

EDILIZIA COSTRUZIONI

Studi di Life Cycle Assessment di filiera
e sviluppo di dataset per la Banca Dati
Italiana LCA del progetto Arcadia





EDILIZIA COSTRUZIONI

Studi di Life Cycle Assessment di filiera e sviluppo di dataset per la Banca Dati Italiana LCA del progetto Arcadia

autori:

Flavio Scrucca, Valentina Fantin, Pier Luigi Porta, Paola Sposato, Antonella Luciano, Francesca Ceruti, Caterina Rinaldi

ENEA, Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento al cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali

Serena Giorgi, Anna Dalla Valle, Monica Lavagna, Andrea Campioli.

Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, LifeCycleTEAM

Federica Carla Carollo, Lucia Rigamonti

Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

Elisabetta Palumbo, Luigi Coppola, Chiara Panozzo, Denny Coffetti, Simone Rapelli

Università degli Studi di Bergamo, Dipartimento di Ingegneria e Scienze Applicate

Marta Maria Sesana

Università degli Studi di Brescia, Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di Matematica

Data di pubblicazione: Marzo 2024



Sommario

Acciaio per costruzioni in carpenteria metallica	pag.1
Calcestruzzo e aggregati da riciclo	pag.12
Cemento	pag.21
Pietre Ornamentali	pag.33
Lastre e sistemi in vetro per infissi e serramenti	pag.41
Telai in PVC per infissi e serramenti e finestre in PVC con vetrocamera a doppio o triplo vetro	pag.51
Catena di gestione dei rifiuti da Costruzione e Demolizione (C&D)	pag.62

Introduzione

Questa monografia è stata realizzata nell'ambito del progetto [Arcadia](#) – Approccio ciclo di vita nei contratti pubblici e banca dati italiana LCA - finanziato dal PON Governance e Capacità Istituzionali 2014-2020, che si prefigge come obiettivo principale la costituzione di una Banca Dati Italiana di Life Cycle Assessment (BDI-LCA). L'LCA è un metodo, standardizzato secondo le norme ISO 14040-44, per calcolare il potenziale impatto ambientale di un prodotto, tenendone in considerazione tutto il ciclo di vita.

Tra i settori rilevanti a livello nazionale è stato considerato quello di edilizia - costruzioni e all'interno di esso sono stati effettuati gli studi LCA su una serie di filiere: *Acciaio per costruzioni in carpenteria metallica, Calcestruzzo e aggregati da riciclo, Cemento, Pietre Ornamentali, Lastre e sistemi in vetro per infissi e serramenti, Telai in PVC per infissi e serramenti e finestre in PVC con vetrocamera a doppio o triplo vetro, processi di gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione.*

Il settore edilizia - costruzioni rappresenta uno dei settori strategici individuati a livello europeo per lo sviluppo dell'economia circolare e di interesse prioritario per il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica nell'ottica di supportare l'applicazione dei [Criteri Ambientali Minimi in Edilizia](#) del Piano Nazionale d'Azione per il [Green Public Procurement](#). Le valutazioni del Ciclo di vita nell'ambito edilizio, e in particolare nella fase di progettazione, si stanno diffondendo sempre più poiché da queste si individuano gli indicatori ambientali alla base dei criteri dei protocolli di valutazione della sostenibilità degli edifici come LEVEL(s), e dei sistemi di rating ambientale quali LEED, BREEAM, ITACA ed Envision per le infrastrutture.

In ambito nazionale un aspetto di grande rilievo è la presenza dell'LCA (abbinato ad uno studio di Life Cycle Costing) come criterio premiante nei CAM Edilizia, che richiede per la sua reale applicazione la messa a punto degli attuali strumenti e metodi per lo sviluppo di una metodologia semplificata e di una banca dati LCA di riferimento per consentire in particolare la comparabilità degli studi proposti, oltre che la definizione di benchmark di edificio e casi studio. Per queste esigenze lo sviluppo di una banca dati nazionale sul settore edilizia costruzioni si ritiene possa dare un importante contributo all'applicazione dell'LCA a scala di edificio richiesta dai CAM. Inoltre, una banca dati nazionale sul settore, consente di rendere disponibili dati per lo sviluppo studi LCA anche a livello di prodotti (da parte di tutti gli attori coinvolti, come imprese, progettisti, PA, ricercatori), e di potere informare e comunicare attraverso le EPD agevolando meccanismi virtuosi, come è accaduto grazie all'introduzione delle EPD come mezzo di prova nei CAM Edilizia. In relazione a quest'ultimo punto si registra una grande espansione nei numeri delle certificazioni EPD dei materiali per edilizia, in particolare dei due sistemi più diffusi: EPD Italy e The International EPD System Environdec. Su queste tematiche è stata attivata nell'ambito del progetto Arcadia, una collaborazione tra ENEA, Green Building Council Italy, l'Università di Bergamo e ICMQ.

Lo scopo della presente monografia è illustrare sinteticamente le principali evidenze degli studi LCA di filiera effettuati nel progetto, fornendo informazioni sul gruppo di lavoro che ha svolto lo studio, i dati utilizzati per lo sviluppo dei dataset presenti in BDI-LCA e i risultati di impatto ambientale in termini di categorie di impatto e processi del ciclo di vita maggiormente rilevanti. Vengono inoltre forniti dettagli sulla costruzione dei dataset come, ad esempio, il campo di applicazione, l'unità funzionale, i confini del sistema, la rappresentatività e la qualità dei dati. Il volume si propone perciò come un documento informativo per coloro che sono interessati ad approfondire l'applicazione dell'LCA al settore e raccoglie le sintesi dei report completi disponibili sia nella sezione dedicata sul sito di [Arcadia](#), che all'interno di ciascun dataset presente nella [BDI-LCA](#).

Il gruppo di lavoro che ha svolto ciascuno studio LCA di filiera è riportato all'interno del capitolo corrispondente della monografia, ed è costituito oltre che dai ricercatori ENEA, da esperti LCA e di settore, imprese ed associazioni di categoria che hanno fornito i dati di produzione.

Tra questi si ringraziano in particolare per il loro contributo:

- Paola Altamura¹, Marilisa Cellurale², Sara Corrado³ - ENEA
- Simona Maura Martelli - *Fondazione Promozione Acciaio – Ente culturale per lo sviluppo delle costruzioni in acciaio*
- *Ecoinnovazione S.r.l.*, per la revisione critica esterna degli studi di filiera e dei dataset.

¹ Dal 2022 è presso "Sapienza" Università di Roma, Dipartimento di Pianificazione Design Tecnologia dell'Architettura

² Ricercatrice all'ENEA fino al 22/1/2024

³ Ricercatrice all'ENEA fino al 31/12/2021



Studio LCA di filiera acciaio per le costruzioni in carpenteria metallica



Autori:

Flavio Scrucca¹, Francesca Ceruti^{1*}, Marta Maria Sesana², Simona Maura Martelli², Caterina Rinaldi¹

¹ ENEA, Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento al cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali

² Università degli Studi di Brescia, Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di Matematica

³ Fondazione Promozione Acciaio – Ente culturale per lo sviluppo delle costruzioni in acciaio

Revisione critica esterna: Ecoinnovazione S.r.l.

* Da settembre 2023 è presso l'Università degli Studi di Brescia, Dipartimento di Economia e Management

Introduzione

L'acciaio è una lega di ferro-carbonio e, grazie alle sue caratteristiche di resistenza, rigidità, durabilità e duttilità, è di gran lunga il metallo più impiegato nel mondo. Con una ridotta presenza di beni sostituti, i volumi di produzione possono essere considerati un indicatore dello stato dell'economia di un Paese. Secondo i dati forniti da EUROFER, nel 2022 l'industria dell'acciaio in Europa occupa oltre 2,5 milioni di persone con un valore aggiunto pari a circa 143 miliardi di euro. Questo porta l'industria ad essere la terza in Europa per valore aggiunto, dietro solo al settore delle bevande e a quello della carta. Con quasi 22 milioni di tonnellate di acciaio l'Italia si classifica seconda per produzione sul territorio europeo ed undicesima a livello mondiale. Di queste, l'85% si compone di acciaio da riciclo, ovvero prodotto dalla rifusione di rottami ferrosi realizzata nei forni elettrici ad arco (EAF – Electric Arc Furnace).

La siderurgia italiana è inoltre la prima in Europa per efficienza energetica con valori di consumo specifico inferiori del 38% rispetto alla media europea, e con una riduzione delle emissioni specifiche dirette di CO₂ di circa il 60% dal 1999 al 2020. Tra i settori in cui questo materiale viene impiegato, quello delle costruzioni e delle infrastrutture risulta essere il primo in Europa, con un consumo mensile di oltre 6 milioni di tonnellate (nel 2022), pari a circa il 37% del totale della produzione di acciaio. Le strutture in acciaio sono divenute, infatti, uno dei principali sistemi di costruzione a livello continentale, divenendo concorrenziali ai sistemi tradizionali. L'uso ottimizzato dei materiali, la leggerezza e il risparmio di tempo nella fase di costruzione evidenziano il potenziale di riduzione degli impatti che questa tecnologia possiede. La possibilità di preassemblare i profili in pannelli e volumi, tipica del sistema costruttivo in carpenteria metallica, consente, infatti, di aumentare la circolarità e la riciclabilità del materiale (Fondazione Promozione Acciaio, 2023).

A livello normativo in Europa, è in corso lo sviluppo e la standardizzazione degli aspetti legati all'edilizia sostenibile della normativa tecnica TC 350, in particolare in riferimento a progetti di standard per la valutazione degli edifici, nonché allo sviluppo di regole di categoria di prodotto (PCR) complementari per le dichiarazioni ambientali di prodotto (EPD), incluse le strutture in acciaio (normativa tecnica TC 135). In ambito delle costruzioni in carpenteria metallica, le EPD stanno conoscendo una rapida diffusione, divenendo strumenti essenziali per lo sviluppo di analisi LCA di edifici e per il confronto di prodotti funzionalmente equivalenti. Queste dichiarazioni, infatti, misurano gli impatti che un determinato prodotto per l'edilizia ha sull'ambiente sulla base di una valutazione ambientale del ciclo di vita, rendendosi fondamentali per il rilascio delle principali certificazioni di sostenibilità degli edifici (ad esempio LEED, BREEAM, Well), oltre ad iniziare ad essere integrate anche a livello normativo in molti stati europei (Sesana, 2023).

Nel 2021 l'Ente Italiano di Normazione ha pubblicato la UNI EN 15804, dal titolo "Sostenibilità delle costruzioni – Dichiarazioni ambientali di prodotto – Regole quadro di sviluppo per categoria di prodotto" la quale fornisce le regole quadro per categoria di prodotto per l'elaborazione di dichiarazioni ambientali di tipo III per ogni tipo di prodotto e servizio per le costruzioni. La norma non definisce procedure di aggregazione dei dati a scala di edificio, né descrive le regole per

l'utilizzo dell'EPD nella valutazione del livello di sostenibilità dell'edificio, ma individua una serie di indicatori di impatto ambientale quantificabili e predefiniti.

Tra i prodotti lunghi in acciaio per le costruzioni in carpenteria metallica più rappresentativi del contesto produttivo italiano, nonché tra i più rilevanti in termini di quantitativi di vendita, vi sono le travi e gli angolari e i profili cavi. Questi profili sono stati identificati dal Gruppo di Lavoro (GdL) tra quelli conformi alla legislazione ed alle normative europee ed italiane vigenti in grado di garantire prestazioni adeguate alla realizzazione di costruzioni in carpenteria metallica. I prodotti individuati sono impiegati per la realizzazione di strutture a telaio mediante elementi lineari verticali (colonne) e orizzontali (travi) e di strutture reticolari (capriate, travi reticolati, tralicci) tipicamente per costruzioni in carpenteria pesante e strutture composte.

Il presente capitolo descrive lo studio LCA di filiera acciaio per le costruzioni in carpenteria metallica, sviluppato in accordo con la metodologia del progetto Arcadia per gli studi di filiera ed in collaborazione con associazioni, esperti ed imprese del settore. Lo studio LCA di filiera è stato sviluppato in accordo alle norme ISO 14040 e 14044 e ha permesso di sviluppare un dataset in formato ILCD nella Banca Dati Italia LCA (<https://www.arcadia.enea.it/la-banca-dati.html>).

Gruppo di Lavoro di Filiera

Il Gruppo di lavoro per lo studio LCA dell'acciaio per le costruzioni in carpenteria metallica ha visto la partecipazione di:

- ENEA (Caterina Rinaldi, Flavio Scrucca e Francesca Ceruti), che ha effettuato lo studio LCA di filiera e ha inoltre svolto attività di formazione “on the job” sulla metodologia LCA alle imprese coinvolte nella raccolta dati;
- Ecoinnovazione s.r.l. che ha svolto la revisione critica dello studio;
- Università degli Studi di Brescia (Marta Maria Sesana) ha supportato le aziende nella raccolta dei dati primari e fornito supporto come esperta del settore delle costruzioni in carpenteria metallica nelle fasi dello studio LCA;
- Fondazione Promozione Acciaio (Simona Maura Martelli), ha fornito supporto per la selezione delle industrie del settore tra i membri della Fondazione per la partecipazione allo studio di filiera;
- Duferco Travi e Profilati S.p.A. (Giuseppe Guerrini) e Arvedi Tubi Acciaio S.p.A. (Carla Cornolò e Matteo Piemonti), che hanno fornito i dati primari.

Duferco Travi e Profilati S.p.A. è un'azienda di riferimento in Italia per la produzione di travi e prodotti lunghi, con una capacità produttiva di 950.000 t l'anno che copre un'ampia gamma qualitativa e dimensionale dei prodotti lunghi ed è in grado di soddisfare le esigenze di diversi settori, tra i quali automotive, edilizia, infrastrutture.

Arvedi Tubi Acciaio S.p.A. è un'azienda attiva fin dal 1970 nella produzione di tubi saldati, con una capacità produttiva di 650.000 t l'anno. L'azienda si pone sul mercato come riferimento nella produzione sostenibile di profili cavi, promuovendo un modello di economia circolare dove i prodotti finiti mantengono il loro valore aggiunto senza l'immissione di nuovi rifiuti.

Obiettivo e campo di applicazione dello studio

I principali obiettivi dello studio LCA della filiera acciaio sono presentati brevemente di seguito.

- La realizzazione di datasets relativi a prodotti per le costruzioni in carpenteria metallica, per l'inserimento nella Banda Dati Italiana LCA di Arcadia, con l'obiettivo di consentire ad altri utenti (pubblica amministrazione, imprese, associazioni di categoria, progettisti, ONG e università / ricerca) di utilizzarli in ambito di studi LCA e di valutazioni di sostenibilità. Tali datasets sono accompagnati dal relativo report tecnico dello studio LCA di filiera, disponibile sul sito di Arcadia (<https://www.arcadia.enea.it/settori-di-intervento/edilizia/acciaio-per-costruzioni-in-carpenteria-metallica.html>).
- La sensibilizzazione e promozione di un approccio circolare al mondo delle costruzioni in Italia, con particolare attenzione alla filiera dei materiali, per favorire il "Life Cycle Thinking" dell'ambiente costruito in linea con gli obiettivi di decarbonizzazione.
- La formazione "on the job" ai tecnici/referenti delle aziende coinvolte, in linea con le finalità del progetto, riguardante la metodologia LCA e le modalità operative per effettuare la raccolta dei dati lungo la filiera.

Il campo di applicazione dello studio si è concentrato su due tipologie principali di prodotti lunghi in acciaio, rappresentativi del contesto produttivo nazionale:

- travi e angolari realizzati con acciai non legati per impieghi strutturali;
- profili cavi (a sezione quadrata e rettangolare) per impieghi strutturali.

L'unità funzionale utilizzata è 1 kg di prodotto, per entrambe le tipologie di prodotti, con le caratteristiche tecniche conformi alla UNI EN 10025 per travi ed angolari e alla UNI EN 10219 e 10210 per i profili cavi. In accordo alle PCR di riferimento per i prodotti da costruzione, e come indicato nella EN 15804, i confini del sistema considerati per l'analisi LCA sono "dalla culla al cancello", includendo i Moduli A1-A3 della fase produttiva. Sono escluse, invece, le operazioni di trasporto verso il sito di utilizzo dei prodotti finiti, essendo il calcolo della distanza media rappresentativa non di facile realizzazione.

Per travi e angolari, in particolare, sono inclusi nei confini del sistema (**Error! Reference source not found.**): l'estrazione delle materie prime tra cui rottame e ferroleghie (esterne all'azienda) e il loro trasporto all'acciaieria; la produzione delle billette per travi e angolari e il loro trasporto in laminatoio; la fase di laminazione per la produzione del prodotto finito; i consumi di materiali, energia, acqua, le emissioni e la produzione di rifiuti in ogni fase di produzione.

Per i profili cavi, invece, sono inclusi nei confini del sistema (Figura 2): la produzione di coils in acciaio al carbonio e il loro trasporto in acciaieria; la fase di taglio dei nastri a misura e la loro formatura/saldatura; il processo di trattamento termico dei prodotti per la realizzazione dei tubi HFS; i consumi di materiali, energia, acqua, le emissioni e la produzione di rifiuti in ogni fase di produzione. È esclusa dai confini del sistema la produzione di macchinari ed infrastrutture (e i relativi rifiuti di manutenzione), con l'eccezione di quelli già contenuti nei dataset di Ecoinvent 3.7.1 (Wernet et al., 2016) utilizzati per modellare i dati di background.

Per la fase di valutazione degli impatti è stato applicato il metodo di valutazione EF 3.0 (Zampori e Pant, 2019). Per i dati di background si è utilizzata la banca dati Ecoinvent 3.7.1.

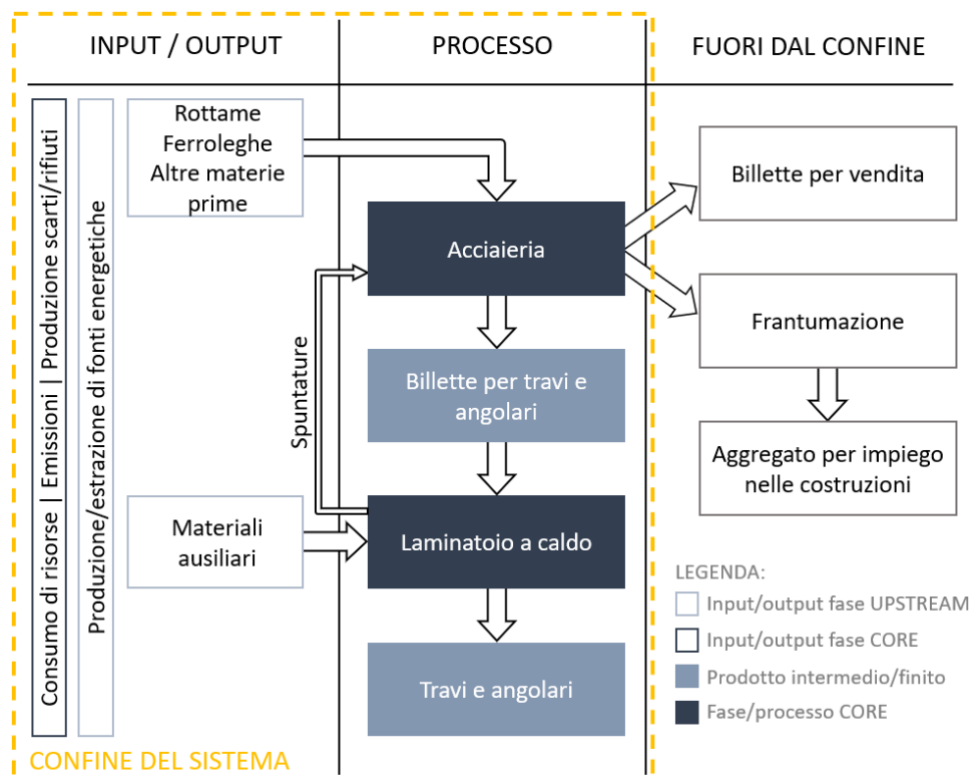


Figura 1. Confini del sistema del processo di produzione delle travi e angolari.

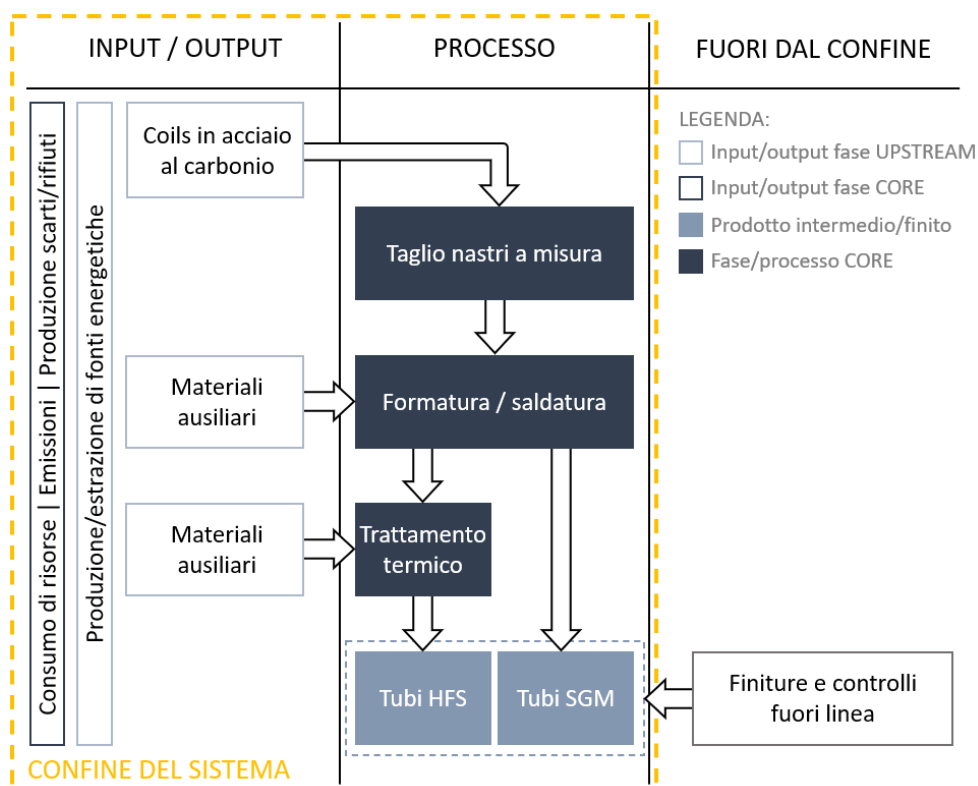


Figura 2. Confini del sistema del processo di produzione dei profili cavi.

Analisi di Inventario

Secondo quanto previsto dalla metodologia del progetto Arcadia, per la valutazione di travi ed angolari il Gruppo di Lavoro (GdL) ha raccolto i dati in maniera tale da essere indicativi di un prodotto medio rappresentativo dei diversi profili con cui vengono realizzati i prodotti finiti (HE, IPE, IPN, ...) e delle differenti caratteristiche dimensionali. Analogamente, per profili cavi si è proceduto alla definizione di un prodotto tipo calcolando la media pesata delle quantità delle diverse tipologie di profili cavi (SGM e HFS) realizzate.

La fase di produzione di ogni singolo prodotto analizzato è stata modellata utilizzando dati primari provenienti dalle aziende coinvolte nello studio. Laddove non è stato possibile operare a tale livello di dettaglio, a causa di una carenza di informazioni in termini di produzione complessiva della singola linea o fase del processo produttivo, si è ricorso a procedure di allocazione su base massa.

Le emissioni dirette (in aria e acqua) associate alla produzione dei prodotti considerati sono state calcolate considerando i risultati degli autocontrolli periodici effettuati dalle aziende e resi disponibili in forma di flussi in massa di ciascun output monitorato, oltre che desunte dalle dichiarazioni ETS prodotte dalle aziende stesse.

Per quanto riguarda i consumi di energia elettrica per le varie fasi della lavorazione, si è considerato esclusivamente l'approvvigionamento di energia elettrica dalla rete nazionale, seguendo un approccio denominato "conservativo", senza quindi considerare eventuale energia autoprodotta in loco da impianti a fonti rinnovabili.

Per la definizione degli scenari di smaltimento dei rifiuti è stato utilizzato l'approccio generale definito dall'International EPD System, secondo cui il produttore dei rifiuti è ritenuto responsabile degli impatti ambientali fino a quando essi cessano di essere qualificati come tali, attribuendo ai materiali destinati al riciclo i processi di raccolta, trasporto e selezione, escludendo i successivi trattamenti per la produzione di materiale riciclato e i benefici ambientali derivanti dal suo utilizzo.

Per i trasporti dei componenti e dei materiali si sono utilizzate quantità fisiche (peso trasportato) e distanze medie ritenute rappresentative delle diverse operazioni della filiera.

Valutazione degli impatti ed interpretazione dei risultati

La Tabella 4 e la Tabella 2 riportano i valori di caratterizzazione per il ciclo di vita della produzione di 1 kg delle due tipologie di prodotti studiati, indicando inoltre il contributo derivante alla fase UPSTREAM e da quella CORE di produzione.

Da tali risultati emerge come nella produzione dei profili cavi la fase UPSTREAM risulta quella preponderante in tutte le categorie di impatto, mentre nella produzione di travi e angolari si ha un maggiore equilibrio tra le due fasi del ciclo di vita (UPSTREAM e CORE).

Analizzando inoltre i risultati di normalizzazione (Figura 11), si nota come le categorie di impatto più rilevanti per le travi e gli angolari siano: Ecotossicità, acqua dolce (16% sul totale dei risultati di normalizzazione), Particolato e Uso delle risorse fossili (15%), Eutrofizzazione, acqua dolce (11%), Cambiamento climatico e Tossicità umana, cancro (9%). Mentre le categorie più rilevanti per i profili cavi risultano: Tossicità umana, cancro (30%), Ecotossicità, acqua dolce (19%),

Eutrofizzazione, acqua dolce (12%), Uso delle risorse fossili (6%), Cambiamento climatico e Particolato (5%).

Categoria d'impatto	Unità	Totale	UPSTREAM	CORE
Cambiamento climatico	kg CO2 eq	9,33E-01	42%	58%
Impoverimento dello strato di ozono	kg CFC11 eq	1,24E-07	40%	60%
Radiazioni ionizzanti	kBq U-235 eq	9,30E-02	50%	50%
Formazione fotochimica dell'ozono	kg NMVOC eq	3,03E-03	44%	56%
Particolato	disease inc.	1,18E-07	85%	15%
Tossicità umana, non cancro	CTUh	8,42E-09	64%	36%
Tossicità umana, cancro	CTUh	1,90E-09	97%	3%
Acidificazione	mol H+ eq	3,64E-03	39%	61%
Eutrofizzazione, acqua dolce	kg P eq	2,28E-04	70%	30%
Eutrofizzazione marina	kg N eq	8,76E-04	33%	67%
Eutrofizzazione terrestre	mol N eq	9,25E-03	30%	70%
Ecotossicità, acqua dolce	CTUe	8,66E+00	69%	31%
Uso del suolo	Pt	1,27E+00	58%	42%
Uso dell'acqua	m3 depriv.	2,75E-01	29%	71%
Uso delle risorse fossili	MJ	1,31E+01	50%	50%
Uso delle risorse minerali e dei metalli	kg Sb eq	2,33E-07	96%	4%

Tabella 1. Risultati di caratterizzazione relativi alla produzione di 1 kg di travi e angolari in acciaio: impatto totale, UPSTREAM e CORE.

Categoria d'impatto	Unità	Totale	UPSTREAM	CORE
Cambiamento climatico	kg CO2 eq	1,60E+00	97%	3%
Impoverimento dello strato di ozono	kg CFC11 eq	7,78E-08	91%	9%
Radiazioni ionizzanti	kBq U-235 eq	1,26E-01	96%	4%
Formazione fotochimica dell'ozono	kg NMVOC eq	6,77E-03	93%	7%
Particolato	disease inc.	1,12E-07	99%	1%
Tossicità umana, non cancro	CTUh	3,50E-08	99%	1%
Tossicità umana, cancro	CTUh	2,05E-08	100%	0%
Acidificazione	mol H+ eq	7,02E-03	91%	9%
Eutrofizzazione, acqua dolce	kg P eq	7,78E-04	99%	1%
Eutrofizzazione marina	kg N eq	1,58E-03	90%	10%
Eutrofizzazione terrestre	mol N eq	1,61E-02	89%	11%
Ecotossicità, acqua dolce	CTUe	3,36E+01	99%	1%
Uso del suolo	Pt	4,29E+00	99%	1%
Uso dell'acqua	m3 depriv.	3,64E-01	97%	3%
Uso delle risorse fossili	MJ	1,72E+01	96%	4%
Uso delle risorse minerali e dei metalli	kg Sb eq	1,71E-05	100%	0%

Tabella 2. Risultati di caratterizzazione relativi alla produzione di 1 kg di profili cavi in acciaio: impatto totale, UPSTREAM e CORE.

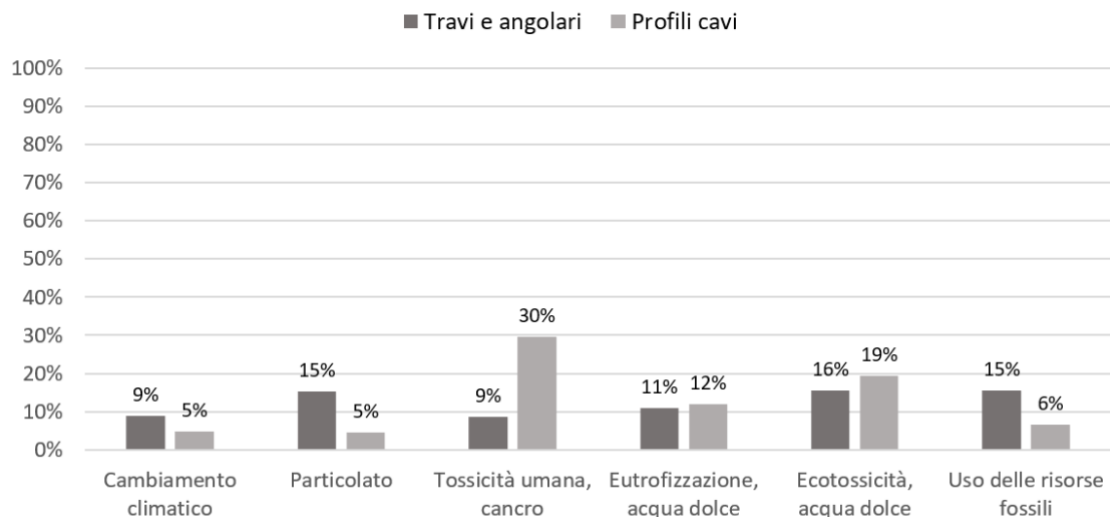


Figura 3. Risultati della normalizzazione per le categorie di impatto più rilevanti per la produzione di travi e angolari e di profili cavi

Analizzando più nel dettaglio i contributi percentuali dei diversi processi che costituiscono il ciclo di vita della produzione di travi e angolari (Figura 4) per alcune categorie di impatto più rilevanti, si evince che le ferroleghie forniscono il contributo più significativo nelle categorie Particolato (74% del totale degli impatti) e Tossicità umana, cancro (51%), mentre nella categoria Ecotossicità, acqua dolce, la ghisa ha la percentuale più alta di impatto (37%).

L'energia elettrica, infine, risulta essere la fonte più rilevante degli impatti nella categoria Uso delle risorse fossili (34%).

Nella produzione dei profili cavi (Figura 5) invece, gli impatti maggiori sono dovuti alla produzione dell'acciaio. In particolare, la produzione da altoforno raggiunge percentuali dell'88%, 79% e 76% rispettivamente nelle categorie Particolato, Ecotossicità, acqua dolce e Uso delle risorse fossili.

Nella categoria Tossicità umana, cancro, invece, il contributo maggiore arriva dalla produzione di acciaio da forno elettrico, con una percentuale pari al 60%.

Le altre fonti di impatto (energia elettrica, trasporti e materiali ausiliari) contribuiscono in modo non significativo alle categorie di impatto analizzate.

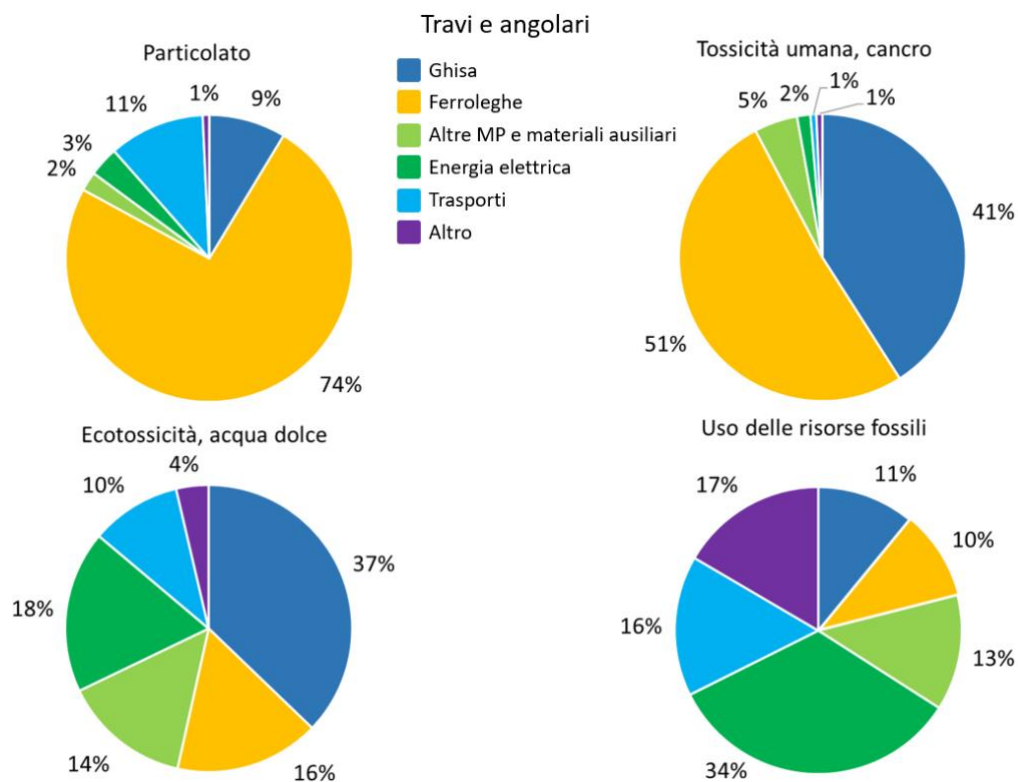


Figura 4. Contributi percentuali dei processi relativi alla produzione di travi e angolari per quattro delle principali categorie di impatto

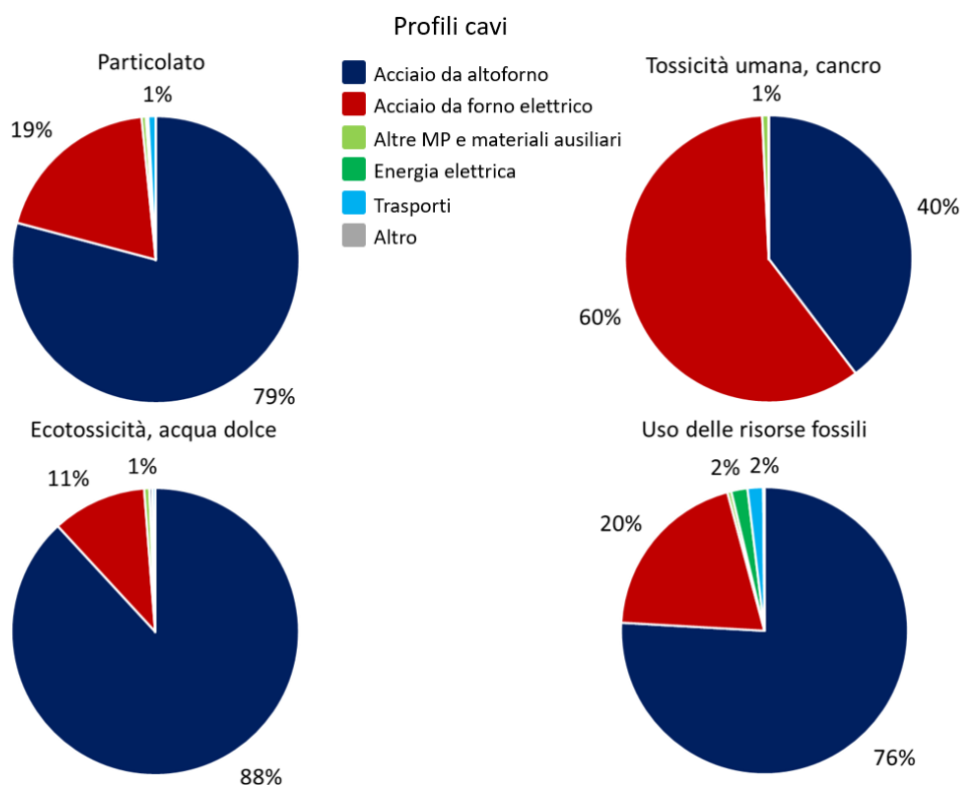


Figura 5. Contributi percentuali dei processi relativi alla produzione di profili cavi per quattro delle principali categorie di impatto

Conclusioni

I risultati dello studio LCA, ottenuti tramite il metodo di valutazione degli impatti EF 3.0, che costituisce il metodo di valutazione dell'iniziativa della Commissione Europea sull'impronta ambientale e consente di ottenere un profilo di impatto completo a livello prodotto, indicano che: le categorie di impatto più rilevanti per travi e angolari sono Particolato, Eco tossicità acqua dolce e Uso delle Risorse Fossili, seguite con valori di impatto leggermente inferiori dalle categorie Eutrofizzazione acqua dolci, Cambiamenti Climatici e Tossicità umana, cancro, mentre per profili cavi la categoria in assoluto più significativa in termini di impatto è Tossicità umana, cancro, seguita dalle categorie Eco tossicità acqua dolce e Eutrofizzazione acqua dolce.

Focalizzandosi solo sulla fase UPSTREAM emerge inoltre che tale fase del ciclo di vita risulta essere la più significativa in termini di impatti sia per tutte le categorie rilevanti nel caso di profili cavi, che per molte categorie d'impatto per travi e angolari.

La categoria Cambiamento climatico, ovvero l'impatto complessivo in termini di contributo al cambiamento climatico di un determinato prodotto o processo (espresso in CO₂ equivalente), registra un valore pari a 0,93 kgCO₂eq/kg per le travi e angolari, e di 1,60 kgCO₂eq/kg per i profili cavi. Tali valori sono in linea con i risultati delle EPD ottenute dalle due aziende coinvolte nello studio, con il valore indicativo di 1,58 kgCO₂eq/kg fornito da World Steel Association (rappresentante i produttori, le associazioni e gli istituti di ricerca del settore dell'acciaio) per i profili cavi in acciaio ma anche con alcuni tra i più recenti studi presenti in letteratura (Backes et al., 2021; Suer et al., 2022), i quali forniscono valori nel range di 0,74 e 2,3 kgCO₂eq/kg per la realizzazione di prodotti in acciaio in diverse forme e modalità.

In conclusione, dall'analisi critica dei risultati di questo studio è possibile affermare che i valori ottenuti riflettono ragionevolmente le prestazioni ambientali del ciclo di vita di travi e angolari e di profili cavi prodotti all'interno della filiera italiana dell'acciaio per costruzioni in carpenteria metallica. Inoltre, ne discende che l'adozione di un approccio sostenibile nell'approvvigionamento delle materie prime e delle risorse energetiche è cruciale per lo sviluppo di prodotti finiti con impatto ambientale minimo, con l'obiettivo di migliorare i processi produttivi e la sostenibilità ambientale nel settore delle costruzioni in acciaio.

I datasets creati con questo studio di filiera sono stati implementati e resi disponibili nella Banca Dati Italiana LCA del progetto Arcadia (<https://bancadatiitalianalca.enea.it/Node>) e potranno essere utilizzati come fonte di dati rappresentativi del contesto italiano per sviluppare studi di LCA, anche a supporto di una progettazione sostenibile, per edifici in carpenteria metallica.

Bibliografia

- Arvedi Tubi Acciaio Spa. Environmental product declaration for steel structural circular, square and rectangular hollow sections. https://www.arvedi.it/fileadmin/user_upload/ata/schede/2023/EPD_rev2a.pdf
- Backes, J.; Suer, J.; Pauliks, N.; Neugebauer, S.; Traverso, M. Life Cycle Assessment of an Integrated Steel Mill Using Primary Manufacturing Data: Actual Environmental Profile. Sustainability 2021, 13, 3443; doi: 10.3390/su13063443

- Duferco travi e profilati Spa. Environmental product declaration for steel beams and angles.
<https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/6da0da67-2fd8-4d03-4705-08db1f315c5e/Data>
- Fondazione Promozione Acciaio. La sostenibilità delle costruzioni in acciaio, 2023. Disponibile online: https://www.promozioneacciaio.it/wp-content/uploads/2022/02/acciaio_prosp_infinite.pdf
- ILCD, 2010. International Life Cycle Data system – Specific guide for Life Cycle Inventory (LCI) data sets. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-Specific-guide-for-LCI-12March2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf>
- Sesana M. M., Net-zero and lightweight steel technologies for the construction sector: Overview and case studies in Italy, Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems – Biondini & Frangopol (Eds) © 2023 The Author(s), ISBN 978-1-003-32302-0
- Suer J., Traverso M., Jäger N. Review of Life Cycle Assessments for Steel and Environmental Analysis of Future Steel Production Scenarios. Sustainability 2022, 14, 14131; doi:10.3390/su142114131.
- The European Steel Association (EuroFER). European steel in figures, 2023. Disponibile online: https://www.eurofer.eu/assets/publications/brochures-booklets-and-factsheets/european-steel-in-figures-2023/FINAL_EUROFER_Steel-in-Figures_2023.pdf
- UNI EN 10219-1:2006. Profilati cavi saldati formati a freddo per impieghi strutturali di acciai non legati e a grano fine - Parte 1: Condizioni tecniche di fornitura
- UNI EN 10210-1:2006. Profilati cavi finiti a caldo di acciai non legati e a grano fine per impieghi strutturali - Parte 1: Condizioni tecniche di fornitura
- UNI EN ISO 14044:2018. Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida.
- UNI EN 10025-2:2019. Prodotti laminati a caldo di acciai per impieghi strutturali - Parte 2: Condizioni tecniche di fornitura di acciai non legati per impieghi strutturali
- UNI EN ISO 14040:2021. Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento.
- UNI EN 15804:2021. Sostenibilità delle costruzioni - Dichiarazioni ambientali di prodotto - Regole quadro di sviluppo per categoria di prodotto
- Wernet B., Bauer G., Steubing C., Reinhard B., Moreno-Ruiz J., and Weidema E., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. Int J Life Cycle Assess 21, 1218–1230 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>
- World Steel Association. Life cycle inventory (LCI) study - 2020 data release. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Life-cycle-inventory-LCI-study-2020-data-release.pdf>
- Zampori e Pant, LU, 2019. Zampori, L. and Pant, R., Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method, EUR 29682 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-00654-1, doi:10.2760/424613, JRC115959.



Studio LCA della filiera del calcestruzzo e degli aggregati riciclati



Autori*:

Luigi Coppola¹, Elisabetta Palumbo¹, Denny Coffetti¹, Chiara Panozzo¹, Simone Rapelli¹, Caterina Rinaldi²

¹ Dipartimento di Ingegneria e Scienze Applicate (DISA), Università degli Studi di Bergamo

² ENEA, Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento al cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali

Revisione critica dello studio: Ecoinnovazione S.r.l.

*Author contribution statement: Sebbene il testo sia frutto della collaborazione degli autori, si segnala che i paragrafi 1 e 3 sono da attribuire a D.C., S.R. e L.C., i paragrafi 4 e 5 e le restanti parti a E.P.

Introduzione

Il calcestruzzo, con una produzione annua mondiale che si assesta attorno ai 9-13 miliardi di metri cubi, è il materiale da costruzione più utilizzato al mondo e nasce dalla miscelazione di materie prime (cemento, acqua, aggregati naturali e da riciclo ed additivi) che hanno un impatto significativo sull'ambiente (Coffetti et al., 2022; Sivakrishna et al. 2020) sia in termini di emissione di CO₂, stimate in circa il 9% delle emissioni di anidride carbonica di origine antropomorfa (Monteiro et al. 2017; Miller et al., 2017), che di consumi energetici e di materie prime naturali. In Italia, il settore del calcestruzzo preconfezionato, coinvolgendo oltre 11500 addetti distribuiti in circa 850 imprese produttrici e muovendo un volume d'affari che, secondo dati ISTAT e ATECAP del 2021, si aggira intorno ai 2.9 miliardi di euro, rappresenta sicuramente una delle principali filiere dell'edilizia nazionale in termini economici e di occupazione. Infatti, la produzione italiana di calcestruzzo nel 2021 si è attestata su un valore pari a circa 35.8 milioni di metri cubi con una discreta variabilità sia in termini di classe di esposizione ambientale che di classe di resistenza a compressione del conglomerato cementizio (Federbeton 2021, 2022, *a*). In particolare, più della metà del calcestruzzo prodotto negli impianti di betonaggio italiani è di classe di esposizione XC1-XC2 e destinato, quindi, alla realizzazione di elementi strutturali in ambienti interni asciutti (XC1) o perennemente a contatto con acqua oppure completamente interrati (XC2). Una ulteriore importante aliquota (il 15,1%) è rappresentata dal calcestruzzo in classe di esposizione XC3-XC4, destinato, quindi, alla realizzazione di strutture esterne protette dalla pioggia (XC3) o strutture esterne esposte alla pioggia e/o che alternano periodi di asciutto e di bagnato (XC4). Il 9,1% del calcestruzzo prodotto, inoltre, fa riferimento a conglomerati destinati ad elementi strutturali in contatto con cloruri (3,8%) derivanti sia dalle operazioni di spargimento di sale antigelo (XD) che di origine marina (XS), conglomerati cementizi destinati alla realizzazione di manufatti a contatto con acque o terreni chimicamente aggressivi (XA, 3,7%) e calcestruzzi per manufatti che operano in ambienti a clima rigido, sottoposti a cicli di gelo e disgelo (XF, 1,6%). Il restante 19,1% del calcestruzzo prodotto non ha indicazioni in merito alla classe di esposizione o appartiene alla classe X0 (strutture non armate con rischio di degrado nullo).

Per quanto concerne la suddivisione del calcestruzzo in base alla classe di resistenza caratteristica a compressione, il rapporto di Federbeton (Federbeton 2021, 2022, *a*). mostra che circa tre quarti del conglomerato cementizio prodotto (73,4%) è compreso tra le classi di resistenza C25/30 e C30/37; soltanto il 6% della produzione raggiunge o supera la classe C35/45, mentre il 16,8% mostra una resistenza che non supera la classe C20/25 e, infine, un'aliquota pari al 2,9% è quella del calcestruzzo per il quale non viene dichiarata alcuna classe di resistenza.

Per limitare l'impatto ambientale del calcestruzzo, anche in Italia negli ultimi anni è stata introdotta la possibilità di sostituire parzialmente gli aggregati naturali con quelli riciclati provenienti da processi industriali o dalla demolizione di fabbricati in calcestruzzo armato, favorendo l'utilizzo di materiale di scarto altrimenti destinato a discarica. Tuttavia, i dati indicati nel rapporto "L'Italia del riciclo 2021" mostrano che, nonostante in Italia il tasso di recupero dei rifiuti C&D sia stabilmente sopra il limite di legge del 75%, solamente il 7,2% di questi viene impiegata nella produzione del calcestruzzo (6,8% per uso non strutturale e 0,4% per calcestruzzi strutturali (Unicircular, 2021). Questi dati sono peraltro in accordo con quanto riportato nel

Rapporto di sostenibilità di Federbeton che nel 2021 stimava un tasso di sostituzione dell'aggregato naturale con quello industriale o da riciclo dello 0,39%.

Il presente capitolo sintetizza lo studio LCA della filiera del calcestruzzo e degli aggregati da demolizione e da riciclo sviluppato in accordo con la metodologia del progetto Arcadia per gli studi di filiera ed in collaborazione con associazioni ed esperti del settore (Coppola et al., 2023). Tale studio è stato sviluppato in linea con gli standard ISO 14040 e 14044 e ha permesso di sviluppare un dataset in formato ILCD (ILCD, 2023) nella Banca Dati Italia LCA (<https://www.arcadia.enea.it/la-banca-dati.html>).

Gruppo di Lavoro di Filiera

Il Gruppo di lavoro per lo studio LCA di filiera del calcestruzzo e degli aggregati riciclati è composto da:

- ENEA (C. Rinaldi & M. Cellurale), che fornito le indicazioni sulla Metodologia del progetto Arcadia per gli studi di filiera e lo sviluppo dei dataset per la BDI-LCA;
- Dipartimento di Ingegneria e Scienze Applicate dell'Università degli Studi di Bergamo (L. Coppola, E. Palumbo, D. Coffetti, C. Panozzo e S. Rapelli) che ha effettuato l'intero studio LCA di filiera, dall'analisi della filiera italiana alla raccolta ed elaborazione dei dati primari, sviluppo dei dataset, LCIA e interpretazione dei risultati;
- Ecoinnovazione S.r.l. che ha effettuato la revisione critica esterna.

Obiettivi e campo di applicazione dello studio

Al fine di rappresentare al meglio il mercato nazionale, il presente studio ha previsto complessivamente lo sviluppo di 32 dataset necessari a coprire più del 96% della produzione italiana di calcestruzzo preconfezionato a prestazione garantita. In particolare, in base alla classe di resistenza caratteristica a compressione, alla classe di consistenza al getto ed alla classe d'esposizione ambientale entro cui ricadono gli elementi cui sono destinati, i 32 dataset sono stati classificati in 8 gruppi, all'interno dei quali le miscele sono state ulteriormente specializzate in relazione alla tipologia di aggregato utilizzato:

- T: aggregato tondeggianti naturali di origine alluvionale;
- F aggregati naturali ottenuti per frantumazione di rocce;
- F-C: aggregato misto costituito in parte da aggregato naturale di frantumazione e in parte (15% in massa) da aggregato di riciclo da demolizione di strutture in calcestruzzo;
- F-I aggregato misto costituito in parte da aggregato naturale di frantumazione e in parte (15% in massa) da aggregato di riciclo proveniente da altri processi industriali.

La funzione del sistema è la produzione di calcestruzzo preconfezionato a prestazione garantita, prodotto con materie prime conformi alle normative vigenti, per strutture semplicemente armate civili e industriali, la cui composizione e le relative proprietà garantiscono una durabilità del materiale sufficientemente elevata da poter resistere alle aggressioni ambientali per i ferri di armatura o per il calcestruzzo nel rispetto delle norme UNI 11104:2016, UNI EN 1992-1-1:2015

e UNI EN 206:2021. L'unità funzionale è 1 m³ di calcestruzzo e i confini del sistema, del tipo “dalla culla al cancello” come indicato in Figura 6, includono:

- le fasi di estrazione e produzione delle materie prime sia di tipo naturale (aggregati naturali come sabbia e ghiaia) che artificiale (cemento, additivi, aggregati da riciclo/demolizione);
- il trasporto verso la manifattura e le lavorazioni nella centrale di betonaggio;
- la trasformazione nella centrale ove in primis avviene lo stoccaggio delle materie prime, la successiva dosatura ed, infine, la miscelazione. Il materiale che si ottiene al termine di questo processo è il calcestruzzo preconfezionato.

Nello studio sono state escluse le fasi relative al lavaggio dei camion betoniera e agli spostamenti del personale della centrale di betonaggio.

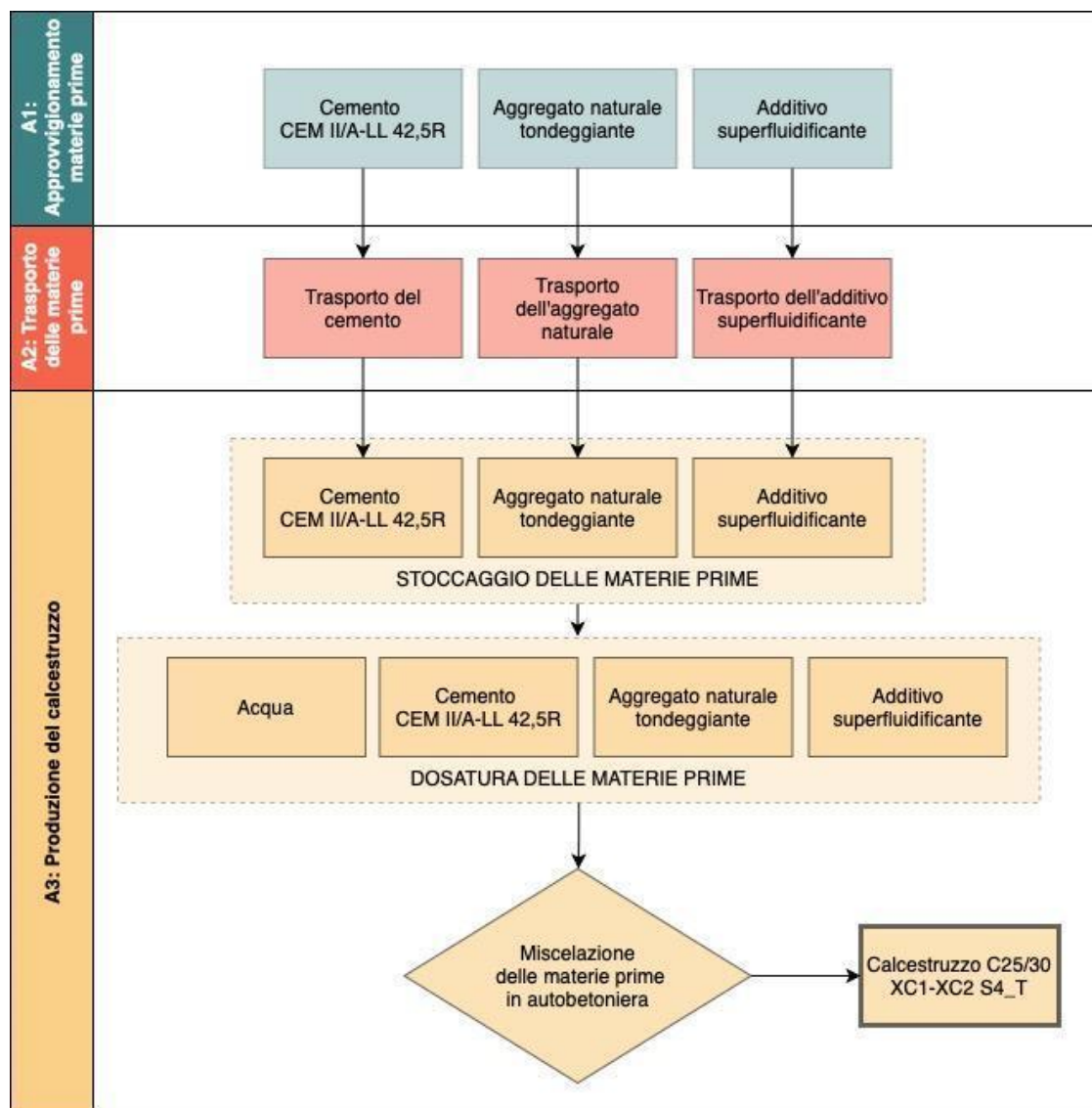


Figura 6. Diagramma dei confini del sistema

Analisi di Inventario

La raccolta dei dati di inventario è stata condotta partendo dai dati primari raccolti da Federbeton sia sotto forma di report di filiera (Federbeton 2021, 2022, *a e b*) che di EPD di settore. Sulla base di questi ultimi e delle consolidate e ampie conoscenze del gruppo di ricerca, è stata definita la Life Cycle Inventory (LCI) per la produzione di 1 m³ di calcestruzzo prodotto in Italia, considerando 8 differenti composizioni e le relative miscele (n.32) rappresentative (oltre il 96% della produzione italiana) del mercato nazionale al momento dello studio. Tra queste, circa il 73% (Federbeton 2021, *b*) è rappresentato dalla produzione di calcestruzzo nelle classi di resistenza a compressione comprese tra C25/30 e C30/37. Pertanto, il presente capitolo si concentrerà sull'analisi di un calcestruzzo C25/30, con classe di consistenza S4, costituito da cemento Portland al calcare CEM II/A-LL 42,5R, aggregati tondeggianti (T) naturali, acqua e additivo superfluidificante (Figura 7), impiegato per la realizzazione di elementi interni o interrati (classe di esposizione XC1-XC2). In particolare, la modellazione del calcestruzzo C25/30 XC1-XC2 S4_T è stata sviluppata a partire dai seguenti riferimenti:

- i quantitativi e la classificazione delle materie prime che compongono la miscela di calcestruzzo si riferiscono ai valori medi assunti nelle EPD di calcestruzzi italiani analizzate;
- la specifica tipologia di cemento, così come le altre 5 introdotte nella ricerca, sono state modellate partendo dal cemento medio sviluppato dallo studio parallelo del gruppo di ricerca ENEA sempre nell'ambito del progetto ARCADIA e successivamente confrontate con quanto emerso dai dati dall'analisi delle oltre 100 EPD di cemento italiane;
- le distanze di approvvigionamento per gli aggregati, additivi e cementi sono state mutate dai valori medi dell'anno 2021 dichiarati dal Rapporto di Sostenibilità Federbeton 2021 (Federbeton 2021, *a*). Nello specifico, il trasporto degli aggregati è mediamente di 37 km, degli additivi di 178 km e di 98 km del cemento;
- i trasporti all'utilizzatore finale o al sito di costruzione sono esclusi dall'indagine.

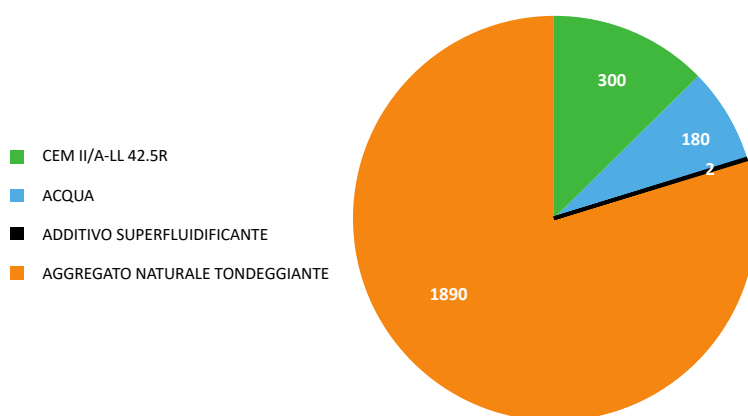


Figura 7. Composizione del calcestruzzo. Il dosaggio dei costituenti è espresso in kg/m³

Valutazione degli impatti e interpretazione dei risultati

In accordo con la norma ISO 14040, lo studio ha esaminato le 16 categorie di impatto mostrate in Tabella 1, che nel presente capitolo sono presentate come valori sia caratterizzati che normalizzati, attraverso il metodo di valutazione EF 3.0.

In particolare, la Tabella 3 mostra i risultati di caratterizzazione per il ciclo di vita della produzione di 1 m³ di calcestruzzo, indicando inoltre il contributo derivante dalle singole tre fasi analizzate (A1-A2 e A3) e dalle sottocategorie che lo compongono.

Impact category	Unit	A1 – M. PRIME			A2 - TRASPORTI			A3
		Fase di produzione cemento	Fase di produzione e aggregato	Fase di produzione additivo	Trasporto cemento	Trasporto aggregato	Trasporto additivo	Fase di produzione e del calcestruzzo
Cambiamento climatico	kg CO2 eq	2,28E+02	4,01E+00	2,02E+00	3,38E+00	1,10E+01	2,91E-02	3,29E+00
Impoverimento dello strato di ozono	kg CFC11 eq	1,57E-05	6,78E-07	3,18E-07	8,06E-07	2,62E-06	6,94E-09	6,27E-07
Radiazioni ionizzanti	kBq U-235 eq	6,00E+00	1,26E+00	1,89E-01	2,66E-01	8,65E-01	2,29E-03	3,03E-01
Formazione fotochimica dell'ozono	kg NMVOC eq	3,71E-01	4,14E-02	5,16E-03	1,51E-02	4,92E-02	1,30E-04	3,28E-02
Particolato	disease inc.	2,61E-06	8,93E-07	6,82E-08	3,97E-07	1,29E-06	3,42E-09	7,55E-07
Tossicità umana, non cancro	CTUh	1,53E-06	7,00E-08	2,72E-08	4,50E-08	1,46E-07	3,87E-10	2,07E-08
Tossicità umana, cancro	CTUh	2,22E-08	5,45E-09	1,67E-09	1,14E-09	3,70E-09	9,79E-12	1,10E-09
Acidificazione	mol H+ eq	2,23E-01	3,69E-02	7,98E-03	1,41E-02	4,58E-02	1,21E-04	2,78E-02
Eutrofizzazione, acqua dolce	kg P eq	4,88E-03	6,64E-04	4,97E-04	2,10E-04	6,83E-04	1,81E-06	3,20E-04
Eutrofizzazione marina	kg N eq	1,32E-01	1,35E-02	1,38E-03	4,30E-03	1,40E-02	3,70E-05	1,09E-02
Eutrofizzazione terrestre	mol N eq	8,53E-01	1,56E-01	1,44E-02	4,70E-02	1,53E-01	4,05E-04	1,19E-01
Ecotossicità, acqua dolce	CTUe	1,43E+03	7,05E+01	2,87E+01	4,11E+01	1,34E+02	3,54E-01	2,93E+01
Uso del suolo	Pt	1,77E+02	1,24E+02	5,63E+00	6,02E+01	1,96E+02	5,19E-01	9,23E+00
Uso dell'acqua	m3 depriv.	1,39E+01	4,04E+00	1,03E+00	1,81E-01	5,89E-01	1,56E-03	2,72E+00
Uso delle risorse fossili	MJ	1,06E+03	6,60E+01	4,12E+01	5,26E+01	1,71E+02	4,53E-01	4,74E+01
Uso delle risorse minerali e dei metalli	kg Sb eq	1,35E-04	6,25E-05	3,59E-05	7,74E-06	2,52E-05	6,67E-08	3,93E-06

Tabella 3. Valori di impatto caratterizzati riguardanti la produzione di 1m³ di calcestruzzo C25/30 XC1-XC2-S4_T: impatto in approvvigionamento delle materie prime (A1), trasporto nell'impianto produttivo (A2) e produzione (A3)

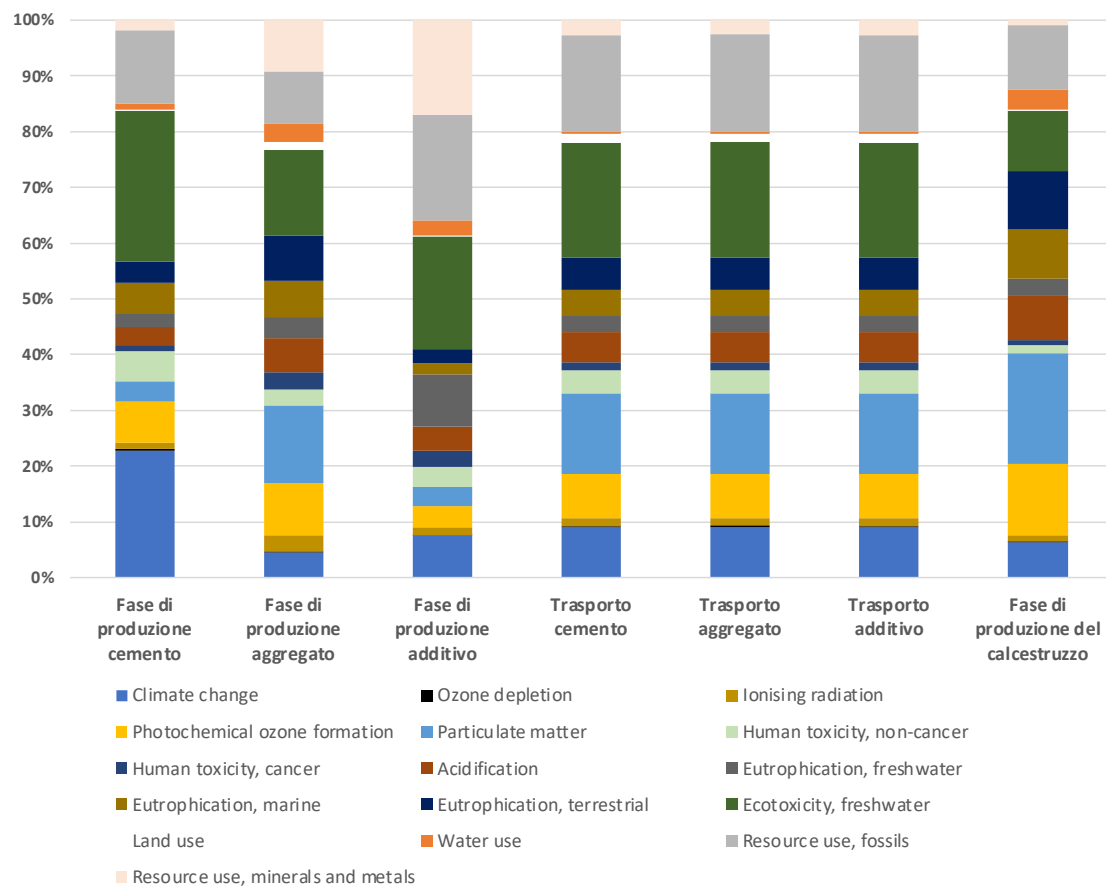


Figura 8. Risultati della normalizzazione per le categorie di impatto più rilevanti per la produzione di 1m³ di calcestruzzo C25/30 XC1-XC2-S4_T nelle tre fasi del ciclo di vita (A1-A3)

Quindi è stata effettuata l'interpretazione dei risultati normalizzati (Figura 8), che mostra che oltre l'81% dell'impatto totale è determinato, rispettivamente, dalle seguenti 7 categorie (% sul totale dei risultati di normalizzazione): eco-tossicità, acqua dolce (24,8 %), cambiamento climatico (19,0%), uso delle risorse fossili (13,6%), formazione fotochimica dell'ozono (7,8%), particolato (6,2%), eutrofizzazione, marina (5,5%) ed infine tossicità umana (4,9%).

La normalizzazione mostra inoltre che la fase di produzione del cemento è dominante (75%) sul totale dell'impatto, seguita, in misura contenuta, dal trasporto e produzione dell'aggregato (circa 9% e 7% rispettivamente), e infine dai minimi contributi dovuti alla fase di lavorazione del calcestruzzo (4%) e da quella di produzione dell'additivo (2%) (Figura 9).

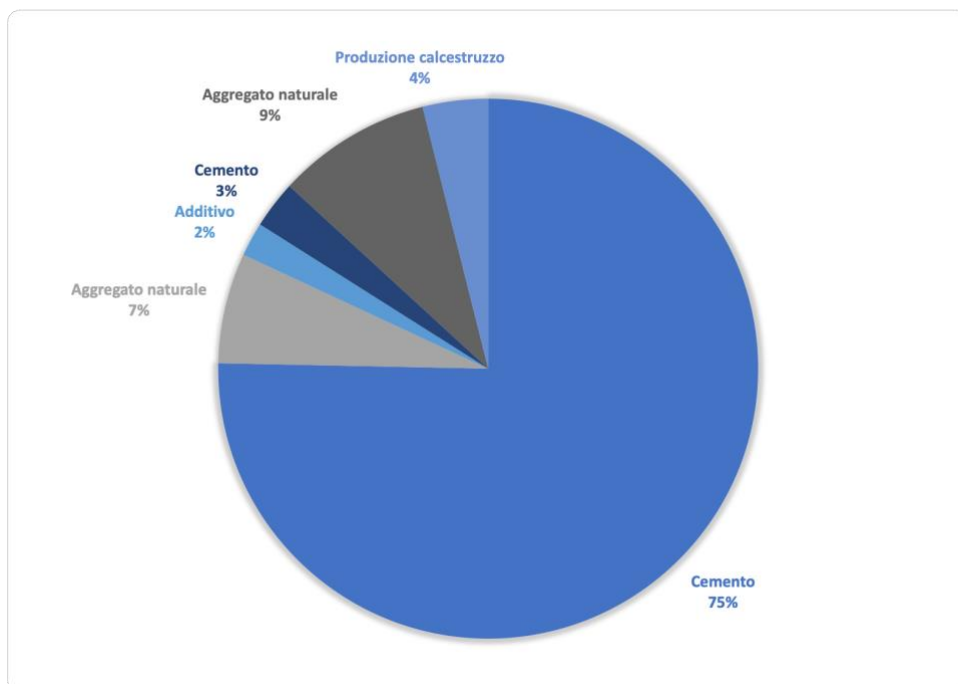


Figura 9. Contributo % di ogni fase del ciclo di vita sul totale degli impatti

Conclusioni

Lo studio ha mostrato che le categorie di impatto più rilevanti, calcolate sui valori normalizzati e ponderati, e che cumulativamente contribuiscono per almeno l'80% sull'impatto ambientale totale risultano essere i seguenti:

- Ecotoxicity, freshwater (ca. 25%),
- Climate change (ca. 18%),
- Resource use, fossils (ca. 13%),
- Photochemical ozone formation (ca. 8%),
- Particulate matter (ca. 7%)
- Eutrophication, marine (ca. 6%)
- Human toxicity, non-cancer. (ca. 5%).

Mentre, le fasi del ciclo di vita che presentano valori di impatto maggiore sono, rispettivamente: l'estrazione delle materie (ca. 80%), e in particolare del cemento (ca. 70% su ca. 80% di tutte le materie prime), seguita dai trasporti dall'approvvigionamento allo stabilimento (ca. 15%) e con un piccolo contributo dalla manifattura (ca. 5%). Più in dettaglio la materia prima che ha maggior peso è il cemento.

Bibliografia

- D. Coffetti, E. Crotti, G. Gazzaniga, M. Carrara, T. Pastore, L. Coppola, Pathways towards sustainable concrete, *Cem. Concr. Res.* 154 (2022) 106718. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106718>.
- A. Sivakrishna, A. Adesina, P.O. Awoyera, K. Rajesh Kumar, Green concrete: A review of recent developments, *Mater. Today Proc.* 27 (2020) 54–58. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.202>.
- ILCD International Life Cycle Data system, 2023. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ilcd.html>
- P.J.M. Monteiro, S.A. Miller, A. Horvath, Towards sustainable concrete, *Nat. Mater.* 16 (2017) 698–699. <https://doi.org/10.1038/nmat4930>.
- S.A. Miller, V.M. John, S.A. Pacca, A. Horvath, Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050, *Cem. Concr. Res.* 114 (2018) 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.026>.
- Federbeton, Rapporto di Filiera 2021, 2022 (a).
- UNICIRCULAR Fondazione per lo sviluppo sostenibile – FISEUNICIRCULAR Unione Imprese Economia, L'Italia del riciclo 2021, 2021.
- Federbeton, Rapporto di sostenibilità 2021, 2022 (b).
- L. Coppola, E. Palumbo, D. Coffetti, C. Panozzo, S. Rapelli, M. Cellulare, C. Rinaldi, Studio LCA della filiera del calcestruzzo e degli aggregati riciclati, 2023.



Studio LCA di filiera del cemento



Autori:

Paola Sposato, Antonella Luciano, Sara Corrado*, Paola Altamura**, Caterina Rinaldi

ENEA, Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento al cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali

Revisione critica esterna: Ecoinnovazione S.r.l.

* Ricercatrice all'ENEA fino al 31/12/2021

** Dal 2022 è presso "Sapienza" Università di Roma, *Dipartimento di Pianificazione Design Tecnologia dell'Architettura*

Introduzione

La filiera del cemento ricopre un ruolo strategico per lo sviluppo socio-economico del Paese, quale primo anello di quella catena che conduce alla realizzazione di infrastrutture ed edifici sicuri e affidabili. Il numero di impianti delle aziende attive a livello nazionale nel 2021 ammonta a 28 cementerie a ciclo completo e 23 centri di macinazione per una produzione per una capacità produttiva di circa 31 milioni di tonnellate anno e una produzione di cemento in di 20,6 milioni di tonnellate.

I principali aspetti ambientali della filiera sono rappresentati dal consumo di materie prime, di energia e dalle emissioni in atmosfera dovute alla calcinazione e alla combustione durante il processo di cottura in forno del clinker. Circa 24 milioni di tonnellate di materiali vergini sono stati consumati dall'industria del cemento nel 2021, ne consegue che l'utilizzo di materie prime di recupero è una buona pratica da incoraggiare in quanto consente di ridurre l'impiego di materie prime naturali (risorse non rinnovabili).

Sotto il profilo ambientale, l'utilizzo di scarti e residui industriali in parziale sostituzione di materie prime di origine naturale offre quindi importanti opportunità per la razionalizzazione del consumo di risorse naturali (cave e miniere) ma anche per la riduzione delle emissioni totali di CO₂ connesse al processo di cottura della roccia calcarea (calcinazione) durante la produzione del clinker. Le materie di sostituzione utilizzate nel processo di produzione del cemento vengono inoltre sottoposte a recupero di materia, in alternativa allo smaltimento in discarica, con un vantaggio ambientale e sociale sia per la collettività che per il sistema industriale. Materiali di origine naturale provenienti dalle attività estrattive (calcare, argilla e scisti) sono di fatto già parzialmente sostituiti da materiali alternativi: questi sono tipicamente rifiuti non pericolosi o sottoprodotti provenienti da altri settori industriali, come le scorie d'altoforno, le ceneri volanti, e i fumi di silice.

Il tasso di sostituzione delle materie prime naturali nel processo di produzione del cemento si è attestato nel 2021 intorno al 7%, costante rispetto al 2020 (FEDERBETON, 2021b) e con +0,5 punti percentuali rispetto al 2015 (Luciano et al., 2020). Il tasso effettivo di sostituzione delle materie prime potrebbe aumentare notevolmente grazie all'elevata disponibilità di materie prime alternative e alla potenzialità dell'industria cementiera di utilizzare tali residui e sottoprodotti. Gli impianti italiani, sia dal punto di vista energetico che ambientale, sono sicuramente idonei a realizzare recuperi percentualmente superiori di rifiuti e residui. Ovviamente non tutti i rifiuti possono essere utilizzati, in primo luogo devono rispondere alla definizione di "rifiuto non pericoloso". Quindi sono soggetti alle rigorose procedure di controllo e accettazione, alle modalità di campionamento e analisi definite nel "Piano di Monitoraggio e Controllo" opportunamente valutato in sede di rilascio della A.I.A. e sistematicamente verificato da parte degli Organi competenti. Lo scopo è sia tutelare la qualità del prodotto finale, che prevenire emissioni inquinanti.

La condivisione degli obiettivi europei di progressiva riduzione delle emissioni, fino alla carbon neutrality nel 2050, ha portato ad una crescente attenzione al miglioramento delle performance ambientali complessive tanto che le imprese hanno sviluppato una propria strategia e avviato

azioni specifiche. La strategia nazionale di decarbonizzazione del settore del cemento prevede di raggiungere un tasso di sostituzione calorica dei combustibili fossili del 47% al 2030 e dell'80% al 2050, arrivando a ridurre le emissioni di CO₂ nel 2050 del 12% rispetto a uno scenario "business as usual". L'Italia è al 22% di sostituzione calorica dei combustibili fossili. (Federbeton, 2021). Incrementare l'utilizzo dei combustibili alternativi contribuirebbe di certo al raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione.

La spinta dei CAM Edilizia, peraltro cogenti e recentemente anche aggiornati, e dei Protocolli di Sostenibilità ambientale, volontari ma premianti sul mercato, spingono l'intera filiera a prestare una crescente attenzione al profilo ambientale dei prodotti. Le informazioni relative al cemento, in particolare sul tasso di sostituzione delle materie prime potrebbero essere utili per il raggiungimento dei target di materiale riciclato presente nel calcestruzzo come previsto dai CAM Edilizia (D.M. 23 giugno 2022). L'industria del cemento, in linea con l'esigenza ormai consolidata del mercato dei prodotti da costruzione di connotarli e qualificarli anche a livello ambientale, ha intrapreso e mantenuto nel tempo la redazione di studi LCA e EPD relativi ai prodotti. Oltre all'EPD un'altra certificazione di interesse è rappresentata dal sistema di certificazione CSC sviluppato dal Concrete Sustainability Council (<https://csc.eco/>) per il calcestruzzo. Tale schema considera infatti nella valutazione del punteggio finale anche il contributo proveniente dai crediti della "chain of custody", i quali valutano la sostenibilità delle due principali catene di fornitura dei materiali componenti il calcestruzzo: il cemento e gli aggregati.

In quest'ottica, riveste un ruolo molto importante la disponibilità di dati di inventario a livello nazionale per l'effettuazione di studi LCA dei settori produttivi nazionali, compreso quello del cemento. All'interno del progetto Arcadia - Approccio ciclo di vita nei contratti pubblici e banca dati italiana LCA per l'uso efficiente delle risorse, coordinato da ENEA (<https://www.arcadia.enea.it>), è prevista la costituzione di una banca dati italiana (BDI) LCA, la quale permetterà di raggiungere un duplice obiettivo in ottica di transizione verso l'economia circolare: da una parte le aziende saranno stimolate a migliorare i loro prodotti, riducendo i consumi di energia e le emissioni, promuovendo azioni di recupero e riuso delle risorse e applicando strumenti di eco-innovazione di prodotto; dall'altra le Pubbliche Amministrazioni potranno utilizzare i dataset nazionali di LCA per studi che supportino le politiche per la gestione e lo sviluppo del territorio, gli "appalti verdi" e le azioni previste dal "Made Green in Italy" e dalla Strategia nazionale di economia circolare. Inoltre, Enti di ricerca e Università potranno utilizzare i dataset per le attività di ricerca e sviluppo. La banca dati (<https://bancadatiitalianalca.enea.it/>), è in continuo aggiornamento con il procedere degli studi di filiera (20 studi di filiera previsti a fine progetto), ed arriverà a ospitare oltre 100 dataset, relativi ai settori edilizia costruzioni, legno arredo, energia e agroalimentare.

Il presente documento descrive lo studio LCA di filiera sulla "Produzione del cemento", sviluppato in accordo con la metodologia del progetto Arcadia per gli studi di filiera e con il contributo, in termini di dati relativi alla filiera, di Federbeton e Aitec. Lo studio LCA di filiera è stato sviluppato in accordo alle norme ISO 14040 e 14044 e ha permesso di sviluppare un dataset in formato ILCD nella Banca Dati Italia LCA (<https://www.arcadia.enea.it/la-banca-dati.html>).

Gruppo di Lavoro di Filiera

Il Gruppo di lavoro per lo studio LCA di filiera è composto da:

- ENEA (P. Sposato, A. Luciano, S. Corrado*, P. Altamura**, C. Rinaldi) che ha effettuato lo Studio LCA del cemento medio;
- AITEC (Laura Negri) e FEDERBETON (Margherita Galli) che hanno fornito i dati primari per lo studio LCA.

ENEA, attraverso il Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento al cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali (SSPT) contribuisce alla valorizzazione del capitale economico, naturale e sociale, fornendo strumenti tecnologici e conoscitivi per una crescita sostenibile e competitiva delle imprese e per il miglioramento della qualità della vita dei cittadini. Supporta l'individuazione e l'attuazione di politiche destinate a favorire la riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra, la mitigazione degli effetti dei cambiamenti climatici, la transizione verso nuovi modelli economici quali l'economia circolare, la bioeconomia e l'economia blu.

FEDERBETON, costituita nel 1959, AITEC rappresenta le Aziende Italiane produttrici di cemento, con ampia rappresentatività della produzione nazionale. Aderente a CONFINDUSTRIA e membro di CEMBUREAU, l'Associazione Europea del Cemento, AITEC rappresenta e tutela gli interessi tecnico-economici dell'industria del cemento presso Istituzioni, Enti e organizzazioni pubbliche e private in ambito nazionale ed europeo, promuovendo la conoscenza, la qualificazione e gli impieghi del cemento attraverso attività di divulgazione e di informazione tecnica.

Federbeton è, in ambito Confindustria, la Federazione di settore delle Associazioni della filiera del cemento, del calcestruzzo, dei materiali di base, dei manufatti, componenti e strutture per le costruzioni, delle applicazioni e delle tecnologie ad essa connesse nell'ambito della filiera sopra indicata.

Obiettivi e campo di applicazione dello studio

Gli obiettivi dello studio LCA di filiera sono:

- La realizzazione del dataset “Clinker at production” finalizzato ad incrementare i dataset relativi al settore Edilizia presenti nella BDI-LCA di Arcadia, per consentire ad altri utenti (pubblica amministrazione, imprese, associazioni di categoria, progettisti, ONG e università / ricerca) di utilizzarlo in ambito di studi LCA e di valutazioni di sostenibilità.
- La realizzazione del dataset “Cement at production” finalizzato ad incrementare i dataset relativi al settore Edilizia presenti nella BDI-LCA di Arcadia, per consentire ad altri utenti (pubblica amministrazione, imprese, associazioni di categoria, progettisti, ONG e università / ricerca) di utilizzarlo in ambito di studi LCA e di valutazioni di sostenibilità.

* Ricercatrice all'ENEA fino al 31/12/2021

**Dal 2022 è presso “Sapienza” Università di Roma, *Dipartimento di Pianificazione Design Tecnologia dell'Architettura*

- Rendere disponibili dati di inventario e di impatto ambientale sul prodotto oggetto dello studio per valutazioni in ambito GPP, in particolare a supporto dell'introduzione di criteri connessi ad LCA nelle procedure di acquisto.
- Sensibilizzare/formare associazioni ed imprese del settore: in linea con le finalità del progetto, contestualmente allo studio LCA, è stata avviata una formazione “on the job” ai tecnici/referenti delle imprese coinvolte riguardante la metodologia LCA e le modalità operative per effettuare la raccolta dei dati lungo la filiera, con il continuo supporto di ENEA.
- Sviluppare il report tecnico dello studio LCA di filiera, reso disponibile sul sito di Arcadia nella pagina dedicata (<https://www.arcadia.enea.it/settori-di-intervento/edilizia/cemento.html>), che comprende una descrizione del settore dal punto di vista ambientale e socio-economico e gli step dello studio LCA in accordo con le norme ISO 14040-44. Scopo del documento è: sia fornire una descrizione dettagliata dello studio effettuato, del gruppo di lavoro e dei dati utilizzati per lo sviluppo del dataset e dei risultati di impatto ambientale, sia costituire una guida per le imprese del settore che vogliano intraprendere un proprio studio LCA.

L'unità funzionale (UF) dello studio è la produzione di 1 t di “cemento medio” prodotto in Italia. Per cemento medio si intende il mix delle principali tipologie di cementi prodotti in Italia secondo la UNI EN 197-1 e tenuto conto dei volumi di produzione nazionale come segue: cemento Portland (CEM I) e il Portland di miscela (CEM II) con l'86% di quota della produzione totale, cementi pozzolanici (12%) e il cemento d'alto forno (2%) - dati medi forniti dall'Associazione Italiana Tecno Economica del Cemento (AITEC) relativi agli anni 2019 e 2020. Il flusso di riferimento dello studio è 1 t di cemento medio in uscita dallo stabilimento produttivo.

Lo studio LCA è stato svolto adottando un approccio “cradle-to-gate”, ovvero considerando tutti i processi fino al “cancello aziendale”, senza includere la distribuzione del prodotto, e le successive fasi di uso e fine vita. Include quindi le fasi di estrazione delle materie prime e di produzione dei prodotti utilizzati per la produzione di cemento, il loro trasporto, la produzione di energia elettrica, l'estrazione di acqua, e la produzione di cemento. Le fasi del ciclo di vita successive all'uscita del cemento dallo stabilimento produttivo sono state escluse in quanto il cemento può essere destinato a vari utilizzi con caratteristiche molto diverse tra di loro.

Il diagramma del confine del sistema è riportato in Figura 10. Tutti i processi della fase di produzione clinker e cemento, inclusi i trasporti e le emissioni in atmosfera sono di foreground, modellati attraverso dati primari, mentre le materie prime in input sono processi di background, modellati con dati secondari.

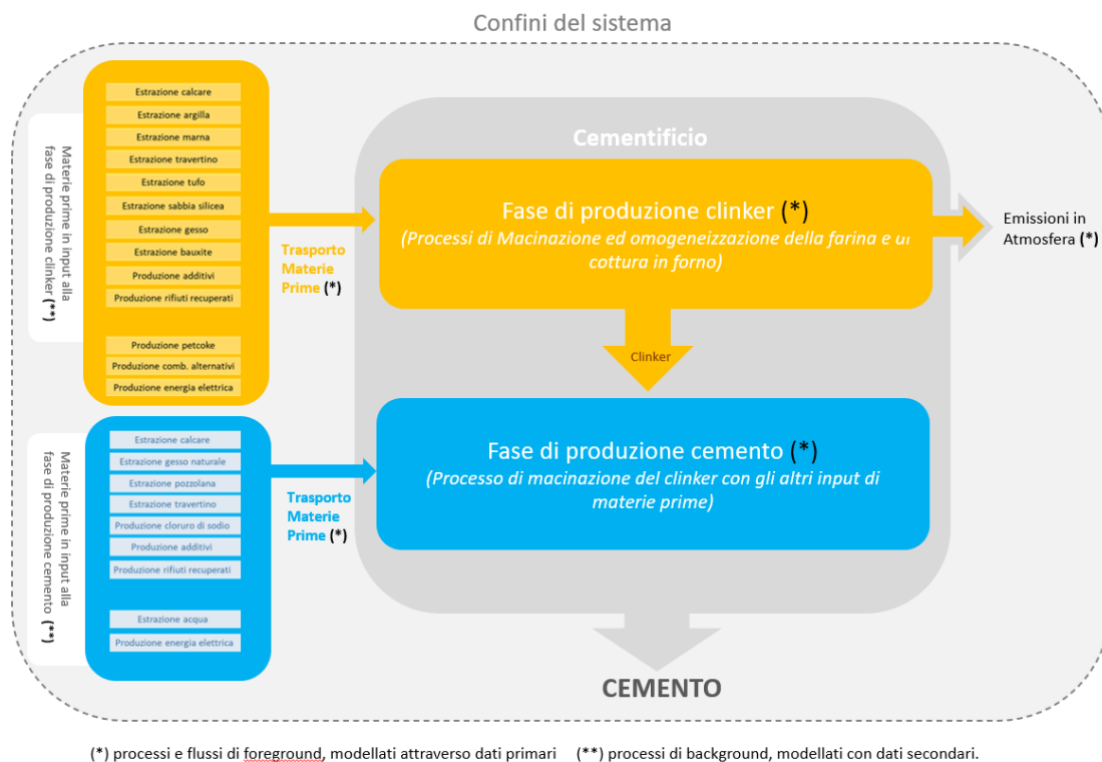


Figura 10. Confini del sistema del processo di produzione di cemento

Analisi di Inventario

La raccolta dei dati è stata impostata con l'obiettivo di ottenere un inventario il più possibile rappresentativo della produzione media di cemento a livello nazionale. Sono stati quindi utilizzati dati medi nazionali forniti dall'Associazione Italiana Tecno Economica del Cemento (AITEC) e da ISPRA.

In particolare, le fonti dei dati di inventario per il presente studio includono:

- Dati medi forniti da AITEC relativi agli anni 2019 e 2020, rappresentativi rispettivamente del 16.4% e del 17% della produzione nazionale. Questa fonte è stata considerata per la tipologia e i quantitativi di materiali in ingresso alla produzione di cemento e clinker, le relative distanze di trasporto, e i consumi di combustibili e di energia elettrica. Inoltre, sono stati utilizzati i dati sulle emissioni in atmosfera di anidride carbonica (CO₂), rame (Cu), acido cloridrico (HCl), acido cianidrico (HCN), e l'acido fluoridrico (HF) relativi alla produzione di clinker, per i motivi descritti al punto successivo.
- Fattori di emissione medi nazionali per l'anno 2019 (ISPRA, 2019) relativi alla produzione di cemento. I fattori di emissione sono pubblicati da ISPRA per il calcolo degli inventari nazionali delle emissioni. Essendo rappresentativi della realtà media nazionale sono stati preferiti alle emissioni comunicate da AITEC, che hanno una rappresentatività più limitata. Questa fonte è stata considerata per le emissioni in atmosfera dovute alla produzione di clinker, fatta alle sole emissioni della combustione e non considerano quelle di processo, rame (Cu), acido cloridrico (HCl), acido cianidrico (HCN), e acido fluoridrico (HF), in quanto

ISPRA non riporta fattori di emissione per queste sostanze. Per questi dati, come indicato al punto precedente, sono stati utilizzati la media dei dati 2019-2020 forniti da AITEC. I fattori di emissione di ISPRA includono le emissioni aggregate di NMVOC, incluse nell'inventario. Questo ha comportato l'esclusione delle emissioni di benzene riportate da AITEC, in quanto gli NMVOC includono il benzene. I fattori di emissione di ISPRA sono riferiti ad un kg di cemento e sono stati ricalcolati per kg di clinker considerando un contenuto di clinker nel cemento pari al 76,3% (AITEC, media dati 2019-2020). I dati di emissione scelti sono stati elaborati e confrontati anche con altri dati di letteratura, e dall'analisi la variazione tra le fonti non è significativa, pertanto si è ritenuto corretto combinarle e inserire anche le emissioni AITEC non considerate da ISPRA.

- Dati ambientali Buzzi Unicem per i consumi idrici per la produzione di cemento. Il consumo di acqua nel ciclo tecnologico del cemento è principalmente dovuto al condizionamento dei gas derivanti dai forni, all'abbattimento della temperatura durante la macinazione cemento, al raffreddamento degli organi motore e alla riduzione della polverosità diffusa negli impianti. Gli impianti Buzzi Unicem sul territorio nazionale rappresentano circa il 30 % del totale degli impianti consorziati AITEC ai quali fanno riferimento gli altri dati ambientali. Tale dato quindi si può considerare rappresentativo del contesto nazionale.
- Lo studio di Rigamonti et al. (2012) è stato considerato per la modellazione della produzione di combustibile solido secondario (CSS).

Valutazione degli impatti ed interpretazione dei risultati

Ai fini del presente studio LCA di filiera è stato utilizzato il metodo di valutazione degli impatti EF 3.0 (Zampori e Pant, 2019).

La Tabella 4 riporta risultati di caratterizzazione risultanti dalla produzione di 1 t di cemento medio italiano con i relativi contributi delle fasi di produzione del clinker e di produzione del cemento.

Impact category	Unit	Fase di Produzione Clinker	Fase di Produzione Cemento	Totale Cemento medio
Climate change	kg CO2 eq	6,98E+02	2,29E+01	7,21E+02
Ozone depletion	kg CFC11 eq	1,70E-05	3,11E-06	2,01E-05
Ionising radiation	kBq U-235 eq	7,54E+00	3,34E+00	1,09E+01
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	1,07E+00	6,67E-02	1,14E+00
Particulate matter	disease inc.	6,28E-06	6,62E-07	6,95E-06
Human toxicity, non-cancer	CTUh	4,62E-06	1,88E-07	4,81E-06
Human toxicity, cancer	CTUh	6,26E-08	1,02E-08	7,27E-08
Acidification	mol H+ eq	1,17E+00	1,13E-01	1,28E+00
Eutrophication, freshwater	kg P eq	3,14E-02	6,65E-03	3,81E-02
Eutrophication, marine	kg N eq	3,94E-01	2,20E-02	4,16E-01
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	4,79E+00	2,49E-01	5,03E+00
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	3,35E+03	5,98E+02	3,95E+03
Land use	Pt	3,21E+02	9,17E+01	4,12E+02

Water use	m3 depriv.	1,64E+01	2,15E+01	3,80E+01
Resource use, fossils	MJ	1,72E+03	3,47E+02	2,07E+03
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	1,92E-04	2,68E-04	4,60E-04
Climate change - Fossil	kg CO2 eq	6,97E+02	2,26E+01	7,20E+02
Climate change - Biogenic	kg CO2 eq	3,87E-01	2,39E-01	6,25E-01
Climate change - Land use and LU change	kg CO2 eq	1,43E-02	7,90E-03	2,22E-02
Human toxicity, non-cancer - organics	CTUh	3,30E-08	1,25E-08	4,55E-08
Human toxicity, non-cancer - inorganics	CTUh	1,13E-07	3,36E-08	1,47E-07
Human toxicity, non-cancer - metals	CTUh	4,48E-06	1,44E-07	4,63E-06
Human toxicity, cancer - organics	CTUh	7,10E-09	2,72E-09	9,82E-09
Human toxicity, cancer - inorganics	CTUh	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Human toxicity, cancer - metals	CTUh	5,55E-08	7,44E-09	6,29E-08
Ecotoxicity, freshwater - organics	CTUe	5,43E+01	3,84E+00	5,81E+01
Ecotoxicity, freshwater - inorganics	CTUe	1,95E+02	2,81E+01	2,23E+02
Ecotoxicity, freshwater - metals	CTUe	3,10E+03	5,66E+02	3,67E+03

Tabella 4. Risultati di caratterizzazione relativi alla produzione di 1 t di cemento medio italiano: impatto totale, fase di produzione del clinker, fase di produzione del cemento.

L'analisi dei risultati derivanti dalla normalizzazione riportati in Figura 11 mostrano come le categorie di impatto più rilevanti per la produzione del cemento siano: Ecotoxicity, freshwater con il 23,8%, Climate change con il 22,9%, Resource use, fossils con il 8,2%, Eutrophication terrestre con il 7,3%, Photochemical ozone formation con il 7,2%, Eutrophication, freshwater con il 6,1%, Acidification con il 5,9%. Il totale degli impatti generati da tali categorie d'impatto rappresenta l'81,4% degli impatti totali della produzione del cemento medio italiano.

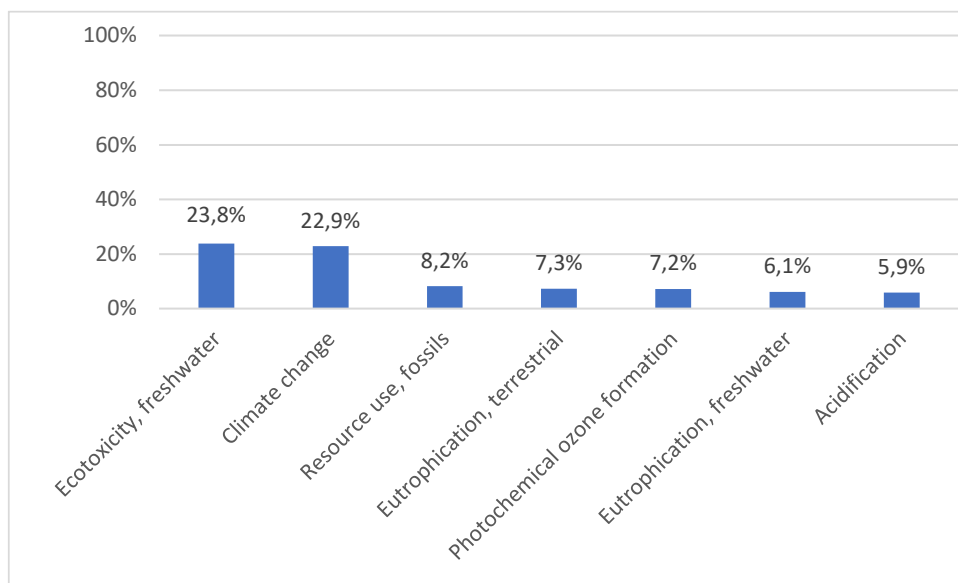


Figura 11. Risultati della normalizzazione per le categorie di impatto più rilevanti per la produzione del cemento medio italiano

Analizzando le categorie di impatto più significative e i processi principali che costituiscono il ciclo di vita della produzione del cemento si evidenzia come in generale la fase di manifattura è

la maggiore responsabile degli impatti ambientali contribuendo con l'80,4% rispetto al 19,4% della pre-manifattura. Andando in maggiore dettaglio si evince come i processi che contribuiscono maggiormente siano quelli relativi alla fase di produzione del clinker sia in termini di contributo sul totale degli impatti (89,2%) che in termini di contributo nelle singole categorie d'impatto rilevanti (Figura 12). Come si vede dai risultati, sebbene l'89,18% degli impatti sia rintracciabile nei processi della fase della produzione clinker, all'interno della fase di produzione cemento (10,82% degli impatti) il processo di produzione di elettricità (Electricity, medium voltage {IT}| market for | Cut-off, U) fornisce un contributo non secondario per un totale del 5% sul totale degli impatti.

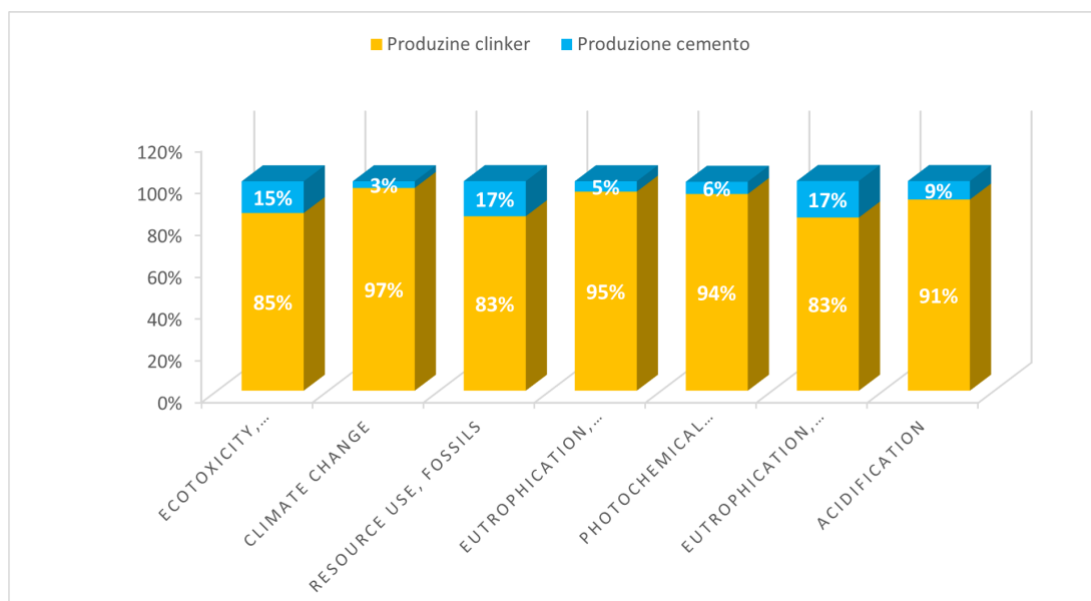
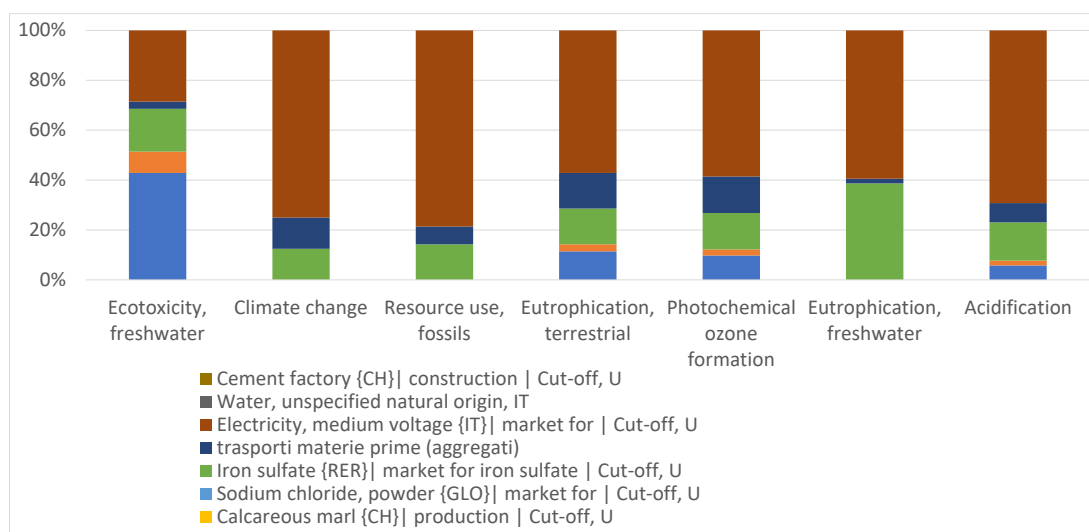
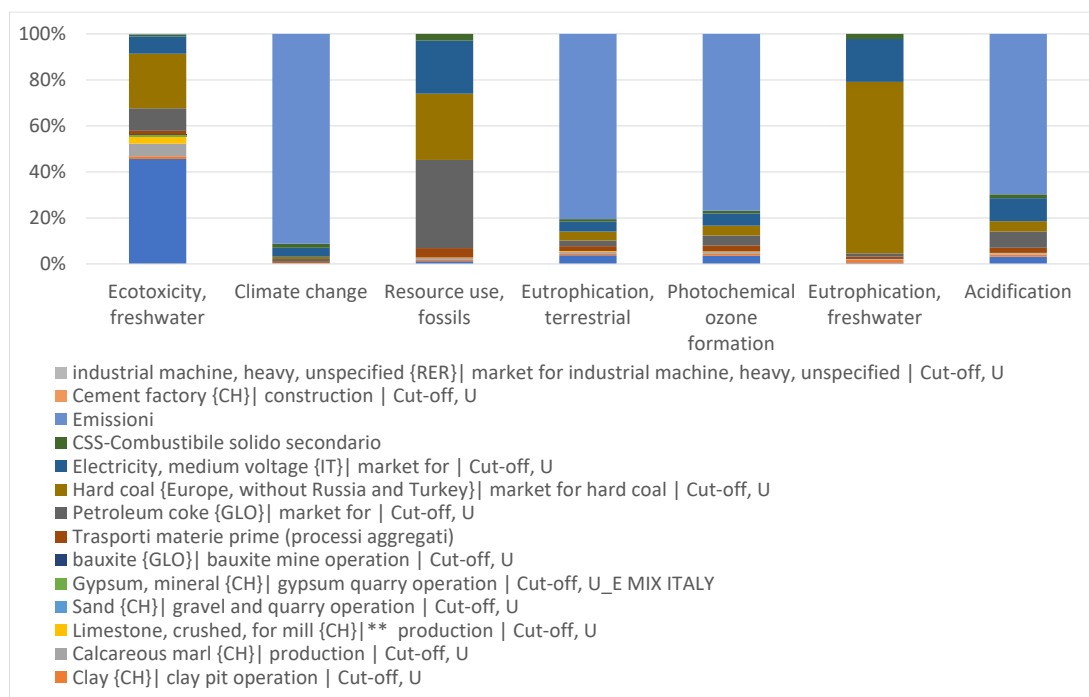


Figura 12. Contributi percentuali delle fasi del ciclo di vita dei processi per le categorie di impatto più rilevanti (in ordine di rilevanza da sinistra a destra)

Più in generale, considerata anche la fase di produzione di clinker, emerge che gli impatti più rilevanti (Figura 13 e Figura 14) sono dovuti a (in ordine di rilevanza sul totale degli impatti dello studio di filiera):

- Le emissioni prodotte nella fase di produzione clinker e dovute al processo di cottura e alla calcinazione che contribuiscono per un totale del 45,5% sul totale degli impatti. Esse costituiscono la quasi totalità degli impatti per le categorie del climate change (20,2% sul totale del 22,2%), Eutrophication, terrestrial (5,6% sul totale del 7%) Photochemical ozone formation (5,2% sul totale del 7%) ed Acidification (3,7% sul totale del 5,4%).
- Il consumo dei combustibili fossili (petcoke e hardcoal), forniti in modo aggregato, che contribuisce per il 18,8% degli impatti totali e rappresenta la quasi interezza degli impatti delle categorie Resource use, fossils ed Eutrophication, freshwater nonché il secondo contributo rilevante per la categoria maggiormente impattante Ecotoxicity, freshwater (con il 6,7%)
- Il consumo di elettricità con un totale del 5% nella fase di produzione cemento ed un 6,6% nella fase di produzione clinker per un totale del 11,6% degli impatti totali

- Il processo Limestone della fase di manifattura associato al calcare contribuisce per il 12,2% degli impatti totali con il contributo maggiore nella fase di produzione clinker (9.3%) ove vi è la maggior parte di presenza di tale input di materia in termini di massa. Tale processo rappresenta il principale impatto per le categorie di Ecotoxicity, freshwater (con il 9,2% per la produzione clinker e 1,5% nella fase di produzione cemento) per un totale del 9.8% sul totale del 23,5%. Non si considerano qui i contributi dati dal processo di Limestone utilizzato come proxy per l'input di tufo.



Conclusioni

Lo studio ha confermato come i maggiori impatti della produzione del cemento medio italiano siano imputabili ai processi di produzione del clinker (con l'89,2% sul totale degli impatti). Più in generale emerge che gli impatti, in ordine di rilevanza, sono dovuti a: a) alle emissioni prodotte nella fase di produzione del clinker; b) al consumo di combustibili fossili; c) al consumo di elettricità.

Massimizzare le performance del clinker, il componente prevalente nella composizione del cemento e il maggiore responsabile degli impatti, aumentando il tasso di sostituzione calorica dei combustibili fossili, è sicuramente un'azione da perseguire per la riduzione degli impatti così come previsto dalla strategia di decarbonizzazione del settore del cemento che prevede di raggiungere un tasso di sostituzione calorica dei combustibili fossili del 47% al 2030 e dell'80% al 2050.

Dallo studio LCA di filiera relativo alla produzione di cemento medio italiano sono stati sviluppati due dataset disponibili nella Banca Dati LCA del progetto Arcadia (<https://bancadatiitalianalca.enea.it/Node/>).

I dataset sviluppati potranno essere utilizzati come fonte di dati rappresentativi del contesto italiano per sviluppare studi di LCA a supporto di strategie di miglioramento continuo da parte delle imprese di produzione e di tutta la filiera nazionale in ottica di economia circolare e produzione sostenibile.

Bibliografia

- D.M. 23 giugno 2022 Criteri ambientali minimi per l'affidamento del servizio di progettazione di interventi edilizi, per l'affidamento dei lavori per interventi edilizi e per l'affidamento congiunto di progettazione e lavori per interventi edilizi. (22A04307) (GU Serie Generale n.183 del 06-08-2022)
- FEDERBETON, 2021. Rapporto di sostenibilità 2020. https://www.federbeton.it/Portals/0/pubdoc/pubblicazioni/Rapporti/Rapporto_di_Sostenibilit%C3%A0_Federbeton_2020.pdf?ver=2021-10-29-151837-237
- ISPRA, 2019. <http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/serie-storiche-emissioni/fattori-di-emissione-per-le-sorgenti-di-combustione-stazionarie-in-italia/view> (ultimo accesso: dicembre 2021).
- Luciano A, Reale P, Cutaia L, Carletti R e al. (2020). Resources Optimization and Sustainable Waste Management in Construction Chain in Italy: Toward a Resource Efficiency Plan. Waste and Biomass Valorization. 11, 5405–5417. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0533-1>
- Rigamonti, L., Grosso, M., & Biganzoli, L. (2012). Environmental Assessment of Refuse-Derived Fuel Co-Combustion in a Coal-Fired Power Plant. Journal of Industrial Ecology, 16(5), 748-760.
- Zampori, L. and Pant, R., Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method, EUR 29682 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-00654-1. doi:10.2760/424613, JRC115959



Studio LCA di filiera delle pietre ornamentali



Autori*:

Elisabetta Palumbo¹, Chiara Panozzo¹, Marilisa Cellurale², Caterina Rinaldi²

¹ Dipartimento di Ingegneria e Scienze Applicate (DISA), Università degli Studi di Bergamo

² ENEA, Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento al cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali

Revisione critica dello studio: Ecoinnovazione S.r.l.

*Author contribution statement: sebbene il testo sia frutto della collaborazione degli autori si segnala che i paragrafi 1, 3, 4, 5 e 6 sono da attribuire a Palumbo E., mentre le restanti parti e in misura equa a Palumbo E. e Rinaldi C.

Introduzione

L'Italia è nota per la ricchezza delle sue risorse litiche vantando antichissime tradizioni estrattive nel settore delle pietre ornamentali, classificandosi come sesto Paese produttore di materia prima litica grezza su scala mondiale (Marmomacchine, 2023). Ancora oggi queste sono materie prime con un alto valore economico (Carvalho et al., 2008), oltre che estetico come materiali da costruzione. In effetti, il territorio italiano presenta giacimenti estrattivi con notevoli caratteri di eterogeneità geomorfologica, le cui principali cave hanno determinato la creazione di 11 riconosciuti distretti tra nord e sud. Inoltre, alle peculiarità fisico-meccaniche del materiale estratto corrisponde una variabilità nelle tecniche sia di coltivazione sia di lavorazione, che rendono quindi il settore di appartenenza un ambito di complessa omogeneità.

Si tratta inoltre di materiali con una vita media solitamente più lunga rispetto ad altri materiali da costruzione (Prikryl, 2015), che possono essere riutilizzati e recuperati per altri usi (Bianco et al., 2017), ma in quanto non rinnovabili, sono sottoposti a trasformazioni meccaniche con un noto peso ambientale (Palumbo, 2018).

Da qui la necessità di approfondire le modalità di produzione con il fine di proporre alle aziende migliori e accorgimenti mirati alla riduzione degli impatti nel ciclo di vita, e rendere disponibili all'interno della Banca Dati Italiana LCA (BDI-LCA), dataset relativi ai processi di produzione di materiali ritenuti significativi del settore edile (Scalbi et al. 2021).

La volontà di indirizzare la famiglia di pietre ornamentali verso un ridotto impatto ambientale è anche negli indirizzi presi nell'ambito dei Criteri Ambientali Minimi per gli interventi edilizi (MiTe, 2022), che stabilendo il criterio 2.5.10.1 sulle pavimentazioni dure, richiede che la rispondenza al criterio avvenga attraverso il possesso dell'etichetta europea Ecolabel (Decisione 2021/476), che viene assegnato solo a quei prodotti che dimostrano di avere un ridotto impatto ambientale durante il ciclo di vita.

Il testo che segue si focalizzerà sugli esiti di uno dei sette prodotti presi in esame, che è una lastra in pietra di pietra arenaria con densità di 2550 kg/m³ con 20 mm di spessore, senza finiture o trattamenti superficiali (Figura 15).

Ulteriori approfondimenti a riguardo e la ricerca effettuata sugli altri sei prodotti sono riportati all'interno del report tecnico "[Studio LCA della filiera delle pietre ornamentali](#)" disponibile sul sito del progetto Arcadia e più precisamente nel dataset all'interno della BDI-LCA ([Banca Dati Italiana LCA](#)). Complessivamente sono stati prodotti 18 dataset in formato ILCD, con l'obiettivo di consentire ad altri utenti (pubblica amministrazione, imprese, associazioni di categoria, progettisti, ONG e università/ricerca) di utilizzarli per altre *Life Cycle Assessment* (LCA) e valutazioni sulla sostenibilità.

Lo studio LCA è stato sviluppato secondo l'approccio metodologico definito dal progetto Arcadia per gli studi di filiera e lo sviluppo dei relativi dataset, e quindi ha coinvolto associazioni di categoria, aziende ed esperti del settore (Figura 16). Gli standard normativi di riferimento sono le ISO 14040 e 14044:2006 per l'impostazione metodologica, e la UNI EN 15804:2012+A2:2019 per le specificità legate all'ambito delle costruzioni. Gli altri riferimenti per lo svolgimento della valutazione sono stati la International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Provisions and Action Steps (EC - JRC, 2010) e la Product Environmental Footprint (PEF) Guide.



Figura 15. Inquadramento delle cave oggetto di analisi e identificazione del litotipo analizzato in questo studio (Elaborazione Cellulare, Palumbo)



Figura 16. Approccio metodologico adottato nel progetto (Elaborazione Cellulare, Palumbo)

Gruppo di Lavoro di Filiera

Il Gruppo di lavoro per lo studio LCA di filiera delle pietre ornamentali è composto da:

- ENEA (C. Rinaldi & M. Cellurale), che ha condotto lo studio preliminare di inquadramento del settore economico e fornito le indicazioni sulla Metodologia del progetto Arcadia;
- Dipartimento di Ingegneria e Scienze Applicate (DISA) dell'Università di Bergamo (E. Palumbo, coordinatore e responsabile scientifico & C. Panozzo) che ha sviluppato lo studio LCA, supportando le aziende nella definizione dei prodotti rappresentativi, la raccolta dei dati primari e la identificazione delle criticità e/o migliorie da integrare, e redatto lo studio di filiera;
- Ecoinnovazione S.r.l. che si è occupata della revisione critica indipendente dello studio LCA;
- le aziende -Casone Group S.p.A. (A. Bartolomei), Marini Marmi S.r.l. (Giulio Marini), Grassi Pietre S.r.l. (F. Grassi & R. Centofante) e Santafiora S.r.l. (P. Palma & F. G. Rossi)- che hanno fornito i dati primari.

Obiettivi e campo di applicazione dello studio

L'obiettivo della LCA è stato duplice:

- analizzare l'impatto ambientale di alcuni dei litoidi estratti in Italia per aumentare la consapevolezza, sia della filiera di competenza, sia dei diversi stakeholder coinvolti e, quindi, intervenire con azioni a favore di una riduzione degli impatti sull'ambiente;
- lo sviluppo di dataset specifici di una delle filiere di ambito edile di maggior rilevanza sul mercato nazionale e internazionale.

Il prodotto litico trattato nel presente capitolo è una lastra in pietra arenaria con densità di 2550 kg/m³ con 20 mm di spessore, senza finiture o trattamenti superficiali, destinato all'utilizzo in pavimentazioni, rivestimenti a parete e finiture interne (es. top piano cucina, lavabo, piatto doccia, ecc.).

L'Unità Funzionale (UF) è 1 m² di lastra di pietra arenaria a cui corrisponde un peso di circa 50 kg per superficie, senza lavorazione o finitura superficiale. Si tratta di una roccia sedimentaria clastica appartenente alla formazione Marnoso-Arenacea, denominata in petrografia "*sandstone light grey*" (UNI EN 12440), estratta nello storico comprensorio Brento Sanico di Firenzuola (Firenze).

Lo studio LCA è del tipo "*from cradle-to-gate*", pertanto analizza tutte le fasi di estrazione in cava, il trasporto dalla cava al laboratorio di trasformazione e la conseguente lavorazione. Quest'ultima comprende la segagione e rifilatura del blocco in lastra, il taglio a misura (di tipo standard), mentre esclude la distribuzione del prodotto, le successive fasi di applicazione, le eventuali manutenzioni e ripristini nel tempo, il fine vita e gli eventuali ricicli/recuperi post uso.

I confini del sistema del processo di estrazione e lavorazione della lastra sono schematizzata in Figura 17, da cui è esclusa la produzione di macchinari e infrastrutture (e le relative attività di manutenzione), con l'eccezione di quelli già contenuti nei dataset di Ecoinvent 3.7.1 (Wernet et al., 2016) utilizzati per modellare i dati di background.

Infine, il metodo di valutazione adottato per la fase di valutazione degli impatti è l'EF 3.0 (Zampori e Pant, 2019).



Figura 17. Confini del sistema del processo di produzione di una lastra di 1 mq di superficie

Analisi di Inventario

La raccolta dei dati primari è avvenuta con la partecipazione di aziende italiane, i cui processi produttivi sono stati considerati tipici di una produzione media italiana e fanno riferimento all'anno 2022. La fase di estrazione del blocco è stata modellata tenendo in considerazione sia i consumi (elettrici, diesel e acqua) rilevati nella specifica cava toscana sul numero totale di materiale estratto annualmente, sia le informazioni dedotte dalle schede tecniche dei mezzi caratteristici della lavorazione a cielo aperto (potenza, consumo orario e resa). Mentre, come output sono state considerate le polveri prodotte da una tipica cava a cielo aperto, quantificate considerando il metodo di calcolo definito dal regolamento PQRA della regione Toscana². Anche per le attività in laboratorio, i consumi di energia elettrica, gasolio e acqua necessari per il funzionamento dei vari mezzi e macchinari adottati sono stati ottenuti combinando il questionario di inventario compilato dall'azienda con le informazioni contenute nelle schede tecniche dei macchinari specifici. Infine, le polveri emesse durante la fase di trasformazione da blocco in lastra sono state mutate dal processo "Particulates, >2,5 um, and < 10um" della bancadati Ecoinvent 3.8.

Valutazione degli impatti ed interpretazione dei risultati

La Tabella 5 mostra le 16 principali categorie di impatto espresse sotto forma di valori caratterizzati secondo il metodo EF 3.0, e, che in accordo con la EN 15804, sono espressi per i tre moduli del ciclo di vita: A1 (operazioni di estrazione in cava), A2 (trasporto del blocco in stabilimento) e A3 (fasi di lavorazione della lastra).

² PRQA, Piano regionale per la qualità dell'aria, Regione Toscana, luglio 2018.

<https://www.regione.toscana.it/documents/10180/24014/Allegato+A+PRQA+Parte+1-4+e+allegati.pdf/f11aa674-db16-4d9c-8723-d432d52c3819>

		A1	A2	A3	TOTALE Lastra SS sp. 2 cm
Impact category	Unit	Cava	Trasporto cava - stabilimento	Stabilimento	
Climate change	kg CO2 eq	1,29E+00	1,10E-01	1,16E+00	2,56E+00
Ozone depletion	kg CFC11 eq	2,39E-07	2,55E-08	1,71E-07	4,36E-07
Ionising radiation	kBq U-235 eq	7,59E-02	8,56E-03	1,45E-01	2,29E-01
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	1,47E-02	4,51E-04	4,65E-03	1,98E-02
Particulate matter	disease inc.	4,04E-07	9,51E-09	6,81E-08	4,81E-07
Human toxicity, non-cancer	CTUh	1,15E-08	1,36E-09	6,60E-09	1,95E-08
Human toxicity, cancer	CTUh	5,78E-10	4,21E-11	2,74E-10	8,94E-10
Acidification	mol H+ eq	1,24E-02	4,47E-04	6,33E-03	1,92E-02
Eutrophication, freshwater	kg P eq	9,59E-05	7,10E-06	2,27E-04	3,30E-04
Eutrophication, marine	kg N eq	4,91E-03	1,35E-04	1,52E-03	6,57E-03
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	5,60E-02	1,47E-03	1,68E-02	7,42E-02
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	1,92E+01	1,30E+00	1,08E+01	3,13E+01
Land use	Pt	3,00E+00	1,14E+00	2,87E+00	7,02E+00
Water use	m3 depriv.	1,81E-01	4,99E-03	1,18E+00	1,36E+00
Resource use, fossils	MJ	1,72E+01	1,67E+00	1,72E+01	3,60E+01
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	6,14E-06	3,83E-07	2,19E-06	8,72E-06

Tabella 5. Indicatori di impatto caratterizzati relativi alla produzione di 1 m2 di lastra di pietra arenaria con spessore 20 mm

Le categorie di impatto che contribuiscono fino a circa l'86% dell'impatto totale, espresse come valori normalizzati risultano essere, rispettivamente (Figura 18):

- Particulate matter (ca. 17%);
- Ecotoxicity, freshwater (ca. 16%);
- Resource use, fossil (ca. 12%);
- Photochemical ozone formation (9%);
- Eutrophication, terrestrial (variabile da 5,9% al 9,7%);
- Acidification (7,4%);
- Eutrophication, marine (7,%)
- Climate change (6,8%).

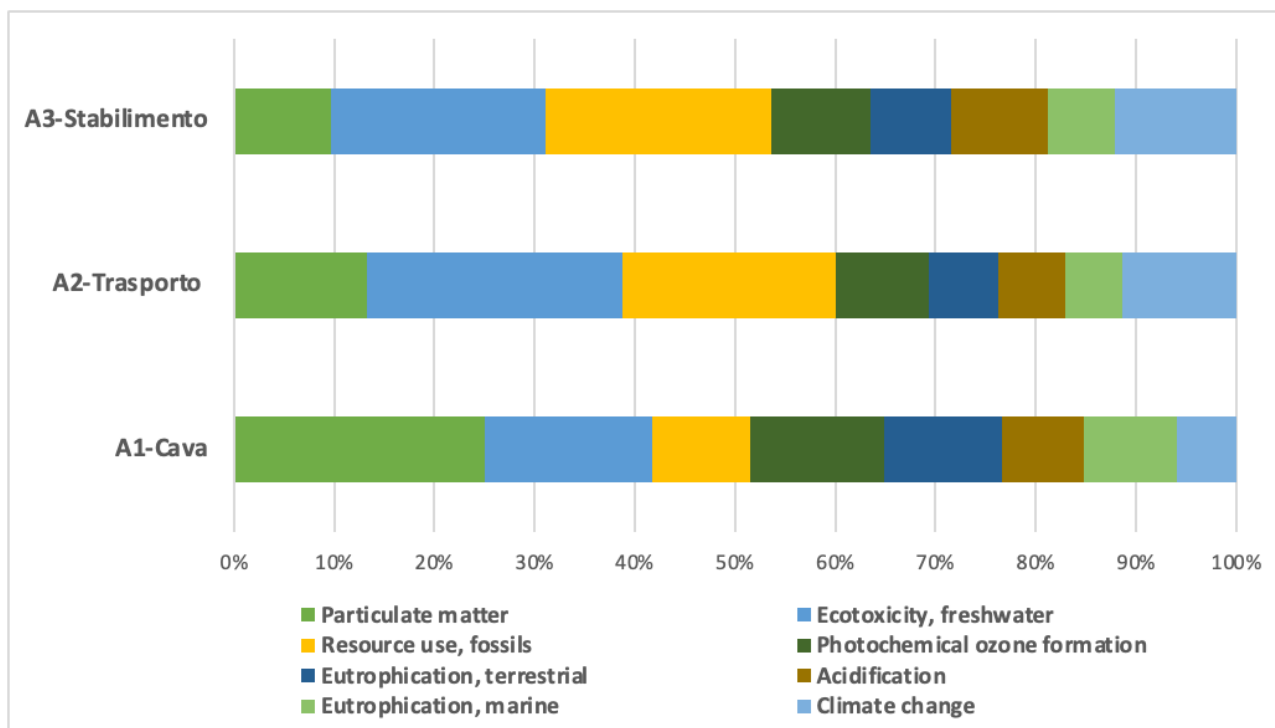


Figura 18. Risultati della normalizzazione per le categorie di impatto più rilevanti per la lastra di pietra arenaria con spessore 20 mm

Guardando, invece, alle tre principali fasi del ciclo di vita, si evince che gli impatti sono fortemente legati alla tecnica estrattiva utilizzata e chiaramente al livello tecnologico degli utensili e macchinari operanti. In particolare, rispetto alle categorie di impatto più rilevanti, l'operazione di estrazione incide per ca. il 63%, seguita dalla lavorazione nel sito produttivo (ca. 33%) e infine da quella di trasporto che è fortemente legata alla distanza di trasporto dei blocchi dalla cava allo stabilimento, che nel caso in questione è di solo il 3%, vista la prossimità dell'azienda al sito estrattivo.

Conclusioni

La filiera delle Pietre ornamentali è emblematica della complessità sottesa al tema della sostenibilità nell'ambito dei materiali da costruzione, specie se analizzato e misurato nell'ottica di circolarità del sistema produttivo. La BDI-LCA in cui sono stati inclusi 18 dataset relativi alla filiera delle pietre ornamentali, può fornire un importante supporto all'applicazione della metodologia LCA nel settore, sia in relazione all'ottenimento di etichette/certificazioni ambientali di prodotto (in particolare l'EPD), sia nell'ambito di valutazioni a scala di edificio (Palumbo, 2021), ad esempio in relazione ai criteri premianti inclusi nei Criteri Ambientali Minimi per l'Edilizia.

Lo studio riportato in questo capitolo, mette in evidenza i principali impatti legati alla produzione di lastre in pietra arenaria, e illustra l'approccio adottato in particolare nella raccolta e nell'analisi dei dati nelle imprese, che si sono rese disponibili a contribuire alla BDI-LCA comprendendo l'importanza della metodologia LCA come strumento imprescindibile nelle valutazioni di sostenibilità.

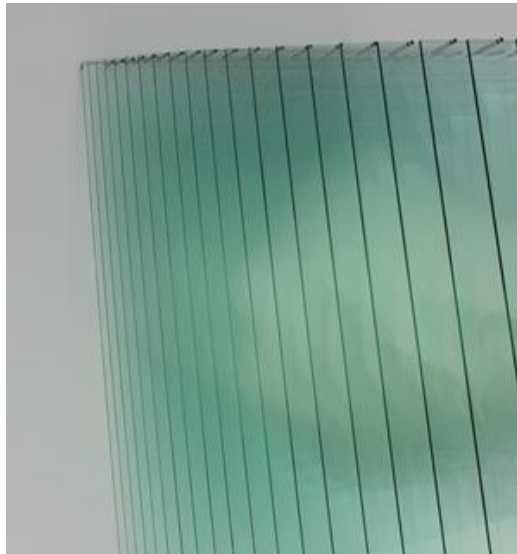
Il report di LCA di dettaglio (disponibile sul sito di Arcadia) rappresenta un approfondimento complessivo importante sulle filiere delle pietre ornamentali, anche in un'ottica più ampia di valutazione delle potenzialità di miglioramento lungo la filiera e di valorizzazione di questi materiali nell'ambito del settore edilizia costruzioni.

Bibliografia

- Bianco B, Glengini G.A., 2019, Life Cycle Inventory of technologies for stone quarrying, cutting and finishing: Contribution to fill data gaps Life Cycle datasets of the Italian stone production chain, *Journal of Cleaner Production*, Volume 231, 10 September 2019, Pages 419-427.
- Confindustria Marmomacchine/Associazione Italiana Marmomacchine (2023). Directory 2023. viewed 30 Mar 2023, <https://www.assomarmomacchine.com/news/3d-flip-book/directory-2023>.
- Commission Decision (EU) 2021/476 of 16 March 2021 establishing the EU Ecolabel criteria for hard covering products (notified under document C (2021) 1579). Text with EEA relevance. GU CEE n. L 26/1 del 28 L99/37 del 22 marzo 2021.
- Donatello S., Garbarino E., Sanfelix J., Fernandez Carretero A. e Wolf O., 2021. EU Ecolabel criteria for hard covering products. Final Technical Report. Criteria and supporting rationale, <https://doi.org/10.2760/080528>.
- Decreto MiTE 23 giugno 2022. Criteri ambientali minimi per l'affidamento del servizio di progettazione di interventi edilizi, per l'affidamento dei lavori per interventi edilizi e per l'affidamento congiunto di progettazione e lavori per interventi edilizi. GU Serie Generale n.183 del 06 agosto 2022.
- ILCD, 2010. International Life Cycle Data system – Specific guide for Life Cycle Inventory (LCI) data sets. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-Specific-guide-for-LCI-12March2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf>
- Palumbo, E, 2018. LCA Natural Stone. Strumenti e indicatori per la progettazione sostenibile di involucri litici secondo un approccio Life Cycle, p. 1-306, Firenze: Didapress, ISBN: 978-88-3338-025-4.
- Palumbo, E, 2021, LCA nei Green Building Rating Systems DGNB e Level(s) in LCA in edilizia. Ambiti applicativi e orientamenti futuri della metodologia Life Cycle Assessment nel settore delle costruzioni - Politecnica University Press- The Plan (libro open access).
- Prikryl, R, 2015. How reliable are rock mechanical parameters for the estimation of durability of natural stone, EUROCK 2015 and 64th Geomechanics Colloquium, Salzburg (Austria), 7-10 October
- Scalbi S, Buttol P, Rinaldi C, 2021. La banca dati italiana LCA: BDI-LCA. Proceedings of "X Convegno dell'Associazione Rete Italiana LCA - XV Convegno della Rete Italiana LCA. INNOVAZIONE E CIRCOLARITÀ" Il contributo del Life Cycle Thinking nel Green Deal per la neutralità climatica". 22 - 24/9/21-Reggio Calabria. Associazione Rete Italiana LCA (pp. 59-66). ISBN: 979-12-2100-456-4.
- UNI EN 15804:2012+A2:2019 Sostenibilità delle opere di costruzione - Dichiarazioni ambientali di prodotto - UNI EN 15978:2011 Sostenibilità delle opere di costruzione - Valutazione delle prestazioni ambientali degli edifici.
- Wernet B., Bauer G., Steubing C., Reinhard B., Moreno-Ruiz J., and Weidema E., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *Int J Life Cycle Assess* 21, 1218–1230 (2016). <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>
- Zampori e Pant, LU, 2019. Zampori, L. and Pant, R., Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method, EUR 29682 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-00654-1, doi:10.2760/424613, JRC115959.



Studio LCA di filiera per la produzione di lastre e sistemi in vetro per infissi e serramenti



Autori:

Anna Dalla Valle¹, Monica Lavagna¹, Andrea Campioli¹, Valentina Fantin²

¹ Politecnico di Milano, *Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, LifeCycleTEAM*

² ENEA, *Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento al cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali*

Revisore critica esterna - Ecoinnovazione S.r.l.

Introduzione

Tra i settori prioritari in ambito di sostenibilità ambientale, l'industria del vetro riveste un ruolo cruciale, in quanto materiale ampiamente adoperato nei più diversi settori e per le più svariate applicazioni. In particolare, la produzione di vetro piano è destinata per l'80% al settore edilizio, per il 15% al settore automobilistico e per il 5% al settore solare (*Glass for Europe*, 2023). I prodotti in vetro derivano dal vetro piano, convenzionalmente chiamato "vetro *float*", dal nome del processo di produzione (bagno *float*). A livello europeo, la produzione di vetro piano supera 10 milioni di tonnellate, di cui il 12% prodotto sul territorio italiano, grazie alla presenza di sei linee *float* afferenti a diversi gruppi multinazionali (Assovetro, 2023) e alla distribuzione capillare di aziende volte alla successiva lavorazione e trasformazione del vetro. Lastre e sistemi in vetro costituiscono un materiale imprescindibile per il settore delle costruzioni, nello specifico per la realizzazione di infissi e serramenti.

A livello ambientale, tuttavia, la produzione di vetro è un'attività altamente energivora in quanto richiede per i processi industriali di fusione e formatura l'impiego di forni ad elevate temperature con attività continue e costanti tutto l'anno. La principale fonte di energia per la produzione di vetro piano in Italia è rappresentata dall'energia termica, poiché ad oggi non è disponibile alcuna tecnologia in grado di far funzionare i forni *float* a sola elettricità e gli impianti più performanti sono alimentati da un mix di combustibili fossili ed elettricità (Scalet et al., 2013). I consumi idrici dell'industria del vetro rappresentano un altro aspetto significativo in materia ambientale, in quanto l'acqua viene impiegata in svariate fasi, soprattutto per il lavaggio del vetro e il raffreddamento sia degli impianti sia degli scarti di produzione, per consentirne il trasporto. Inoltre, particolarmente critiche sono le emissioni in atmosfera, che derivano dal processo di fusione. La produzione di rifiuti è invece limitata: i principali rifiuti non pericolosi sono gli imballaggi, e il rottame di vetro viene comunemente recuperato e reimmesso nel processo produttivo. In pratica, mentre il rottame interno (proveniente dalla produzione di vetro) viene nella prassi comune reimmesso direttamente nei processi di produzione (Scalet et al., 2013), diviene più complesso recuperare il rottame esterno, sia in termini di raccolta sia di qualità, per la produzione del vetro *float* (Vieitez et al., 2011). Di conseguenza, seppur in quantità limitata a causa della ridotta disponibilità, vengono recuperati i rifiuti di vetro provenienti dalla trasformazione delle lastre di vetro e da prodotti non consegnati al cliente finale (rottame *pre-consumer*). Una minima parte deriva invece da ristrutturazioni e demolizioni edilizie (rottame *post-consumer*), in quanto ordinariamente non supera i test di qualità definiti per la produzione di vetro *float*.

In questo contesto, gli Acquisti Verdi nella Pubblica Amministrazione – *Green Public Procurement* (GPP) – nonché la serie di strumenti normativi introdotti dalle politiche comunitarie in edilizia, interessano in modo particolare il vetro piano, quale elemento base per la realizzazione di serramenti. Tuttavia, non essendoci criteri CAM specifici per prodotti in vetro, essi concorrono a una serie di criteri comuni a tutti i componenti edilizi. Si tratta in particolare del requisito di disassemblabilità (pari ad almeno il 50% in peso dei componenti edilizi) e del contenuto di riciclato (pari ad almeno il 15% in peso sul totale dei materiali utilizzati).

Per rafforzare la competitività sul mercato e in ottica di sostenibilità, le aziende sono sempre più dotate di certificazioni EPD (Dalla Valle et al., 2022). Inoltre, allargando il campo di indagine ai serramenti (comprensivi di lastre di vetro e profili di supporto), sono attualmente disponibili vari *Ecolabel* specifici per i sistemi-finestra (DG Environment, 2010).

Alla luce di ciò, è fondamentale definire *benchmark* di riferimento e dati di inventario a livello nazionale per l'effettuazione di studi LCA dell'industria del vetro in Italia. Il presente capitolo descrive lo studio LCA di filiera sulla "Produzione di lastre e sistemi in vetro per infissi e serramenti", sviluppato in accordo con la metodologia del progetto Arcadia per gli studi di filiera ed in collaborazione con associazioni, esperti ed imprese del settore.

Lo studio LCA di filiera è stato sviluppato in accordo alle norme ISO 14040 e 14044 (UNI EN ISO; 2021a; UNI EN ISO; 2021b) e ha permesso di sviluppare differenti *dataset* in formato ILCD (Dalla Valle et al., 2023) inclusi nella Banca Dati Italia LCA (<https://www.arcadia.enea.it/la-banca-dati.html>). Nell'ambito del progetto Arcadia, il gruppo di ricerca LifeCycleTEAM del Politecnico di Milano si è occupato anche dello studio LCA della filiera PVC per infissi e serramenti (Giorgi et al., 2023). Dall'unione del prodotto rappresentativo "telaio PVC" con i prodotti rappresentativi "vetrocamera" è stato possibile definire il profilo ambientale delle principali soluzioni di finestra completa prodotte in Italia.

Gruppo di Lavoro di Filiera

Lo studio di filiera, volto alla creazione dei *dataset* LCA rappresentativi a scala nazionale dei prodotti in vetro, è stato condotto da un gruppo di lavoro dedicato, che vede il coinvolgimento dei principali gruppi di interesse:

- ENEA (V. Fantin), ha supportato e coordinato la realizzazione dello studio LCA di filiera, con il supporto di Ecoinnovazione S.r.l. per la revisione esterna indipendente;
- il gruppo di ricerca LifeCycleTEAM del Politecnico di Milano (A. Dalla Valle, M. Lavagna, A. Campioli), Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito ha effettuato lo studio LCA di filiera;
- i produttori leader di settore sul territorio italiano, quali Pilkington e Saint-Gobain, con la partecipazione attiva di direttori commerciali, per l'individuazione dei prodotti rappresentativi, e di esperti di gestione ambientale e controllo qualità, per l'approfondimento delle specifiche tecniche e la definizione dei dati di inventario. In aggiunta, sono state consultate una serie di vetrerie attive sul territorio, per sottoporre a verifica e validare i valori come rappresentativi del settore lungo la catena produttiva a scala nazionale.

Obiettivi e campo di applicazione dello studio

L'obiettivo dello studio LCA di filiera qui presentato è la realizzazione di diversi *dataset* per la produzione di lastre e sistemi in vetro per infissi e serramenti (di seguito elencati), da integrare nella Banca Dati Italiana LCA di Arcadia. Fine ultimo è consentire ai possibili utenti, quali pubblica amministrazione, imprese, associazioni di categoria, progettisti, ONG e università/ricerca) di utilizzarli per studi LCA e valutazioni di sostenibilità. Tali *dataset* sono accompagnati dal relativo report tecnico dello studio LCA di filiera, disponibile sul sito di Arcadia (<https://www.arcadia.enea.it/settori-di-intervento/edilizia.html>). In dettaglio, i *dataset* elaborati per la banca dati Arcadia e resi disponibili sono i seguenti (<https://bancadatiitalianalca.enea.it/Node/>):

- *Float Glass*, ossia vetro *float*;
- *Coated Float Glass*, ossia vetro basso-emissivo;
- *Laminated Safety Glass*, ossia vetro stratificato;
- *Insulated Glass Unit, double glazing, float-laminated*, ossia vetrocamera doppio vetro con lastra esterna in vetro *float* ed interna in vetro stratificato;
- *Insulated Glass Unit, double glazing, coated-laminated*, ossia vetrocamera doppio vetro con lastra esterna in vetro basso-emissivo ed interna in vetro stratificato;
- *Insulated Glass Unit, double glazing, laminated-laminated*, ossia vetrocamera doppio vetro con lastra esterna ed interna in vetro stratificato;
- *Insulated Glass Unit, triple glazing, float-float-laminated*, ossia vetrocamera triplo vetro con lastra esterna e centrale in vetro *float* e lastra interna in vetro stratificato;
- *Insulated Glass Unit, triple glazing, laminated-float-laminated*, ossia vetrocamera triplo vetro con lastra esterna ed interna in vetro stratificato e lastra centrale in vetro *float*.

Oggetto dello studio LCA sono pertanto un totale di otto prodotti in vetro piano, sotto forma sia di lastre sia di sistemi vetrocamera, destinati alla realizzazione di infissi e serramenti e ritenuti rappresentativi per la filiera vetro nazionale, in quanto tipologie di prodotto più vendute ed utilizzate nel settore delle costruzioni in Italia (Tabella 6). In conformità con le *Product Categories Rules* per i prodotti in vetro e con le relative certificazioni EPD oggi disponibili, l'unità funzionale (UF) è 1 m² di vetro, considerando lastre e sistemi di diverso spessore a seconda del prodotto in oggetto (Tabella 6).

Prodotti rappresentativi	Unità Funzionale	Spessore	Peso
Vetro <i>float</i>	1 m ²	4 mm	10 kg
Vetro basso-emissivo	1 m ²	4 mm	10 kg
Vetro stratificato	1 m ²	6 mm (33.1)	15,4 kg
Vetrocamera doppio vetro con lastre <i>float</i> -stratificato	1 m ²	26 mm (4-16-33.1)	26,3 kg
Vetrocamera doppio vetro con lastre basso emissivo-stratificato	1 m ²	26 mm (4-16-33.1)	26,3 kg
Vetrocamera doppio vetro con lastre stratificato-stratificato	1 m ²	28 mm (33.1-16-33.1)	31,7 kg
Vetrocamera triplo vetro con lastre <i>float</i> - <i>float</i> -stratificato	1 m ²	42 mm (4-14-4-14-33.1)	36,9 kg
Vetrocamera triplo vetro con lastre stratificato- <i>float</i> -stratificato	1 m ²	44 mm (33.1-14-4-14-33.1)	42,3 kg

Tabella 6. Prodotti in vetro rappresentativi di filiera.

I confini del sistema (Figura 19) sono dalla culla al cancello (analisi *cradle-to-gate*), ossia dall'estrazione delle materie prime all'uscita dallo stabilimento produttivo, considerando sia il processo di produzione del vetro *float* (prodotto base) sia le ulteriori lavorazioni necessarie per la realizzazione di vetri basso-emissivi, stratificati e vetrocamera. Per ogni fase del processo, si considerano quindi come flussi in input, le materie prime impiegate nel prodotto, le materie ausiliare integrate nella produzione (es. stagno) e contenute negli imballaggi, il relativo trasporto presso lo stabilimento produttivo, i consumi energetici e idrici. Invece, i flussi in output comprendono le emissioni in aria, in acqua e al suolo, includendo i rifiuti solidi generati durante la produzione e il relativo trasporto.

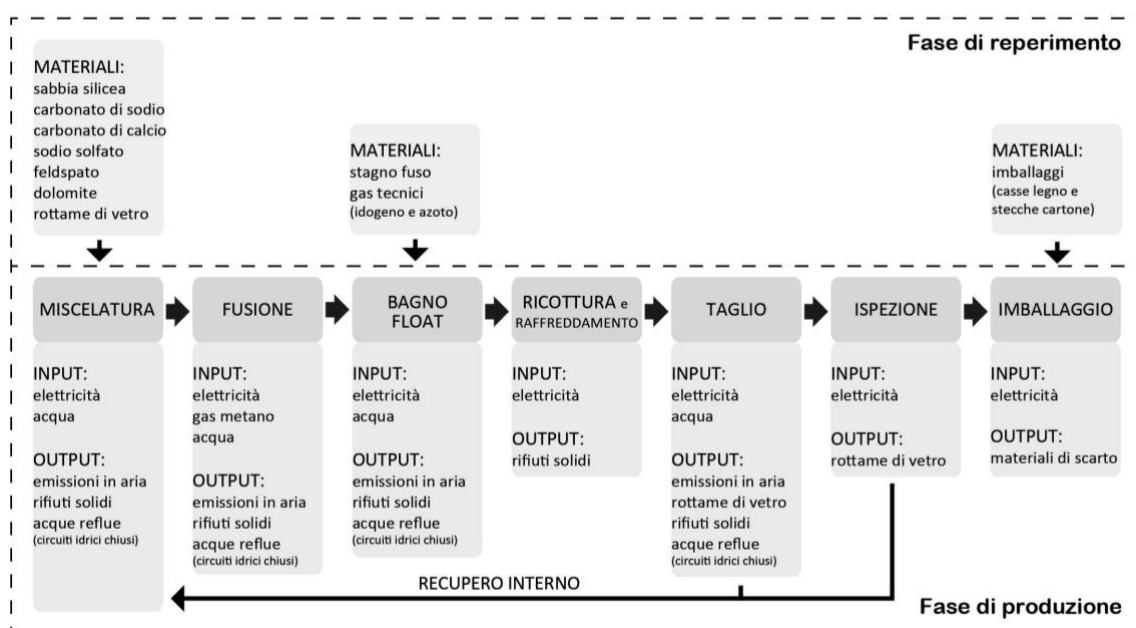


Figura 19. Confini di sistema e diagramma di flusso del processo di produzione del vetro float.

È esclusa dai confini del sistema la produzione di macchinari ed infrastrutture (e i relativi rifiuti di manutenzione), con l'eccezione di quelli già contenuti nei *dataset* di Ecoinvent 3.6 (Wernet et al., 2016) utilizzati per modellare i dati di *background*. Per la fase di valutazione degli impatti è stato applicato il metodo di valutazione EF 3.0 (Zampori e Pant, 2019).

Analisi di inventario

Per l'inventario dei prodotti in vetro, in ottica di rappresentatività geografica, temporale e tecnologica dei processi, si è fatto riferimento a tecnologie medie e ai più recenti dati disponibili dell'industria del vetro a livello nazionale. Sono stati quindi raccolti dati primari presso le aziende leader di settore in Italia, solo ove necessario, ricorrendo a dati secondari da letteratura. In particolare, fonti primarie di inventario sono utilizzate per la modellizzazione del vetro *float* e del vetro stratificato, reperendo dagli operatori sul campo dati medi degli ultimi tre anni consecutivi (2019-2020-2021). Alcune fonti secondarie sono state utilizzate per le successive lavorazioni (dati sensibili non condivisi/disponibili), per la modellazione dei processi di coatizzazione e assemblaggio in sistemi vetrocamera.

La fase di produzione del vetro *float* (prodotto base) è stata modellata utilizzando dati primari provenienti dalle aziende coinvolte nel GdL, i cui dati forniti per 1 kg di prodotto sono stati convertiti per 1 m² di vetro, in accordo con l'UF dello studio, considerando lastre di spessore 4 mm e peso 10 kg/m². Come risorse in input sono incluse le materie prime impiegate per la miscela vetrificabile, ossia: sabbia silicea, carbonato di sodio, dolomite, carbonato di calcio, feldspato e sodio solfato. A differenza della produzione standard da letteratura, è interessante notare la sostituzione dell'ossido di calcio con il carbonato di calcio, componente dichiarato dai produttori, e l'uso del rottame di vetro che costituisce circa il 15% delle risorse in input. Tuttavia, dato che per garantire le prestazioni e l'elevato livello di trasparenza richiesto, si tratta di recupero interno non viene considerato nella modellizzazione come riciclo, dal momento che rimane entro i confini di stabilimento (rispetto alla media annuale il vetro di recupero in input corrisponde esattamente al rottame di vetro in output).

I materiali ausiliari impiegati nella produzione sono lo stagno per il bagno *float*, unitamente a idrogeno e azoto liquido per evitarne l'ossidazione (tutti i dati di processo sono stati calcolati direttamente dalle aziende in relazione alle tonnellate di vetro prodotte). Invece, i materiali di imballaggio utilizzati per lo stoccaggio e distribuzione delle lastre di vetro comprendono casse di legno e stecche di cartone e sono stati calcolati come media degli imballi usati complessivamente rispetto alla produzione di vetro *float* (allocazione per massa effettuata dai produttori coinvolti). I consumi di acqua impiegata per i processi di raffreddamento e lavaggio sono considerati alimentati da acquedotto, in quanto ritenuta rappresentativa della situazione italiana media. Le fonti energetiche impiegate per la produzione *float* sono elettricità a media tensione e gas naturale ad alta pressione, in generale associati per il 90% alla fase di fusione. Per il vetro *float*, così come per tutti gli altri prodotti rappresentativi in vetro, l'energia elettrica è considerata proveniente interamente da rete nazionale, utilizzando per la sua produzione il mix italiano.

Per quanto riguarda i trasporti sono state considerate le tonnellate di materiale per le rispettive distanze dal fornitore all'impianto di produzione (tkm). Per le materie ausiliarie, i trasporti sono compresi nel *dataset* di riferimento, esclusi gli imballaggi per cui sono considerati trascurabili. Inoltre, sono inclusi i trasporti via gomma relativi a tutti i rifiuti in output del sistema.

I flussi in output del vetro *float* comprendono le emissioni dirette in aria misurate presso gli stabilimenti produttivi, e i rifiuti. Per questi ultimi, sono stati inclusi i rifiuti solidi urbani, i rifiuti speciali inviati a smaltimento, i rifiuti di carta e legno derivati dagli imballaggi e lo scarico di acque reflue derivanti dalla

produzione di vetro. Come scenario di smaltimento è stato considerato l'incenerimento, eccetto per i rifiuti speciali che si prevedono smaltiti in discarica.

Per quanto riguarda i trasporti delle lastre *float* destinate alle successive lavorazioni, si è assunta una distanza media di 25 km per i processi di coatizzazione e stratifica, mentre una distanza di 100 km per le operazioni di assemblaggio in vetrocamera. Infine, per i trasporti dei rifiuti, è stata assunta una distanza pari a 20 km per i rifiuti in discarica e 160 km per i rifiuti destinati ad incenerimento (Stichnothe e Azapagic, 2013).

Valutazione degli impatti ed interpretazione dei risultati

I risultati di caratterizzazione relativi alla produzione di 1 m² di prodotto in vetro sono messi in evidenza per singole lastre di vetro, sottoposte alle diverse lavorazioni: vetro *float*, basso-emissivo e vetro stratificato (Tabella 7) e per i sistemi vetrocamera sia doppio vetro sia triplo vetro, ottenuti dall'assemblaggio di diverse combinazioni di lastre (Tabella 8). In aggiunta, viene mostrato l'incremento percentuale (%) delle diverse lavorazioni rispetto al prodotto base: nel primo caso, costituito dal vetro *float*, mentre nel secondo caso, dalla vetrocamera doppio vetro con lastre *float*-stratificato.

Categoria di impatto	Unità	Vetro <i>float</i>	Vetro basso-emissivo		Vetro stratificato	
Climate change	kg CO ₂ eq	1,21E+01	1,25E+01	4%	2,04E+01	69%
Ozone depletion	kg CFC11 eq	1,85E-06	1,91E-06	3%	3,46E-06	87%
Ionising radiation	kBq U-235 eq	5,10E-01	5,69E-01	12%	1,02E+00	100%
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	6,04E-02	6,20E-02	3%	9,69E-02	61%
Particulate matter	disease inc.	3,34E-07	3,53E-07	6%	5,79E-07	73%
Human toxicity, non-cancer	CTUh	8,82E-08	9,28E-08	5%	1,76E-07	100%
Human toxicity, cancer	CTUh	2,51E-09	2,80E-09	12%	5,17E-09	106%
Acidification	mol H ⁺ eq	3,94E-02	4,38E-02	11%	7,00E-02	78%
Eutrophication, freshwater	kg P eq	1,38E-03	1,50E-03	9%	2,78E-03	102%
Eutrophication, marine	kg N eq	2,16E-02	2,21E-02	2%	3,45E-02	60%
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	1,45E-01	1,50E-01	4%	2,40E-01	65%
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	1,56E+02	1,65E+02	5%	2,74E+02	75%
Land use	Pt	5,20E+01	6,64E+01	28%	1,21E+02	132%
Water use	m ³ depriv.	2,79E+00	3,02E+00	8%	5,83E+00	109%
Resource use, fossils	MJ	1,53E+02	1,60E+02	4%	2,71E+02	77%
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	8,95E-05	9,32E-05	4%	1,69E-04	89%

Tabella 7. Risultati di caratterizzazione relativi alla produzione di 1 m² di lastre di vetro.

Categoria di impatto	Unità	Vetrocamera float-stratificato	Vetrocamera basso emissivo-stratificato		Vetrocamera stratificato-stratificato		Vetrocamera float-float-stratificato		Vetrocamera stratificato-float-stratificato	
Climate change	kg CO2 eq	4,02E+01	4,06E+01	1%	4,89E+01	22%	5,70E+01	42%	6,57E+01	64%
Ozone depletion	kg CFC11 eq	6,06E-06	6,12E-06	1%	7,73E-06	28%	8,31E-06	37%	9,98E-06	65%
Ionising radiation	kBq U-235 eq	2,03E+00	2,09E+00	3%	2,58E+00	27%	2,85E+00	40%	3,40E+00	68%
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	1,82E-01	1,84E-01	1%	2,20E-01	21%	2,58E-01	42%	2,96E-01	62%
Particulate matter	disease inc.	1,40E-06	1,42E-06	1%	1,66E-06	18%	2,04E-06	46%	2,30E-06	64%
Human toxicity, non-cancer	CTUh	4,70E-07	4,74E-07	1%	5,62E-07	20%	6,83E-07	45%	7,75E-07	65%
Human toxicity, cancer	CTUh	2,11E-08	2,14E-08	1%	2,39E-08	13%	3,15E-08	49%	3,43E-08	63%
Acidification	mol H+ eq	1,57E-01	1,62E-01	3%	1,90E-01	21%	2,27E-01	44%	2,59E-01	65%
Eutrophication, freshwater	kg P eq	6,74E-03	6,87E-03	2%	8,23E-03	22%	9,78E-03	45%	1,13E-02	67%
Eutrophication, marine	kg N eq	6,44E-02	6,49E-02	1%	7,76E-02	21%	9,11E-02	41%	1,04E-01	62%
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	4,72E-01	4,78E-01	1%	5,71E-01	21%	6,70E-01	42%	7,69E-01	63%
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	8,19E+02	8,27E+02	1%	9,41E+02	15%	1,19E+03	45%	1,31E+03	60%
Land use	Pt	2,34E+02	2,49E+02	6%	3,13E+02	33%	3,15E+02	35%	3,94E+02	68%
Water use	m3 depriv.	1,12E+01	1,15E+01	2%	1,45E+01	29%	1,55E+01	38%	1,88E+01	67%
Resource use, fossils	MJ	5,14E+02	5,21E+02	1%	6,38E+02	24%	7,22E+02	40%	8,46E+02	64%
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	4,13E-04	4,16E-04	1%	4,97E-04	20%	5,81E-04	41%	6,65E-04	61%

Tabella 8. Risultati di caratterizzazione relativi alla produzione di 1 m² di sistemi vetrocamera.

L'analisi dei risultati derivanti dalla normalizzazione (Figura 20) mostra come le categorie di impatto più rilevanti per tutti i prodotti in vetro siano rispettivamente: *Ecotoxicity freshwater* (23,7% per vetro float), *Resource use fossils* (15,2% per vetro float), *Climate change* (9,7% per vetro float), *Photochemical ozone formation* (9,6% per vetro float) e *Resource use minerals and metals* (9,1% per vetro float). Infatti, sia per le diverse lavorazioni delle lastre di vetro sia per le diverse soluzioni di vetrocamera, i loro contributi cumulativi si attestano intorno al 67% del totale degli impatti.

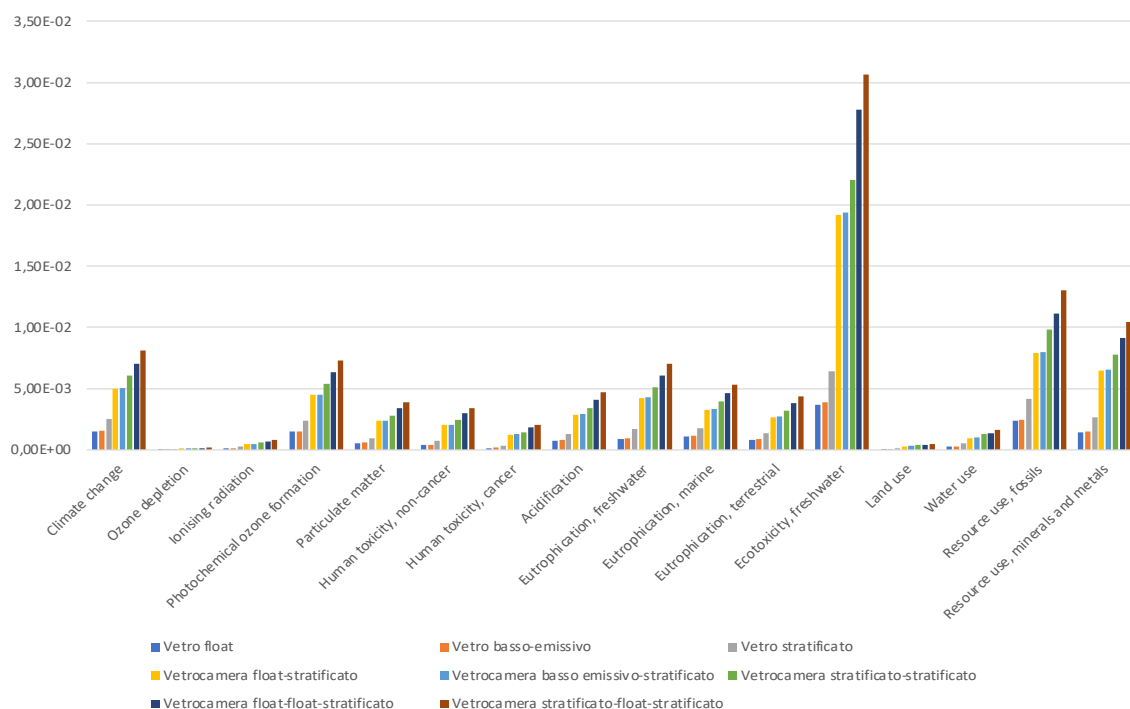


Figura 20. Risultati di normalizzazione per la produzione di prodotti in vetro.

Esaminando nel dettaglio i risultati di normalizzazione del vetro *float* (prodotto base), la fase di reperimento dei materiali per il vetro *float* risulta preponderante per le categorie *Ecotoxicity freshwater* (88%) e *Resource use minerals and metals* (96%). Invece, la fase di produzione è dominante per le categorie *Climate change* (77%), *Photochemical ozone formation* (80%) e *Resource use fossils* (76%), principalmente a causa dell'alto impatto di fusione.

Per quanto riguarda i processi più rilevanti per tutte le categorie più rilevanti (Figura 21), si può notare come il contributo di imballaggi, consumi idrici e rifiuti possa essere considerato trascurabile (<1%) nell'ambito della produzione del vetro *float*. Per la categoria *Climate change*, i principali impatti derivano essenzialmente dai consumi energetici in fase di manifattura (77%), seguiti da quelli imputati al reperimento dei materiali per la miscela vetrificabile (19%), comprensivi di sabbia silicea, carbonato di sodio, dolomite, carbonato di calcio, feldspato, sodio solfato e relativi trasporti in input. In misura minore incidono poi i materiali impiegati per il bagno *float* (4%), che includono lo stagno e i materiali ancillari, quali idrogeno e azoto liquido, oltre ai relativi trasporti. In *Photochemical ozone formation*, i consumi energetici ammontano all'80% degli impatti totali, in cui si segnala anche il contributo della miscela vetrificabile (18%). L'approvvigionamento della miscela vetrificabile appare invece il contributo più rilevante (83%) nella categoria *Ecotoxicity freshwater*, seguito dai consumi energetici (12%) e bagno di stagno (4%). La miscela vetrificabile si conferma essere il contributo principale (79%) in *Resource use minerals and metals*, in cui il bagno di stagno risulta il secondo fattore in termini di impatto (17%) e i consumi energetici il terzo (4%). Infine, i maggiori impatti della categoria *Resource use fossils* sono attribuiti rispettivamente ai consumi energetici (76%), comprensivi di elettricità a medio voltaggio, gas naturale e relative emissioni in aria, susseguiti da miscela vetrificabile (16%) e bagno di stagno (8%).

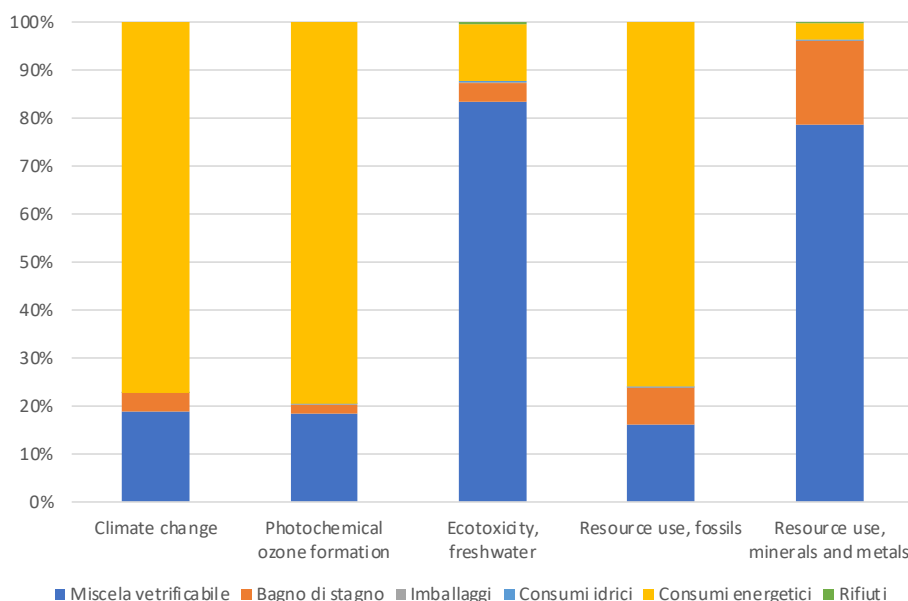


Figura 21. Contributi percentuali della produzione di 1 m² di vetro float, per le categorie di impatto più rilevanti.

Conclusioni

Dallo studio LCA di filiera relativo alla produzione di lastre e sistemi in vetro per infissi e serramenti sono stati sviluppati otto *dataset* rappresentativi dei prodotti in vetro più diffusi sul territorio nazionale, disponibili nella Banca Dati LCA del progetto Arcadia (<https://bancadatiitalianalca.enea.it/Node/>). Lo studio è stato svolto sulla base di dati relativi alla filiera del vetro in Italia, ricorrendo a dati primari raccolti presso le imprese coinvolte nel GdL, ed eventualmente, a dati di letteratura e/o di settore rappresentativi della filiera. Esso descrive lo stato dell'arte di risorse, tecnologie e processi comunemente impiegati nell'ambito dell'industria del vetro, essenziale per sviluppare strategie e dimostrare azioni a supporto dell'eco-innovazione. Fotografando infatti le soluzioni standard della prassi corrente, intende stimolare, nell'ambito del sistema produttivo, la valutazione LCA delle pratiche virtuose e, nell'ambito degli appalti pubblici, la promozione di criteri premianti da applicare ai bandi di acquisto del settore delle costruzioni per quanto riguarda i prodotti in vetro.

Numerose sono infatti le iniziative e azioni messe oggi in campo per traggare la sostenibilità ambientale e contribuire alla transizione verso un'economia circolare dell'industria del vetro, come ad esempio interventi di efficientamento energetico e soluzioni specifiche per il settore del vetro (Martini et al., 2021), così come l'utilizzo sempre crescente di energia elettrica da fonti rinnovabili. Per ottimizzare i consumi idrici, i produttori si stanno dotando di circuiti idrici chiusi, installando sistemi mirati alla riduzione delle perdite e al riciclo delle acque di pulizia e raffreddamento. Anche in materia di emissioni, le aziende hanno in corso piani di miglioramento mirati ad ottenere importanti riduzioni.

Per concludere, le opportunità offerte dalle caratteristiche intrinseche del vetro – quale materiale permanente – possono aprire a nuove prospettive, scenari, processi, tecnologie e, in generale, sfide della transizione verso un'economia circolare. Molteplici sono infatti i benefici connessi all'impiego di rottame di vetro nella composizione della miscela vetrificabile, principalmente orientati al risparmio energetico. Esso consente infatti l'abbassamento della temperatura necessaria alla fusione, riducendo la quantità di combustibile e la sostituzione di materie prime ad alto contenuto energetico, limitando quindi lo sfruttamento delle cave.

La valutazione LCA riveste un ruolo chiave per evidenziare l'entità delle modificazioni ambientali che si generano a seguito dei rilasci nell'ambiente e del consumo di risorse, diventando sempre più uno strumento di supporto decisionale. A tal fine, la definizione di parametri di riferimento (*benchmark*), sviluppati nel presente studio LCA di filiera e disponibili nella BD-LCA di Arcadia, apre la strada ad innovazioni future nell'industria del vetro nel territorio nazionale.

Bibliografia

Assovetro, 2023. Dati di settore: vetro piano.

Dalla Valle et al., 2022. Insights into LCA and EPD environmental impacts data related to glass products for windows, in: Barucco et al. (Eds.), Antifragile Glass, Venezia, 18 Nov.

Dalla Valle A., Lavagna M., Campioli A., 2023. Produzione di lastre e sistemi in vetro per infissi e serramenti. Internal report ARCADIA Project. Background datasets from Ecoinvent 3.6 database cut-off were used for the LCA study.

DG Environment, 2010. Green Public Procurement. Windows Technical Background Report: Windows, Glazed Doors and Skylights, Report for the European Commission, Brussels.

Giorgi S., Lavagna M., Campioli A., 2023. Produzione di telai in PVC per infissi e serramenti e produzione di finestre in PVC con vetrocamera a doppio o triplo vetro. Internal report ARCADIA Project. Background datasets from Ecoinvent 3.6 database cut-off were used for the LCA study.

Glass for Europe, 2023. Key data: Flat glass production in the EU.

Martini et al., 2021. Quaderni dell'efficienza energetica: vetro. Report Enea.

Scalet et al., 2013. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass, JRC Reference Report, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

Stichnothe e Azapagic, 2013. Life cycle assessment of recycling PVC window frames, Resources, Conservation and Recycling 71, 40-47.

Vieitez et al., 2011. End-of-Waste Criteria for Glass Cullet: Technical Proposals, JRC Scientific and Technical Reports, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

Wernet et al., 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment, 21, 1218-1230.

Zampori e Pant, 2019. Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method, EUR 29682 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg.



Studio LCA di filiera per la produzione di telai in PVC per infissi e serramenti e per la produzione di finestre in PVC con vetrocamera a doppio o triplo vetro



Autori:

Serena Giorgi¹, Monica Lavagna¹, Andrea Campioli¹, Valentina Fantin²

¹ Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, LifeCycleTEAM

² ENEA, Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento al cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali

Revisione critica esterna: Ecoinnovazione S.r.l.

Introduzione

Il settore edilizio sta dimostrando un crescente interesse per gli infissi in PVC, che coprono circa il 42% del mercato totale dei serramenti in Italia, rispetto alle altre opzioni materiche (PVC Forum Italia, 2022).

La produzione di PVC in Italia è cessata a partire dal 2010, a seguito di un referendum sul cloro e di un susseguirsi di acquisizioni di industrie italiane da parte di aziende straniere (Trifirò, 2015). Dal 2010, quindi, l'Italia importa PVC dall'estero, in particolare da altre nazioni europee.

Tuttavia, in Italia sono ancora attive diverse aziende chimiche per la produzione di additivi per PVC e aziende specialistiche nella produzione di *compound*, ovvero granulati di PVC rigido (PVC-U, quello utilizzato per i serramenti) o flessibile che sono utilizzati per produrre i manufatti finali. Inoltre, in Italia è fortemente presente anche l'industria manifatturiera di trasformazione delle plastiche in PVC, in particolare per la produzione di serramenti, persiane, avvolgibili, tubi, raccordi e valvole, pavimentazione vinilica e film. In Italia, la filiera di produzione di serramenti in PVC è molto frammentata, ossia poche aziende riescono a gestire l'intera filiera dalla fase di *compound*, all'estrusione, all'assemblaggio, fino alla posa in opera.

In Italia, nel 2021, sono stati immessi sul mercato oltre 14,2 milioni di metri lineari di telaio per finestre in PVC. Le unità serramento in PVC prodotte in Italia nel 2021 sono oltre 2,3 milioni quasi equamente suddivise tra profili bianchi e pellicolati. Considerando un peso medio di 18 kg per il telaio in PVC, la statistica dichiara che sono state prodotte 42.660 tonnellate (SiPVC, 2021). In aggiunta ai serramenti prodotti in Italia, si conteggiano anche le unità finestra importate dall'estero, stimabili intorno alle 900.000 unità. Ne consegue quindi che in Italia, nel 2021, in totale si arriva a circa 3,2 milioni unità di serramento in PVC, di cui il 72% prodotte in Italia e il 28% importate dall'estero (SiPVC, 2021).

I serramenti in PVC contribuiscono al rispetto dei Criteri Ambientali Minimi (CAM) in edilizia riguardanti i "2.5.11 Serramenti ed oscuranti in PVC" e l'uso di materie plastiche. In particolare i CAM richiedono per serramenti ed oscuranti in PVC un contenuto di materie riciclate oppure recuperate oppure di sottoprodotti di almeno il 20% sul peso del prodotto, inteso come somma delle tre frazioni.

La filiera italiana ed europea del PVC ha dimostrato attenzione verso gli aspetti di sostenibilità, impegnandosi in progetti mirati al miglioramento del profilo ambientale dei prodotti, ad esempio (Ciotti, 2012): l'utilizzo di additivi sempre più sostenibili, l'abolizione dell'utilizzo di stabilizzanti al piombo e co-stabilizzante al cadmio, la riduzione di rifiuti inviati a discarica e riciclo meccanico dei sottoprodotti e del fine vita. Particolarmente discusso è il tema dell'aumento del recupero e riciclo del PVC a fine vita. L'ultimo bilancio di VinylPlus mostra come il riciclo di rifiuti in PVC ha raggiunto il volume rilevante di 810.775 tonnellate nel 2021 (Vinylplus, 2021). In totale, nel 2021, nell'Unione Europea (incluso Svezia) è stato riciclato nell'ambito di VinylPlus circa il 44% del totale del riciclo di PVC (Recovynl, 2021; 2022).

Il presente contributo descrive lo studio LCA di filiera della produzione di telai in PVC per infissi e serramenti e produzione di finestre in PVC con vetrocamera a doppio o triplo vetro (Giorgi et al., 2023). Ai fini dello studio LCA e della definizione di *dataset* per la banca dati Arcadia è stato definito un prodotto medio di telaio in PVC rappresentativo della filiera nazionale, partendo da un più ampio campione di soluzioni, ricavate da EPD di prodotto e studi LCA a letteratura, calcolando, per tutti i componenti, pesi e dimensioni, i quali sono stati avallati dal parere di alcune aziende e dall'Associazione PVC Forum Italia. Inoltre, l'unione del prodotto rappresentativo "telaio PVC" ai prodotti rappresentativi "vetrocamera" ha permesso di definire il profilo ambientale delle principali soluzioni di finestra completa prodotte in Italia.

Lo studio LCA condotto per il progetto Arcadia risulta importante per fornire l'informazione ambientale dei diversi elementi che costituiscono il prodotto finestra (telaio; vetrocamera; ferramenta; ecc.), contestualizzata inoltre per il settore produttivo italiano.

Il presente capitolo descrive lo studio LCA di filiera sulla "Produzione di telai in PVC per infissi e serramenti e per la produzione di finestre in PVC con vetrocamera a doppio o triplo vetro", sviluppato in accordo con la

metodologia del progetto Arcadia per gli studi di filiera ed in collaborazione con associazioni, esperti ed imprese di settore. Lo studio LCA è stato sviluppato in accordo alle norme UNI EN ISO 14040:2021 e UNI EN 14044:2021 e ha permesso di sviluppare differenti *dataset* in formato ILCD (Giorgi et al., 2023) per la Banca Dati Italiana LCA (<https://www.arcadia.enea.it/la-banca-dati.html>). Nell'ambito del progetto Arcadia, il gruppo di ricerca LifeCycleTEAM del Politecnico di Milano si è occupato anche dello studio LCA della filiera vetro, quale materiale base (Dalla Valle et al., 2023). Dall'unione del prodotto rappresentativo "telaio PVC" con i prodotti rappresentativi "vetrocamera" è stato possibile definire il profilo ambientale delle principali soluzioni di finestra completa prodotte in Italia.

Gruppo di Lavoro di Filiera

Per lo svolgimento dello studio di filiera, volto alla creazione dei *dataset* LCA rappresentativi a scala nazionale, è stato costituito un gruppo di lavoro, che vede il coinvolgimento dei principali gruppi di interesse:

- ENEA (V. Fantin), ha supportato e coordinato la realizzazione dello studio LCA di filiera, con il supporto di Ecoinnovazione S.r.l. per la revisione esterna indipendente;
- il gruppo di ricerca LifeCycleTEAM del Politecnico di Milano (S. Giorgi, M. Lavagna, A. Campioli), Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito ha effettuato lo studio LCA di filiera;
- l'associazione PVCForumItalia, che raccoglie diversi attori della filiera (produttori di *compound*, produttori di additivi, produttori di profili, assemblatori e posatori/installatori), ha fornito informazioni complessive sulla filiera;
- alcune aziende italiane, che rivestono a livello nazionale una quota parte di mercato particolarmente rilevante nella produzione del *compound* PVC-U (TPV Compound) e nella produzione di finestre in PVC (Finstral), hanno fornito dati primari per lo studio LCA.

I partner aziendali sono rappresentativi del mercato nazionale per il processo di produzione del telaio in PVC (*compound*, estrusione, assemblaggio). Tuttavia, siccome i loro prodotti finali (serramenti) risultano atipici rispetto ai prodotti sul mercato a causa di specifiche ottimizzazioni di forma e composizione del telaio in PVC prodotto, si è ritenuto corretto utilizzare i dati primari di processo da loro forniti e rapportarli alla geometria del prodotto medio rappresentativo definito dallo studio LCA per il progetto Arcadia.

Obiettivi e campo di applicazione dello studio

L'obiettivo dello studio LCA di filiera qui presentato riguarda la definizione di diversi *dataset* per la produzione di telai in PVC per infissi e serramenti e di produzione di finestre in PVC con vetrocamera a doppio o triplo vetro (di seguito elencati). Tali *dataset*, finalizzati all'implementazione della Banda Dati Italiana LCA di Arcadia, possono essere utilizzati da molteplici utenti (pubblica amministrazione, imprese, associazioni di categoria, progettisti, ONG e università/ricerca) in ambito di studi LCA e di valutazioni di sostenibilità. I *dataset* sono, altresì, accompagnati dal relativo report tecnico dello studio LCA di filiera, disponibile sul sito di Arcadia (<https://www.arcadia.enea.it/settori-di-intervento/edilizia.html>).

In dettaglio, i *dataset* elaborati per la banca dati Arcadia sono i seguenti:

- *Polyvinylchloride frame for a window of 1,23 m x 1,48 m*: telaio per serramenti in PVC (vetro escluso) con sviluppo lineare perimetrale di 5,42 m e con profondità 76 mm, comprensivo di tutti gli elementi.
- *Polyvinylchloride frame for windows, 1 m*: 1 metro lineare di telaio, con profondità 76 mm, comprensivo di tutti gli elementi.

- *Window, polyvinylchloride frame, double glazing, float-laminated*: finestra completa, dimensione 1,23 m × 1,48 m, con telaio in PVC e vetrocamera a doppio vetro (F-L);
- *Window, polyvinylchloride frame, double glazing, coated-laminated*: finestra completa, dimensione 1,23 m × 1,48 m, con telaio in PVC e vetrocamera a doppio vetro (C-L);
- *Window, polyvinylchloride frame, double glazing, laminated-laminated*: finestra completa, dimensione 1,23 m × 1,48 m, con telaio in PVC e vetrocamera a doppio vetro (L-L);
- *Window, polyvinylchloride frame, triple glazing, float-float-laminated*: finestra completa, dimensione 1,23 m × 1,48 m, con telaio in PVC e vetrocamera a triplo vetro (F-F-L);
- *Window, polyvinylchloride frame, triple glazing, laminated-float-laminated*: finestra completa, dimensione 1,23 m × 1,48 m, con telaio in PVC e vetrocamera a triplo vetro (L-F-L).

Il flusso di riferimento per la raccolta dei dati primari è il seguente:

- 1 kg di prodotto (*compound*) per la raccolta dati primari relativi al processo di compoundazione;
- 1 telaio in PVC per una finestra 1,23 m × 1,48 m (1,82 m²) per la raccolta dati primari relativi al processo di estrusione e per il processo di assemblaggio del prodotto finito, vetro escluso.

L'assunzione della dimensione della finestra oggetto di studio, pari a 1,23 m x 1,48 m, è in linea con la EN 14351 e la Product Category Rules dei prodotti finestra EN ISO 17213:2020.

Le unità funzionali (UF) della valutazione ambientale per ciascun *dataset* analizzato sono:

- 1 finestra di dimensione 1,82 m² (1 p) per i *dataset* che riguardano l'intero telaio PVC per serramenti (1,23 m x 1,48 m) e le finestre complete;
- 1 metro lineare (1 m) per il *dataset* che riguarda 1 metro lineare di telaio PVC, elaborato per dare la possibilità agli utenti della banca dati di definire una dimensione di finestra personalizzata in base al numero di metri di metri lineari di telaio e al numero di metri quadrati di vetro).

I confini di sistema dello studio LCA sono stati definiti per ottenere un'analisi LCA "cradle-to-gate" (dalla culla al cancello) e includono: il processo di produzione di *compound* PVC rigido (PVC-U) (che comprende la fase di polimerizzazione che avviene fuori dal contesto italiano), il processo di estrusione del telaio in PVC per infissi e il processo di assemblaggio della finestra, inclusi i trasporti tra stabilimenti (Figura 22).

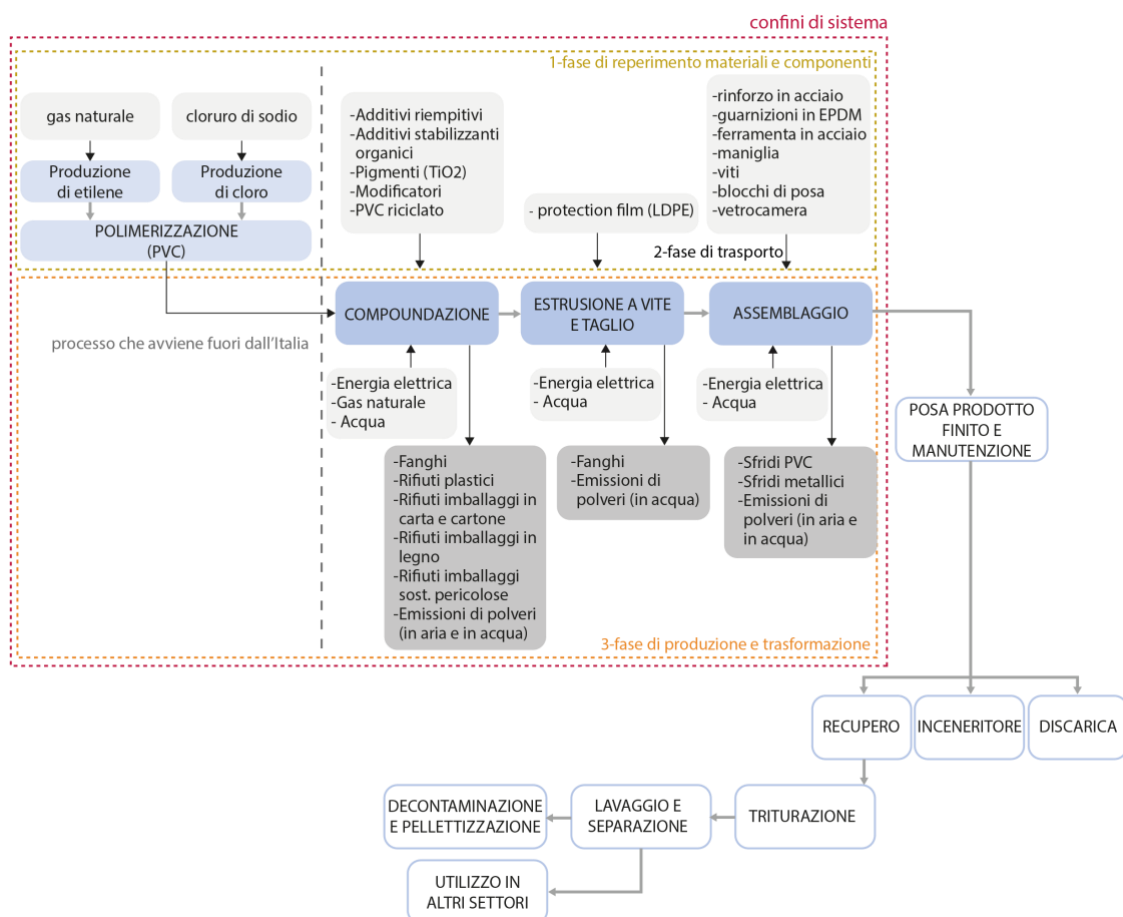


Figura 22. Confini del sistema del processo di produzione del serramento in PVC.

È esclusa dai confini del sistema la produzione di macchinari ed infrastrutture (e i relativi rifiuti di manutenzione), con l'eccezione di quelli già contenuti nei *dataset* di Ecoinvent 3.6 (Wernet et al., 2016) utilizzati per modellare i dati di background. Per la fase di valutazione degli impatti è stato applicato il metodo di valutazione EF 3.0 (Zampori e Pant, 2019).

Analisi di Inventario

Tutti i dati raccolti sono stati ritenuti di buona rappresentatività tecnologica, geografica e temporale, dunque sulla base di essi si sono costruiti i *dataset* di filiera.

Gli *input* riguardano: la resina di PVC, prodotta al di fuori del contesto italiano; gli additivi che servono per raggiungere le caratteristiche richieste da norma per il PVC rigido (PVC-U) destinato alla produzione di serramenti, gli accessori della finestra (ovvero il rinforzo in acciaio, le guarnizioni, la ferramenta e le viti), la vetrocamera (nei *dataset* relativi alle finestre), i materiali per gli imballaggi, i relativi trasporti e i flussi energetici necessari per le fasi di processo (compoundazione, estrusione e assemblaggio). Gli *output* invece riguardano: il prodotto finale, le emissioni in atmosfera e in acqua, i rifiuti generati durante il processo produttivo e i relativi trasporti fino al conferimento in discarica o centri di riciclaggio.

I flussi materici ed energetici in *input* e in *output* rilevati presso le aziende partner, relativi all'anno di produzione 2021 (es. pesi dei materiali del mix *compound*, consumo energetico, emissioni, ecc.) sono stati riproporzionati all'UF dello studio, sulla base del peso in *input* del telaio PVC del prodotto rappresentativo.

Relativamente ai materiali in *input* del processo di compoundazione, grazie alla raccolta dei dati primari delle aziende, facenti parte il GdL, è stato possibile definire la composizione rappresentativa del mix *compound*

per la produzione di PVC rigido per serramenti utilizzato in Italia, considerando sia la provenienza della resina PVC importata (circa l'80% del PVC proviene dall'Europa e il 20% proviene dal mondo), sia l'incidenza dei differenti processi di produzione della stessa resina in PVC (il 10% viene prodotta con processo *emulsion* e il 90% con processo *suspension*). Il mix *compound* presenta circa un 20% di contenuto di riciclato, in linea con i dati primari raccolti e le statistiche rilevate nelle dichiarazioni PVC Forum Italia e Recovynyl.

Relativamente al processo di estrusione, è stato rilevato che lo sfrido PVC (generato durante il processo di estrusione) viene reimmesso direttamente nella filiera di estrusione, insieme al mix *compound* in *input*, alimentando il processo di estrusione e non generando dunque rifiuto.

Scegliendo di valutare un telaio in PVC bianco, si esclude dal conteggio la presenza del film adesivo colorato. Viene invece conteggiato il nastro di protezione, generalmente in LDPE, che viene applicato sul profilo in PVC durante il processo di estrusione, come protezione contro i danni esterni che possono verificarsi durante le operazioni di trasporto, movimentazione, stoccaggio e assemblaggio del prodotto finito e rimosso dopo la fase di installazione in opera della finestra.

Nell'ambito della fase di assemblaggio, è stato possibile quantificare lo scarto PVC generato a causa dei necessari tagli (a 45°) dei profili PVC per la formazione del telaio completo (scarto pari al 7% del peso del telaio in PVC). Lo sfrido prodotto durante l'assemblaggio viene raccolto e riciclato (e destinato alla stessa filiera dei prodotti finestra per la produzione di *compound* PVC-U, oppure ad altre filiere produttive).

All'interno del processo di assemblaggio del telaio PVC è stato incluso il contributo dell'aggiunta di tutti i componenti della finestra: rinforzo in acciaio, ferramenta, maniglia, viti. Per la quantificazione degli impatti dei componenti in acciaio zincato è stato necessario quantificare la superficie degli oggetti in acciaio in quanto Ecoinvent non riporta un *dataset* di *background* relativo all'acciaio zincato, ma solo *dataset* relativi al rivestimento in zinco.

Non potendo reperire tale informazione dalle aziende produttrici, la superficie di zinco del rinforzo di telaio e della ferramenta è stata calcolata considerando i vari componenti.

Per quanto riguarda tutti i prodotti in acciaio, i dati primari di *input* sono associati alla produzione di acciaio vergine (per il 60% del totale) e alla produzione di acciaio riciclato (per il 40% del totale) secondo l'assunzione presente a letteratura (Lavagna et al., 2022).

Il consumo di energia (articolato in due vettori: energia elettrica e gas naturale) e di acqua, derivato da dati primari, riguarda l'intero ciclo produttivo: per la fase di compoundazione viene considerato lo stoccaggio delle materie prime in silo, il loro trasferimento nei turbo-miscelatori veloci, il raffreddamento nei miscelatori lenti, la granulazione ed infine l'imballaggio dei granuli; per la fase di estrusione viene compreso il passaggio del mix *compound* nella macchina profilatrice, il taglio dei profili, il sistema di raffreddamento e il compressore; durante l'assemblaggio viene considerato il taglio dei profili a 45°, la saldatura e l'assemblaggio dei componenti.

Si è inoltre determinata (sulla base di dati primari) la distanza media di trasporto (km) percorsa per il reperimento dei materiali/componenti in *input* (da fornitore a impianto di compoundazione, estrusione e assemblaggio).

Dai dati primari è stato possibile anche definire il tipo e la quantità di imballaggio per ogni materiale e componente in *input* al processo di produzione di PVC-U e l'imballaggio dello stesso PVC-U *compound* per il trasporto dalla sede di compoundazione alla sede di estrusione.

Durante il processo produttivo sono generati rifiuti che vengono poi conferiti a terzi per operazioni di recupero o smaltimento.

Per quanto riguarda le emissioni dirette in aria, solo le polveri durante il processo di produzione di *compound* e il processo di assemblaggio sono state quantificate partendo da dati primari, mentre per tutte le altre emissioni in aria sono stati utilizzati dati di *background*. È stato rilevato anche il dato primario riferito alle emissioni in acqua, complessivo delle fasi di *compounding*, estrusione ed assemblaggio.

L'assunzione di dati secondari si è resa necessaria per la definizione della distanza di trasporto dei rifiuti in PVC e metallici al centro di riciclaggio e per la distanza di trasporto degli altri rifiuti di processo al conferimento in discarica (Stichnothe and Azapagic, 2013). Per quantificare il consumo energetico utilizzato per la triturazione del PVC riciclato si è utilizzato il consumo energetico del dataset "Recycling PVC/RER U".

Valutazione degli impatti ed interpretazione dei risultati

Nella Tabella 9 e nella Tabella 10 sono indicati i risultati di caratterizzazione relativi ai sette dataset sviluppati. La percentuale indica l'aumento degli impatti causato dalla componente vetrocamera rispetto al telaio (accessori compresi), riferita all'intera finestra.

Categoria d'impatto	Unità	PVC frame for windows, 1 m	PVC frame for a window of 1,23 m x 1,48 m	Window, PVC frame, double glazing, F-L	% di aumento impatto	Window, PVC frame, double glazing, C-L	% di aumento impatto
Climate change	kg CO2 eq	1,83E+01	9,89E+01	1,52E+02	35%	1,53E+02	35%
Ozone depletion	kg CFC11 eq	4,01E-06	2,17E-05	2,99E-05	27%	2,99E-05	27%
Ionising radiation	kBq U-235 eq	2,27E+00	1,23E+01	1,50E+01	18%	1,51E+01	19%
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	6,25E-02	3,38E-01	5,80E-01	42%	5,82E-01	42%
Particulate matter	disease inc.	1,61E-06	8,75E-06	1,06E-05	18%	1,07E-05	18%
Human toxicity, non-cancer	CTUh	8,23E-07	4,46E-06	5,08E-06	12%	5,09E-06	12%
Human toxicity, cancer	CTUh	4,11E-08	2,23E-07	2,50E-07	11%	2,51E-07	11%
Acidification	mol H+ eq	2,02E-01	1,10E+00	1,31E+00	16%	1,31E+00	16%
Eutrophication, freshwater	kg P eq	7,53E-03	4,08E-02	4,96E-02	18%	4,98E-02	18%
Eutrophication, marine	kg N eq	2,05E-02	1,11E-01	1,96E-01	43%	1,97E-01	44%
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	6,81E-01	3,69E+00	4,32E+00	15%	4,33E+00	15%
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	5,03E+02	2,72E+03	3,80E+03	28%	3,81E+03	29%
Land use	Pt	7,46E+01	4,05E+02	7,21E+02	44%	7,40E+02	45%
Water use	m3 depriv.	1,30E+01	7,04E+01	8,50E+01	17%	8,53E+01	18%
Resource use, fossils	MJ	3,03E+02	1,64E+03	2,33E+03	29%	2,34E+03	30%
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	1,91E-02	1,03E-01	1,04E-01	1%	1,04E-01	1%

Tabella 9. Risultati di caratterizzazione relativi alla produzione del telaio in PVC e della finestra completa con diverse tipologie di doppio vetro.

Categoria d'impatto	Unità	Window, PVC frame, double glazing, L-L,	% di aumento impatto	Window, PVC frame, triple glazing, F-F-L	% di aumento impatto	Window, PVC frame, triple glazing, L-F-L	% di aumento impatto
Climate change	kg CO2 eq	1,64E+02	40%	1,75E+02	43%	1,86E+02	47%
Ozone depletion	kg CFC11 eq	3,21E-05	32%	3,29E-05	34%	3,51E-05	38%
Ionising radiation	kBq U-235 eq	1,58E+01	22%	1,61E+01	24%	1,69E+01	27%
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	6,30E-01	46%	6,80E-01	50%	7,30E-01	54%
Particulate matter	disease inc.	1,10E-05	20%	1,15E-05	24%	1,19E-05	26%
Human toxicity, non-cancer	CTUh	5,21E-06	14%	5,37E-06	17%	5,49E-06	19%
Human toxicity, cancer	CTUh	2,54E-07	12%	2,64E-07	16%	2,68E-07	17%
Acidification	mol H+ eq	1,35E+00	19%	1,40E+00	22%	1,44E+00	24%
Eutrophication, freshwater	kg P eq	5,16E-02	21%	5,36E-02	24%	5,56E-02	27%
Eutrophication, marine	kg N eq	2,14E-01	48%	2,32E-01	52%	2,49E-01	55%
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	4,45E+00	17%	4,59E+00	19%	4,72E+00	22%
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	3,96E+03	31%	4,29E+03	36%	4,45E+03	39%
Land use	Pt	8,26E+02	51%	8,31E+02	51%	9,36E+02	57%
Water use	m3 depriv.	8,92E+01	21%	9,07E+01	22%	9,49E+01	26%
Resource use, fossils	MJ	2,49E+03	34%	2,61E+03	37%	2,77E+03	41%
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	1,04E-01	1%	1,04E-01	1%	1,04E-01	1%

Tabella 10. Risultati di caratterizzazione relativi alla produzione del telaio in PVC e della finestra completa con diverse tipologie di doppio vetro e triplo vetro.

Analizzando i risultati di normalizzazione dello studio LCA del telaio PVC (1,23 m x 1,48 m) e dei prodotti finestra (Figura 23), è possibile constatare che, le categorie di impatto più rilevanti sono: *Resource use minerals and metals* (che contribuisce all'87,16% del totale degli impatti del telaio PVC e al 81,89% del totale degli impatti della finestra con vetrocamera a triplo vetro L-F-L); *Ecotoxicity freshwater* (che contribuisce al 3,43% del totale degli impatti del telaio PVC e al 5,22% del totale degli impatti della finestra con vetrocamera a triplo vetro L-F-L); *Eutrophication freshwater* (che contribuisce rispettivamente al 1,37% per il telaio PVC e 1,73% per la finestra con vetrocamera a triplo vetro L-F-L); *Resource use fossils* (1,36% per il telaio PVC e 2,13% per la finestra con vetrocamera a triplo vetro L-F-L); *Eutrophication terrestrial* (1,12% per il telaio PVC e 1,34% per la finestra con vetrocamera a triplo vetro L-F-L).

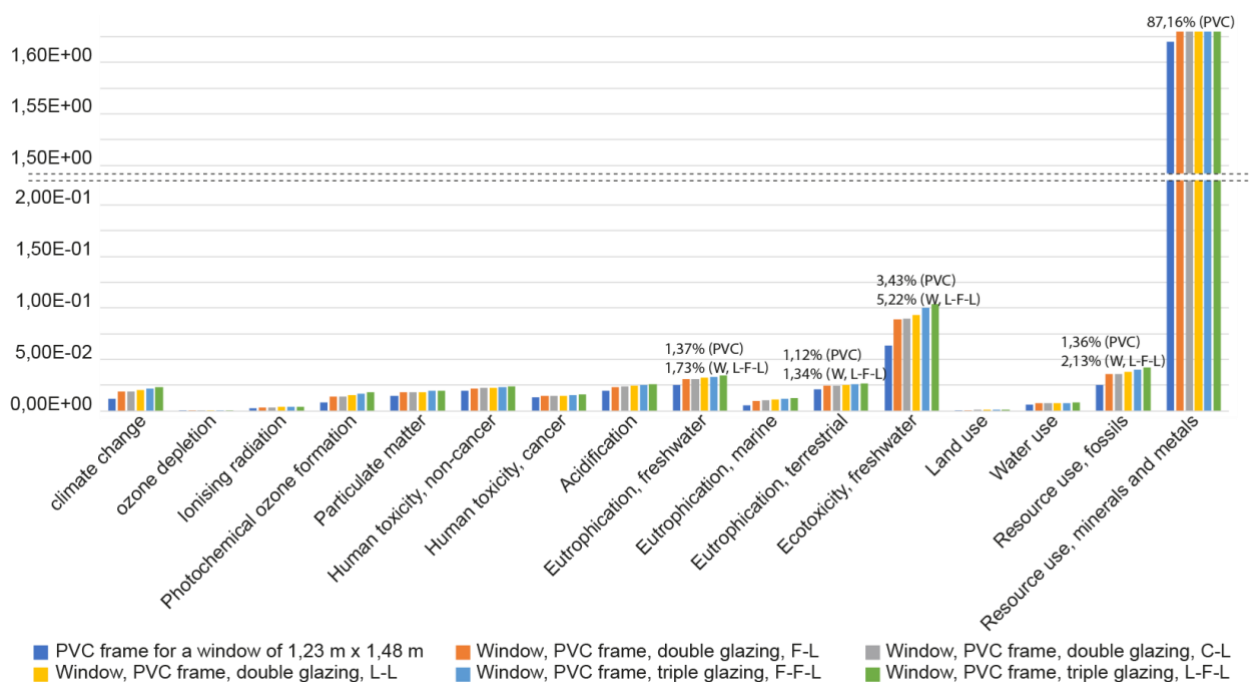


Figura 23. Risultati della normalizzazione per le categorie di impatto più rilevanti per la produzione del telaio in PVC 1,23 m x 1,48 m (incluso elementi) e finestre con doppio e triplo vetro.

Analizzando le fasi del ciclo di vita e i processi più rilevanti (Figura 24), si può notare come il reperimento materiali e componenti rappresenti la fase maggiormente influente per tutte le categorie di impatto rispetto a tutte le fasi del ciclo di vita del telaio in PVC. In particolare emerge il contributo del processo di compoundazione, in cui assume una rilevanza preponderante la polimerizzazione *suspension* della resina PVC, utilizzato nella produzione di *compound* PVC-U, e il processo di assemblaggio della finestra, in cui incide in maniera prevalente la produzione dell'acciaio vergine per il rinforzo del telaio e la ferramenta e la relativa zincatura. La zincatura del rinforzo in acciaio del telaio PVC è preponderante per la maggior parte degli impatti più rilevanti (*Resource use minerals and metals*, *Ecotoxicity freshwater*, *Eutrophication terrestrial*); mentre la polimerizzazione *suspension* influenza particolarmente le categorie di impatti relative a *Resource use fossils*, *Ecotoxicity freshwater*, *Eutrophication freshwater*.

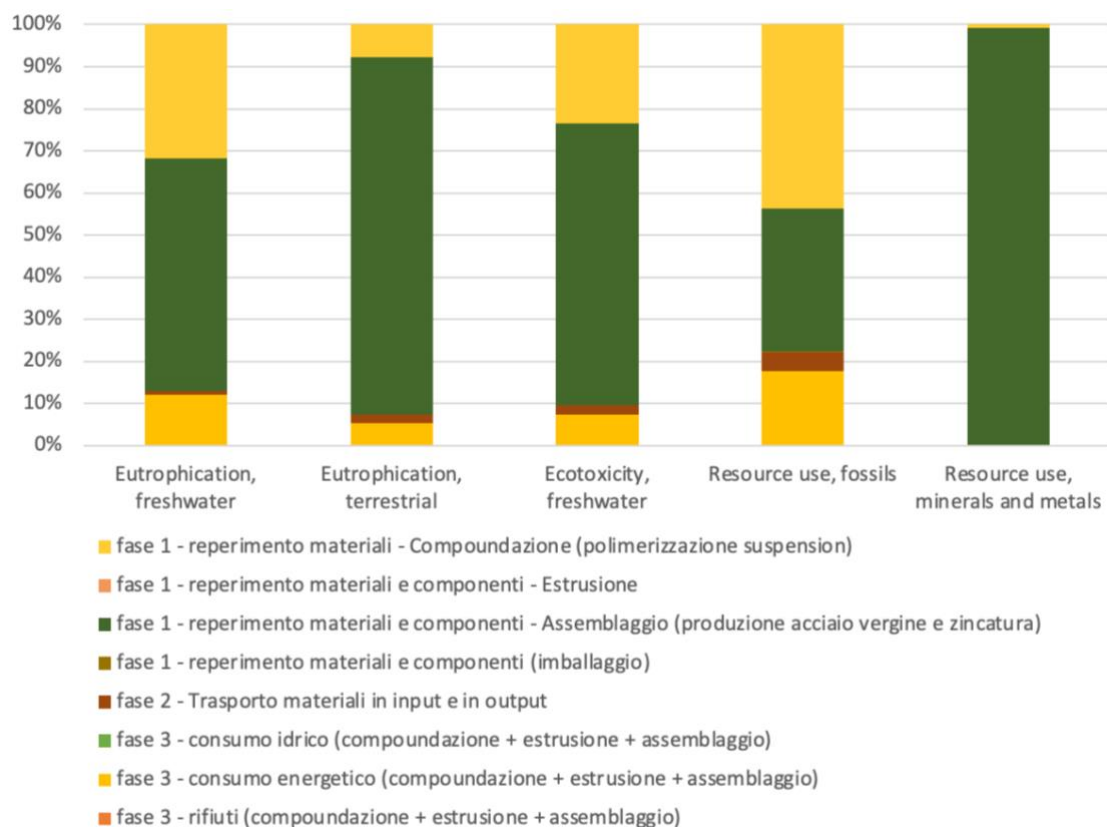


Figura 24. Incidenza percentuale delle fasi e dei processi più rilevanti per le categorie di impatto più rilevanti per la produzione del telaio in PVC 1,23 m x 1,48 m (incluso elementi).

Nel caso delle finestre a doppio vetro, in tutte le categorie di impatto ambientale, risulta prevalente l'incidenza del telaio in PVC rispetto alla componente di vetrocamera (Figura 25). Nel caso di finestre con triplo vetro, la soluzione vetrocamera (F-F-L) incide più del telaio nella categoria di impatto *Eutrophication marine*, e la soluzione vetrocamera (L-L-F) risulta prevalente negli indicatori di *Photochemical ozone formation*, *Eutrophication marine* e *Land use*.

Tuttavia è da sottolineare che tale confronto è stato effettuato su una finestra di dimensione standard 1,23 m x 1,48 m. Il contributo di impatto del telaio rispetto al contributo della vetrocamera varia a seconda della dimensione del serramento. L'incidenza della vetrocamera risulterebbe quindi maggiore rispetto a quella del telaio PVC per le finestre di grandi dimensioni, generalmente utilizzate in architettura.

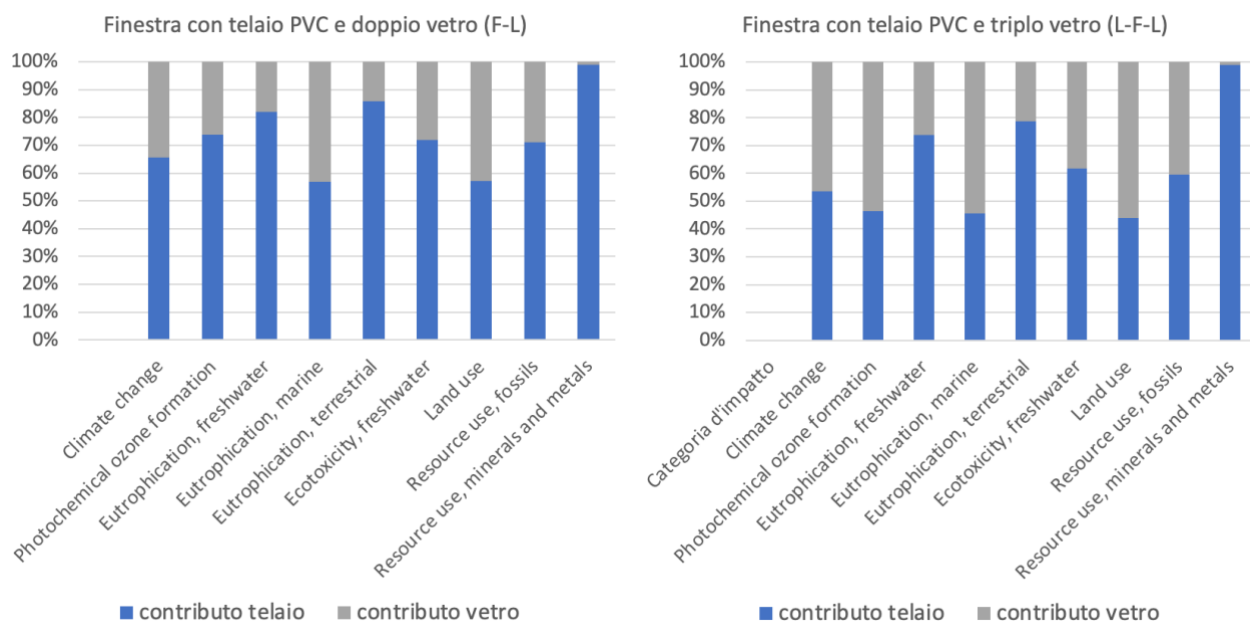


Figura 25. Incidenza della produzione del telaio PVC e della vetrocamera sugli impatti totali della finestra completa 1,23 m x 1,48 m.

I risultati sull'analisi di sensitività condotta relativamente allo spessore di zincatura dei componenti in acciaio ha evidenziato come la mancanza di tale informazione dimensionale può causare un'incertezza nei risultati delle categorie di impatto più rilevanti, dimostrando scostamenti (ad esempio che superano il 50% nel caso dell'indicatore *Resource use, minerals and metals*). La difficoltà di reperimento dei dati relativi allo spessore di zincatura dei prodotti in acciaio e la carenza di relativi *dataset* ambientali in banche dati, è già stata evidenziata a letteratura (Lavagna et al., 2022).

Conclusioni

Lo studio è stato svolto sulla base di dati relativi alla specifica filiera italiana, ricorrendo prevalentemente a dati primari disponibili a livello di filiera, raccolti presso le aziende coinvolte nel GdL, e ad alcuni dati secondari reperiti a letteratura, e controllati da esperti a conferma della rappresentatività della filiera italiana.

Nonostante il confronto con la letteratura esistente sia complicato a causa delle differenze metodologiche che possono esserci tra studi LCA di prodotti analoghi, è stato riscontrato un allineamento, dello stesso ordine di grandezza, rispetto ad alcuni risultati di studi LCA riportati in EPD di prodotto: ad esempio nel caso della finestra a doppio vetro l'impatto *Climate change* del presente studio è pari a $8,37E+01$ kgCO₂eq/m² di finestra, in linea con l'impatto dichiarato dalla EPD EPPA (validità 02.05.2027) pari a $8,00E+01$ kgCO₂eq/m² di finestra; altresì, l'indicatore *Resource use, fossils*, pari a $1,28E+03$ MJ secondo questo studio, è in linea con l'indicatore PENRE (*Use of non-renewable primary energy excluding non-renewable primary energy resources used as raw materials*) della EPD EPPA, pari a $1,14E+03$ MJ.

I dati elaborati in questo studio possono costituire valori di riferimento (*benchmark*) utili per gli operatori della filiera produttiva, al fine di migliorare i processi di produzione, e per coloro che sviluppano studi LCA al fine di individuare miglioramenti ambientali nel progetto di edifici.

Bibliografia

- Ciotti C., 2012. La strategia per la sostenibilità del PVC Un PVC sempre più nuovo, <https://www.pvcforum.it/wp-content/themes/twentyseventeen/assets/pdf/ccplast.pdf>
- Dalla Valle A., Lavagna M., Campioli A., 2023. Produzione di lastre e sistemi in vetro per infissi e serramenti. Internal report ARCADIA Project. Background datasets from Ecoinvent 3.6 database cut-off were used for the LCA study.
- Giorgi S., Lavagna M., Campioli A., 2023. Produzione di telai in PVC per infissi e serramenti e produzione di finestre in PVC con vetrocamera a doppio o triplo vetro. Internal report ARCADIA Project. Background datasets from Ecoinvent 3.6 database cut-off were used for the LCA study.
- Lavagna M., Dalla Valle A., Giorgi S., Campioli A., 2022. Aspetti critici nello sviluppo di LCA dettagliate finalizzate alla certificazione EPD: il caso di prodotti in acciaio zincato, XVI Convegno Associazione Rete Italiana LCA, La sostenibilità nel contesto del PNRR: il contributo della Life Cycle Assessment, Università di Palermo, Associazione Rete Italiana LCA (Ed.), pp. 291-298.
- PVC Forum Italia, 2022. Il consumo di PVC in Italia 2021, Plastic Consult s.r.l.
- Recovinyl, 2021. Recovinyl results 2020, https://www.recovinyl.com/_files/ugd/ed9371_b5d059c088794dacb475c741cc52d1df.pdf
- Recovinyl, 2022. Progress Report 2022 Reporting on 2021 Activities, <https://www.vinylplus.eu/wp-content/uploads/2022/05/VinylPlus-Progress-Report-2022.pdf>
- SiPVC, 2021. Il mercato italiano dei serramenti in PVC nel 2020, Gruppo Serramenti e Avvolgibili di PVC Forum Italia, <https://www.pvcforum.it/si-pvc/news/crescita-del-mercato-italiano-del-serramento-pvc-nel-2021/>
- Stichnothe H., Azapagic A., 2013. Life cycle assessment of recycling PVC window frames. Resources, Conservation and Recycling, Vol. 71, pp. 40-47.
- Trifirò F., 2015. Come si è salvata l'industria delle plastiche in PVC, dopo la scomparsa della sua produzione in Italia. La Chimica e l'Industria, Vol. 2(6), https://www.soc.chim.it/sites/default/files/chimind/pdf/2015_6_1_on.pdf.
- VinylPlus, 2021. Rapporto sulle attività del 2020 e sintesi dei principali risultati degli ultimi 10 anni, <https://www.vinylplus.eu/resources/new-vinylplus-progress-report-2021/>.
- Wernet G., Bauer C., Steubing B. et al., 2016. The Ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. International Journal of Life Cycle Assessment, 21, 1218–1230.
- Zampori L., Pant R., 2019. Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method, EUR 29682 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, JRC115959.



Studio LCA della catena di gestione dei rifiuti da Costruzione e Demolizione (C&D)



Autori:

Federica Carla Carollo¹, Francesca Ceruti ^{2*}, Lucia Rigamonti¹

¹ Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

² ENEA, Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento al cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali

* Da settembre 2023 è presso l'Università degli Studi di Brescia, Dipartimento di Economia e Management

Introduzione

Il settore delle costruzioni è caratterizzato da un elevato consumo di risorse e necessita di interventi per mitigarne gli impatti ambientali e garantire un uso efficiente delle risorse (Ghufran et al., 2022). Per tale scopo, le imprese e i consumatori sono chiamati non solo a ridurre il consumo di materie prime e a prevenire la produzione dei rifiuti ma anche a massimizzarne il recupero, attraverso il riciclo o il riutilizzo. In questo contesto risulta cruciale l'attenzione verso il fine vita dell'edificio, la generazione dei rifiuti da costruzione e demolizione (C&D) e il loro destino. Secondo il rapporto ISPRA del 2023, i rifiuti C&D rappresentano il 47,7% del totale prodotto riferito ai rifiuti speciali in Italia. Tuttavia, nonostante il tasso di recupero si attesti al 80,1% (ISPRA, 2023), sono tutt'oggi presenti vincoli legislativi, economici, tecnologici e culturali (Cutaia et al., 2022) che ostacolano l'uso diffuso degli aggregati riciclati (AR) prodotti dalle attività di trattamento dei rifiuti C&D. Per favorire la generazione degli AR di alta qualità per applicazioni nobili (e.g. per calcestruzzo strutturale) è necessario che i rifiuti in ingresso al processo di riciclo siano il più omogenei possibile. Ciò richiede una classificazione e divisione meticolosa del rifiuto già in fase di demolizione dell'edificio (Cárcel-Carrasco et al., 2021), attraverso una pratica attualmente poco diffusa in Italia, la demolizione selettiva. Affinché l'adozione della demolizione selettiva, unitamente all'utilizzo degli AR, sia incoraggiata, è essenziale fornire agli operatori del settore un'adeguata documentazione scientifica. Questo può essere realizzato con una valutazione degli impatti ambientali lungo l'intera catena di gestione dei rifiuti da C&D, attraverso l'applicazione della metodologia Life Cycle Assessment (LCA). Lo studio LCA qui presentato è parte di una ricerca di dottorato del Politecnico di Milano (Carollo et al., 2022), Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, elaborata in co-tutoraggio con ENEA e co-finanziata da Regione Lombardia. Lo studio LCA è stato realizzato in accordo alle norme ISO 14040 e 14044 e ha permesso di sviluppare 24 dataset in formato ILCD nella Banca Dati Italiana LCA (BDI-LCA) (<https://www.arcadia.enea.it/la-banca-dati.html>).

Obiettivi e campo di applicazione dello studio

L'obiettivo dello studio LCA qui presentato è duplice. Da un lato lo studio si propone di valutare gli impatti ambientali dell'intera catena di gestione dei rifiuti C&D, dall'altro, di realizzare 24 dataset relativi ai processi di gestione, recupero e smaltimento dei rifiuti da costruzione e demolizione, con particolare riferimento alla regione Lombardia, per l'inserimento nella BDI-LCA di Arcadia. Questo consente ad altri utenti (pubblica amministrazione, imprese, associazioni di categoria, progettisti, ONG e università/ricerca) di utilizzare i dati inseriti in ambito di studi LCA e di valutazioni di sostenibilità. Tali dataset sono accompagnati dal relativo report tecnico dello studio LCA di filiera, disponibile sul sito di Arcadia (<https://www.arcadia.enea.it/settori-di-intervento/edilizia/gestione-recupero-e-smaltimento-dei-rifiuti-da-costruzione-e-demolizione.html>).

Il sistema analizzato comprende tutte le fasi di gestione del rifiuto inerte derivante dalle attività di costruzione e demolizione, dalla produzione dello stesso in sede del fine vita di un edificio, durante una demolizione ordinaria o selettiva, alla fase di trattamento del rifiuto C&D in impianto di riciclo, fino alla re-immissione sul mercato come aggregato riciclato e la produzione evitata di materie prime vergini attraverso il recupero e l'uso di risorse secondarie. L'unità funzionale definita è la demolizione di un metro cubo di edificio (m^3). I dati relativi ai processi intrinseci al recupero dei rifiuti C&D e alla produzione evitata di aggregati naturali sono tratti dal lavoro svolto precedentemente da Rigamonti et al. (2017) per Regione Lombardia.

Analisi di Inventario

Lo studio LCA è stato condotto sui dati relativi a sei casi studio di demolizione - selettiva e ordinaria - raccolti tramite l'invio di questionari specifici alle aziende di demolizione presenti sul territorio italiano. La risposta ha evidenziato una casistica quasi del tutto omogenea sulla tipologia edilizia in quanto la maggioranza dei

casi riguarda edifici ad uso commerciale e, nonostante la diffusione del questionario sull'intero territorio nazionale, tutti i casi provengono esclusivamente della regione Lombardia. Per l'ottimizzazione dei dataset caricati sulla BDI-LCA è stata poi definita una classificazione basata sulla tipologia costruttiva degli edifici: edifici in muratura/calcestruzzo; edifici a struttura metallica. I dati di inventario includono i consumi dei macchinari da demolizione (elettricità, carburante e acqua), la tipologia e la quantità di rifiuti generata a seguito della demolizione e il relativo destino finale (riciclo, discarica o riuso in situ).

A titolo illustrativo, è di seguito presentato un caso tipo di demolizione selettiva di un edificio commerciale a struttura in muratura/calcestruzzo, datato 2004, di 550.000 m³, ubicato nella provincia di Milano. Le operazioni di demolizione hanno richiesto l'utilizzo di escavatori dotati di attrezzature quali pinze, cesoie, magneti ecc., oltre a nebulizzatore di acqua, muletti e camion (Tabella 11). Queste attività hanno comportato un consumo totale di elettricità, carburante e acqua pari rispettivamente a 0,05 kWh/m³, 27 MJ/m³ e 0,002 kg/m³. I rifiuti generati e il relativo destino sono illustrati in Tabella 12.

Macchinari	Ore di utilizzo
Escavatore	3100 ore
Con pinza	700 ore
Con polverizzatore	1000 ore
Con cesoia	200 ore
Con martello idraulico	1000 ore
Con magneti	200 ore
Nebulizzatore	3000 ore
Muletti	400 ore
Camion	700 ore

Tabella 11. Macchinari impiegati nella demolizione selettiva

Rifiuto generato	Codice CER	Quantità	Destino	Distanza di trasporto
Rifiuto misto C&D	17 09 04	227,93 kg/m ³	Riuso in situ	0
		0,04 kg/m ³	Discarica	8,5 km
Materiali da isolamento	17 06 04	1,09 kg/m ³	Stoccaggio + Discarica	30,6 km + 18,6 km ⁽¹⁾
Legno	17 02 01	0,31 kg/m ³	Riciclo	8,2 km ⁽¹⁾
Materiali a base di gesso	17 08 02	1,08kg/m ³	Riciclo	73 km ⁽¹⁾
Ferro e acciaio	17 04 05	15,6 kg/m ³	Riciclo	7,8 km ⁽¹⁾
Alluminio	17 04 02	0,01 kg/m ³	Riciclo	7,8 km ⁽¹⁾
Cavi	17 04 11	0,26 kg/m ³	Riciclo	7,8 km ⁽¹⁾

¹ Ipotesi: Impianto più vicino.

Tabella 12. Rifiuti generati e destino.

La Figura 26 mostra il bilancio di massa del sistema in esame. Il destino dei flussi metallici separati durante le operazioni di demolizione è stato esaminato nel contesto di una analisi di sensitività non presente in questo estratto.

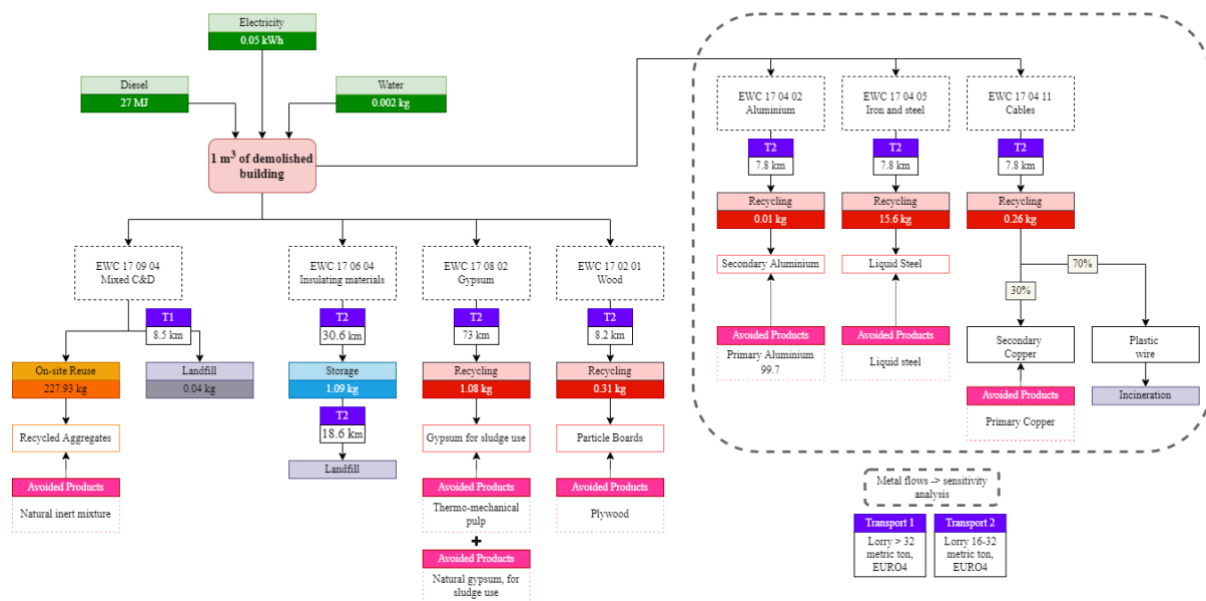


Figura 26. Bilancio di massa

Valutazione degli impatti e interpretazione dei risultati

I dati d'inventario sono stati elaborati con il software SimaPro v9.3, impiegando dataset di Ecoinvent 3.8 e dataset specifici realizzati appositamente per alcune tipologie di trattamento rifiuti. Nella valutazione degli impatti ambientali sono state analizzate le 16 categorie di impatto del metodo EF 3.0 (Zampori e Pant, 2019; CE - JRC, 2011).

In Tabella 13 sono mostrati i risultati della valutazione degli impatti relativi al caso precedentemente illustrato, associati ai seguenti contributi: i consumi della demolizione (elettricità, carburante, acqua), il riuso in situ dei rifiuti misti C&D, lo smaltimento in discarica dei rifiuti misti C&D, lo stoccaggio e lo smaltimento dei materiali isolanti, il riciclo del legno, il riciclo dei materiali a base di gesso, e i trasporti per il conferimento.

Categorie di impatto	DEM	ORCD	LCD	SLI	RW	RG	T
CC	2,50E+00	-5,40E-01	3,06E-04	8,17E-03	-9,88E-03	3,59E+00	2,23E-02
OD	5,33E-07	-1,38E-07	1,13E-10	2,38E-09	-1,36E-09	6,57E-07	5,20E-09
IR	1,56E-01	-4,67E-02	3,86E-05	9,00E-04	-1,39E-02	4,40E-01	1,75E-03
POF	3,45E-02	-1,43E-03	2,49E-06	6,74E-05	-4,88E-04	2,39E-02	1,21E-04
PM	6,92E-07	-3,35E-08	4,36E-11	1,18E-09	-1,17E-08	4,18E-07	1,99E-09
HTNC	1,46E-08	-8,75E-09	3,35E-12	8,44E-11	2,16E-10	1,31E-08	2,78E-10
HTC	7,75E-10	9,54E-10	1,99E-13	3,42E-12	4,82E-10	4,59E-09	8,58E-12
A	2,59E-02	-1,63E-03	2,45E-06	6,39E-05	-3,30E-04	2,49E-02	1,13E-04
EF	8,15E-05	-3,54E-05	1,01E-07	1,11E-06	-1,55E-05	4,05E-04	1,45E-06
EM	1,14E-02	-3,63E-04	7,75E-07	2,07E-05	-1,65E-04	8,09E-03	3,89E-05
ET	1,25E-01	-3,95E-03	8,45E-06	2,25E-04	-1,78E-03	8,94E-02	4,25E-04

ETF	2,01E+01	-7,02E+00	5,48E-03	1,26E-01	-1,33E+00	2,01E+01	2,65E-01
LU	4,39E+00	-1,31E+01	2,15E-02	3,45E-01	-2,20E+01	3,68E+00	2,34E-01
WU	6,68E-02	-1,79E-02	4,29E-04	8,76E-03	-6,23E-02	1,70E+00	1,02E-03
RUF	3,44E+01	-8,96E+00	8,47E-03	2,32E-01	-2,53E-01	5,50E+01	3,40E-01
RUM	1,32E-06	-1,59E-06	1,26E-09	2,64E-08	1,57E-07	-9,62E-07	7,81E-08

DEM: Demolizione (consumi di carburante, acqua, elettricità); **ORCD:** Riutilizzo in situ dei rifiuti C&D; **LCD:** Discarica dei rifiuti misti C&D; **SLI:** Stoccaggio + Discarica dei materiali isolanti; **RW:** Riciclo del legno; **RG:** Riciclo dei materiali a base di gesso; **T:** Trasporto a conferimento

CC: Cambiamento climatico; **OD:** Riduzione dello strato di ozono; **IR:** Radiazione ionizzante; **POF:** Formazione di ozono fotochimico; **PM:** Materiale particolato; **HTNC:** Tossicità umana non cancerogena; **HTC:** Tossicità umana cancerogena; **A:** Acidificazione; **EF:** Eutrofizzazione delle acque dolci; **EM:** Eutrofizzazione marina; **ET:** Eutrofizzazione terrestre; **ETF:** Ecotossicità delle acque dolci; **LU:** Uso del suolo; **WU:** Uso di acqua; **RUF:** Uso di risorse energetiche; **RUM:** Uso di risorse - minerali e metalli

Tabella 13. Risultati della valutazione degli impatti derivanti dalla demolizione selettiva di 1 m³ di un edificio commerciale in calcestruzzo/mattoni.

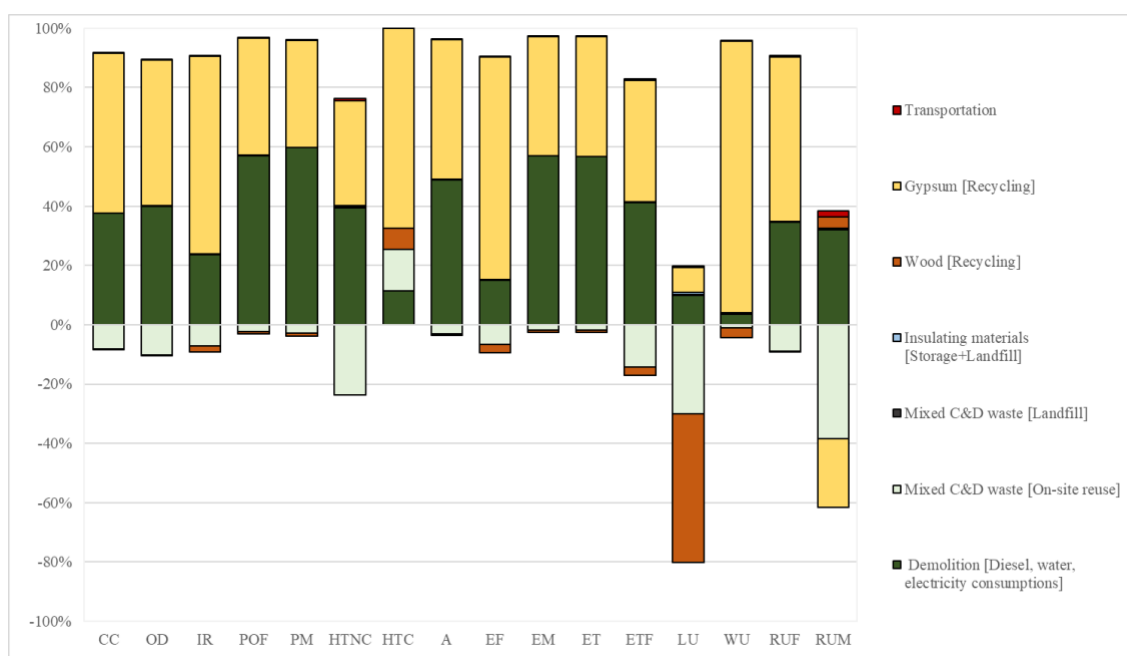


Figura 27. Analisi dei contributi per la demolizione selettiva di 1 m³ di un edificio commerciale in calcestruzzo/mattoni.

L'analisi dei contributi in Figura 27 ha evidenziato come i principali contributi agli impatti ambientali in quasi tutte le categorie di impatto derivino dai consumi dei macchinari di elettricità, carburante e acqua e dal riciclo dei materiali a base di gesso (ad eccezione della categoria uso delle risorse minerali (RUM)). Il riutilizzo dei rifiuti C&D in situ previo trattamento apporta un beneficio in quasi tutte le categorie di impatto analizzate. Il riciclo del legno, invece, apporta un beneficio sostanziale alla categoria di uso del suolo (LU), ma impatta notevolmente sulla tossicità umana (NHTC e HTC) e sull'uso di risorse minerali (RUM). Gli altri input hanno un contributo minimo e quasi trascurabile su tutte le categorie di impatto.

Conclusioni

L'analisi LCA suggerisce che una gestione mirata dei rifiuti può portare benefici ambientali. Concentrarsi sul riciclo e riutilizzo in situ dei materiali come legno, rifiuti misti C&D e cemento offre vantaggi evidenti. È

tuttavia fondamentale valutare attentamente i costi e i benefici di tali pratiche per massimizzare i risultati positivi e minimizzare l'utilizzo dei macchinari.

Dallo studio è stato sviluppato il relativo dataset, disponibile nella BDI-LCA del progetto Arcadia (<https://bancadatiitalianalca.enea.it/Node>). I dataset realizzati (Figura 28 e Figura 29) potranno essere utilizzati come fonte di dati rappresentativi del contesto italiano per sviluppare studi di LCA. Poiché in letteratura non esistono, a nostra conoscenza, studi LCA simili a quello in esame, si può affermare che lo studio LCA condotto per il progetto Arcadia, proprio per la sua unicità, riveste ancora più rilevanza per il settore italiano della gestione dei rifiuti da C&D, in ottica di economia circolare e produzione sostenibile.

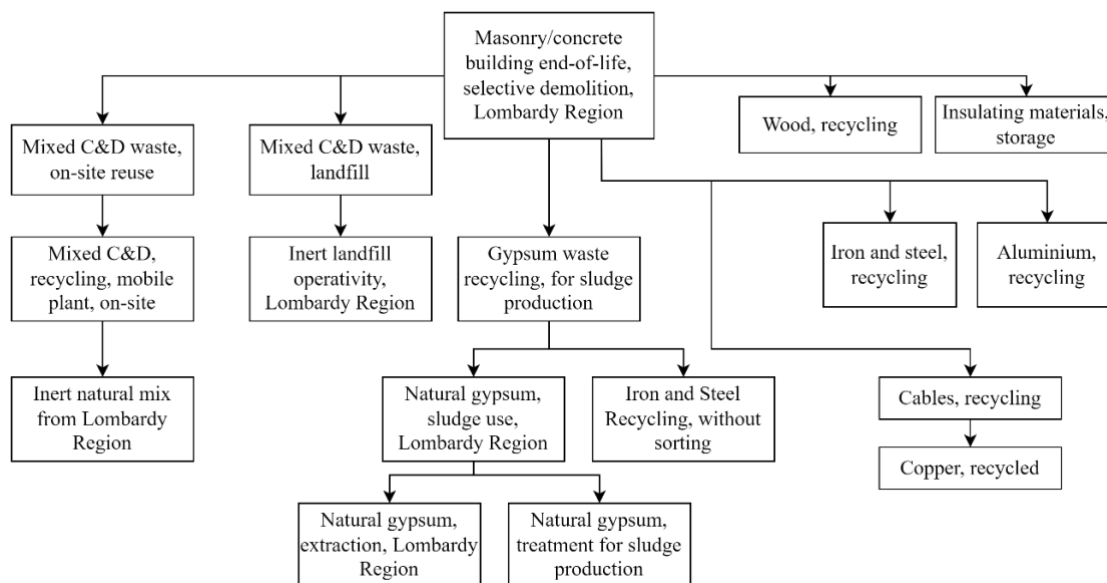


Figura 28. Dataset presenti su BDI-LCA per la demolizione di un edificio in muratura/calcestruzzo

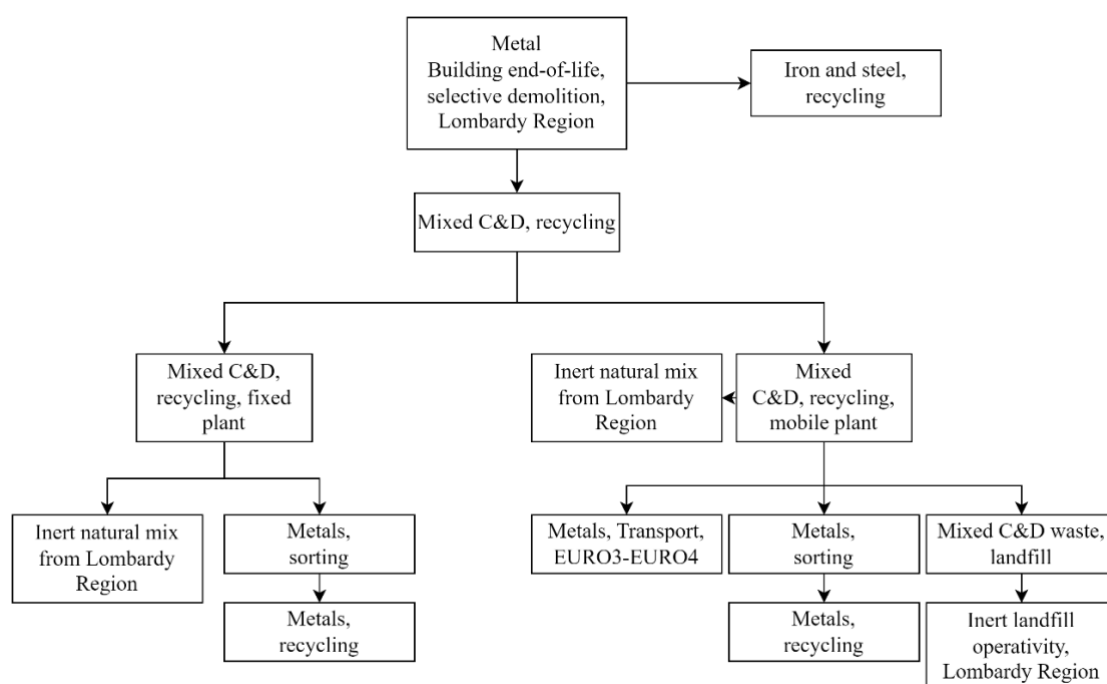


Figura 29. Dataset presenti su BDI-LCA per la demolizione di un edificio in struttura metallica

Bibliografia

- Borghi G, Pantini S, Rigamonti L (2018) Life cycle assessment of non-hazardous Construction and Demolition Waste (CDW) management in Lombardy Region (Italy). *J Clean Prod* 184:815–825. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.02.287>
- Cárcel-Carrasco J, Peñalvo-López E, Pascual-Guillamón M, Salas-Vicente F (2021) An Overview about the Current Situation on C&D Waste Management in Italy: Achievements and Challenges. *Build* 11:284. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS11070284>
- Carollo F, Ceruti F, Rigamonti L (2022) PhD dissertation: Circularity in construction and demolition waste management chain. Politecnico di Milano. Accessibile qui: arcadia.enea.it/component/jdownloads/?task=download.send&id=40&Itemid=101
- Circular 15/07/2005 No. 5205 of Ministry of the Environment: Indicazioni per l'operatività nel settore edile, stradale e ambientale, ai sensi del Decreto Ministeriale 8 maggio 2003, n. 203.
- Cutaia L, Altamura P, Ceruti F, Cellurale M, Corrado S, de Marco E, Luciano A, Klein A, Carollo F, Kissner J, Bertino G, Bukowski H, Sabbadin D (2022) A two-year stakeholder" consultation on the construction and infrastructure value chains. Output Paper of the activities coordinated by ENEA in 2020-2021. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.11001.13928>
- Dhir RK, de Brito J, Silva R, Lye CQ (2019) Recycled Aggregate Concrete. *Sustain Const Mat* 365–418. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100985-7.00010-8>
- EC-JRC (2011). Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context - based on existing environmental impact assessment models and factors (International Reference Life Cycle Data System - ILCD handbook)
- Ghufran M, Khan KIA, Ullah F, Nasir AR, Al Alahmadi AA, Alzaed AN, Alwetaishi M (2022) Circular Economy in the Construction Industry: A Step towards Sustainable Development. *Buildings* 2022, 12, 1004. <https://doi.org/10.3390/buildings12071004>
- ICESP (2020) Rapporto di filiera Rapporto di filiera sulla transizione verso l'economia circolare nel settore Costruzione&Demolizione e nel settore Agrifood. <https://www.icesp.it/sites/default/files/DocsGdL/L%27economia%20circolare%20nelle%20filieri%20industriali%20i%20casi%20Costruzione%26Demolizione%20e%20Agrifood.pdf>. Accessed 29 June 2022.
- ISPRA (2023) Special waste report 2023 edition. [rapportorifiutispeciali ed-2023 n-390 versionedati-di-sintesiit.pdf \(isprambiente.gov.it\)](https://www.isprambiente.gov.it/it/temi/rifiuti/rapporti-rifiuti-speciali-ed-2023-n-390-versione-dati-di-sintesi). Accessed 25 February 2024
- Rigamonti L, Pantini S, Borghi G (2017) Relazione FinaleValutazione con metodologia LCA (Life Cycle Assessment) dei flussi e del destino dei rifiuti da costruzione e demolizione. Report for Lombardy Region
- Zampori L, Pant, R (2019). Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method, EUR 29692 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-00654-1, doi: 10.2760/424613, JRC115959.

BANCA DATI LCA

AGROALIMENTARE

EDILIZIA COSTRUZIONI

ENERGIA

LEGNO ARREDO

LIFE CYCLE COSTING

ISBN 978-88-8286-466-8



enea.it