

# EDILIZIA

Studio LCA della filiera di elementi  
per muratura in calcestruzzo  
aerato autoclavato





AGENZIA NAZIONALE PER LE  
NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E LO  
SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE



ACCORDO DI COLLABORAZIONE TRA MASE ED ENEA  
PER LO SVILUPPO E LA DIFFUSIONE DELLA BANCA DATI  
ITALIANA DI LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)

# EDILIZIA

Studio LCA della filiera di elementi  
per muratura in calcestruzzo  
aerato autoclavato

Autori:

Silvio Viglia, Flavio Scrucca, Marilisa Cellurale\*, Caterina Rinaldi

Revisione critica:

Valentina Fantin

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

*\* Ricercatrice all'ENEA fino a gennaio 2024*

Data di pubblicazione: Febbraio 2026

## Sommario

|       |                                                                     |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Sintesi.....                                                        | 7  |
| 2     | Scopo del documento.....                                            | 8  |
| 3     | Descrizione della filiera.....                                      | 8  |
| 3.1   | Impatto socio-economico della filiera .....                         | 8  |
| 3.2   | Prodotti rappresentativi della filiera nazionale .....              | 9  |
| 3.2.1 | Norme Tecniche di riferimento per il settore .....                  | 10 |
| 3.3   | Aziende coinvolte nel progetto .....                                | 10 |
| 3.4   | Impatti ambientali e strumenti di sostenibilità .....               | 11 |
| 4     | Gruppo di lavoro.....                                               | 13 |
| 5     | Ambito di applicazione dello studio .....                           | 13 |
| 5.1   | Funzione del sistema, unità funzionale e flusso di riferimento..... | 13 |
| 5.2   | Descrizione del processo produttivo e confini del sistema .....     | 14 |
| 5.3   | Assunzioni e giudizi di valore .....                                | 16 |
| 5.4   | Gestione della multifunzionalità.....                               | 17 |
| 5.5   | Modellizzazione e metodologia di analisi degli impatti .....        | 17 |
| 5.6   | Revisione critica .....                                             | 18 |
| 6     | Modellazione dei dataset della filiera .....                        | 18 |
| 7     | Analisi di inventario .....                                         | 18 |
| 7.1   | Assunzioni utilizzate nello studio.....                             | 18 |
| 7.2   | Descrizione e documentazione processi unitari.....                  | 21 |
| 7.3   | Sviluppo del dataset.....                                           | 24 |
| 8     | Valutazione degli impatti ambientali .....                          | 24 |
| 8.1   | Caratterizzazione .....                                             | 25 |
| 8.2   | Normalizzazione.....                                                | 25 |
| 8.3   | Pesatura .....                                                      | 26 |
| 8.4   | Analisi di sensitività.....                                         | 27 |
| 9     | Interpretazione dei risultati.....                                  | 31 |
| 9.1   | Categorie di impatto rilevanti.....                                 | 31 |
| 9.2   | Fasi del ciclo di vita e processi rilevanti .....                   | 34 |

|       |                                                                                          |    |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 9.3   | Flussi elementari rilevanti.....                                                         | 36 |
| 9.3.1 | Confronto con le EPD delle aziende Xella Italia ed Ekoru .....                           | 37 |
| 9.3.2 | Confronto con il processo di produzione di CAA presente nella banca dati Ecoinvent ..... | 39 |
| 10    | Conclusioni.....                                                                         | 45 |
| 11    | Bibliografia .....                                                                       | 47 |

## Lista delle Figure

|                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Esempio di impiego di blocchi di CAA (fonte: EPD Ekoru S.r.l.) .....                                                                                        | 9  |
| Figura 2 – Diagramma di Flusso relativo alla produzione dei blocchi in CAA e ai confini del sistema dello studio. Fonte: modificato da EPD Gasbeton - Ekoru s.r.l..... | 16 |
| Figura 3 – Importanza percentuale delle diverse categorie d’impatto secondo la normalizzazione. ....                                                                   | 31 |
| Figura 4 - Rappresentazione grafica dei risultati della normalizzazione. ....                                                                                          | 33 |
| Figura 5 - Contributo percentuale dei vari processi alla categoria d’impatto Climate change (CC). 34                                                                   |    |
| Figura 6 - Contributo percentuale dei vari processi alla categoria d’impatto Resource use, fossil (RUF). ....                                                          | 35 |
| Figura 7 - Contributo percentuale dei vari processi alla categoria d’impatto Photochemical ozone formation (POF). ....                                                 | 36 |
| Figura 8 – Rappresentazione grafica del confronto dei risultati della caratterizzazione .....                                                                          | 41 |
| Figura 9 - Rappresentazione grafica del confronto dei risultati della normalizzazione. ....                                                                            | 45 |

## Lista delle Tabelle

|                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabella 1- Dati socio-economici della filiera del cemento e del calcestruzzo (Fonte: Federbeton 2023a) .....                                                                       | 9  |
| Tabella 2 - Elenco delle Environmental Product Declarations (EPDs) prodotte dai partner aziendali di progetto .....                                                                | 12 |
| Tabella 3 – Gruppo di lavoro dello studio di filiera .....                                                                                                                         | 13 |
| Tabella 4 – Unità funzionale .....                                                                                                                                                 | 14 |
| Tabella 5 - Range delle materie prime e dei sottoprodotti utilizzati per la produzione del CAA oggetto dello studio.....                                                           | 21 |
| Tabella 6 - Dati di inventario in input al processo produttivo di 1m <sup>3</sup> di CAA .....                                                                                     | 22 |
| Tabella 7 – Dati di inventario in output al processo produttivo di 1m <sup>3</sup> di CAA .....                                                                                    | 23 |
| Tabella 8 – Risultati caratterizzati per la produzione di 1m <sup>3</sup> di CAA .....                                                                                             | 25 |
| Tabella 9 – Risultati normalizzati .....                                                                                                                                           | 26 |
| Tabella 10 – Risultati pesati .....                                                                                                                                                | 26 |
| Tabella 11 – Analisi di sensitività .....                                                                                                                                          | 29 |
| Tabella 12 – Confronto dei risultati caratterizzati calcolati in questo studio con quelli pubblicati in due EPD delle aziende produttrici di CAA (UF: 1m <sup>3</sup> di CAA)..... | 37 |
| Tabella 13 – Confronto dei risultati caratterizzati per la produzione di 1m <sup>3</sup> di CAA del presente studio e di 1 m <sup>3</sup> di CAA-CH.....                           | 40 |
| Tabella 14 –Contributi dei singoli processi ai risultati della caratterizzazione dello studio del CAA-CH .....                                                                     | 43 |
| Tabella 15 - Contributi dei singoli processi ai risultati della caratterizzazione dello studio del CAA .....                                                                       | 44 |

## Lista degli Acronimi

|                                         |           |
|-----------------------------------------|-----------|
| Calcestruzzo Aerato Autoclavato         | CAA       |
| Environmental Product Declaration       | EPD       |
| Gruppo di Lavoro                        | GdL       |
| Life Cycle Assessment                   | LCA       |
| Unità Funzionale                        | UF        |
| Climate change                          | CC        |
| Ozone depletion                         | OD        |
| Ionising radiation                      | IR        |
| Photochemical ozone formation           | POF       |
| Particulate matter                      | OPM       |
| Human toxicity, non-cancer              | HTnon-c   |
| Human toxicity, cancer                  | HTc       |
| Acidification                           | AC        |
| Eutrophication, freshwater              | EUf       |
| Eutrophication, marine                  | EUm       |
| Eutrophication, terrestrial             | EUt       |
| Ecotoxicity, freshwater                 | ECT       |
| Land use                                | LU        |
| Water use                               | WU        |
| Resource use, fossils                   | RUf       |
| Resource use, minerals and metals       | RUm       |
| Climate change - Fossil                 | CCf       |
| Climate change - Biogenic               | CCb       |
| Climate change - Land use and LU change | CClu      |
| Human toxicity, non-cancer - organics   | HTnon-c-o |
| Human toxicity, non-cancer - inorganics | HTnon-c-i |
| Human toxicity, non-cancer - metals     | Htnon-c-m |
| Human toxicity, cancer - organics       | HTc-o     |
| Human toxicity, cancer - inorganics     | HTc-i     |
| Human toxicity, cancer - metals         | HTc-m     |
| Ecotoxicity, freshwater - organics      | ECT-o     |
| Ecotoxicity, freshwater - inorganics    | ETC-i     |
| Ecotoxicity, freshwater - metals        | ETC-m     |

## 1 Sintesi

Il presente report descrive lo studio di Life Cycle Assessment (LCA) della produzione di blocchi da costruzione in Calcestruzzo Aerato Autoclavato (CAA) non armato, che è stato sviluppato nell'ambito delle attività dell'Accordo tra il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica ed ENEA sullo sviluppo e diffusione della Banca Dati Italiana LCA (BDI-LCA).<sup>1</sup>

Il documento, che ha lo scopo di descrivere il profilo ambientale del prodotto "blocco da muratura non armato in CAA", fa riferimento alla filiera di produzione italiana e ai relativi aspetti socio-economici. Il Gruppo di Lavoro (GdL) che ha svolto lo studio è costituito dai ricercatori ENEA, dall'Associazione di Categoria di riferimento (Assobeton) e da due aziende leader del settore: Xella Italia S.r.l. ed Ekoru S.r.l.

I dati primari, raccolti dalle due aziende, riguardano i flussi in input (risorse materiche ed energetiche) e in output (rifiuti ed emissioni) del processo di produzione e sono caratterizzati da buona affidabilità e ottima rappresentatività in termini geografici, tecnologici e temporali.

Il presente report riporta gli step dello studio LCA svolto in conformità con le norme ISO 14040-44 e verificato da parte terza (revisione critica interna), della produzione di 1 m<sup>3</sup> di blocchi in CAA di densità media pari a 455 kg/m<sup>3</sup>. A conclusione dello studio è stato sviluppato 1 dataset per la BDI-LCA, relativo alla produzione dei blocchi in CAA, rappresentativa del contesto italiano.

L'analisi dei risultati di impatto ambientale, secondo il metodo EF 3.1 della Commissione Europea, derivanti dalla fase di normalizzazione indica che le categorie di impatto più significative sono Climate change (CC) (23,8% sul totale dei risultati di normalizzazione), Resource use, fossils (RUf) (19,7%) e Photochemical ozone formation (POF) (9,4%), seguite dalle categorie Eutrophication, freshwater (EUf) (8,4%), Acidification (AC) (6,2%), Eutrophication, terrestrial (EUt) (6,2%), Human Toxicity, non-cancer (5,4%) e Eutrophication, marine (EUm) (5,0%). Il contributo cumulativo di queste categorie è maggiore dell'80% dell'impatto totale prodotto.

I risultati ottenuti per la categoria di impatto Climate Change sono allineati e dello stesso ordine di grandezza, con quelli presenti nelle EPD pubblicate dalle due aziende (Allegato 1).

Nell'ambito del presente studio, è stata effettuata un'analisi di sensitività incentrata su: la tipologia di energia termica utilizzata nel processo produttivo, le modalità di trasporto dei materiali e dei componenti utilizzati in input al processo produttivo e la fonte di produzione dell'energia elettrica utilizzata dalle aziende per produrre il CAA.

In dettaglio, è stato considerato uno scenario alternativo basato sulla produzione di energia termica da biomassa lignocellulosica, che mostra una riduzione degli impatti nelle categorie Resource use, fossils (-34%), Ozone depletion (-55%) e Climate change (-15%), a fronte però di incrementi significativi nei risultati di tutte le altre categorie.

Per il trasporto di materiali e componenti è stata ipotizzata l'adozione esclusiva di veicoli EURO 6, con una lieve diminuzione dell'impatto in alcune categorie (Eutrophication, terrestrial ed Eutrophication, marine, entrambe circa -6%, e Photochemical ozone formation, -4,3%).

Infine, l'impiego di energia elettrica durante il processo produttivo, proveniente da impianti fotovoltaici, comporta una riduzione degli impatti totali, rispetto allo scenario base, in tutte le

---

<sup>1</sup> <https://bancadatiitalianalca.enea.it/Node/>

categorie di impatto più rilevanti. Il consumo di elettricità generata da pannelli fotovoltaici installati a terra garantisce infatti risparmi nell'impiego di risorse fossili (Resource use, fossils, -6,3%) e una diminuzione dell'impronta di carbonio del prodotto (Climate change, -2,5%), ma determina al contempo un aumento marcato del consumo di risorse minerali e metalli (Resource use, minerals and metals, +18,8%) e dell'uso del suolo (Land use, +35,9%).

In conclusione, lo studio ha descritto i risultati di impatto ambientale del ciclo di vita della produzione del CAA rappresentativo del contesto italiano, calcolati con il metodo della Commissione Europea EF 3.1, e tramite l'analisi di sensitività sono state approfondite alcune possibilità di intervento per la riduzione degli impatti complessivi. Inoltre, sono stati inseriti due confronti: 1) tra i risultati dello studio e quello di due EPD effettuate su prodotti simili dalle aziende Xella Italia S.r.l. ed Ekoru S.r.l.; 2) tra i risultati dello studio e quelli del dataset relativo alla produzione del CAA presente sulla banca dati Ecoinvent; entrambe le comparazioni hanno evidenziato un sostanziale allineamento con i risultati del presente studio.

La presenza del dataset sulla produzione del CAA nella BDI-LCA è di grande importanza, sia per valorizzare gli aspetti di sostenibilità del materiale e l'impegno in tal senso delle aziende che hanno contribuito allo studio, sia per l'utilità che potrà avere per progettisti ed esperti LCA per quanto riguarda in particolare le valutazioni di LCA a scala di edificio, anche in relazione all'applicazione dell'LCA come criterio premiante all'interno dei Criteri Ambientali Minimi (CAM) Edilizia del Green Public Procurement, di recente pubblicazione.

## 2 Scopo del documento

Il presente studio nasce da una collaborazione di ENEA con le aziende Xella Italia S.r.l., Ekoru S.r.l. e Assobeton, iniziata durante il progetto Arcadia<sup>2</sup> – Approccio di ciclo di vita nei contratti pubblici e Banca Dati Italiana LCA (PON Governance e Capacità Istituzionali 2014-2020), nell'ambito degli studi di filiera per il settore edilizia-costruzioni. Lo studio LCA di filiera è stato completato nell'ambito delle attività dell'Accordo tra MASE ed ENEA (2024-2029) che prevede attività di mantenimento, aggiornamento, ampliamento e promozione della Banca Dati Italiana LCA (BDI-LCA) e di disseminazione dei risultati raggiunti nell'ambito del progetto Arcadia.

## 3 Descrizione della filiera

### 3.1 Impatto socio-economico della filiera

L'industria italiana del cemento e del calcestruzzo riveste un ruolo strategico nel contesto economico del nostro Paese, negli anni più recenti sempre più complesso e sfidante. Nello scenario del 2023, in cui l'economia italiana ha registrato una performance positiva, la filiera del cemento e del calcestruzzo ha mostrato segnali di stabilità e crescita moderata, con un lieve incremento del fatturato complessivo, a cui si è contrapposta però una diminuzione del numero di imprese attive e degli addetti impiegati nel settore. Nel dettaglio, come si può osservare in Tabella 1, dopo il positivo andamento del 2021 e del 2022, il numero delle imprese del settore ha registrato una lieve contrazione del 4,4%, passando da 2.742 a 2.621 unità. Il numero di addetti nel settore ha invece

---

<sup>2</sup> <https://www.arcadia.enea.it>

subito una flessione del 2,6%, scendendo a circa 35.610 unità, con una riduzione di circa 1.000 unità rispetto al 2022 (Federbeton 2023a).

Il ruolo strategico che la filiera riveste nel contesto nazionale è comunque evidenziato, oltre che dai dati sul valore della produzione - pari a 13,76 miliardi di euro nel 2023 (+2,1% rispetto al 2022) - anche dai dati relativi alle esportazioni, che sono aumentate del 4,5%, attestandosi a 1,1 miliardi di euro. Le importazioni hanno invece fatto registrare una crescita più marcata nel corso dell'ultimo anno (+8,1% rispetto al 2022), raggiungendo i 610,6 milioni di euro (Federbeton 2023a).

Tabella 1- Dati socio-economici della filiera del cemento e del calcestruzzo (Fonte: Federbeton 2023a)

|                                | 2020   | 2021   | 2022   | 2023   |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Numero imprese                 | 2.679  | 2.756  | 2.742  | 2.621  |
| Addetti                        | 33.832 | 34.577 | 36.563 | 35.610 |
| Fatturato complessivo (Mil. €) | 9.219  | 10.956 | 13.020 | 13.289 |
| Esportazioni (Mil. €)          | 1.580  | 1.785  | 1.053  | 1.101  |
| Importazioni (Mil. €)          | 394    | 500    | 565    | 611    |

### 3.2 Prodotti rappresentativi della filiera nazionale

La filiera di interesse del presente studio LCA di filiera riguarda la produzione di blocchi da costruzione in Calcestruzzo Aerato Autoclavato (CAA) non armato di diversi formati, facenti parte dell'attività economica identificata con il codice ATECO 23.61.00 – Fabbricazione di prodotti in calcestruzzo per l'edilizia. L'immagine in Figura 1 mostra esempi di impiego del materiale oggetto di studio.



Figura 1 – Esempio di impiego di blocchi di CAA (fonte: EPD Ekoru S.r.l.)

Il prodotto è stato selezionato in collaborazione con l'Associazione Assobeton<sup>3</sup> in ragione della diffusione degli elementi nell'edilizia corrente per caratteristiche quali leggerezza, rapidità e semplificazione delle fasi di posa, che lo rendono un prodotto più versatile del laterizio tradizionalmente adottato con la stessa funzione. Assobeton promuove infatti l'utilizzo del calcestruzzo in generale e, quindi del CAA, come materiale sostenibile, grazie alle sue proprietà di compatibilità ambientale e alle possibilità di riciclo, impegnandosi nella ricerca e sviluppo di nuove tecnologie e soluzioni costruttive, al fine di migliorare le prestazioni e l'efficienza delle costruzioni in calcestruzzo.

Il riconoscimento dell'incremento di impiego del prodotto è testimoniato dalla recente introduzione della dicitura esatta del prodotto nella versione del 3 Dicembre 2025 dei Criteri Ambientali Minimi 2025<sup>4</sup> che ne aumenta la competitività nell'ambito degli appalti pubblici, e quindi del Green Public Procurement.

### 3.2.1 Norme Tecniche di riferimento per il settore

La norma UNI EN 771-4:2015 "Specifica per elementi per muratura – Parte 4: Elementi di calcestruzzo aerato autoclavato per muratura" individua le prestazioni degli elementi per muratura di CAA, le cui principali destinazioni d'uso sono differenti tipi di applicazioni strutturali e non strutturali in tutte le forme di costruzioni murarie, inclusi muri a parete semplice, sia con funzione portante che di semplice tamponamento, cavità, tramezzi, comprendendo anche muri che possono fornire protezione all'incendio, isolamento termico, isolamento acustico e muratura esterna dei camini (esclusi i condotti dei camini).

Tale normativa tecnica prevede che per la messa in circolazione dei prodotti in CAA nell'Unione Europea, sia redatta una specifica dichiarazione di prestazione, contenente informazioni relative alle caratteristiche dimensionali, meccaniche e termo-igrometriche degli stessi prodotti, ma anche alle loro prestazioni di isolamento acustico.

### 3.3 Aziende coinvolte nel progetto

Per lo studio di filiera si sono utilizzati i dati forniti dalle aziende Xella Italia S.r.l. e Ekoru S.r.l. (di seguito anche "Xella Italia" e "Ekoru").

Xella Italia fa parte del Gruppo Xella ed è presente in Italia dal 2005. L'azienda ha una dimensione internazionale, è presente in 22 Paesi con 75 stabilimenti che contano oltre 5.000 dipendenti; essa produce e commercializza sistemi CAA e prodotti a base di silicati di calcio. I prodotti in calcestruzzo aerato autoclavato sono commercializzati con il marchio Ytong. In Italia, l'azienda ha la sua sede commerciale e amministrativa a Grassobbio, in provincia di Bergamo, mentre i due poli produttivi sono dislocati a Pontenure (PC) e ad Atella (PZ).

L'azienda Ekoru s.r.l., si trova a Volla in provincia di Napoli. Lo stabilimento si sviluppa all'interno di una zona industriale con una superficie di circa 56.000 m<sup>2</sup>, la cui produzione da anni ormai consiste in blocchi di CAA conosciuti con il nome commerciale Gasbeton®. L'azienda, da sempre attenta alle

---

<sup>3</sup> ASSOJETON è l'Associazione Nazionale di Categoria delle industrie produttrici di manufatti, componenti e strutture in calcestruzzo. <https://www.assobeton.it/assobeton>

<sup>4</sup> Cfr. par. 2.4.3 *Prodotti prefabbricati in calcestruzzo, in calcestruzzo vibrocompresso e in calcestruzzo aerato autoclavato.*

esigenze di qualità ed ambiente, è certificata anche per la ISO 9001:2015 valida per la gestione della qualità all'interno dello stabilimento.

Entrambe le aziende, leader nel settore a livello nazionale, sono impegnate nei confronti della sostenibilità ambientale, ponendo attenzione non solo alla riduzione dei consumi di energia e delle emissioni di CO<sub>2</sub> nella fase d'uso degli edifici, ma anche agli impatti legati alla produzione dei materiali utilizzati per la loro costruzione. Per questo motivo, entrambe le aziende hanno già precedentemente valutato i loro prodotti tramite studi LCA per misurare le proprie prestazioni ambientali e promuovere scelte progettuali orientate alla sostenibilità ambientale. Sia Xella Italia S.r.l. che Ekoru S.r.l. possiedono inoltre le Dichiarazioni Ambientali di Prodotto - EPD<sup>5</sup>, secondo la ISO 14025 e i sistemi EPD Italia ed Environdec, riportate in Allegato 1.

L'interesse ed esigenza di partecipazione alle attività dell'accordo MASE-ENEA sull'ampliamento e diffusione della Banca Dati Italiana LCA, derivano dalla volontà di valorizzare i propri prodotti e l'impegno nei confronti della sostenibilità, nel quadro di politiche e provvedimenti, che, sia a livello nazionale che europeo, qualificano il mercato delle opere pubbliche e indirizzano le scelte dei progettisti. Il voler contribuire inoltre allo sviluppo dei dataset della BDI-LCA, rientra in un'ottica lungimirante che vede, nella disponibilità di dataset specifici, la possibilità di un utilizzo da parte dei progettisti anche in un'ottica di valutazioni di LCA a scala di edificio, e in relazione all'applicazione dei CAM, in cui l'LCA a scala di edificio è inserito come criterio premiante nella versione aggiornata ed appena pubblicata.

### **3.4 Impatti ambientali e strumenti di sostenibilità**

Dal punto di vista dell'impatto ambientale della filiera, la produzione del cemento rappresenta indubbiamente l'elemento determinante. A livello italiano, si stima che il settore del cemento rappresenti circa il 5% delle emissioni totali nazionali, e che il 60-70% circa delle emissioni dirette di CO<sub>2</sub> derivi da emissioni conseguenti a reazioni chimiche di processo, necessarie alla produzione del cemento (Federbeton, 2021). Un percorso di riduzione delle emissioni del comparto risulta dunque strategico anche ai fini del raggiungimento degli obiettivi nazionali di decarbonizzazione.

Analizzando le emissioni specifiche di CO<sub>2</sub> per tipologia di prodotto (Federbeton 2023b), è possibile osservare che le emissioni per tonnellata di cemento si sono attestate nel 2023 sul valore di 620 kgCO<sub>2</sub>/t (-2,6% rispetto al 2022), quelle per tonnellata di cementizio sul valore di 577 kgCO<sub>2</sub>/t (-6,6% rispetto al 2022) e quelle per tonnellata di clinker sul valore di 818 kgCO<sub>2</sub>/t (-0,1% rispetto al 2022). In tale contesto, caratterizzato da una progressiva riduzione degli impatti ambientali, ma anche da notevoli ulteriori potenzialità di intervento, le etichette ambientali di prodotto basate sulla metodologia LCA, che forniscono informazioni sulla performance ambientale complessiva o su uno o più aspetti specifici del ciclo di vita, rappresentano un utile e strategico strumento di sostenibilità in un'ottica di miglioramento continuo e di supporto alla progettazione e ad azioni di economia circolare. Le etichette ambientali basate sul ciclo di vita sono definite dalla serie delle norme internazionali ISO 14020:1999. Quelle di maggiore interesse per il settore sono:

---

<sup>5</sup> a) <https://www.epditaly.it/epd/calcestruzzo-aerato-autoclavato-xella-italia-s-r-l/>;

b) [https://www.gasbeton.it/wp-content/uploads/2021/04/EPD-Gasbeton\\_ITA-environdec.pdf](https://www.gasbeton.it/wp-content/uploads/2021/04/EPD-Gasbeton_ITA-environdec.pdf)

- Tipo II (ISO 14021): autodichiarazioni del produttore su caratteristiche ambientali specifiche del prodotto.

- Tipo III (ISO 14025) Dichiarazioni ambientali di prodotto (EPD – Environmental Product Declaration) basate su uno studio LCA, secondo regole definite per ciascuna categoria di prodotto (Product Category Rules - PCR) per consentire il confronto degli aspetti ambientali tra prodotti simili; sottoposte a verifica di parte terza.

In particolare, le EPD descrivono gli impatti ambientali legati alla produzione, uso, fine vita di una specifica quantità di prodotto o di un servizio, considerando l'intero ciclo di vita.

Nello specifico, la norma UNI EN 15804:2021 (UNI, 2021) "Sostenibilità delle costruzioni – Dichiarazioni ambientali di prodotto – Regole quadro di sviluppo per categoria di prodotto" fornisce le indicazioni metodologiche per lo sviluppo di EPD per il settore delle costruzioni. I sistemi maggiormente diffusi in Italia, EPD Italy<sup>6</sup> ed EPD International-Envirodec<sup>7</sup>, hanno sviluppato PCR specifiche per numerosi materiali del settore dell'edilizia e costruzioni.

Le aziende Ekoru e Xella Italia hanno sviluppato studi LCA dei prodotti (Paleari & Miliani, 2018) e le EPD di seguito elencate (Tabella 2):

*Tabella 2 - Elenco delle Environmental Product Declarations (EPDs) prodotte dai partner aziendali di progetto*

| AZIENDA/E    | ANNO DI PUBBLICAZIONE | PRODOTTO                                                                                                                                   | STABILIMENTO        | PROGRAM OPERATOR  |
|--------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------|
| EKORU        | 2021                  | Blocchi da costruzione non armati, di diversi formati in calcestruzzo aerato autoclavato (6 prodotti caratterizzati da differenti densità) | (IT) Volla - NA     | EPD International |
| XELLA ITALIA | 2022                  | Blocchi da costruzione non armati, di diversi formati in calcestruzzo aerato autoclavato                                                   | (IT) Pontenure - PC | EPD Italy         |

Oltre alle EPD pubblicate dalle aziende coinvolte nel presente studio, sono state reperite altre EPD relative al prodotto in esame. Nel 2018 è stata rilasciata una dichiarazione, presente sul database EPDItaly (attualmente scaduta), dalla azienda DOC Airconcrete S.r.l. con produzione nello stabilimento sito in Zona Industriale Valle di Vitalba, Atella (PZ).

Sul database "Envirodec" risultano altre due EPD prodotte da aziende non italiane (Kuwait e Turchia). La prima è stata prodotta dall'azienda "National Industries Company" (pubblicata il 29/07/2024 e valida fino al 30/06/2029) (National Industries Company, 2024), mentre la seconda è stata prodotta dall'azienda turca "Gaziantep Ytong" (pubblicata il 01/04/2020 con scadenza il 31/03/2025) (Gaziantep Ytong Sanayi A.Ş., 2020).

Infine, sul sito dell'Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU)<sup>8</sup>, un'associazione tedesca che gestisce un programma per il rilascio di EPD per i materiali da costruzione, sono disponibili diverse EPD, in lingua inglese ed in lingua tedesca, relative al CAA. tra cui una pubblicata il 24/10/2023 e con scadenza 23/10/2028 dalla polacca Solbet (Solbet Sp. z o.o., 2023), oltre ad una serie di EPD pubblicate dal gruppo Xella su CAA di diversa densità (Xella Italia S.r.l, 2022).

<sup>6</sup> <https://www.epditaly.it>

<sup>7</sup> <https://www.envirodec.com/home>

<sup>8</sup> <https://ibu-epd.com>

## 4 Gruppo di lavoro

Di seguito (Tabella 3) si riportano i riferimenti dei componenti del GdL che hanno partecipato a vario titolo all'attività e contribuito attivamente al completamento dello studio.

Tabella 3 – Gruppo di lavoro dello studio di filiera

| NOME                 | ENTE/IMPRESA                    | TIPOLOGIA                 | SITO WEB                                                                                                       | CONTATTI                                                                       |
|----------------------|---------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| Caterina Rinaldi     | ENEA (referente del progetto)   | Centro di ricerca         | <a href="http://www.enea.it">www.enea.it</a>                                                                   | <a href="mailto:caterina.rinaldi@enea.it">caterina.rinaldi@enea.it</a>         |
| Silvio Viglia        | ENEA                            | Centro di ricerca         | <a href="http://www.enea.it">www.enea.it</a>                                                                   | <a href="mailto:silvio.viglia@enea.it">silvio.viglia@enea.it</a>               |
| Flavio Scrucca       | ENEA                            | Centro di ricerca         | <a href="http://www.enea.it">www.enea.it</a>                                                                   | <a href="mailto:flavio.scrucca@enea.it">flavio.scrucca@enea.it</a>             |
| Marilisa Cellurale*  | ENEA                            | Centro di ricerca         | <a href="http://www.enea.it">www.enea.it</a>                                                                   | <a href="mailto:marilisa.cellurale@enea.it">marilisa.cellurale@enea.it</a>     |
| Valentina Fantin     | ENEA (revisore critico interno) | Centro di ricerca         | <a href="http://www.enea.it">www.enea.it</a>                                                                   | <a href="mailto:valentina.fantin@enea.it">valentina.fantin@enea.it</a>         |
| Alessandro Miliani   | Xella Italia S.r.l.             | Impresa                   | <a href="http://www.xella-italia.it">www.xella-italia.it</a>                                                   | <a href="mailto:alessandro.miliani@xella.com">alessandro.miliani@xella.com</a> |
| Andrea Riva          | Ekoru S.r.l.<br>(gruppo Bacchi) | Impresa                   | <a href="http://www.gasbeton.it">www.gasbeton.it</a><br><a href="http://www.bacchispa.it">www.bacchispa.it</a> | <a href="mailto:andrea.riva@bacchispa.it">andrea.riva@bacchispa.it</a>         |
| Alessandra Ronchetti | Assobeton                       | Associazione di categoria | <a href="https://www.assobeton.it">https://www.assobeton.it</a>                                                | <a href="mailto:a.ronchetti@assobeton.it">a.ronchetti@assobeton.it</a>         |

## 5 Ambito di applicazione dello studio

### 5.1 Funzione del sistema, unità funzionale e flusso di riferimento

La funzione del sistema, dettagliata in Tabella 4, è la produzione di blocchi di Calcestruzzo Aerato Autoclavato destinata all'uso di all'applicazione in edilizia come muratura portante e non portante (es. tamponature).

L'Unità Funzionale (UF) adottata ai fini dello studio è 1 blocco di dimensioni nominali pari a 1 m<sup>3</sup> in CAA di densità media pari a 455 kg/m<sup>3</sup> e di durata media pari a 100 anni. Il packaging è escluso dall'Unità Funzionale. Il flusso di riferimento coincide con l'Unità Funzionale.

---

\* Ricercatrice all'ENEA fino a gennaio 2024

Tabella 4 – Unità funzionale

|                                                    |                                                                             |                                                                                                                                                      |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Funzione fornita</b>                            | Che cosa?                                                                   | Elementi per murature in calcestruzzo aerato autoclavato                                                                                             |
| <b>Quantità della funzione fornita</b>             | Quanto?                                                                     | Produzione 1 blocco in Calcestruzzo Aerato Autoclavato con densità media 455 kg/m <sup>3</sup>                                                       |
| <b>Il livello di qualità della funzione attesa</b> | Quanto bene la funzione viene espletata (non sempre applicabile/definibile) | Norma di riferimento: UNI EN 771-4:2015<br>"Specifica per elementi per muratura – Parte 4: Elementi di calcestruzzo aerato autoclavato per muratura" |
| <b>La durata del prodotto</b>                      | Per quanto tempo la funzione è espletata?                                   | La durata media può essere stimata in 100 anni                                                                                                       |

## 5.2 Descrizione del processo produttivo e confini del sistema

Gli elementi in calcestruzzo aerato autoclavato (CAA), sono blocchi di origine minerale impiegati, come detto, in ambito edilizio. Il termine "autoclavato" definisce la modalità di preparazione di tale calcestruzzo: il processo di produzione si conclude infatti con l'indurimento del materiale all'interno delle autoclavi, che consentono di far maturare il materiale a temperatura, pressione e umidità controllate.

Il CAA viene prodotto sotto forma di blocchi costituiti da una struttura alveolare che comprende micro e macroporosità distribuite nella massa in maniera uniforme, in funzione della densità desiderata. Questo tipo di struttura consente al materiale di ottenere la sua caratteristica leggerezza. Le aziende producono diverse tipologie di blocchi CAA che differiscono per densità in base all'applicazione finale del prodotto e di conseguenza per le quantità di materie prime utilizzate. Il ciclo produttivo di queste differenti tipologie segue un percorso analogo. Le materie prime impiegate sono: acqua, sabbia, gesso, calce, cemento ed un agente espandente. Quest'ultimo elemento ha la funzione di far lievitare la miscela, esso innesca infatti una reazione che sviluppa idrogeno e il composto ingloba aria aumentando di volume, da qui il termine "aerato". Una volta espanso e parzialmente indurito in apposite camere di maturazione, il materiale viene prima tagliato e poi fatto indurire in autoclave. Il particolare metodo di autoclavatura consente al materiale di modificare le proprie caratteristiche chimico-fisiche, come la resistenza meccanica e la densità (Ekoru S.r.l., 2021).

La sabbia, macinata a umido, viene omogeneizzata con la calce ed il cemento in modo da ottenere un impasto fluido, che viene versato in apposite vasche metalliche nelle quali, in fase di lievitazione, avverrà la formazione delle porosità interne alla massa che contraddistinguono il materiale. Questo fenomeno è innescato da una polvere di alluminio specificatamente progettata, che, reagendo con l'idrossido di calcio, libera bolle di idrogeno nell'atmosfera le quali sono poi sostituite da aria aumentando il volume della miscela, e conferendo al materiale le proprietà caratteristiche di isolamento termico.

Il processo di lievitazione si interrompe quando il fenomeno di presa dei leganti cementizi consente al materiale di raggiungere una consistenza sufficientemente solida. Durante questo processo

l'idrogeno viene rilasciato nell'atmosfera e sostituito da aria che è il miglior isolante termico naturale.

Dopo aver estratto le forme, il materiale ancora sufficientemente soffice viene tagliato in blocchi o pannelli e chiuso in un'autoclave per 11-12 ore. Durante il processo di maturazione a vapore saturo, quando la temperatura raggiunge i 190 - 200 °C e la pressione da 8 a 12 bar, la sabbia di quarzo reagisce con l'idrossido di calcio e forma calcio silicato idrato, che fornisce al materiale le sue caratteristiche meccaniche.

Terminato il processo in autoclave, il materiale è immediatamente pronto per l'uso. In funzione della densità, il prodotto finale è composto di materiale solido per circa il 20-30 % del volume, mentre, per il restante 70-80% del volume, è composto da macroporosità visibili a occhio nudo e microporosità visibili al microscopio, responsabili delle proprietà fisiche e meccaniche che lo caratterizzano (Xella Italia, 2022).

Ai fini del presente studio, sono state considerate le fasi di produzione in stabilimento del CAA, dalla macinazione al confezionamento; sono esclusi gli imballaggi e la movimentazione e stoccaggio nel piazzale perché essi, sulla base dei risultati di studi LCA effettuati in precedenza dalle aziende Xella Italia ed Ekoru, per l'ottenimento delle EPD, presentano impatti trascurabili. In Figura 2 sono mostrati i confini del sistema analizzato che si possono definire "dalla culla al cancello" (secondo la norma EN 15804 A1+A2+A3), comprendendo quindi l'estrazione delle materie prime (A1), il loro trasporto allo stabilimento produttivo (A2) ed il processo produttivo (A3).

Le fasi di uso e di fine vita non sono incluse in questo studio, in quanto ai fini dell'utilizzo della Banca Dati Italiana LCA (ad esempio per studi LCA a scala di edificio) si ritiene rilevante poter disporre di un dataset che comprende solamente le fasi dalla culla fino ai cancelli dell'azienda, in quanto l'utilizzatore potrà poi includere anche eventuali fasi successive del ciclo di vita a seconda di obiettivi specifici e puntuali.

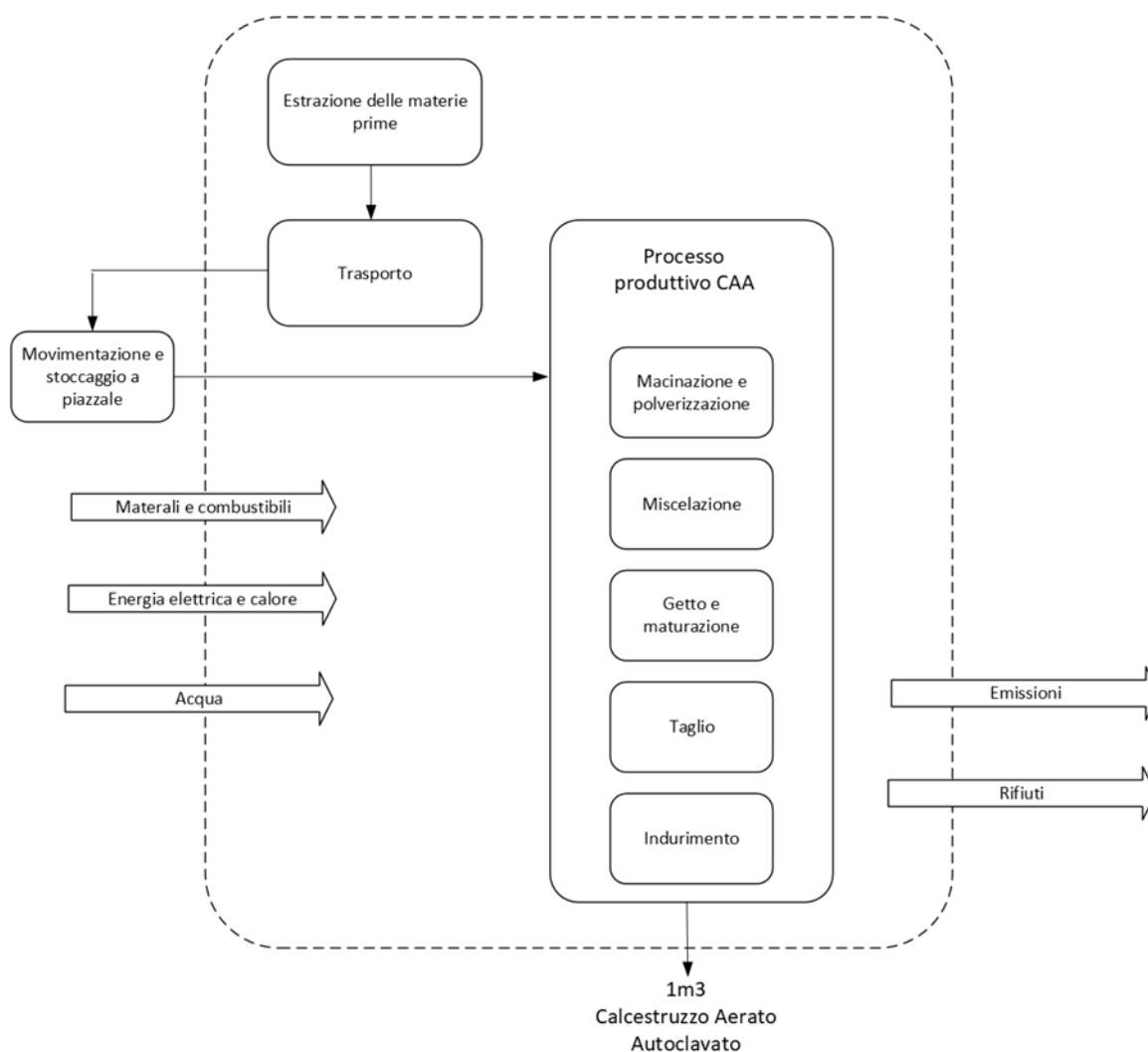


Figura 2 – Diagramma di Flusso relativo alla produzione dei blocchi in CAA e ai confini del sistema dello studio. Fonte: modificato da EPD Gasbeton<sup>9</sup> - Ekoru s.r.l.

### 5.3 Assunzioni e giudizi di valore

La modellazione del sistema è stata eseguita facendo ricorso esclusivamente a dati primari sito-specifici, forniti direttamente dalle due aziende coinvolte nel GdL (Xella Italia ed Ekoru), nell’ambito della collaborazione alle attività di progetto. In particolare, le due aziende si sono confrontate con l’obiettivo di fornire dati medi di input e output ai fini dello sviluppo di un dataset da inserire nella BDI-LCA ritenuto, da giudizio esperto del GdL, rappresentativo della produzione nazionale del CAA. I dati di inventario relativi alle quantità fisiche di materiali impiegati nei diversi processi sono stati forniti conformemente ai requisiti di qualità e completezza richiesti ai fini dello studio LCA e sono da ritenersi ragionevolmente rappresentativi della filiera oggetto di studio.

Nel complesso, con riferimento alla metodologia utilizzata nel progetto per lo sviluppo degli studi LCA di filiera e dei dataset, “Metodologia per gli studi di filiera della Banca Dati italiana LCA (versione 2 - novembre 2021)”, la qualità dei dati utilizzati nello studio è ritenuta buona e, in particolare, si ritiene:

<sup>9</sup> [https://www.gasbeton.it/wp-content/uploads/2021/04/EPD-Gasbeton\\_ITA-environddec.pdf](https://www.gasbeton.it/wp-content/uploads/2021/04/EPD-Gasbeton_ITA-environddec.pdf)

- molto buona l'affidabilità dei dati (i dati sono stati forniti dalle aziende che avendo l'EPD hanno già adottato un sistema di raccolta dati affidabile, verificabile e tracciato);
- molto buona la rappresentatività temporale dei dati (nessun dato si riferisce a un periodo antecedente di 3 anni lo studio di filiera);
- molto buona la rappresentatività geografica dei dati (il processo descritto è rappresentativo del luogo geografico indicato nello studio di filiera);
- molto buona la rappresentatività tecnologica dei dati (i dati descrivono in modo dettagliato la tecnologia attualmente presente sul mercato per la filiera di riferimento).

#### 5.4 Gestione della multifunzionalità

Non sono stati individuati problemi di multifunzionalità per il prodotto oggetto di analisi nel presente studio di filiera.

#### 5.5 Modellizzazione e metodologia di analisi degli impatti

Per lo svolgimento dello studio è stato utilizzato il software SimaPro versione 10.2.0.0 contenente la banca dati commerciale Ecoinvent 3.11 (Wernet et al., 2016), da cui sono stati selezionati tutti i dataset utilizzati nella modellazione e riguardanti i dati di background. In un'ottica di rappresentatività geografica, temporale e tecnologica dei processi di banca dati utilizzati, si è fatto riferimento a tecnologie medie italiane ed europee, disponibili nel database Ecoinvent 3.11, e ove non disponibili, a tecnologie medie globali.

Il dataset per la BDI-LCA e i relativi metadati, sono nel formato International Life Cycle Data System (ILCD)<sup>10</sup> sviluppato dal Joint Research Center della Commissione Europea e dalla Direzione Generale per l'Ambiente della Commissione Europea (DG ENV).

Secondo le indicazioni della ISO 14040, la fase di valutazione degli impatti ha lo scopo di evidenziare l'entità delle modificazioni ambientali che si generano a seguito dei rilasci nell'ambiente e del consumo di risorse provocati dal sistema di prodotto in esame. Tale fase consiste quindi nell'imputare i consumi e le emissioni a specifiche categorie di impatto, riferibili ad effetti ambientali conosciuti, e nel quantificare l'entità del contributo che il processo arreca agli effetti considerati.

La valutazione degli impatti in accordo alla ISO 14040 si articola nelle seguenti fasi obbligatorie:

- Classificazione: assegnazione dei dati raccolti nell'inventario ad una o più categorie d'impatto ambientale selezionate;
- Caratterizzazione: calcolo dei risultati di ogni indicatore di categoria; in dettaglio, si determina il contributo relativo di ogni sostanza emessa o risorsa usata;
- Valutazione vera e propria dell'impatto.

Come fasi opzionali della valutazione degli impatti di ciclo di vita, sono invece indicate dalla ISO 14040 le operazioni di normalizzazione, raggruppamento e ponderazione (pesatura).

In conformità con la metodologia di Arcadia, il metodo di valutazione degli impatti utilizzato è il metodo EF 3.1 ( Andreasi Bassi et al., 2023), che costituisce il metodo di valutazione dell'iniziativa della Commissione Europea sull'impronta ambientale (Zampori e Pant, 2019) e che comprende caratterizzazione, normalizzazione e ponderazione.

---

<sup>10</sup> <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ilcd.html>

## 5.6 Revisione critica

La metodologia per gli studi di filiera del progetto Arcadia prevede una revisione critica indipendente degli studi LCA di filiera e dei rispettivi dataset, effettuata da revisori interni afferenti ad ENEA, oppure da revisori esterni. La verifica dello studio LCA (dati raccolti, calcolati e stimati, modello LCA) assicura la conformità alle norme ISO 14040-44, mentre la validazione delle informazioni contenute nello studio valuta se i dati e le informazioni utilizzate nello studio sono consistenti, affidabili e tracciabili, e se i calcoli sono stati eseguiti correttamente. Nella verifica dello studio LCA e dei dataset viene valutato che essi siano completi, consistenti e conformi alle norme ISO 14040-44 e al formato ILCD.

Lo studio LCA è stato sottoposto a revisione critica interna, secondo la metodologia di revisione prevista dal progetto Arcadia. Il revisore ha stabilito che lo studio LCA risulta conforme alla metodologia ISO 14040-44, al formato ILCD e alla “Metodologia per gli studi di filiera della Banca Dati italiana LCA (versione 2 - novembre 2021)”. Inoltre, il dataset sviluppato e i relativi metadati sono da ritenere corretti e coerenti con lo studio LCA.

## 6 Modellazione dei dataset della filiera

Il modello scelto per la creazione dei dataset per la banca dati di Arcadia è di tipo “attribuzionale”, ovvero un modello che riproduce la catena di fornitura del prodotto oggetto di analisi utilizzando dati ed eventuali processi di background rappresentativi di una situazione media del mercato di riferimento. Il dataset creato a partire dal presente studio di filiera è relativo alla produzione del prodotto, senza includere la fase di “downstream” (trasporti del prodotto finito alla destinazione finale di uso, uso e fine vita).

## 7 Analisi di inventario

Ai fini della raccolta dei dati primari presso le aziende coinvolte nel GdL, a seguito di un’attenta analisi della filiera e di confronti interni al GdL, sono state messe a punto delle specifiche schede in grado di semplificare e sistematizzare la raccolta stessa. Tali schede di raccolta dati, predisposte su fogli di calcolo Microsoft Excel, sono dunque state condivise con le aziende, che hanno identificato e raccolto dati medi (tra le due aziende) relative ai loro processi produttivi del CAA. Tale procedura ha permesso di effettuare una raccolta dati molto dettagliata relativa alla produzione di CAA delle aziende coinvolte, permettendo di quantificare tutti i flussi in input e output relativi al processo produttivo.

### 7.1 Assunzioni utilizzate nello studio

Per effettuare l’analisi di inventario, le aziende coinvolte nel progetto hanno collaborato tra di loro per fornire un modello medio relativo ai processi di produzione del blocco in CAA, caratterizzato da dati medi di input e output delle loro produzioni (in dettaglio, le aziende hanno condiviso tra di loro i dati relativi al proprio processo produttivo e hanno identificato dei dati medi, che sono stati in seguito forniti al GdL per lo studio di filiera); tali dati perciò si possono ritenere rappresentativi della produzione nazionale di CAA.

Gli input e gli output sono riferiti ai processi di lavorazione del blocco in CAA che avvengono in stabilimento e sono relativi alle fasi di macinazione e polverizzazione, miscelazione, getto e maturazione, taglio e autoclavaggio.

Per quanto riguarda i flussi in input, essi si articolano in consumo di materie prime (calce viva, sabbia, gesso), di prodotti (cemento Portland), di sotto-prodotti provenienti da altre filiere (polvere di alluminio), di additivi (acido cloridrico, agente idrofobico, olio per modellatura, cloruro di sodio, idrossido di sodio, acciaio), di acqua, energia elettrica e termica. Per le materie prime e i sottoprodotti è stato utilizzato il valore medio della quantità utilizzata dalle due aziende (espressa come quantità minima e quantità massima), come riportato nella tabella 5.

In particolare, le principali assunzioni effettuate, riguardanti i flussi in input al processo produttivo, sono relative ai seguenti materiali/prodotti:

- Polvere di alluminio: per questo input è stato utilizzato il dataset di Ecoinvent relativo alla produzione di una generica lega di alluminio, non essendo disponibile in banca dati uno specifico dataset che rappresenti la produzione di polvere di alluminio, né altri dataset che rappresentino la macinazione di alluminio per produrre polvere. L'adozione di questo dataset (peraltro unica scelta disponibile in banca dati), potrebbe leggermente sovrastimare l'impatto di questo input poiché la polvere di alluminio viene generalmente prodotta a partire da alluminio riciclato che viene fuso e atomizzato con getti d'aria o gas ad alta pressione e solo eventualmente macinato.
- Agente idrofobico: questo prodotto viene utilizzato in particolare per il calcestruzzo basale: poiché esso è soggetto ad esposizione all'umidità, tale prodotto lo rende idrorepellente, impedendo l'assorbimento dell'acqua e proteggendolo da danni causati dall'umidità. Non essendo disponibile la composizione chimica esatta di questo prodotto, a causa di problemi di riservatezza, si è valutata la sua possibile composizione identificando schede tecniche di prodotti analoghi presenti in rete (es. <https://www.murexin.at/it/produkte/idrofobizzante-per-calcestruzzo-h-2/>); poiché si è accertato che il prodotto è composto da silani (composti di idrogeno e silicio), si è utilizzato per la sua modellazione un dataset di Ecoinvent relativo alla produzione di una sostanza chimica inorganica generica.
- Acciaio: per la modellazione dell'acciaio usato nel processo di macinazione a umido della sabbia in mulini a sfere d'acciaio, è stato utilizzato il dataset di Ecoinvent relativo all'acciaio utilizzato per strutture di rinforzo.

Ai fini della modellazione dei consumi energetici, aspetto particolarmente rilevante del ciclo produttivo, si è considerato che l'approvvigionamento di energia elettrica provenga esclusivamente dalla rete nazionale, utilizzando perciò un approccio di tipo "conservativo", e non contemplando il possibile utilizzo di energia autoprodotta in loco da impianti a fonti rinnovabili di proprietà delle aziende. Tale scelta metodologica sarà perciò oggetto di analisi di sensitività per valutare la variazione dei risultati totali di impatto ambientale del ciclo di vita della produzione del blocco in CAA, qualora si ipotizzi di utilizzare solamente energia elettrica da fonte rinnovabile per il processo produttivo in azienda.

In dettaglio, per il consumo di energia elettrica è stato utilizzato il dataset di Ecoinvent relativo alla produzione del mix elettrico italiano a medio voltaggio riferito al 2021. Per il consumo di energia

termica da gas naturale, è stato utilizzato il dataset relativo alla produzione di calore da gas naturale in una caldaia industriale >100kW (conforme perciò ai dati di potenza della caldaia forniti dalle aziende coinvolte nello studio), e sottraendo il consumo di energia elettrica per il funzionamento della caldaia stessa, poiché esso è già compreso nel consumo di energia elettrica totale fornita dalle aziende e relativa all'intero processo produttivo del blocco in CAA.

Per quanto riguarda i flussi in output al processo produttivo, essi si articolano in emissioni in aria dovute alla combustione del gas naturale in caldaia, in emissioni in acque reflue, e rifiuti, destinati a recupero, smaltimento e/o trattamento; in dettaglio, i rifiuti prodotti sono composti da grassi esauriti, olii minerali, imballaggi in legno, imballaggi misti, imballaggi contenenti residui di sostanze pericolose, ferro e acciaio, imballaggi metallici, altri materiali isolanti contenenti o costituiti da sostanze pericolose, rifiuti liquidi acquosi, scarti di ceramica, mattoni, mattonelle, materiali da costruzione, rifiuti urbani non differenziati.

Per modellare il trattamento dei rifiuti, si è utilizzato l'approccio del General Programme Instructions dell'International EPD System (EPD International AB, 2021): il produttore dei rifiuti è ritenuto responsabile degli impatti ambientali degli stessi fino al punto in cui essi hanno valore economico negativo (ovvero fino a quando essi cessano di essere qualificati come rifiuti). In pratica, per i materiali destinati a riciclo, si sono inseriti nello studio i processi di raccolta, trasporto e selezione, escludendo quindi i trattamenti successivi per produrre materiale riciclato/secondario e gli eventuali benefici derivanti dall'uso del materiale secondario prodotto. In tal caso, i processi che avvengono dopo la cessazione di qualifica di rifiuto sono attribuiti ai sistemi prodotto che utilizzano il materiale riciclato. Per l'incenerimento con recupero energetico, si sono inclusi nello studio i processi di raccolta, pretrattamento e incenerimento, escludendo quindi i benefici dell'uso dell'energia prodotta. Per il trattamento in discarica, si sono incluse le operazioni di trattamento in discarica dei rifiuti, la cattura e la combustione del gas naturale prodotto, escludendo tuttavia i benefici derivanti dalla produzione e uso dell'energia.

In particolare, le principali assunzioni che riguardano gli output/rifiuti del processo sono relative ai seguenti flussi:

- Rifiuti liquidi e acque reflue: essi sono stati modellati utilizzando il dataset di Ecoinvent relativo al trattamento delle acque reflue derivanti da un processo produttivo del calcestruzzo.
- Imballaggi in legno: per questa tipologia di rifiuto è stata ipotizzata un'operazione di recupero tramite triturazione, utilizzando un apposito dataset presente in Ecoinvent.
- Rifiuti misti: essi sono stati modellati utilizzando il dataset presente in Ecoinvent relativo allo smaltimento dei rifiuti urbani misti in Italia (circa 50% di rifiuti trattati in discarica e 50% trattati con un processo di incenerimento, senza recupero energetico).
- Emissioni dirette in aria: per evitare un doppio conteggio, le emissioni gassose fornite dalle aziende sono state considerate come già comprese nel dataset di Ecoinvent relativo alla produzione di energia termica tramite combustione di gas naturale in una caldaia di potenza maggiore di 100 kW.
- Emissioni dirette in acque reflue: per evitare un doppio conteggio, le emissioni in acque reflue fornite dalle aziende sono state considerate come già comprese nel dataset di Ecoinvent relativo al trattamento delle acque reflue provenienti dalla produzione di calcestruzzo.

Per la fase di trasporto dei materiali/prodotti/rifiuti in input e output, è stata stimata una distanza media dal fornitore alle aziende produttrici del blocco in CAA per ogni materiale di input, secondo i dati forniti dalle aziende coinvolte nel GdL, mentre per i rifiuti è stato previsto un trasporto di 50 km dall'azienda produttrice del CAA fino all'impianto di trattamento. Per modellare entrambi i trasporti è stato utilizzato un dataset di Ecoinvent relativo ad un trasporto su gomma generico, costituito da un insieme eterogeneo di camion di tipologia media.

## 7.2 Descrizione e documentazione processi unitari

Le quantità minime e massime delle materie prime e dei sottoprodotti utilizzati per la produzione del CAA oggetto dello studio sono riportati nella Tabella 5..

Per poter modellare il dataset e al contempo garantire la riservatezza di dati sensibili, è stato scelto di utilizzare nello studio il valore medio della quantità di ogni materiale, come indicato nelle tabelle di inventario complessive.

*Tabella 5 - Range delle materie prime e dei sottoprodotti utilizzati per la produzione del CAA oggetto dello studio.*

| Flussi in input   | Quantità minima-<br>Quantità massima | Quantità media | Unità di misura   |
|-------------------|--------------------------------------|----------------|-------------------|
| Sabbia            | 230-290                              | 260            | kg/m <sup>3</sup> |
| Calce             | 40-50                                | 45             | kg/m <sup>3</sup> |
| Gesso             | 10-20                                | 15             | kg/m <sup>3</sup> |
| Cemento Portland  | 80-120                               | 100            | kg/m <sup>3</sup> |
| Polvere alluminio | 0,5-1                                | 0,75           | kg/m <sup>3</sup> |
| Sottoprodotti     | 0-60                                 | 30             | kg/m <sup>3</sup> |

In Tabella 6 e in Tabella 7 sono riportati rispettivamente i flussi di input e output, coinvolti nel ciclo di vita del prodotto oggetto di studio, considerati per la realizzazione dello studio LCA di filiera, con la loro identificazione della banca dati (e relativi dataset) di riferimento.

I dati sono stati forniti dalle aziende produttrici coinvolte nel GdL e si riferiscono alla produzione di un blocco di CAA di 1 m<sup>3</sup> con una densità di 455 kg/m<sup>3</sup>.

Tabella 6 - Dati di inventario in input al processo produttivo di 1m<sup>3</sup> di CAA

| Flussi in input                      | Valore | Unità di misura   | Dataset di riferimento (Ecoinvent 3.7.1)                                                                                                       |
|--------------------------------------|--------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Materie prime e sottoprodotti</b> |        |                   |                                                                                                                                                |
| Sabbia                               | 260    | kg/m <sup>3</sup> | Sand {RoWER}  market for sand   Cut-off, U                                                                                                     |
| Calce                                | 45     | kg/m <sup>3</sup> | Quicklime, milled, packed {RER}  market for quicklime, milled, packed   Cut-off, U                                                             |
| Gesso                                | 15     | kg/m <sup>3</sup> | Gypsum, mineral {RER}  market for gypsum, mineral   Cut-off, U                                                                                 |
| Cemento Portland                     | 100    | kg/m <sup>3</sup> | Cement, Portland {Europe without Switzerland}  market for   Cut-off, U                                                                         |
| Polvere alluminio                    | 0,75   | kg/m <sup>3</sup> | Aluminium, cast alloy {GLO}  market for aluminium, cast alloy   Cut-off, U                                                                     |
| Sottoprodotti                        | 30     | kg/m <sup>3</sup> | -                                                                                                                                              |
| <b>Additivi</b>                      |        |                   |                                                                                                                                                |
| Acido cloridrico 32% (HCL)           | 0,029  | kg/m <sup>3</sup> | Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state {RER}  market for hydrochloric acid, without water, in 30% solution state   Cut-off, U |
| Agente idrofobico                    | 0,011  | kg/m <sup>3</sup> | Chemical, inorganic {GLO}  market for chemicals, inorganic   Cut-off, U                                                                        |
| Olio per lubrificazione              | 0,077  | kg/m <sup>3</sup> | Lubricating oil {RER}  market for lubricating oil   Cut-off, U                                                                                 |
| Cloruro di sodio (NaCl)              | 0,072  | kg/m <sup>3</sup> | Sodium chloride, powder {GLO}  market for sodium chloride, powder   Cut-off, U                                                                 |
| Idrossido di sodio (NaOH)            | 0,029  | kg/m <sup>3</sup> | Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {RER}  market for sodium hydroxide, without water, in 50% solution state   Cut-off, U   |
| Acciaio                              | 0,299  | kg/m <sup>3</sup> | Reinforcing steel {GLO}  market for reinforcing steel   Cut-off, U                                                                             |
| <b>Acqua</b>                         |        |                   |                                                                                                                                                |
| Acqua da pozzo                       | 294,3  | l/ m <sup>3</sup> | Water, well, IT                                                                                                                                |
| <b>Energia</b>                       |        |                   |                                                                                                                                                |
| Energia elettrica                    | 16,5   | kWh/m3            | Electricity, medium voltage {IT}  market for electricity, medium voltage   Cut-off, U                                                          |

|                                |       |        |                                                                                                                                                                             |
|--------------------------------|-------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Energia termica (gas naturale) | 10,7  | SMC/m3 | Heat, district or industrial, natural gas {Europe without Switzerland}  heat production, natural gas, at boiler modulating >100kW MODIFIED WITHOUT ELECTRICITY   Cut-off, U |
| <b>Trasporto</b>               |       |        |                                                                                                                                                                             |
| Trasporto su gomma - input     | 35,84 | t*km   | Transport, freight, lorry, diesel, unspecified {RER}  market for transport, freight, lorry, unspecified   Cut-off, U                                                        |

Tabella 7 – Dati di inventario in output al processo produttivo di 1m<sup>3</sup> di CAA

| Flussi in Output                                     | Valore | Unità di misura   | Dataset di riferimento                                                                                                        |
|------------------------------------------------------|--------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Rifiuti</b>                                       |        |                   |                                                                                                                               |
| grassi esauriti                                      | 0,002  | kg/m <sup>3</sup> | Waste mineral oil {Europe without Switzerland}  market for waste mineral oil   Cut-off, U                                     |
| olii minerali                                        | 0,015  | kg/m <sup>3</sup> | Waste mineral oil {Europe without Switzerland}  market for waste mineral oil   Cut-off, U                                     |
| imballaggi in legno                                  | 0,196  | kg/m <sup>3</sup> | Wood chipping, industrial residual wood, stationary electric chipper {RER}  processing   Cut-off, U                           |
| imballaggi misti                                     | 0,167  | kg/m <sup>3</sup> | Municipal solid waste {IT}  market for municipal solid waste   Cut-off, U                                                     |
| imballaggi contenenti residui di sostanze pericolose | 0,012  | kg/m <sup>3</sup> | Hazardous waste, for incineration {Europe without Switzerland}  market for hazardous waste, for incineration   Cut-off, U     |
| ferro e acciaio                                      | 0,021  | kg/m <sup>3</sup> | Ferrous metal, in mixed metal scrap {Europe without Switzerland}  market for ferrous metal, in mixed metal scrap   Cut-off, U |
| imballaggi metallici                                 | 0,005  | kg/m <sup>3</sup> | Ferrous metal, in mixed metal scrap {Europe without Switzerland}  market for ferrous                                          |

|                                                                                                     |       |                   |                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                     |       |                   | metal, in mixed metal scrap   Cut-off, U                                                                                  |
| altri materiali isolanti contenenti o costituiti da sostanze pericolose                             | 0,010 | kg/m <sup>3</sup> | Hazardous waste, for incineration {Europe without Switzerland}  market for hazardous waste, for incineration   Cut-off, U |
| Rifiuti liquidi acquosi, diversi da quelle di cui alla voce 16 10 01                                | 0,014 | kg/m <sup>3</sup> | Wastewater from concrete production {RoW}  market for wastewater from concrete production   Cut-off, U                    |
| Acque reflue                                                                                        | 0.006 | l/ m <sup>3</sup> | Wastewater from concrete production {RoW}  market for wastewater from concrete production   Cut-off, U                    |
| scarti di ceramica, mattoni, mattonelle, materiali da costruzione sottoposti a trattamento termico* | 2,181 | kg/m <sup>3</sup> | Inert waste {RER}  market for inert waste   Cut-off, U                                                                    |
| Rifiuti urbani non differenziati                                                                    | 0,010 | kg/m <sup>3</sup> | Municipal solid waste {IT}  treatment of, incineration   Cut-off, U                                                       |
| Trasporto su gomma - rifiuti                                                                        | 0,131 | t*km              | Transport, freight, lorry, diesel, unspecified {RER}  market for transport, freight, lorry, unspecified   Cut-off, U      |

### 7.3 Sviluppo del dataset

In questo studio è stato definito un unico processo unitario relativo alla produzione di 1 m<sup>3</sup> di CAA, dal quale è stato sviluppato il dataset “Autoclaved aerated concrete block, at plant” inserito nella Banca Dati Italiana LCA.

## 8 Valutazione degli impatti ambientali

La valutazione degli impatti in accordo alla ISO 14040 (UNI EN ISO, 2021a) si articola nelle seguenti fasi obbligatorie:

- Classificazione: assegnazione dei dati raccolti nell’inventario ad una o più categorie d’impatto ambientale selezionate;
- Caratterizzazione: calcolo dei risultati di ogni indicatore di categoria, in cui è determinato il contributo relativo di ogni sostanza emessa o risorsa usata;

- Valutazione vera e propria dell'impatto.

Come fasi opzionali della valutazione degli impatti di ciclo di vita, sono invece indicate dalla ISO 14040 (UNI EN ISO, 2021a) le operazioni di normalizzazione, raggruppamento e ponderazione (pesatura). Ai fini del presente studio è stato utilizzato il metodo di valutazione degli impatti EF 3.1 (Andreasi Bassi et al., 2023) e i risultati delle fasi appena descritte sono riportate nei paragrafi successivi.

## 8.1 Caratterizzazione

In Tabella 8 sono elencati i risultati della fase di caratterizzazione relativi alla produzione di 1 m<sup>3</sup> di CAA della densità di 455 kg/m<sup>3</sup>.

Tabella 8 – Risultati caratterizzati per la produzione di 1m<sup>3</sup> di CAA

| Categoria di impatto                    | Acronimo  | Unità        | Totale   |
|-----------------------------------------|-----------|--------------|----------|
| Acidification                           | AC        | mol H+ eq    | 3,73E-01 |
| Climate change                          | CC        | kg CO2 eq    | 1,93E+02 |
| Climate change - Biogenic               | CCb       | kg CO2 eq    | 9,45E-02 |
| Climate change - Fossil                 | CCf       | kg CO2 eq    | 1,93E+02 |
| Climate change - Land use and LU change | CClu      | kg CO2 eq    | 3,85E-02 |
| Ecotoxicity, freshwater                 | ECT       | CTUe         | 1,28E+02 |
| Ecotoxicity, freshwater - inorganics    | ECT-i     | CTUe         | 1,23E+02 |
| Ecotoxicity, freshwater - organics      | ECT-o     | CTUe         | 4,88E+00 |
| Particulate matter                      | OPM       | disease inc. | 3,13E-06 |
| Eutrophication, marine                  | EUm       | kg N eq      | 1,06E-01 |
| Eutrophication, freshwater              | EUf       | kg P eq      | 1,45E-02 |
| Eutrophication, terrestrial             | EUt       | mol N eq     | 1,17E+00 |
| Human toxicity, cancer                  | HTc       | CTUh         | 2,28E-08 |
| Human toxicity, cancer - inorganics     | HTc-i     | CTUh         | 7,84E-09 |
| Human toxicity, cancer - organics       | HTc-o     | CTUh         | 1,50E-08 |
| Human toxicity, non-cancer              | HTnon-c   | CTUh         | 7,53E-07 |
| Human toxicity, non-cancer - inorganics | HTnon-c-i | CTUh         | 7,17E-07 |
| Human toxicity, non-cancer - organics   | HTnon-c-o | CTUh         | 3,61E-08 |
| Ionising radiation                      | IR        | kBq U-235 eq | 4,73E+00 |
| Land use                                | LU        | Pt           | 4,68E+02 |
| Ozone depletion                         | OD        | kg CFC11 eq  | 2,44E-06 |
| Photochemical ozone formation           | POF       | kg NMVOC eq  | 4,12E-01 |
| Resource use, fossils                   | RUf       | MJ           | 1,38E+03 |
| Resource use, minerals and metals       | RUm       | kg Sb eq     | 2,10E-04 |
| Water use                               | WU        | m3 depriv.   | 3,61E+01 |

## 8.2 Normalizzazione

In Tabella 9 sono mostrati i risultati della fase di normalizzazione. Si evidenzia che sono state escluse dalla Tabella 9 le categorie di impatto caratterizzate dall'assenza di fattori di normalizzazione all'interno del metodo di valutazione degli impatti EF 3.1.

Tabella 9 – Risultati normalizzati

| Categoria di impatto              | Acronimo | Totale   |
|-----------------------------------|----------|----------|
| Acidification                     | AC       | 6,71E-03 |
| Climate change                    | CC       | 2,56E-02 |
| Ecotoxicity, freshwater           | ECT      | 2,25E-03 |
| Particulate matter                | OPM      | 5,26E-03 |
| Eutrophication, marine            | EUm      | 5,42E-03 |
| Eutrophication, freshwater        | EUf      | 9,03E-03 |
| Eutrophication, terrestrial       | EUt      | 6,63E-03 |
| Human toxicity, cancer            | HTc      | 1,32E-03 |
| Human toxicity, non-cancer        | HTnon-c  | 5,85E-03 |
| Ionising radiation                | IR       | 1,12E-03 |
| Land use                          | LU       | 5,72E-04 |
| Ozone depletion                   | OD       | 4,66E-05 |
| Photochemical ozone formation     | POF      | 1,01E-02 |
| Resource use, fossils             | RUf      | 2,12E-02 |
| Resource use, minerals and metals | RUm      | 3,29E-03 |
| Water use                         | WU       | 3,15E-03 |

### 8.3 Pesatura

La Tabella 10 elenca i risultati della fase di pesatura. Si evidenzia che sono state escluse dalla Tabella 10 le categorie di impatto caratterizzate dall'assenza di fattori di pesatura all'interno del metodo di valutazione degli impatti EF 3.1.

Tabella 10 – Risultati pesati

| Categoria di impatto              | Unità | Totale   |
|-----------------------------------|-------|----------|
| Total                             | mPt   | 9,98E+00 |
| Acidification                     | mPt   | 4,16E-01 |
| Climate change                    | mPt   | 5,38E+00 |
| Ecotoxicity, freshwater           | mPt   | 4,33E-02 |
| Particulate matter                | mPt   | 4,71E-01 |
| Eutrophication, marine            | mPt   | 1,60E-01 |
| Eutrophication, freshwater        | mPt   | 2,53E-01 |
| Eutrophication, terrestrial       | mPt   | 2,46E-01 |
| Human toxicity, cancer            | mPt   | 2,82E-02 |
| Human toxicity, non-cancer        | mPt   | 1,08E-01 |
| Ionising radiation                | mPt   | 5,62E-02 |
| Land use                          | mPt   | 4,54E-02 |
| Ozone depletion                   | mPt   | 2,94E-03 |
| Photochemical ozone formation     | mPt   | 4,82E-01 |
| Resource use, fossils             | mPt   | 1,76E+00 |
| Resource use, minerals and metals | mPt   | 2,49E-01 |

|           |     |          |
|-----------|-----|----------|
| Water use | mPt | 2,68E-01 |
|-----------|-----|----------|

## 8.4 Analisi di sensitività

Lo scopo dell'analisi di sensitività è valutare gli effetti prodotti da variazioni nelle “variabili in ingresso”, ovvero da variazioni dei flussi in input allo studio LCA di filiera, sulla/e “variabile/i risposta”, ovvero sui risultati dello studio LCA stesso. Oltre che per stimare quanto la variazione di uno o più parametri incide sui risultati dello studio e sui risultati del singolo prodotto, in particolare quando vi sia incertezza su specifici parametri utilizzati nel modello, tale analisi è svolta anche al fine di determinare quantitativamente la variazione dei risultati di impatto ambientale associata a possibili scenari alternativi alla situazione di riferimento. In questo caso, ovvero nell'eventualità di una “analisi per scenari”, l'attenzione è preferibilmente posta su input significativi del sistema oggetto di studio su cui sia ragionevolmente possibile intervenire, così da ottenere delle indicazioni sugli effetti di alternative realmente applicabili ed adottabili.

Nell'ambito del presente studio di filiera, l'analisi di sensitività è stata focalizzata sull'utilizzo di diversi dataset per modellare il processo produttivo, per valutare quanto la scelta del dataset influenzi i risultati di impatto del ciclo di vita della produzione del blocco in CAA. In particolare, sono stati considerati 4 scenari alternativi al “business as usual” (BAU) (situazione attuale), come di seguito dettagliato:

- Scenario 1 (S1): sostituzione del dataset “Heat, district or industrial, natural gas {Europe without Switzerland}| heat production, natural gas, at boiler modulating >100kW MODIFIED WITHOUT ELECTRICITY | Cut-off, U” con il dataset “Heat, district or industrial, other than natural gas {RER}| heat production, straw, at furnace 300kW - MODIFIED WITHOUT ELECTRICITY | Cut-off, U”.

Questo primo scenario è stato costruito per valutare le conseguenze sui risultati di caratterizzazione della sostituzione della caldaia alimentata a gas naturale, utilizzata per la produzione di calore necessario per il processo produttivo, con una caldaia alimentata a biomassa lignocellulosica.

- Scenario 2 (S2): sostituzione del dataset “Transport, freight, lorry, diesel, unspecified {RER}| market for transport, freight, lorry, unspecified | Cut-off, U” con il dataset “Transport, freight, lorry, diesel, unspecified {RER}| transport, freight, lorry, all sizes, EURO 6 to generic market for transport, freight, lorry, unspecified | Cut-off, U”.

Lo Scenario 2 ha l'obiettivo di valutare le conseguenze dell'utilizzo di camion EURO 6 per il trasporto degli input (materiali/prodotti) dai fornitori alle aziende produttrici del blocco in CAA. Nello scenario BAU, per questo trasporto merci è stato utilizzato un dataset generico di trasporto merci su gomma, che comprende un mix di camion di diversa tipologia.

- Scenario 3 (S3): sostituzione del dataset “Electricity, medium voltage {IT}| market for electricity, medium voltage | Cut-off, U” con il dataset “Electricity, low voltage {IT}| electricity production, fotovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si | Cut-off, U”.

Il terzo scenario si pone come obiettivo valutare le conseguenze della sostituzione dell'energia elettrica utilizzata dalle aziende produttrici del blocco in CAA, proveniente dalla rete italiana, con energia elettrica di tipo fotovoltaico prodotta da un impianto installato su terreno.

- Scenario 4 (S4): modifica al dataset “Aluminium, cast alloy {GLO}| market for aluminium, cast alloy | Cut-off, U”, che è composto da un mix formato da circa il 70% di alluminio secondario e 30% di alluminio primario, con il dataset “Aluminium, cast alloy {GLO}| market for aluminium, cast alloy | Cut-off, U - MODIFIED 100% recycled” che contiene invece 100% di alluminio secondario.

Il quarto scenario è stato costruito per valutare l’impatto della frazione di alluminio primario presente nel mix del dataset modificato.

I risultati dell’analisi di sensitività, applicata sui risultati di caratterizzazione, sono riportati in Tabella 11.

Lo Scenario 1 mostra significative riduzioni dell’impatto ambientale sulle categorie Ozone Depletion (-55%), Resource Use, fossil (-34%), e Climate Change (-15%). D’altra parte, però esso produce un aumento dei risultati di impatto in quasi tutte le altre categorie, ed in particolare su Particulate matter (+228%) e su Human toxicity, non-cancer (+78%).

Lo Scenario 2 non comporta notevoli differenze nei risultati rispetto allo scenario BAU. In dettaglio, le riduzioni più rilevanti si rilevano nelle seguenti categorie di impatto: Eutrophication, marine (-6,4%), Eutrophication, terrestrial (-6,3%) e Photochemical ozone formation, in cui l’impatto si riduce del 4,3%.

Lo Scenario 3 presenta una minima diminuzione degli impatti rispetto allo scenario BAU su quasi tutte le categorie di impatto. È da evidenziare come l’uso di energia elettrica prodotta da pannelli fotovoltaici installati su terreno, mentre comporta risparmi notevoli nell’uso di risorse fossili (Resource use, fossil, -6,3%) e una riduzione dell’impronta di carbonio associata al prodotto analizzato (Climate change, -2,5%) produce un impatto molto maggiore dello scenario BAU in termini di consumo di risorse minerali e metalli (Resource use, minerals and metals, +18,8%) e di uso del suolo (Land use, +35,9%).

Lo scenario 4 mette evidenza l’impatto non trascurabile della frazione di alluminio primario presente nel dataset selezionato. È da notare come, utilizzando esclusivamente alluminio secondario, si riducono gli impatti in quasi tutte le categorie ed in particolare in Human Toxicity, cancer (-11,2%) e in Particulate matter (-12,2%).

Tabella 11 – Analisi di sensitività

| Impact category                         | Unit         | BAU      | S1       | Var % S1 | S2       | Var % S2 | S3       | Var % S3 | S4       | Var % S4 |
|-----------------------------------------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Acidification                           | mol H+ eq    | 3,73E-01 | 4,15E-01 | 11%      | 3,60E-01 | -3,4%    | 3,61E-01 | -3,2%    | 3,43E-01 | -7,9%    |
| Climate change                          | kg CO2 eq    | 1,93E+02 | 1,65E+02 | -15%     | 1,93E+02 | 0,0%     | 1,88E+02 | -2,5%    | 1,89E+02 | -2,2%    |
| Climate change - Biogenic               | kg CO2 eq    | 9,45E-02 | 1,01E-01 | 7%       | 9,45E-02 | 0,0%     | 8,25E-02 | -12,6%   | 9,02E-02 | -4,5%    |
| Climate change - Fossil                 | kg CO2 eq    | 1,93E+02 | 1,64E+02 | -15%     | 1,93E+02 | 0,0%     | 1,88E+02 | -2,5%    | 1,89E+02 | -2,2%    |
| Climate change - Land use and LU change | kg CO2 eq    | 3,85E-02 | 3,83E-02 | 0%       | 3,85E-02 | 0,1%     | 4,00E-02 | 4,1%     | 2,55E-02 | -33,6%   |
| Ecotoxicity, freshwater                 | CTUe         | 1,28E+02 | 1,56E+02 | 22%      | 1,28E+02 | 0,1%     | 1,30E+02 | 1,5%     | 1,24E+02 | -2,8%    |
| Ecotoxicity, freshwater - inorganics    | CTUe         | 1,23E+02 | 1,44E+02 | 17%      | 1,23E+02 | 0,2%     | 1,25E+02 | 1,7%     | 1,20E+02 | -2,2%    |
| Ecotoxicity, freshwater - organics      | CTUe         | 4,88E+00 | 1,28E+01 | 163%     | 4,86E+00 | -0,4%    | 4,70E+00 | -3,6%    | 4,05E+00 | -17,0%   |
| Particulate matter                      | disease inc. | 3,13E-06 | 1,03E-05 | 228%     | 3,03E-06 | -3,1%    | 3,14E-06 | 0,5%     | 2,75E-06 | -12,2%   |
| Eutrophication, marine                  | kg N eq      | 1,06E-01 | 1,26E-01 | 19%      | 9,92E-02 | -6,4%    | 1,04E-01 | -2,2%    | 1,01E-01 | -4,5%    |
| Eutrophication, freshwater              | kg P eq      | 1,45E-02 | 1,46E-02 | 1%       | 1,45E-02 | 0,0%     | 1,37E-02 | -5,5%    | 1,32E-02 | -8,7%    |
| Eutrophication, terrestrial             | mol N eq     | 1,17E+00 | 1,22E+00 | 4%       | 1,10E+00 | -6,3%    | 1,15E+00 | -2,1%    | 1,12E+00 | -4,2%    |
| Human toxicity, cancer                  | CTUh         | 2,28E-08 | 2,83E-08 | 24%      | 2,24E-08 | -2,1%    | 2,28E-08 | -0,2%    | 2,03E-08 | -11,2%   |
| Human toxicity, cancer - inorganics     | CTUh         | 7,84E-09 | 1,12E-08 | 43%      | 7,85E-09 | 0,1%     | 7,88E-09 | 0,5%     | 7,57E-09 | -3,5%    |
| Human toxicity, cancer - organics       | CTUh         | 1,50E-08 | 1,71E-08 | 14%      | 1,45E-08 | -3,3%    | 1,49E-08 | -0,5%    | 1,27E-08 | -15,2%   |
| Human toxicity, non-cancer              | CTUh         | 7,53E-07 | 1,34E-06 | 78%      | 7,48E-07 | -0,7%    | 7,67E-07 | 1,9%     | 7,29E-07 | -3,2%    |
| Human toxicity, non-cancer - inorganics | CTUh         | 7,17E-07 | 1,30E-06 | 81%      | 7,17E-07 | 0,1%     | 7,32E-07 | 2,1%     | 6,93E-07 | -3,3%    |
| Human toxicity, non-cancer - organics   | CTUh         | 3,61E-08 | 3,64E-08 | 1%       | 3,04E-08 | -15,8%   | 3,58E-08 | -0,9%    | 3,55E-08 | -1,5%    |
| Ionising radiation                      | kBq U-235 eq | 4,73E+00 | 4,67E+00 | -1%      | 4,74E+00 | 0,0%     | 3,95E+00 | -16,5%   | 4,67E+00 | -1,4%    |
| Land use                                | Pt           | 4,68E+02 | 6,02E+02 | 29%      | 4,69E+02 | 0,0%     | 6,37E+02 | 35,9%    | 4,62E+02 | -1,3%    |
| Ozone depletion                         | kg CFC11 eq  | 2,44E-06 | 1,09E-06 | -55%     | 2,44E-06 | 0,0%     | 2,40E-06 | -1,5%    | 2,42E-06 | -0,9%    |
| Photochemical ozone formation           | kg NMVOC eq  | 4,12E-01 | 3,77E-01 | -8%      | 3,94E-01 | -4,3%    | 4,01E-01 | -2,6%    | 3,97E-01 | -3,7%    |
| Resource use, fossils                   | MJ           | 1,38E+03 | 9,05E+02 | -34%     | 1,38E+03 | 0,0%     | 1,29E+03 | -6,3%    | 1,34E+03 | -3,0%    |

|                                   |            |          |          |     |          |      |          |       |          |       |
|-----------------------------------|------------|----------|----------|-----|----------|------|----------|-------|----------|-------|
| Resource use, minerals and metals | kg Sb eq   | 2,10E-04 | 2,15E-04 | 2%  | 2,10E-04 | 0,2% | 2,49E-04 | 18,8% | 2,31E-04 | 10,1% |
| Water use                         | m3 depriv. | 3,61E+01 | 5,03E+01 | 39% | 3,61E+01 | 0,0% | 3,43E+01 | -5,1% | 3,58E+01 | -0,9% |

## 9 Interpretazione dei risultati

L'interpretazione di uno studio di ciclo di vita, svolta sulla base di una analisi critica dei risultati delle precedenti fasi di analisi dell'inventario e valutazione dell'impatto, è finalizzata a comprendere la ragionevolezza del risultato finale in termini di impatto ambientale, trarre le conclusioni, spiegare le limitazioni dei risultati ottenuti, nonché fornire delle raccomandazioni sulla base degli stessi risultati.

Le evidenze dell'interpretazione dei risultati del presente studio LCA di filiera, svolta in accordo alle indicazioni della ISO 14040, sono riportate nei paragrafi successivi.

### 9.1 Categorie di impatto rilevanti

L'analisi dei risultati derivanti dalla fase di normalizzazione (Tabella 9, Figura 3, Figura 4) mostra come le categorie di impatto più rilevanti, per la produzione di un blocco di CAA della densità di 455 kg/m<sup>3</sup>, siano Climate change (CC) (23,8% sul totale dei risultati di normalizzazione), Resource use, fossils (RUf) (19,7%) e Photochemical ozone formation (POF) (9,4%), seguite dalle categorie Eutrophication, freshwater (EUf) (8,4%), Acidification (AC) (6,2%), Eutrophication, terrestrial (EUT) (6,2%), Human Toxicity, non-cancer (HTnon-c) (5,4%) e Eutrophication, marine (EUm) (5,0%). Il contributo cumulativo di queste categorie è maggiore dell'80% dell'impatto totale prodotto secondo la fase di normalizzazione.

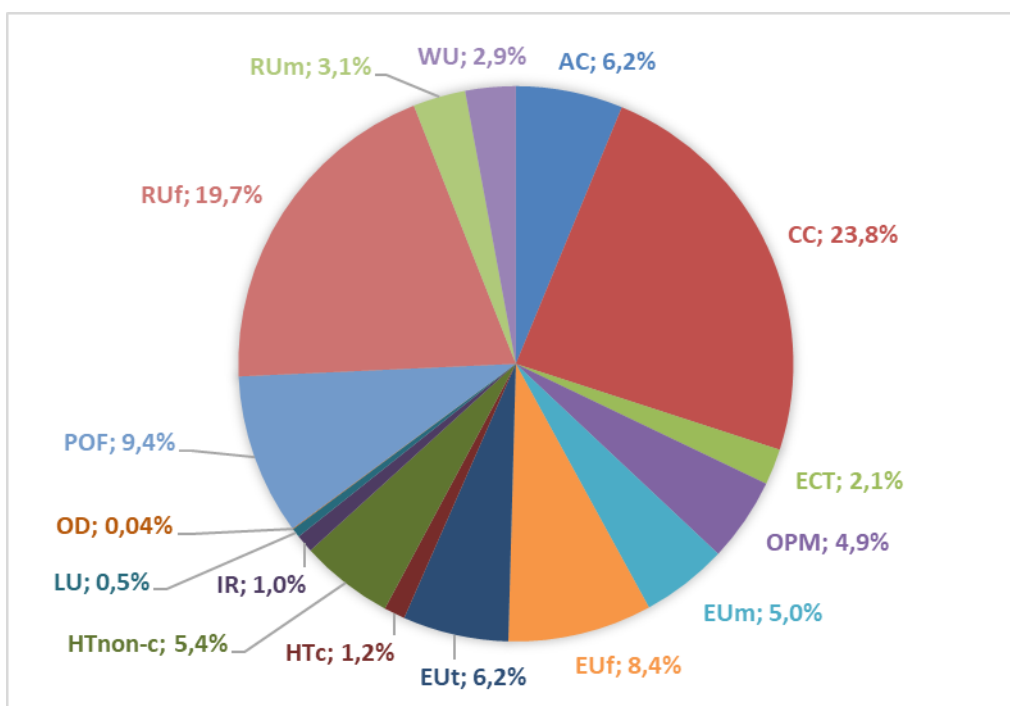


Figura 3 – Importanza percentuale delle diverse categorie d'impatto secondo la normalizzazione.

La rilevanza di tali categorie di impatto è dovuta alla produzione di materiali ed energia (principalmente cemento ed energia termica da gas naturale) per la produzione e le lavorazioni del blocco in CAA, come si evince in Figura 4.

Secondo l'analisi dei risultati della fase di pesatura, elencati in Tabella 10, la categoria Climate Change (CC) è la più significativa in termini di impatto, seguita dalla categoria Resource use, fossils (RUF) e Photochemical ozone formation (POF).

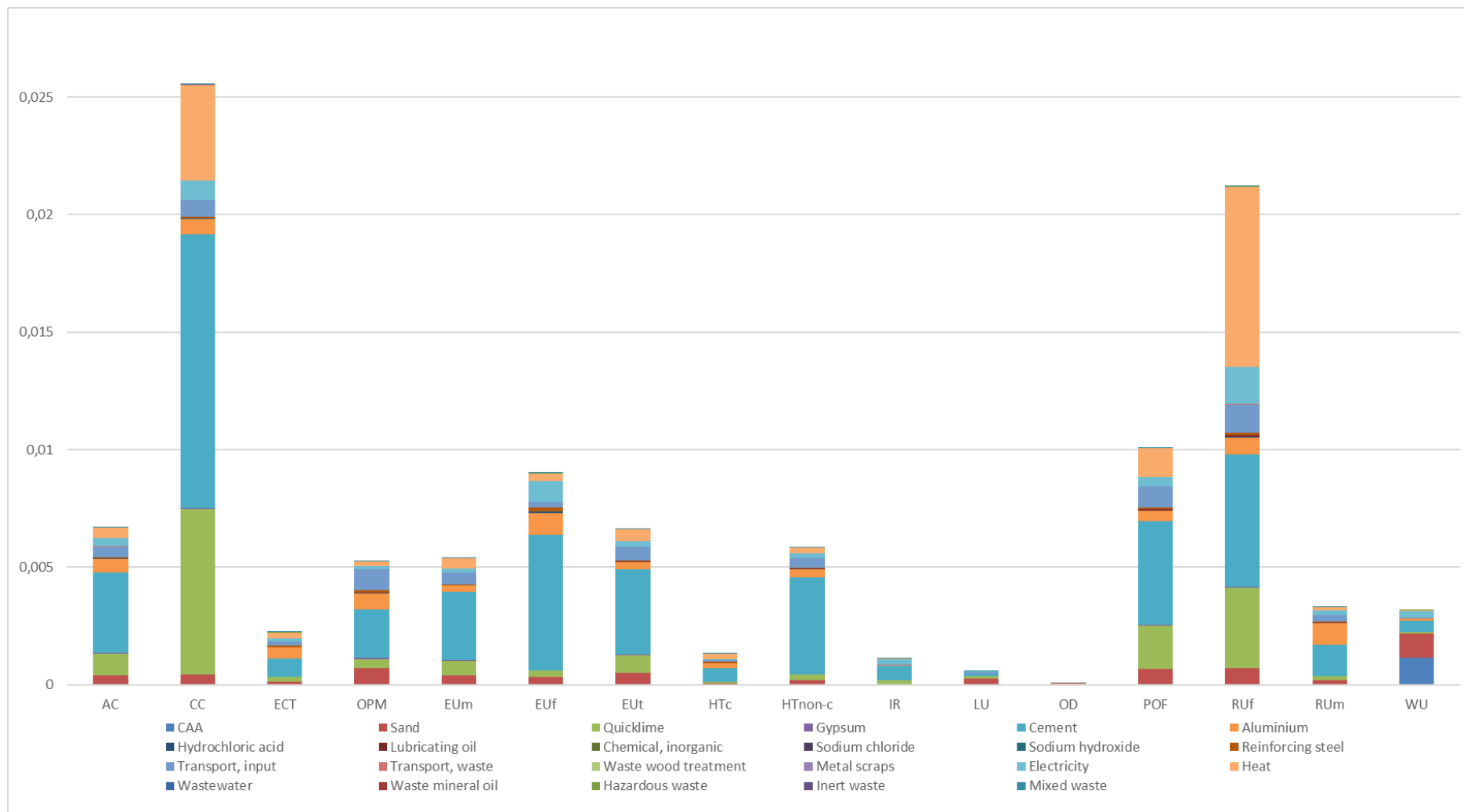


Figura 4 - Rappresentazione grafica dei risultati della normalizzazione.

## 9.2 Fasi del ciclo di vita e processi rilevanti

La Figura 4 mostra il contributo dei processi alle differenti categorie di impatto secondo i risultati della normalizzazione. Da quest'ultima si evince chiaramente che la produzione del cemento di tipo Portland e dell'energia termica prodotta tramite l'utilizzo di gas naturale, ed utilizzata nel processo produttivo, risultano essere i processi più rilevanti per quasi tutte le categorie di impatto.

Le Figure 5, 6 e 7 mostrano, per le categorie di impatto identificate come maggiormente significative dalla fase di normalizzazione (il loro contributo ammonta a più del 50% sul totale dei risultati di normalizzazione), i contributi dei singoli processi in percentuale, sulla base dei risultati della caratterizzazione.

Nel dettaglio, la Figura 5 mostra il contributo percentuale dei vari processi alla categoria d'impatto Climate change (CC). Per questa categoria il processo più rilevante è quello legato alla produzione del cemento di tipo Portland, il quale contribuisce per circa il 45% al totale dell'impatto. Per la stessa categoria risultano rilevanti anche la produzione della calce viva (Quicklime) e della produzione di energia termica da gas naturale (Heat), con un contributo del 27,5% e 15,9% sull'impatto totale, rispettivamente.

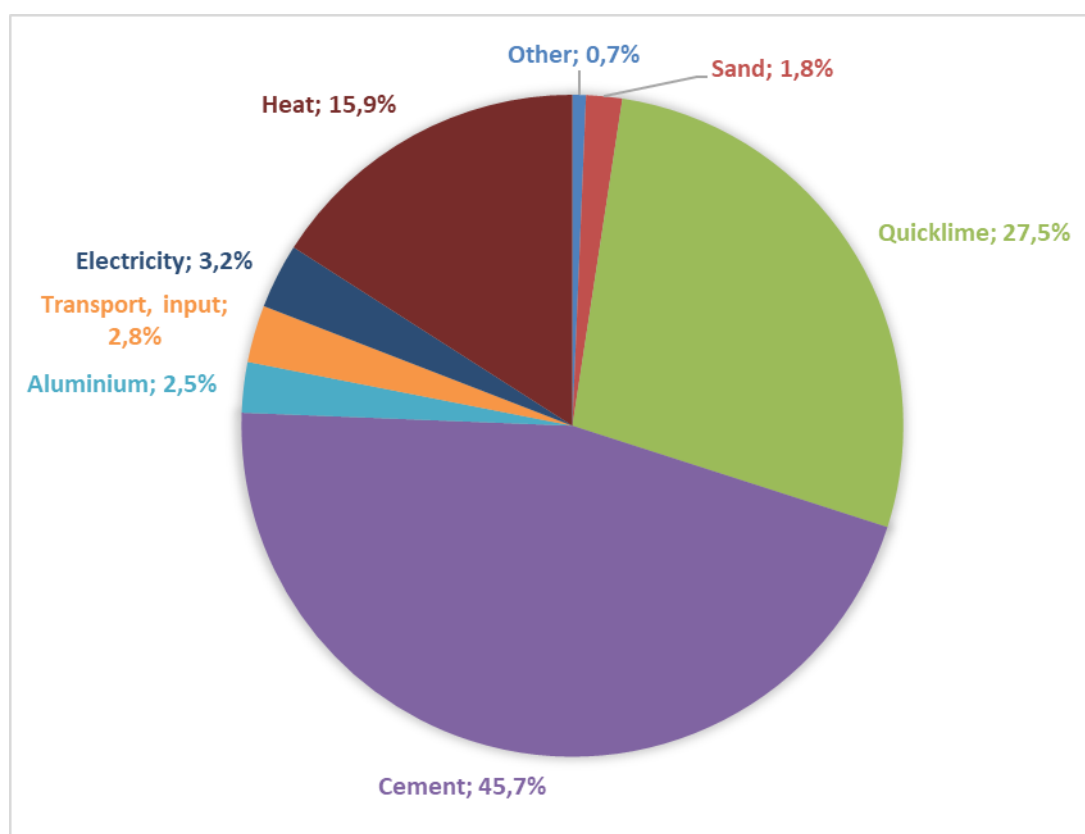


Figura 5 - Contributo percentuale dei vari processi alla categoria d'impatto Climate change (CC).

La Figura 6 mostra il contributo percentuale dei vari processi alla categoria d'impatto Resource use, fossil (RUF). La produzione di energia termica tramite gas naturale risulta essere l'input più rilevante contribuendo da solo a più del 36% dell'impatto totale. Il secondo processo più rilevante per la stessa categoria d'impatto è la produzione di cemento (27%). Di minore rilevanza, il contributo della

produzione della calce viva (16%), del consumo di elettricità (7%) e del trasporto delle risorse dai fornitori alle aziende produttrici (6%).

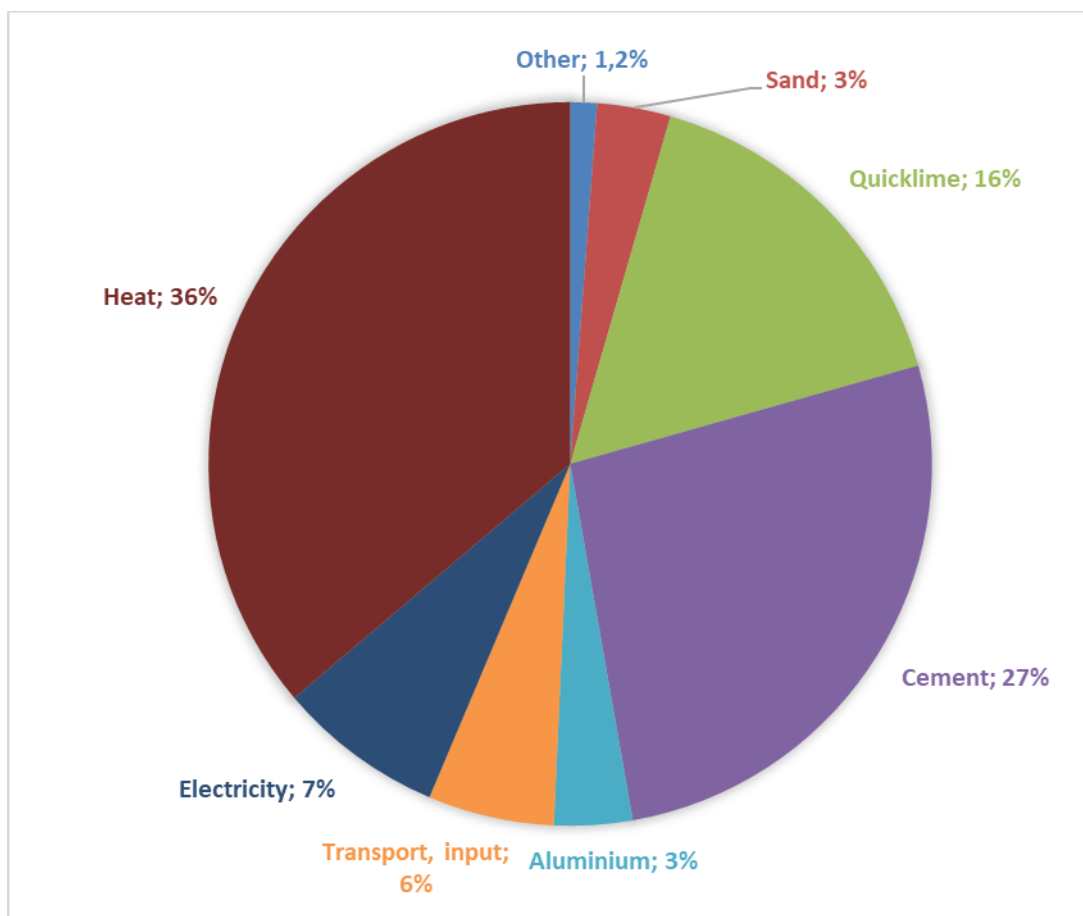


Figura 6 - Contributo percentuale dei vari processi alla categoria d'impatto Resource use, fossil (RUf).

La Figura 7 mostra il contributo percentuale dei vari processi alla categoria d'impatto Photochemical ozone formation (POF). Per questa categoria, la produzione del cemento Portland contribuisce per il 43,9%, confermandosi come uno degli input più importanti per quasi tutte le categorie di impatto considerate; inoltre, contributi rilevanti sono forniti dalla produzione di calce viva e di energia termica mediante combustione di gas naturale (rispettivamente il 18,2% e il 12,3% sul totale).. Seguono in ordine di rilevanza il trasporto degli input dai fornitori al produttore di CAA e la produzione di sabbia, il cui contributo è pari al 9,0% ed al 6,7%, rispettivamente.

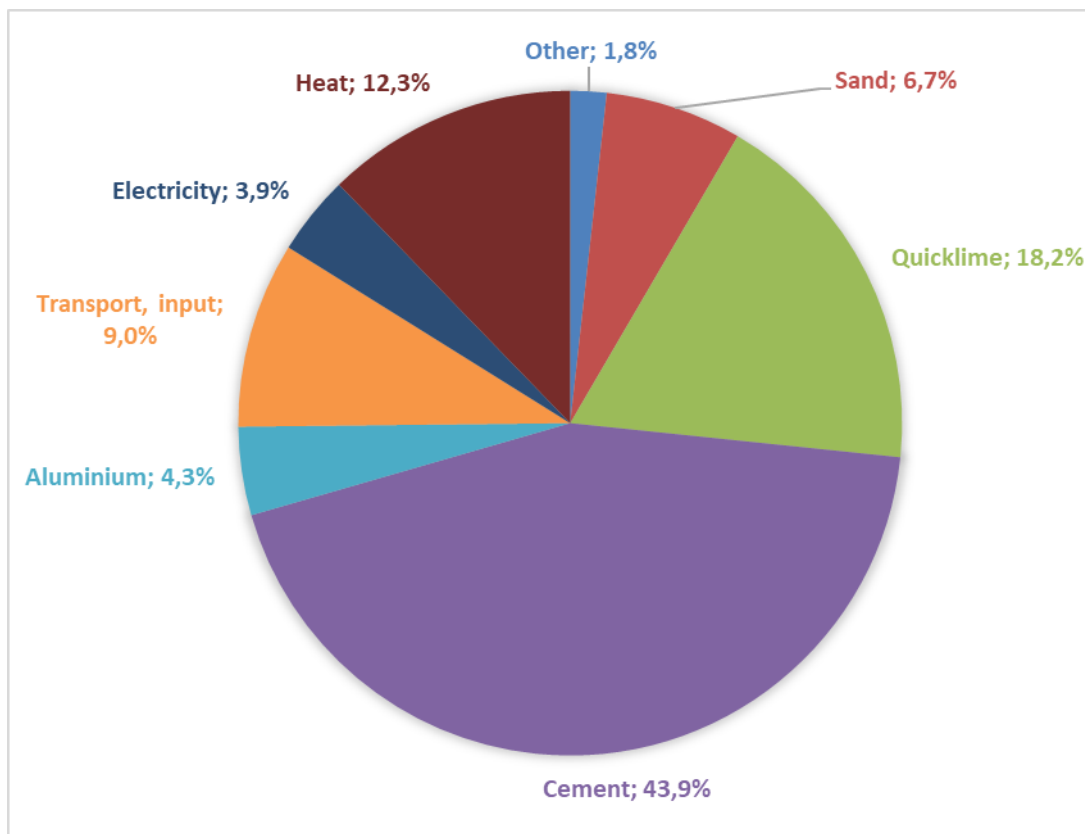


Figura 7 - Contributo percentuale dei vari processi alla categoria d'impatto Photochemical ozone formation (POF).

### 9.3 Flussi elementari rilevanti

L'analisi dei flussi elementari è stata condotta sui risultati di normalizzazione. In particolare, essa si focalizza sulle categorie di impatto più rilevanti del sistema, ossia: Climate change (CC), Resource use, fossils (RUF) e Photochemical ozone formation (POF).

Per la categoria Climate change (CC) il flusso elementare più rilevante è l'emissione di CO<sub>2</sub> fossile, che contribuisce per il 95,2% al totale degli impatti: il 44,3% di questa proviene dal processo produttivo del cemento Portland, il 26,6% dal processo di produzione della calce viva e il 14,6% dall'energia termica prodotta dalla combustione del gas naturale.

Il flusso elementare che prevale nella categoria Resource use, fossils (RUF) risulta essere quello legato al consumo di gas naturale (45,9%) per la produzione di energia termica. Il secondo flusso più importante in questa categoria è quello legato al consumo di petrolio (34,9%) per la produzione della calce viva.

Per la categoria Photochemical ozone formation (POF) il flusso elementare più significativo risulta essere dovuto agli ossidi di azoto rilasciati in aria (63,1%), di cui è principalmente responsabile il processo di produzione del cemento.

### 9.3.1 Confronto con le EPD delle aziende Xella Italia ed Ekoru

In Tabella 12 sono confrontati i risultati di caratterizzazione ottenuti nel presente studio con quelli pubblicati nelle EPD delle due aziende che hanno partecipato allo studio di filiera; i risultati sono relativi alla produzione di 1 m<sup>3</sup> di blocchi in CAA<sup>11</sup>.

Tabella 12 – Confronto dei risultati caratterizzati calcolati in questo studio con quelli pubblicati in due EPD delle aziende produttrici di CAA (UF: 1m<sup>3</sup> di CAA).

| Categoria d'impatto                     | Acronimo | Unità                 | Questo studio<br>(455 kg/m <sup>3</sup> ) | EPD –<br>Xella Italia<br>(429 kg/m <sup>3</sup> ) | EPD - Ekoru<br>(480 kg/m <sup>3</sup> ) |
|-----------------------------------------|----------|-----------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Climate change                          | CC       | kg CO <sub>2</sub> eq | 1,93E+02                                  | 1,58E+02                                          | 1,97E+02                                |
| Ozone depletion                         | OD       | kg CFC11 eq           | 2,44E-06                                  | 5,11E-13                                          | 1,55E-05                                |
| Photochemical ozone formation           | POF      | kg NMVOC eq           | 4,12E-01                                  | 2,09E-01                                          | 9,31E-01                                |
| Acidification                           | AC       | mol H+ eq             | 3,73E-01                                  | 2,06E-01                                          | 4,85E-01                                |
| Eutrophication, freshwater              | EUf      | kg P eq               | 1,45E-02                                  | 7,96E-07                                          | 1,87E-02                                |
| Eutrophication, marine                  | EUm      | kg N eq               | 1,06E-01                                  | 7,11E-02                                          | 3,32E-01                                |
| Eutrophication, terrestrial             | Eut      | mol N eq              | 1,17E+00                                  | 7,78E-01                                          | 2,13E+00                                |
| Water use                               | WU       | m3 depriv.            | 3,61E+01                                  | 4,23E+00                                          | 1,10E+01                                |
| Resource use, fossils                   | RUF      | MJ                    | 1,38E+03                                  | 1,20E+03                                          | 1,52E+03                                |
| Resource use, minerals and metals       | RUm      | kg Sb eq              | 2,10E-04                                  | 1,15E-05                                          | 2,76E-03                                |
| Climate change - Fossil                 | CCf      | kg CO <sub>2</sub> eq | 1,93E+02                                  | 1,63E+02                                          | 2,05E+02                                |
| Climate change - Biogenic               | CCb      | kg CO <sub>2</sub> eq | 9,45E-02                                  | -5,64E+00                                         | -8,96E+00                               |
| Climate change - Land use and LU change | CCLu     | kg CO <sub>2</sub> eq | 3,85E-02                                  | 6,51E-02                                          | 1,10E-01                                |

Dall'analisi della Tabella 12, si può evincere come i valori calcolati nel presente studio di filiera risultino, per alcune categorie di impatto, allineati e dello stesso ordine di grandezza (spesso collocandosi su valori intermedi) con quelli presentati nelle EPD prodotte dalle due aziende. Al contrario, i risultati delle altre categorie di impatto risultano difficilmente comparabili con quelli pubblicati nelle EPD, a causa dell'utilizzo di metodi differenti di valutazione degli impatti (che presentano fattori di caratterizzazione differenti rispetto a quelli del metodo EF 3.1 usato nel presente studio), e di differenti scelte metodologiche ed assunzioni. Si può comunque evincere che, almeno per alcune categorie di impatto, quali ad esempio Climate Change, Photochemical Ozone Formation, Acidification, Resource use, fossil, i risultati delle EPD presentano lo stesso ordine di grandezza di quelli del presente studio di filiera. Inoltre, si deve sottolineare che i risultati confrontati in Tabella 12, oltre a riferirsi a prodotti con densità diverse, sono stati calcolati utilizzando software e banche dati diversi: per il prodotto di Xella si è utilizzato il software "GaBi 10.5", sviluppato da Sphera Solutions GmbH e per quanto riguarda i processi di background, sono stati utilizzati i dataset della banca dati GaBi con Content Update (CUP) 2021.1.); per il prodotto di Ekoru (Gasbeton) è stato utilizzato il software SimaPro ma nella versione 9.1.1.1, consultando

<sup>11</sup> a) <https://www.epditaly.it/epd/calcestruzzo-aerato-autoclavato-xella-italia-s-r-l/>;

b) [https://www.gasbeton.it/wp-content/uploads/2021/04/EPD-Gasbeton\\_ITA-environdec.pdf](https://www.gasbeton.it/wp-content/uploads/2021/04/EPD-Gasbeton_ITA-environdec.pdf)

unicamente il database Ecoinvent 3.6, quindi precedente alla versione 3.11 utilizzata nel presente studio (quest'ultima risulta quindi più aggiornata, sia come processi di background che come flussi elementari).

I risultati della categoria di impatto Climate Change prodotti dal presente studio sono stati inoltre confrontati con quelli pubblicati nelle EPD dell'azienda italiana "DOC Airconcrete S.r.l." e delle aziende di Kuwait e Turchia "National Industries Company" e "Gaziantep Ytong". Tutte le EPD analizzate comprendono gli stessi confini del sistema del presente studio LCA di filiera.

I risultati della prima EPD, relativa a blocchi in CAA di densità  $479 \text{ kg/m}^3$ , sono pari a  $1,91\text{E}+02 \text{ kg CO}_2\text{eq/m}^3$ . I risultati della seconda e terza EPD, relativi a blocchi in CAA di densità  $480 \text{ kg/m}^3$  e  $381 \text{ kg/m}^3$ , sono pari rispettivamente a  $1,90\text{E}+02 \text{ kg CO}_2\text{eq/m}^3$ ,  $1,50\text{E}+02 \text{ kg CO}_2\text{eq/m}^3$ . Si può quindi concludere che tutti questi risultati sono dello stesso ordine di grandezza di quelli del presente studio di filiera.

In generale, le differenze tra i risultati di due studi di LCA su prodotti simili possono essere attribuite a una serie di fattori che influiscono direttamente sulla comparabilità dei dati. È fondamentale sottolineare che, sebbene si tratti dello stesso oggetto di studio o di prodotti analoghi, i risultati LCA non sono sempre confrontabili in modo diretto a causa di scelte metodologiche e dati di input differenti; in dettaglio, si possono verificare le seguenti opzioni: (a) differenti dataset utilizzati per modellare i processi di background: ogni studio LCA può utilizzare anche dati differenti come fonti di dati di background (dataset) per costruire l'inventario del ciclo di vita (LCI), come ad es. Ecoinvent (nelle sue diverse versioni più o meno aggiornate), GaBi, ecc. Ogni banca dati contiene dataset a cui afferiscono dati raccolti in contesti geografici, temporali e tecnologici diversi, con assunzioni e strutture di modellazione specifiche, che influenzano i risultati finali; (b) differenti fattori di caratterizzazione: nei metodi di Valutazione degli Impatti (LCIA -Life Cycle Impact Assessment) disponibili in letteratura e contenuti all'interno del software LCA utilizzato, i fattori di caratterizzazione (cioè i coefficienti moltiplicativi che traducono i flussi di inventario in input e in output in impatti ambientali) possono variare da un metodo all'altro per lo stesso flusso elementare, conducendo quindi a risultati diversi per lo stesso input o output; (c) uso di metodi di Valutazione degli Impatti più o meno aggiornati: la scelta del metodo LCIA (es. ReCiPe, CML, EF 3.0, EF 3.1, ecc.) ha un forte impatto sui risultati, in quanto ogni metodo ha una sua struttura (midpoint o endpoint), categorie di impatto e modelli ambientali di calcolo. Anche tra versioni diverse dello stesso metodo possono esserci aggiornamenti significativi che modificano i risultati dello studio LCA. Nel caso specifico delle due EPD citate sopra, sono stati utilizzati versioni precedenti del metodo EF o è stato usato CML (metodo di LCIA precedente a EF), il quale presenta fattori di caratterizzazione diversi, producendo quindi risultati differenti; (d) differenze nei dati di inventario (non sempre disponibili nelle EPD): le EPD non includono necessariamente i dati dettagliati di inventario (input/output energetici e materiali), né includono i dataset di background utilizzati, e quindi non permettono un confronto di dettaglio né tra i dati di inventario utilizzati in studi LCA differenti, né tra i risultati delle EPD e degli studi LCA effettuati da altri soggetti su prodotti simili; (e) differenze nelle assunzioni metodologiche (non sempre esplicitate nelle EPD): elementi come la definizione dei confini del sistema, la scelta dell'unità funzionale, la modellazione del fine vita, l'uso o meno di allocazioni (economiche, di massa, energetiche), possono variare sensibilmente tra studi. Queste assunzioni hanno un impatto diretto e spesso decisivo sui risultati.

Nei casi in cui i risultati di due studi LCA differenti ma effettuati su prodotti simili, ad esempio quelli della categoria Climate Change, presentino valori dello stesso ordine di grandezza, si può affermare con un buon grado di confidenza che i risultati siano comparabili e sostanzialmente coerenti tra loro. Anche in presenza di piccole differenze numeriche, la similarità nell'ordine di grandezza è indicativa di una coerenza metodologica e quantitativa, che rafforza la validità dei risultati ottenuti.

### 9.3.2 Confronto con il processo di produzione di CAA presente nella banca dati Ecoinvent

In questo paragrafo il processo di produzione del CAA analizzato nel presente studio LCA e i relativi risultati, sono messi a confronto con quelli del CAA presente nella banca dati Ecoinvent, ovvero con il dataset "Autoclaved aerated concrete block {CH}| production | Cut-off, U" (di seguito CAA-CH). L'unità funzionale (FU) del CAA-CH è 1 kg, mentre l'unità funzionale assunta nel presente studio è 1 m<sup>3</sup>. Pertanto, al fine di rendere possibile il confronto tra i due processi di produzione e i relativi impatti di ciclo di vita, i dati dell'inventario del CAA-CH sono stati moltiplicati per la densità dello stesso (pari a 550 kg/m<sup>3</sup>).

Da un primo raffronto, oltre alle differenze significative tra i due processi in termini di caratteristiche del prodotto oggetto dell'analisi (il CAA-CH ha una densità di 550 kg/m<sup>3</sup>, mentre quello del presente studio ha una densità di 455 kg/m<sup>3</sup>), si riscontrano anche delle difformità nella definizione dei confini dei sistemi analizzati (il nostro studio non include il packaging e le infrastrutture), nei flussi in input/output presi in considerazione e nella scelta dei dataset utilizzati per rappresentare i processi di background. Inoltre, è da sottolineare anche la diversa rappresentatività geografica dei dataset selezionati, relativa alla Svizzera ("CH") per il CAA-CH e, invece, a valori medi a livello italiano ("IT", "Italy"), europeo ("RER", "Europe without Switzerland") o mondiale ("GLO", "Global" e "RoW", "Rest of World") (queste due ultime laddove non fossero disponibili dati italiani o europei), nel caso dello studio LCA svolto.

Va inoltre messo in evidenza che la diversa densità dei due prodotti fa sì che, a parità di FU (1 m<sup>3</sup>), risultino apprezzabilmente differenti anche le quantità dei flussi di inventario in input/output, con conseguenti differenze nei risultati di impatto del ciclo di vita. A parità di materia prime/materiali/risorse utilizzati e di dataset di background utilizzati, infatti, l'impatto è direttamente proporzionale al quantitativo (kg, l, kWh, ecc.) utilizzato (ovvero, più materiale di una certa tipologia si usa per produrre quel prodotto, più elevati saranno gli impatti ambientali di quel prodotto).

In Tabella 13 e Figura 8 sono confrontati i risultati della valutazione di impatto in termini di caratterizzazione. Come si può notare, il CAA presente in Ecoinvent (CAA-CH, opzione B) risulta meno impattante del CAA del presente studio (opzione A), per la maggior parte delle categorie d'impatto, con l'eccezione di Climate change, Eutrophication, freshwater, Human toxicity, non-cancer, Ionising radiation e Resource use, minerals and metals, in cui il CAA di Ecoinvent presenta impatti maggiori; in particolare, le differenze più significative (>50%, evidenziate in giallo in Tabella 13), escludendo le sottocategorie (es. Climate Change- Biogenic), si osservano per le categorie Ozone depletion (-60%), Water use (-83%), Ionising radiation (+149%) e Resource use, minerals and metals (+82%). In generale, comunque, i risultati presentano lo stesso ordine di grandezza, e sono tra di loro comparabili e coerenti.

Tabella 13 – Confronto dei risultati caratterizzati per la produzione di 1m<sup>3</sup> di CAA del presente studio e di 1 m<sup>3</sup> di CAA-CH

| Categoria d'impatto                     | Unità                  | Autoclaved aerated concrete block, unreinforced, at plant (455 kg/m <sup>3</sup> ) (A) | Autoclaved aerated concrete block {CH}   production   Cut-off, U (550 kg/m <sup>3</sup> ) (B) | Differenza % (B-A/A) |
|-----------------------------------------|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Acidification                           | mol H+ eq              | 3,73E-01                                                                               | 3,31E-01                                                                                      | -11%                 |
| Climate change                          | kg CO <sub>2</sub> eq  | 1,93E+02                                                                               | 1,96E+02                                                                                      | 1%                   |
| Climate change - Biogenic               | kg CO <sub>2</sub> eq  | 9,45E-02                                                                               | 3,46E-02                                                                                      | -63%                 |
| Climate change - Fossil                 | kg CO <sub>2</sub> eq  | 1,93E+02                                                                               | 1,96E+02                                                                                      | 1%                   |
| Climate change - Land use and LU change | kg CO <sub>2</sub> eq  | 3,85E-02                                                                               | 2,38E-02                                                                                      | -38%                 |
| Ecotoxicity, freshwater                 | CTUe                   | 1,28E+02                                                                               | 1,25E+02                                                                                      | -3%                  |
| Ecotoxicity, freshwater - inorganics    | CTUe                   | 1,23E+02                                                                               | 1,21E+02                                                                                      | -1%                  |
| Ecotoxicity, freshwater - organics      | CTUe                   | 4,88E+00                                                                               | 3,43E+00                                                                                      | -30%                 |
| Particulate matter                      | disease inc.           | 3,13E-06                                                                               | 2,75E-06                                                                                      | -12%                 |
| Eutrophication, marine                  | kg N eq                | 1,06E-01                                                                               | 9,79E-02                                                                                      | -8%                  |
| Eutrophication, freshwater              | kg P eq                | 1,45E-02                                                                               | 1,89E-02                                                                                      | 30%                  |
| Eutrophication, terrestrial             | mol N eq               | 1,17E+00                                                                               | 1,14E+00                                                                                      | -3%                  |
| Human toxicity, cancer                  | CTUh                   | 2,28E-08                                                                               | 1,78E-08                                                                                      | -22%                 |
| Human toxicity, cancer - inorganics     | CTUh                   | 7,84E-09                                                                               | 9,39E-09                                                                                      | 20%                  |
| Human toxicity, cancer - organics       | CTUh                   | 1,50E-08                                                                               | 8,42E-09                                                                                      | -44%                 |
| Human toxicity, non-cancer              | CTUh                   | 7,53E-07                                                                               | 8,26E-07                                                                                      | 10%                  |
| Human toxicity, non-cancer - inorganics | CTUh                   | 7,17E-07                                                                               | 7,95E-07                                                                                      | 11%                  |
| Human toxicity, non-cancer - organics   | CTUh                   | 3,61E-08                                                                               | 3,02E-08                                                                                      | -16%                 |
| Ionising radiation                      | kBq U-235 eq           | 4,73E+00                                                                               | 1,18E+01                                                                                      | 149%                 |
| Land use                                | Pt                     | 4,68E+02                                                                               | 3,77E+02                                                                                      | -20%                 |
| Ozone depletion                         | kg CFC11 eq            | 2,44E-06                                                                               | 9,70E-07                                                                                      | -60%                 |
| Photochemical ozone formation           | kg NMVOC eq            | 4,12E-01                                                                               | 3,66E-01                                                                                      | -11%                 |
| Resource use, fossils                   | MJ                     | 1,38E+03                                                                               | 8,79E+02                                                                                      | -36%                 |
| Resource use, minerals and metals       | kg Sb eq               | 2,10E-04                                                                               | 3,82E-04                                                                                      | 82%                  |
| Water use                               | m <sup>3</sup> depriv. | 3,61E+01                                                                               | 6,27E+00                                                                                      | -83%                 |

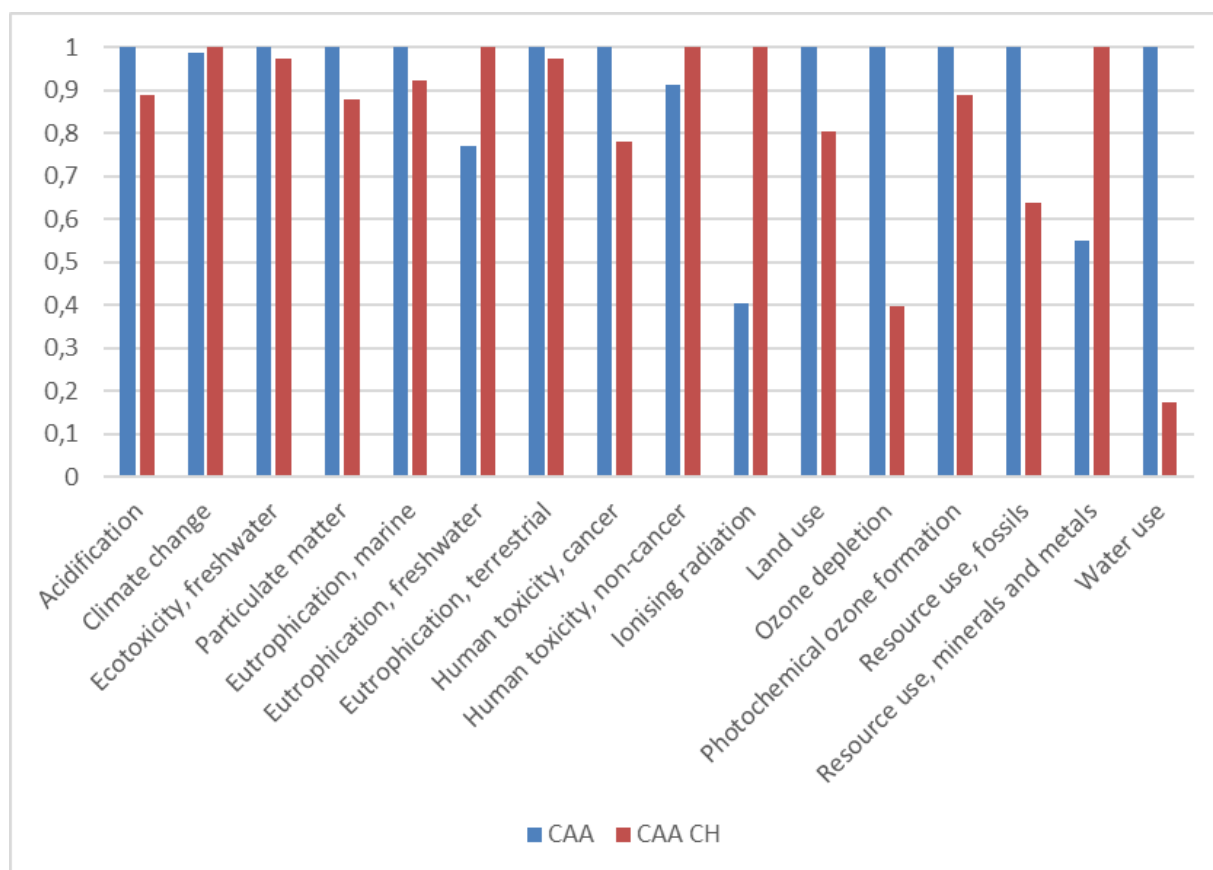


Figura 8 – Rappresentazione grafica del confronto dei risultati della caratterizzazione

Approfondendo le cause di tali scostamenti significativi, per la categoria **Water use** è stato possibile riscontrare che la differenza di impatto tra i processi analizzati (-83%) è dovuta sia alla diversa quantità di acqua utilizzata nel processo di produzione del calcestruzzo, che nel processo CAA-CH risulta circa tre volte inferiore, sia al diverso contributo sul risultato della categoria Water use del dataset utilizzato per modellare la sabbia in input al process produttivo (“sand {CH}| market for sand | Cut-off, U” nel caso del CAA-CH e “sand {RoW}| market for sand | Cut-off, U”, nel caso del presente studio). In dettaglio, il risultato di impatto su Water use di “sand {CH}| market for sand | Cut-off, U”, ammonta a (0,00232 m<sup>3</sup>/kg), mentre quello di “sand {RoW}| market for sand | Cut-off, U” ammonta a (0,0457 m<sup>3</sup>/kg). Quindi, nonostante il processo produttivo del calcestruzzo analizzato in questo studio usi un quantitativo inferiore di sabbia rispetto al CAA CH, produce un impatto potenziale maggiore sulla categoria Water use. Tale evidenza dimostra che, anche in caso di utilizzo dello stesso metodo di analisi degli impatti, la scelta di differenti dataset per modellizzare gli input può influenzare notevolmente i risultati finali dell’analisi. Si precisa inoltre che nel presente studio si è deciso di utilizzare il dataset sand {RoW}| market for sand | Cut-off, U in linea con i criteri di rappresentatività geografica utilizzati nello studio (nella fase di modellizzazione si sono utilizzati i dataset RoW o GLO quando i dataset IT o RER non erano disponibili).

Per quanto riguarda la categoria **Ionising radiation**, per cui i risultati del CAA-CH sono maggiori del 149% a quelli del presente studio, è stato invece possibile osservare che la ragione principale del significativo scostamento è la diversa quantità e tipologia (mix elettrico nazionale) di elettricità utilizzata dai due processi. Per il CAA-CH, infatti, si osserva un consumo pari a 31,625 kWh/m<sup>3</sup> (con mix elettrico della Svizzera), mentre il CAA analizzato nel presente studio ha un consumo di 16,5

kWh/m<sup>3</sup> (con mix elettrico Italiano). Nello specifico, il mix elettrico svizzero (“market for electricity, medium voltage – CH”) produce un impatto potenziale sulla categoria Ionising radiation pari a circa 0,212 kBq U235-Eq/kWh, mentre il mix elettrico italiano (“market for electricity, medium voltage – CH”) produce un impatto potenziale sulla stessa categoria di 0,0526 kBq U235-Eq/kWh (quindi di un ordine di grandezza inferiore).

La differenza di impatto sulla categoria **Ozone depletion** è invece dovuta al fatto che il CAA analizzato nel nostro studio utilizza una quantità maggiore di energia termica nel processo produttivo (prodotta dalla combustione di gas naturale in caldaia), rispetto al CAA-CH. Il calore prodotto, in entrambi i casi, infatti, risulta il flusso di input che contribuisce maggiormente all’impatto su questa categoria.

Le differenze rilevate nella categoria **Resource use, minerals and metals** sono dovute soprattutto al fatto che il processo CAA-CH include degli input che invece non sono considerati nel presente studio. In particolare, il CAA-CH prende in considerazione sia l’imballaggio del prodotto che è invece escluso dai confini del nostro studio, che il contributo dell’infrastruttura relativa alla cava di argilla (ritenuto trascurabile nelle nostre analisi, come riportato peraltro in letteratura (Tokede e Rouwette, 2024) e quindi non inserito nel modello LCA.

In Tabella 14 sono riportati i contributi dei singoli processi del CAA CH, come contributo percentuale ai risultati di caratterizzazione. Analogamente, in Tabella 15 sono riportati i risultati del CAA del nostro studio.

Per ogni categoria d’impatto riportata in Tabella 14 e in Tabella 15, sono evidenziati in scala di rosso i flussi di input/output maggiormente responsabili dell’impatto totale. Appare evidente come la produzione del cemento contribuisca maggiormente agli impatti ambientali di quasi tutte le categorie per entrambi i processi.

Tabella 14 –Contributi dei singoli processi ai risultati della caratterizzazione dello studio del CAA-CH

|                                      | CAA CH<br>(emissioni<br>dirette) | Aluminium | Anhydrite | Cement | Clay pit | Packing | Quicklime | Sand | Tap<br>water | Diesel | Electricity | Heat | Waste | Waste<br>water |
|--------------------------------------|----------------------------------|-----------|-----------|--------|----------|---------|-----------|------|--------------|--------|-------------|------|-------|----------------|
| Acidification                        | 0%                               | 5%        | 1%        | 52%    | 5%       | 5%      | 19%       | 3%   | 0%           | 4%     | 1%          | 5%   | 0%    | 0%             |
| Climate change                       | 0%                               | 1%        | 0%        | 54%    | 1%       | 1%      | 35%       | 1%   | 0%           | 1%     | 0%          | 6%   | 0%    | 0%             |
| Ecotoxicity, freshwater              | 0%                               | 10%       | 1%        | 34%    | 14%      | 18%     | 11%       | 3%   | 0%           | 1%     | 2%          | 5%   | 0%    | 1%             |
| Particulate matter                   | 0%                               | 8%        | 2%        | 38%    | 7%       | 8%      | 11%       | 8%   | 0%           | 13%    | 2%          | 2%   | 0%    | 0%             |
| Eutrophication, marine               | 0%                               | 3%        | 1%        | 58%    | 2%       | 3%      | 16%       | 4%   | 0%           | 6%     | 1%          | 6%   | 0%    | 0%             |
| Eutrophication, freshwater           | 0%                               | 4%        | 0%        | 74%    | 6%       | 9%      | 3%        | 1%   | 0%           | 0%     | 1%          | 1%   | 0%    | 0%             |
| Eutrophication, terrestrial          | 0%                               | 3%        | 1%        | 60%    | 3%       | 3%      | 15%       | 3%   | 0%           | 6%     | 1%          | 6%   | 0%    | 0%             |
| Human toxicity, cancer               | 0%                               | 10%       | 1%        | 31%    | 13%      | 26%     | 7%        | 2%   | 0%           | 1%     | 2%          | 7%   | 0%    | 0%             |
| Human toxicity, non-cancer           | 0%                               | 3%        | 0%        | 60%    | 11%      | 15%     | 5%        | 2%   | 0%           | 0%     | 2%          | 2%   | 0%    | 0%             |
| Ionising radiation                   | 0%                               | 0%        | 1%        | 30%    | 1%       | 4%      | 7%        | 2%   | 0%           | 0%     | 55%         | 0%   | 0%    | 0%             |
| Land use                             | 0%                               | 1%        | 1%        | 16%    | 13%      | 28%     | 24%       | 7%   | 0%           | 0%     | 8%          | 1%   | 0%    | 0%             |
| Ozone depletion                      | 0%                               | 2%        | 1%        | 13%    | 1%       | 2%      | 41%       | 3%   | 0%           | 2%     | 3%          | 32%  | 0%    | 0%             |
| Photochemical<br>ozone<br>formation  | 0%                               | 2%        | 1%        | 49%    | 2%       | 3%      | 26%       | 3%   | 0%           | 5%     | 1%          | 8%   | 0%    | 0%             |
| Resource use, fossils                | 0%                               | 3%        | 1%        | 24%    | 2%       | 4%      | 32%       | 3%   | 0%           | 2%     | 12%         | 17%  | 0%    | 0%             |
| Resource use, minerals and<br>metals | 0%                               | 8%        | 0%        | 23%    | 26%      | 30%     | 3%        | 2%   | 0%           | 0%     | 5%          | 2%   | 0%    | 0%             |
| Water use                            | -1%                              | 8%        | 1%        | 28%    | 9%       | 18%     | 11%       | 10%  | 2%           | 1%     | 10%         | 3%   | 0%    | -1%            |

Tabella 15 - Contributi dei singoli processi ai risultati della caratterizzazione dello studio del CAA

|                                         | CAA<br>(emissioni<br>dirette) | Sand | Lime | Gypsum | Cement | Aluminium | Hydrochloric acid | Lubricating oil | Chemical,<br>inorganic | Sodium<br>chloride | Sodium<br>hydroxide | Reinforcing<br>steel | Transport | Electricity | Heat | Wastewater | Waste |
|-----------------------------------------|-------------------------------|------|------|--------|--------|-----------|-------------------|-----------------|------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|-----------|-------------|------|------------|-------|
| Acidification                           | 0%                            | 6%   | 14%  | 0%     | 51%    | 9%        | 0%                | 0%              | 0%                     | 0%                 | 0%                  | 1%                   | 7%        | 5%          | 7%   | 0%         | 0%    |
| Climate change                          | 0%                            | 2%   | 28%  | 0%     | 46%    | 2%        | 0%                | 0%              | 0%                     | 0%                 | 0%                  | 0%                   | 3%        | 3%          | 16%  | 0%         | 0%    |
| Ecotoxicity,<br>freshwater              | 0%                            | 6%   | 9%   | 0%     | 35%    | 20%       | 0%                | 0%              | 0%                     | 0%                 | 0%                  | 2%                   | 8%        | 6%          | 11%  | 0%         | 1%    |
| Particulate<br>matter                   | 0%                            | 13%  | 8%   | 1%     | 39%    | 13%       | 0%                | 0%              | 0%                     | 0%                 | 0%                  | 2%                   | 17%       | 2%          | 4%   | 0%         | 0%    |
| Eutrophication,<br>marine               | 0%                            | 7%   | 11%  | 0%     | 53%    | 5%        | 0%                | 0%              | 0%                     | 0%                 | 0%                  | 1%                   | 9%        | 4%          | 8%   | 0%         | 0%    |
| Eutrophication,<br>freshwater           | 0%                            | 4%   | 3%   | 0%     | 64%    | 10%       | 0%                | 0%              | 0%                     | 0%                 | 0%                  | 2%                   | 3%        | 10%         | 4%   | 0%         | 0%    |
| Eutrophication,<br>terrestrial          | 0%                            | 7%   | 12%  | 1%     | 55%    | 5%        | 0%                | 0%              | 0%                     | 0%                 | 0%                  | 1%                   | 9%        | 3%          | 8%   | 0%         | 0%    |
| Human toxicity,<br>cancer               | 0%                            | 5%   | 4%   | 0%     | 44%    | 15%       | 0%                | 0%              | 0%                     | 0%                 | 1%                  | 3%                   | 6%        | 3%          | 17%  | 0%         | 0%    |
| Human toxicity,<br>non-cancer           | 0%                            | 3%   | 4%   | 0%     | 70%    | 6%        | 0%                | 0%              | 0%                     | 0%                 | 0%                  | 1%                   | 7%        | 3%          | 4%   | 0%         | 0%    |
| Ionising radiation                      | 0%                            | 2%   | 15%  | 0%     | 57%    | 2%        | 0%                | 0%              | 0%                     | 0%                 | 0%                  | 0%                   | 2%        | 18%         | 3%   | 0%         | 0%    |
| Land use                                | 0%                            | 46%  | 15%  | 0%     | 18%    | 2%        | 0%                | 0%              | 0%                     | 0%                 | 0%                  | 0%                   | 12%       | 3%          | 1%   | 0%         | 0%    |
| Ozone depletion                         | 0%                            | 2%   | 13%  | 0%     | 15%    | 1%        | 0%                | 0%              | 0%                     | 0%                 | 0%                  | 0%                   | 5%        | 6%          | 57%  | 0%         | 0%    |
| Photochemical<br>ozone formation        | 0%                            | 7%   | 18%  | 0%     | 44%    | 4%        | 0%                | 1%              | 0%                     | 0%                 | 0%                  | 1%                   | 9%        | 4%          | 12%  | 0%         | 0%    |
| Resource use,<br>fossils                | 0%                            | 3%   | 16%  | 0%     | 27%    | 3%        | 0%                | 0%              | 0%                     | 0%                 | 0%                  | 1%                   | 6%        | 7%          | 36%  | 0%         | 0%    |
| Resource use,<br>minerals and<br>metals | 0%                            | 6%   | 4%   | 0%     | 41%    | 28%       | 0%                | 0%              | 0%                     | 0%                 | 0%                  | 1%                   | 8%        | 6%          | 4%   | 0%         | 0%    |
| Water use                               | 37%                           | 33%  | 1%   | 0%     | 16%    | 3%        | 0%                | 0%              | 0%                     | 0%                 | 0%                  | 1%                   | 1%        | 8%          | 1%   | 0%         | -1%   |

Infine, l'analisi dei risultati derivanti dalla fase di normalizzazione, in Figura 9, mostra come la maggior parte delle categorie di impatto più rilevanti siano comunque le stesse per i due studi: Resource use, fossil (RUF), Climate change (CC), Photochemical ozone formation (POF), Eutrophication, freshwater (EUf), Acidification (AC), Eutrophication, terrestrial (EUt), Human Toxicity, non-cancer (HTnon-c) e Eutrophication, marine (EUM). Ciò dimostra che, nonostante le differenze nei risultati di caratterizzazione tra i 2 studi, essi conducono a risultati comparabili per quanto riguarda le categorie di impatto più significative.

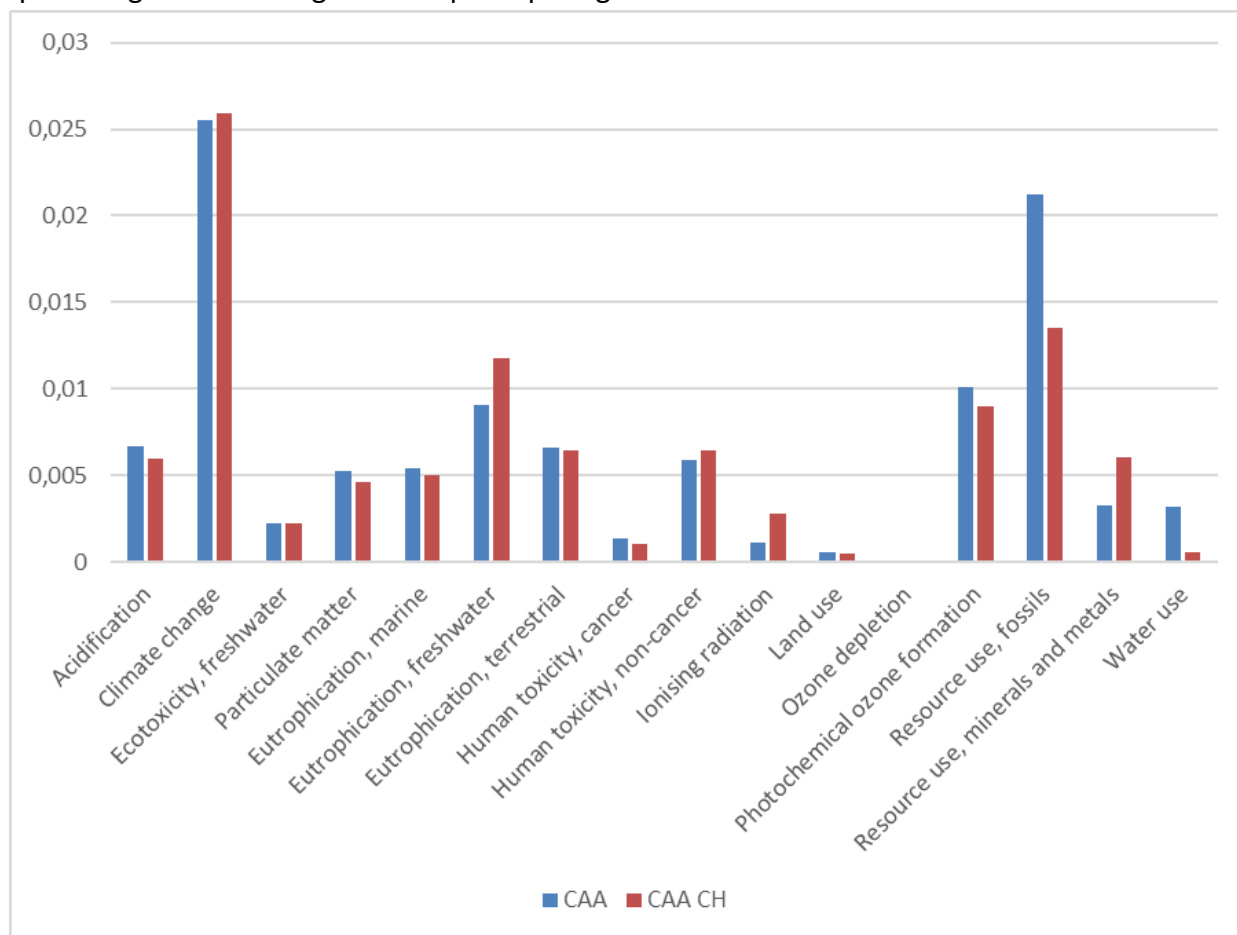


Figura 9 - Rappresentazione grafica del confronto dei risultati della normalizzazione.

## 10 Conclusioni

Nel presente report sono presentati i risultati dello studio LCA di filiera relativo alla produzione di blocchi di Calcestruzzo Aerato Autoclavato (CAA).

Lo studio è stato svolto sulla base di dati relativi alla filiera italiana della produzione dei blocchi in CAA, ricorrendo a dati primari disponibili a livello di filiera, raccolti presso le imprese coinvolte nel GdL. All'interno del GdL si sono selezionate due aziende il cui processo produttivo e le cui tecnologie sono state considerate rappresentative di una situazione media italiana relativa alla produzione del blocco in CAA. In dettaglio, allo studio hanno partecipato rappresentanti del mondo della Ricerca (ENEA), due imprese produttive che coprono gran parte della produzione nazionale degli elementi per l'edilizia in CAA (Xella Italia S.r.l. ed Ekoru S.r.l.), e la relativa Associazione di Categoria (Assobeton).

All'interno della filiera, in particolare, è stato preso in considerazione un blocco in CAA di densità

455 kg/m<sup>3</sup>. Il blocco in CAA oggetto dello studio soddisfa le norme di tipo meccanico-prestazionale così come indicato secondo gli standard normativi di riferimento per questo tipo di prodotti, come la Norma UNI EN 771-4:2015. Esso è destinato all'uso in ambito edilizio, in particolare come elemento per murature non portanti (es. tamponature esterne e tramezzature interne).

Lo studio LCA di filiera è stato svolto adottando un approccio "cradle-to-gate", ovvero un approccio che considera tutti i processi fino al "cancello aziendale", escludendo la distribuzione del prodotto al cliente finale, e le successive fasi di uso e fine vita (ad es. eventuale manutenzione del blocco in CAA e il processo di riuso/riciclo/smaltimento del prodotto). Tale scelta dei confini del sistema, che vanno dalla fase di produzione delle materie prime ed il loro trasporto allo stabilimento produttivo, fino al processo produttivo vero e proprio, che comprende macinazione e polverizzazione, miscelazione, getto e maturazione, taglio e autoclavaggio, è ritenuta rilevante per le attività delle aziende di produzione dei blocchi in CAA.

Non vi sono da segnalare importanti carenze di dati in quanto è stata effettuata una dettagliata raccolta dati presso le aziende coinvolte nello studio di filiera.

Ad esito dello studio è stato definito 1 dataset, rappresentativo della produzione nazionale del blocco in CAA, che è stato inserito nella Banca Dati Italiana LCA.

Per la fase di valutazione degli impatti è stato adottato il metodo di valutazione degli impatti EF 3.1 promosso dall'iniziativa della Commissione Europea sull'impronta ambientale, volto a ottenere un profilo di impatto ambientale completo al livello di prodotto.

L'analisi dei risultati della fase di normalizzazione mostra come le categorie di impatto più rilevanti siano Climate change (CC), Resource use, fossils (RUf), Photochemical ozone formation (POF), Eutrophication, freshwater (EUf), Acidification (AC), Eutrophication, terrestrial (EUt), Human Toxicity, non-cancer (HTnon-c) e Eutrophication, marine (EUM).

L'analisi dei risultati della fase di pesatura, allo stesso modo, evidenzia come la categoria Climate Change (CC) sia la più significativa, seguita dalla categoria Resource use, fossils (RUf).

Dallo studio si evince chiaramente come la produzione del cemento di tipo Portland e dell'energia termica utilizzata nel processo produttivo (generata dalla combustione di gas naturale) siano i processi più rilevanti in quasi tutte le categorie di impatto.

Nell'ambito del presente studio, è stata infine effettuata un'analisi di sensitività focalizzata sui seguenti aspetti: la tipologia di energia termica utilizzata nel processo produttivo, la tipologia di mezzi di trasporto dei materiali/componenti in input e la fonte di produzione dell'energia elettrica utilizzata dalle aziende per la produzione del CAA.

È stato perciò ipotizzato che l'energia termica necessaria al processo produttivo sia prodotta da biomassa lignocellulosica, evidenziando da un lato una riduzione dell'impatto sulle categorie Resource Use, fossil (-34%), Ozone Depletion (-55%) e Climate Change (-15%) ma al contempo, un impatto molto maggiore su tutte le altre categorie di impatto.

Per il trasporto merci è stato ipotizzato l'uso esclusivo di mezzi EURO 6 mostrando una riduzione modesta dell'impatto su alcune categorie (Eutrophication, terrestrial e Eutrophication, marine, entrambe circa -6%, e Photochemical ozone formation, -4,3%).

Infine, l'utilizzo, durante il processo produttivo, di energia elettrica prodotta da pannelli fotovoltaici, mostra una riduzione degli impatti rispetto a quelli dello scenario base, su tutte le categorie di impatto più significative. È da evidenziare come l'uso di energia elettrica prodotta da pannelli

fotovoltaici installati su terreno, se da un lato comporta risparmi notevoli nell'uso di risorse fossili (Resource use, fossil, -6,3%) e una riduzione dell'impronta di carbonio associata al prodotto analizzato (Climate change, -2,5%), dall'altro lato produce un impatto molto maggiore in termini di consumo di risorse minerali e metalli (Resource use, minerals and metals, +18,8%) e di uso del suolo (Land use, +35,9%).

È stato inoltre implementato un confronto con due EPD pubblicate precedentemente dalle due aziende Xella Italia S.r.l. ed Ekoru S.r.l., e con il processo relativo al CAA presente sulla banca dati Ecoinvent, mettendo in luce un sostanziale allineamento tra i risultati degli studi confrontati. Infatti, anche in presenza di piccole differenze numeriche, in particolare nei risultati della caratterizzazione, la similarità nell'ordine di grandezza è indicativa di una coerenza metodologica e quantitativa, che rafforza la validità dei risultati ottenuti. Inoltre, nonostante le differenze nei risultati di caratterizzazione tra gli studi messi a confronto, i risultati della normalizzazione conducono a risultati assolutamente comparabili per quanto riguarda le categorie di impatto più significative.

Infine, i risultati dello studio LCA di filiera della produzione del blocco in CAA potranno essere utilizzati dalle aziende coinvolte per sviluppare azioni e strategie di ecodesign che permettano sia di migliorare la prestazione ambientale del ciclo di vita della produzione dei blocchi in CAA, sia di utilizzare in modo più efficace le risorse materiali ed energetiche lungo il processo produttivo, promuovendo perciò la circolarità e la sostenibilità del prodotto.

La presenza del dataset di produzione del CAA nella Banca Dati Italiana LCA potrà consentire di valorizzare il profilo ambientale del CAA nelle valutazioni di sostenibilità della pubblica amministrazione e degli esperti LCA (ad esempio nel confronto tra prodotti con la medesima funzione) e dei progettisti nelle valutazioni LCA a scala di edificio, anche in relazione all'applicazione dell' LCA come criterio premiante, inserito nei Criteri Ambientali Minimi (CAM) Edilizia di recente pubblicazione.

## 11 Bibliografia

Andreas Bassi S., Biganzoli F., Ferrara N., Amadei A., Valente A., Sala S., Ardente F., 2023, Updated characterisation and normalisation factors for the Environmental Footprint 3.1 method. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, doi:10.2760/798894, JRC130796.

Ekoru Srl., 2021, GASBETON: Dichiarazione ambientale di prodotto (EPD n. S-P-03048). EPD International AB. [https://www.gasbeton.it/wp-content/uploads/2021/04/EPD-Gasbeton\\_ITA-environdoc.pdf](https://www.gasbeton.it/wp-content/uploads/2021/04/EPD-Gasbeton_ITA-environdoc.pdf)

Federbeton, 2021. La strategia di decarbonizzazione nel settore del cemento. Disponibile online: <https://www.federbeton.it/Pubblicazioni>

Federbeton, 2023a. Rapporto di filiera 2023. Disponibile online: <https://www.federbeton.it/Pubblicazioni>

Federbeton, 2023b. Rapporto di sostenibilità 2023. Disponibile online: <https://www.federbeton.it/Pubblicazioni>

Gaziantep Ytong Sanayi A.Ş., 2024. 350 kg/m<sup>3</sup> Autoclaved Aerated Concrete. EPD International AB, EPD-IES-0001804:001.

<https://epd.dijitalpanel.site/Upload/epdturkey.com/Products/Images/68305f4554492-EPD-IES-0001804001%20Gaziantep%20YTONG%20EPD.pdf>

National Industries Company, 2024. Environmental Product Declaration AAC White Block. EPD International AB, S-P-13878. <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/7aed473d-4a18-4847-c5bb-08dc95fad0b1/Data>

Paleari M., Miliani A., 2018. The sustainability of wall solutions: Life Cycle Assessment (LCA) of different solutions for external closures. *ce/papers*, 2(4), 489-494.

Solbet Sp. z o.o., 2023. Autoklawizowany beton komórkowy (ABK). Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU), EPD-SOL-20230257-CBD1-EN.

[https://solbet-lubartow.pl/wp-content/uploads/2023/11/Deklaracja-srodowiskowa-EPD-SOLBET\\_pl.pdf](https://solbet-lubartow.pl/wp-content/uploads/2023/11/Deklaracja-srodowiskowa-EPD-SOLBET_pl.pdf)

UNI, 2021. 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., Weidema E., 2016. "The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology," *Int. J. Life Cycle Assess.* <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087>

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.

Xella Baustoffe GmbH., 2021. Calcestruzzo aerato autoclavato Xella Italia S.r.l. (EPD n. MR-EPDITALY0062). EPD Italy. <https://www.epditaly.it/epd/calcestruzzo-aerato-autoclavato-xella-italia-s-r-l/>

Xella Baustoffe GmbH, 2023. Calcestruzzo aerato autoclavato. IBU - Institut Bauen und Umwelt e.V. (Istituto di Edilizia e Ambiente), EPD-XEL-20220257-IBA2-IT. <https://storefrontapi.commerce.xella.com/medias/EPD-XELLA-Ytong-2022.pdf?context=bWFzdGVyfHJvb3R8NzEyNzM2fGFwcGxpY2F0aW9uL3BkZnxhRFJpTDJnelppODVNVFUyTIRnMk5UTTJPVGt3TDBWUVJDQlISVXhNUVNBdElGbDBiMjVuSURJd01qSXVjR1JtfDk2ZmVjNDYxMDUyYzI4MTkYzVlOTY0N2M3ZmUxOTE2YmRjNmVjNTIyNWVmMjg2NTcxNTU5Y2UyYzAxZjM5MGE>

AGROALIMENTARE

EDILIZIA

ENERGIA

LEGNO ARREDO

EVENTI

ISBN 978-88-8286-538-2



enea.it