



POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Architettura e Design

Corso di Laurea Magistrale in Architettura per la Sostenibilità

A.A. 2025/2026

Tesi di Laurea Magistrale

Life Cycle Assessment (LCA) – Analisi del Ciclo di Vita di cementi a ridotto contenuto di clinker mediante l'impiego di scorie d'acciaio carbonatate

Relatore:

Prof.ssa Paola Palmero

Correlatori:

Prof.ssa Antonella Sola

Giuseppe Ferrara

Francesca Bonfante

Tesi di Laurea di:

Anna Facheris

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Architettura e Design

Laurea Magistrale in Architettura per la Sostenibilità



Tesi di Laurea Magistrale

Life Cycle Assessment (LCA) – analisi del ciclo di vita di cementi a ridotto contenuto di clinker mediante l'impiego di scorie d'acciaio carbonatate

Relatore:

Prof.ssa Paola Palmero

Correlatori:

Prof.ssa Antonella Sola

Giuseppe Ferrara

Francesca Bonfante

Candidato:

Anna Facheris

A.A. 2025/2026

INDICE

PARTE PRIMA - QUADRO TEORICO

Capitolo I - Sviluppo e struttura dell'analisi LCA

1.1 LO SVILUPPO SOSTENIBILE

1.1.1 Il concetto di sviluppo sostenibile: origine, definizioni e obiettivi.....	1
1.1.2 I momenti chiave che hanno segnato l'evoluzione dello sviluppo sostenibile.....	4
1.1.3 La sostenibilità del mondo delle costruzioni.....	10

1.2 STRUMENTI PER LA VALUTAZIONE DELLA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE NEL CICLO DI VITA

1.2.1 Il pensiero Life Cycle Thinking e il concetto di economia circolare.....	12
1.2.2 La metodologia del Life Cycle Assessment.....	15
1.2.3 I riferimenti normativi: le norme della serie ISO14040.....	19

1.3 LA STRUTTURA DI UNA ANALISI LCA

1.3.1 Fase 1: Definizione dell'obiettivo e campo di applicazione.....	21
1.3.2 Fase 2: Analisi dell'inventario.....	25
1.3.3 Fase 3: Valutazione dell'impatto del ciclo di vita.....	27
1.3.4 Fase 4: Interpretazione del ciclo di vita.....	28

1.4 CRITICITA' E POTENZIALITA' DI UNA ANALISI LCA

1.4.1 Potenzialità – Criticità.....	30
-------------------------------------	----

Capitolo II – Strategie di decarbonizzazione nell'industria del cemento: valorizzazione delle scorie EAF tramite mineralizzazione e possibile riuso come materiale cementizio supplementare

2.1 STRATEGIE DI DECARBONIZZAZIONE NELL'INDUSTRIA DEL CEMENTO

2.1.1 L'impegno globale per la neutralità carbonica nell'industria del cemento.....	32
2.1.2 Emissioni nella produzione di cemento – il clinker.....	33
2.1.3 Strategie di decarbonizzazione nel settore cementizio.....	38
2.1.4 Opportunità e barriere all'adozione di approcci circolari nel settore cementizio.....	41

2.2 LA SCORIA EAF: UNO SCARTO INDUSTRIALE CON UN POTENZIALE STRATEGICO

2.2.1 La scoria da forno ad arco elettrico – EAF slag.....	42
2.2.2 Potenzialità della scoria EAF come materiale basico per la mineralizzazione della CO ₂	43
2.2.3 Processo di carbonatazione acquosa della scoria d'acciaio EAF.....	44
Bibliografia.....	46

PARTE SECONDA - LIFE CYCLE ASSESSMENT

Analisi LCA applicata alla produzione di cemento: valutazione comparativa degli impatti ambientali del cemento Portland (I – II) e del cemento a ridotto contenuto di clinker con aggiunta di scoria EAF carbonatata.

Capitolo III. FASE 1: DEFINIZIONE DI OBIETTIVO E CAMPO DI APPLICAZIONE

- Goal and scope definition -

3.1. Obiettivo.....	52
3.2 Definizione del campo di applicazione e sistemi a confronto.....	53

Capitolo IV. FASE 2: ANALISI DELL'INVENTARIO LCI -

- Life cycle inventory -

4.1 Raccolta dati e fonti.....	56
4.2 Assunzioni e modellazione del cemento innovativo con basso TRL.....	57
4.3 Gestione della multifunzionalità e allocazione della la scoria EAF.....	62
4.4 LCI: Diagrammi di flusso.....	63
4.5 LCI: flussi in ingresso e flussi in uscita.....	64

Capitolo V. FASE 3: VALUTAZIONE DELL'IMPATTO DEL CICLO DI VITA LCIA

- Life cycle impact assessment -

5.1 Selezione delle categorie di impatto.....	82
5.2 Caratterizzazione – confronto scenario A e scenario B.....	83
5.3 Normalizzazione e Pesatura– confronto scenario A e scenario B.....	85

Capitolo VI. FASE 4: INTERPRETAZIONE DEL CICLO DI VITA

- Life cycle interpretation -

6.1 Confronto risultati e comparazione Scenario A e Scenario B.....	86
Bibliografia.....	93

PARTE PRIMA
- QUADRO TEORICO -

1.1 | LO SVILUPPO SOSTENIBILE

1.1.1 Il concetto di sviluppo sostenibile: origine, definizione e obiettivi

Nel corso degli ultimi decenni il tema dello sviluppo sostenibile ha certamente rappresentato uno degli argomenti più discussi all'interno del dibattito politico sul futuro dell'umanità. La seconda metà del ventesimo secolo, infatti, è stata caratterizzata dall'aumento del potere d'acquisto globale che ha portato una crescita esponenziale della domanda di beni di consumo e non solo primari [1]. Ciò ha innescato il fenomeno della produzione di massa e ha trasformato le case da luoghi di produzione a luoghi di consumo, portando le famiglie ad acquistare all'esterno prodotti che un tempo erano realizzati all'interno del nucleo familiare. In un arco temporale ristretto il potenziale produttivo mondiale del settore industriale è cresciuto esponenzialmente portando la competitività industriale a basarsi sulla ricerca di costi più bassi, ignorando a lungo l'impatto ambientale [1]. Le Istituzioni e gruppi industriali hanno ignorato per decenni la tutela dell'ambiente, trascurando non solo l'inquinamento che le loro stesse attività causavano in modo diretto, ma anche le conseguenze della messa in commercio di prodotti privi di requisiti di eco-compatibilità. Un prodotto è definito tale quando, a differenza dei modelli tradizionali, viene progettato per avere un ridotto impatto ambientale; non danneggiando o danneggiando solo in minima parte l'ecosistema [2]. Questo ha generato un forte aumento dell'inquinamento, con gravi conseguenze sugli ecosistemi, e del consumo di risorse non rinnovabili. Dagli anni Settanta e Ottanta del secolo scorso, la consapevolezza di dover conciliare crescita economica e tutela ambientale ha portato alla necessità di apportare un cambiamento urgente e radicale al modello di sviluppo tradizionale [3]: il concetto di sostenibilità, in collegamento con l'esigenza di proteggere le risorse ambientali del Pianeta, viene progressivamente messo in relazione con le esigenze dello sviluppo socio-economico con l'obiettivo di equilibrarne gli interessi opposti.

È in questo contesto che il tema della sostenibilità dello sviluppo conquista gradualmente la scena internazionale dopo la pubblicazione del Rapporto "The limits to growth" [4] nel 1972. In tale documento, commissionato ai ricercatori del MIT (Massachusetts Institute of Technology) dal Club di Roma – associazione fondata nel 1968 da Aurelio Peccei [5] – viene contestato per la prima volta il modello economico neoclassico dominante dimostrando che la crescita economica infinita, predicata da tale modello tradizionale, è sostanzialmente impossibile in un mondo finito, ossia caratterizzato da risorse naturali limitate [4].

Il testo è il primo avvertimento del fatto che le risorse presenti sul Pianeta non sono illimitate e rappresenta la consapevolezza che il consumo umano delle risorse naturali e la crescita incontrollata della popolazione, in un pianeta dalle risorse limitate, stavano raggiungendo un livello allarmante per l'ecosistema e per lo sviluppo futuro: *«Se l'attuale tasso di crescita della popolazione, dell'industrializzazione, dell'inquinamento, della produzione di cibo e dello sfruttamento delle risorse continuerà inalterato, i limiti dello sviluppo su questo pianeta saranno raggiunti in un momento imprecisato entro i prossimi cento anni»* [4, pag.104]. Nello stesso anno si svolge a Stoccolma la Conferenza delle Nazioni Unite sullo sviluppo umano (UNCHE, United Nations Conference On Human Enviroment), che per la prima volta richiede che la comunità internazionale si dedichi a ridurre le conseguenze negative che lo sviluppo economico incontrollato può avere sulle risorse naturali del Pianeta [4]. La conferenza tenutasi a Stoccolma segna il primo incontro internazionale in cui l'attenzione è stata rivolta alla salvaguardia dell'ambiente naturale come condizione essenziale per consentire lo sviluppo dell'umanità nel presente garantendo al contempo i diritti delle generazioni future. La conferenza si conclude con la redazione di un documento noto come "Dichiarazione di Stoccolma" recante ventisei principi, tutt'ora attuali, per la protezione ambientale e la responsabilità dell'uomo sull'ambiente, ai quali i governi devono attenersi nelle proprie decisioni politiche [6]. Tra questi: la libertà, l'uguaglianza e il diritto a condizioni di vita adeguate; la protezione delle risorse naturali per il vantaggio delle generazioni future; infine, la tutela della natura, che deve avere un ruolo significativo nei processi legislativi ed economici degli Stati [3]. In particolare, la Conferenza si concentrava sulla crisi del modello economico prevalente, già evidenziata nel Rapporto "The Limits to Growth", con l'obiettivo di valutare un modello di crescita in relazione ai criteri di tutela e sviluppo ambientale. Questo ha dato inizio al processo di valutazione delle conseguenze ambientali dei tradizionali modelli di produzione e consumo, aprendo la strada a nuovi orizzonti interdisciplinari in cui il termine "sviluppo" ha acquisito un significato più ampio, includendo anche gli ambiti civile, sociale e culturale, e non limitandosi solo alla sfera economica.

Sulla scia di tali episodi si giunge alla pubblicazione del Rapporto Brundtland "Our Common Future", elaborato nel 1987 [7] dalla Commissione mondiale sull'ambiente e lo sviluppo (WCED, World Commission on Environment and Development) che contiene la definizione oggi più condivisa di sviluppo sostenibile: *«L'umanità ha la capacità di rendere lo sviluppo sostenibile per assicurarsi che soddisfi i bisogni del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni.... lo sviluppo sostenibile non è uno stato fisso di armonia, ma piuttosto un processo di cambiamento in cui lo sfruttamento delle risorse , la direzione degli*

degli investimenti, l'orientamento dello sviluppo tecnologico e il cambiamento istituzionale sono resi coerenti con i bisogni futuri e presenti» [7, pag.15]. Questo nuovo elaborato considera il concetto di sviluppo sostenibile come un principio guida per cercare di equilibrare le varie esigenze dello sviluppo socio-economico con la protezione dell'ambiente: Si tratta di un processo volto a raggiungere obiettivi di miglioramento ambientale, sociale e istituzionale sia a livello locale che globale, con lo scopo di soddisfare i bisogni delle generazioni attuali senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri. Da ciò deriva l'importanza e la necessità di esaminare e strutturare il modello concettuale dello sviluppo sostenibile in relazione a tre pilastri distinti, come mostrato in figura n.1, noti anche come “dimensioni”: economica, ambientale e sociale, che devono essere mantenute in equilibrio e continuare ad essere riconosciute a livello internazionale come modello consolidato di sostenibilità [4].

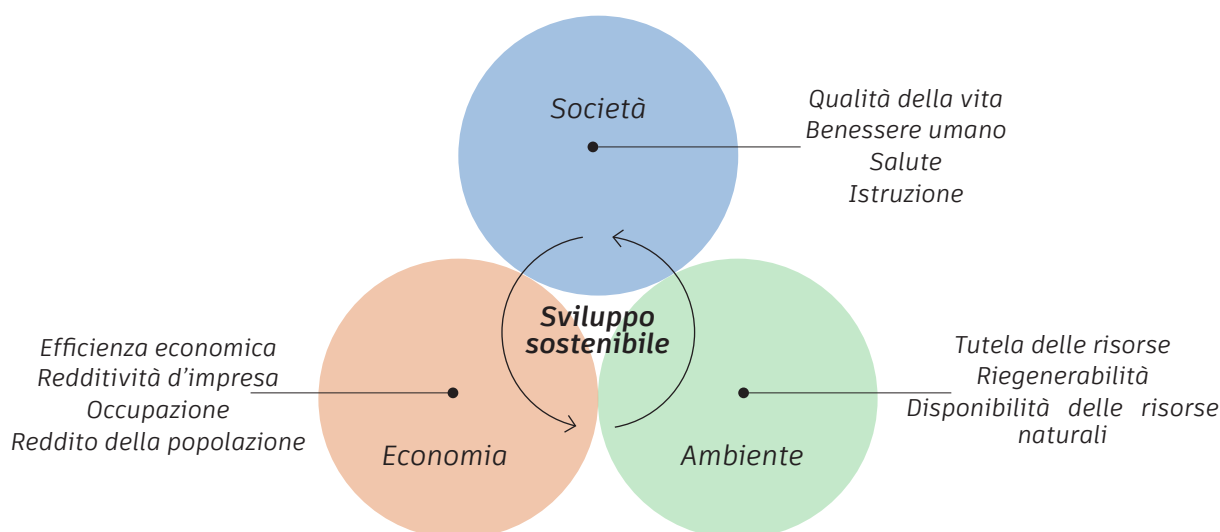


Figura 1 - Dimensioni dello sviluppo sostenibile: sociale, economica, ambientale

Ognuna di queste dimensioni è strettamente interconnessa: l'ambiente deve essere preservato per garantire la vita e la prosperità, l'economia deve essere inclusiva e supportare il benessere di tutti, la dimensione sociale punta a promuovere l'uguaglianza e la giustizia. Ciascuna delle dimensioni della sostenibilità persegue obiettivi specifici: la sostenibilità ambientale si concentra sulla capacità di preservare la qualità, la riproducibilità e la disponibilità delle risorse naturali; la sostenibilità economica, invece, ha l'obiettivo di garantire efficienza economica e reddito per le imprese, creando al contempo reddito e lavoro per sostenere la popolazione; infine, la sostenibilità sociale si focalizza sul miglioramento della qualità della vita e delle condizioni di benessere umano promuovendo sicurezza, salute, istruzione, democrazia, partecipazione e giustizia, in modo che siano distribuite equamente tra i generi e le diverse classi sociali [8].

In conclusione lo sviluppo sostenibile deve essere un obiettivo comune che mira alla crescita economica e al miglioramento della qualità della vita, senza però danneggiare l'ecosistema [9]: infatti, è evidente che non si può separare la tutela dell'ambiente dal benessere economico e dal progresso sociale. Il modello ideale da seguire è quello dell'economia circolare [10], che persegue il progresso utilizzando in modo moderato le risorse naturali, riducendo gli sprechi e rendendo i prodotti il più possibile riciclabili e riutilizzabili a fine vita. Questo approccio si contrappone al modello di economia lineare che, senza considerare i bisogni delle generazioni future, non solo sfrutta insostenibilmente le risorse e le materie prime, ma fallisce anche nel valorizzare i prodotti a fine vita [11]. Gli obiettivi principali dello sviluppo sostenibile sono la rimodulazione e la contrazione dei consumi, l'adozione di energia sostenibile da fonti rinnovabili in sostituzione dei combustibili fossili, la creazione di comunità rispettose dell'ambiente, la sensibilizzazione di ogni individuo a un consumo non eccessivo, la riduzione degli interventi artificiali e la limitazione della produzione e dell'uso di sostanze nocive per l'atmosfera [1]. Inoltre i principali ambiti in cui si discute di sostenibilità ambientale includono l'inquinamento atmosferico, spesso causato da una mobilità insostenibile o dalla produzione di energia da fonti fossili, l'urbanizzazione e la deforestazione, la perdita di biodiversità, il cambiamento climatico derivante dall'uso massiccio di risorse non rinnovabili, e la necessità di promuovere una migliore gestione delle risorse, sia rinnovabili che non rinnovabili [8].

1.1.2 I momenti chiave che hanno segnato l'evoluzione dello sviluppo sostenibile

Il concetto di sviluppo sostenibile ha conosciuto una profonda e continua evoluzione nel corso degli anni, come dimostrato dalla successione di modelli e programmi; questa trasformazione lo ha reso un elemento sempre più centrale in diversi contesti politici, economici e sociali. Successivamente al Rapporto Brundtland, citato nel capitolo precedente, è la Conferenza delle Nazioni Unite su ambiente e sviluppo (UNCED - United Nations Conference on Environment and Development), tenutasi a Rio de Janeiro nel 1992 e nota come "Summit della Terra di Rio" [12], che segna una svolta cruciale su ambiente e modelli di sviluppo sostenibile. Questa conferenza è stata la prima a livello mondiale a riunire i leader mondiali per concentrarsi esclusivamente su questioni ambientali: *«l'intento è quello di stabilire una nuova e equa cooperazione globale mediante la realizzazione di nuovi livelli di collaborazione tra Stati, settori chiave delle società e persone, operando per raggiungere accordi internazionali nel rispetto degli interessi di tutti per proteggere l'integrità del sistema ambientale e di sviluppo globale, prendendo atto della natura integrale e interdependente della Terra, nostra casa»* [12, pag.1]. Alla conferenza parteciparono 172 delegazioni governative, tra cui 108 capi di Stato e 2.400 rappresentanti di organizzazioni non governative [1].

Al termine dell'evento, sono state istituite due convenzioni e tre accordi, che non sono vincolanti a livello internazionale, ma servono come linee guida per tutti gli Stati membri. Per quanto riguarda i tre accordi si citano: la Dichiarazione di Rio su ambiente e sviluppo che definisce in 27 principi i diritti e gli impegni delle Nazioni nei riguardi dello sviluppo sostenibile; la Dichiarazione dei principi per la gestione sostenibile delle foreste, che definisce le linee guida per la gestione, la conservazione e l'uso sostenibile delle foreste; infine, la stesura dell'Agenda 21 ovvero una pianificazione delle azioni da intraprendere su scala globale, nazionale e locale [3]. Tale agenda è un programma di intenti di 40 capitoli che indica le azioni da intraprendere e da inserire in agenda nel XXI secolo con l'obiettivo di realizzare lo sviluppo sostenibile, e che inoltre sollecita esplicitamente le autorità locali a svolgere un ruolo fondamentale nella promozione dello sviluppo sostenibile [13]: *«ogni amministrazione locale dovrebbe dialogare con i cittadini, le organizzazioni locali e le imprese private e adottare una propria Agenda 21 locale. Attraverso la consultazione e la costruzione del consenso, le amministrazioni locali dovrebbero apprendere e acquisire dalla comunità locale e dal settore industriale, le informazioni necessarie per formulare le migliori strategie»* [13, pag 1]. In particolare il testo si suddivide in 4 parti: la prima, riguarda l'aspetto economico e sociale: povertà, sanità, ambiente, demografia, produzione; la seconda, è relativa alla conservazione e gestione delle risorse: atmosfera, foreste, deserti, montagne, acqua, prodotti chimici, rifiuti; la terza si propone di rafforzare il ruolo dei gruppi più rilevanti: donne, giovani, anziani, sindacati, settori produttivi, comunità scientifica; infine, la quarta si focalizza sui mezzi per attuare il programma: strumenti scientifici, formazione, informazione, cooperazione internazionale, strumenti finanziari, strumenti giuridici [7]. Il Summit di Rio è, quindi, considerato un evento di grande impatto mediatico che ha portato a scelte politiche e di sviluppo senza precedenti. In quell'occasione sono stati redatti documenti e programmi di comportamento etico-ambientale che restano ancora oggi un punto di riferimento fondamentale.

Oltre agli accordi menzionati, la Conferenza di Rio ha assunto un'importanza particolare in quanto ha portato all'istituzione della Commissione delle Nazioni Unite ONU per lo sviluppo sostenibile (UNCSD, United Nations Commission on Sustainable Development). Il ruolo di questa commissione era quello di assicurare l'attuazione dell'Agenda 21 e della Dichiarazione di Rio. Sebbene i trattati elaborati dalla UNCSD non fossero legalmente vincolanti e non imponessero limiti obbligatori alle emissioni di CO₂ ai Paesi firmatari, la questione climatica era già ritenuta un'urgenza. Pertanto, nel 1995, i Paesi aderenti alla UNFCCC (United Nation Framework Convention Climate Change) diedero inizio alle prime negoziazioni formali sul clima note come COP (Conference Of the Parties), che si svolgono annualmente. Per la stesura del primo atto con

un impegno vincolante per la riduzione delle emissioni, si dovette però attendere fino al 1997 [14]. In occasione della terza Conferenza delle Parti (COP3) della UNFCCC, venne redatto un trattato internazionale fondamentale conosciuto come il “Protocollo di Kyoto”, considerato il principale strumento giuridico internazionale per ridurre a livello mondiale le emissioni di 6 gas serra (GHG – Greenhouse Gases), riportati in figura n.2, che sono i principali responsabili del riscaldamento globale dei conseguenti cambiamenti climatici. Il Protocollo rappresenta un passo significativo nella lotta contro il riscaldamento globale, in quanto introduce precisi obiettivi vincolanti e quantificati per la limitazione e la riduzione dei gas serra. Per conseguire questi obiettivi, il Protocollo propone una serie di strategie operative e impone ai Paesi industrializzati l’obbligo di ridurre drasticamente le emissioni complessive di GHG nel periodo 2008-2012, con una diminuzione di almeno il 5% rispetto ai livelli globali del 1990, considerato come anno di riferimento [8].

Riduzione GHG ↓	CO₂	Anidride carbonica	Combustione di combustibili fossili, trasporti, produzione di energia, industria, respirazione
	CH₄	Metano	Estrazione di petrolio e gas naturale, agricoltura
	N₂O	Ossido nitroso	Fertilizzanti agricoli, processi chimici
	HFCs	Idrofluorocarburi	Refrigerazione, fabbricazione schiume isolanti
	PFCs	Idrocarburi perfluorati	Climatizzazione, refrigerazione, imballaggi alimentari
	SF₆	Esafluoro di zolfo	Apparecchiature elettriche, produzione di Al e Mg in metallurgia, fabbricazione di semiconduttori

Figura 2 - Gas serra regolamentati dal Protocollo di Kyoto e principali fonti di emissione

I piani d’azione includono, da un lato, l’ampliamento o la creazione di politiche nazionali mirate alla diminuzione delle emissioni, come l’incremento dell’efficienza energetica, la promozione dell’agricoltura sostenibile e lo sviluppo di fonti di energia rinnovabile. Dall’altro lato, si incoraggia la cooperazione tra le parti contraenti attraverso lo scambio di esperienze e informazioni, oltre al coordinamento delle politiche nazionali mediante veri e propri meccanismi di mercato basati sull’idea dei crediti di carbonio (carbon credits), quali i diritti di emissione, l’attuazione congiunta e il meccanismo di sviluppo pulito [15]. Questi strumenti rappresentano la concretizzazione sul piano economico degli impegni ambientali, ideati per raggiungere gli obiettivi di riduzione delle emissioni al costo più efficiente possibile. Nonostante fosse stato sottoscritto nel 1997, il Protocollo non entrò in vigore prima del 2005, poiché la sua attuazione era subordinata alla ratifica di almeno 55 nazioni che rappresentassero collettivamente non meno del 55% delle emissioni

globali di gas serra. La ratifica da parte della Russia nel 2004 fu determinante per il raggiungimento di questa soglia.

Al termine del periodo stabilito dal Protocollo di Kyoto per la riduzione dei gas serra, l'anno 2012, anziché registrare successi, emerse una forte preoccupazione a seguito delle conclusioni del Quarto Rapporto dell'IPCC stipulato nel 2007 [15]. Il rapporto sosteneva che l'aumento della temperatura globale fosse dovuto principalmente all'attività umana, in particolare all'uso eccessivo di combustibili fossili e alla deforestazione, con un chiaro richiamo alle attività commerciali e imprenditoriali per il loro consumo energetico. Per tale ragione, l'attenzione si è focalizzata in modo crescente sul fenomeno del riscaldamento globale [16]. Nel 2015 è stato siglato "l'Accordo di Parigi", noto come uno dei più rilevanti e recenti trattati internazionali nell'ambito della sostenibilità [17]. Tale accordo venne stipulato tra 195 stati membri della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (COP21 di Parigi) con l'obiettivo di mantenere l'aumento della temperatura media globale al di sotto di una certa soglia: *«Questo Accordo mira a rafforzare la risposta globale alla minaccia del cambiamento climatico nel contesto dello sviluppo sostenibile e degli sforzi di sradicare la povertà incluso attraverso il mantenimento dell'incremento della temperatura media globale molto sotto i 2 gradi centigradi al di sopra dei livelli preindustriali e di perseguire sforzi per limitare l'incremento della temperatura media globale a 1,5 gradi centigradi al di sopra dei livelli pre-industriali»* [17, pag.27]. Secondo il report AR6 2023 dell'IPCC, per raggiungere l'obiettivo occorre diminuire le emissioni di gas serra del 45% entro il 2030 rispetto ai dati del 2010 e del 100% entro il 2050 [16]. Inoltre, durante la COP21 ci fu una seconda importante iniziativa, ovvero quella riguardante la fondazione della Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC), nata con l'intento di catalizzare le azioni strategiche in materia di neutralità carbonica sull'ambiente edificato [16].

Infine, nel 2015, i Paesi membri delle Nazioni Unite hanno adottato l'Agenda 2030 [18], che include i 17 Sustainable Development Goals (SDGs), mostrati in tabella n.1. Questi obiettivi mirano a promuovere lo sviluppo sostenibile a livello globale entro il 2030, coinvolgendo tutte le dimensioni della sostenibilità. Gli SDGs rappresentano infatti i pilastri interconnessi, indivisibili e universali per l'attuazione dell'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile ed invitano tutti gli Stati della comunità internazionale a predisporre piani di attuazione: questi devono individuare le criticità, nonché prevedere programmi ed azioni, definiti a livello nazionale, per il raggiungimento degli obiettivi e dei target stabiliti a livello globale. Inoltre dal momento che le *«tre dimensioni dello sviluppo (economica, ambientale e sociale) sono strettamente connesse tra loro, ciascun*

Obiettivo (SDGs) non può essere considerato in maniera indipendente ma deve essere perseguito sulla base di un approccio sistemico, che tenga in considerazione le reciproche interrelazioni e non si ripercuota con effetti negativi su altre sfere dello sviluppo. Solo la crescita integrata di tutte e tre le componenti consentirà il raggiungimento dello sviluppo sostenibile» [18, pag. 12].

I Sustainable Development Goals	
1. Porre fine ad ogni forma di povertà nel mondo	10. Ridurre l'ineguaglianza all'interno di e fra le nazioni
2. Porre fine alla fame, raggiungere la sicurezza alimentare	11. Rendere le città e gli insediamenti umani inclusivi, sicuri e sostenibili
3. Assicurare la salute e il benessere per tutti e per tutte le età	12. Garantire modelli sostenibili di produzione e di consumo
4. Assicurare un'istruzione di qualità, equa ed inclusiva	13. Adottare misure urgenti per combattere il cambiamento climatico
5. Raggiungere l'uguaglianza di genere	14. Conservare gli oceani, i mari e le risorse marine
6. Garantire a tutti la disponibilità e la gestione sostenibile dell'acqua	15. Proteggere e favorire un uso sostenibile dell'ecosistema terrestre
7. Assicurare a tutti l'accesso a sistemi di energia economici e sostenibili	16. Promuovere società pacifiche e più inclusive per uno sviluppo sostenibile
8. Incentivare una crescita economica duratura, inclusiva e sostenibile	17. Rafforzare i mezzi di attuazione e rinnovare il partenariato
9. Costruire una infrastruttura resiliente e promuovere l'innovazione	

Tab. 1 - I Sustainable Development Goals, Fonte: Agenda 2030: un viaggio attraverso gli Obiettivi di sviluppo sostenibile, 2021 [18]

Attualmente, l'elemento più recente in Europa legato allo sviluppo sostenibile è il Green Deal, anche detto Patto Verde, con il quale l'Unione Europea si è prefissata l'obiettivo di diventare la prima area a impatto climatico nullo entro il 2050. Questo costituisce una parte essenziale della strategia della Commissione Europea per implementare l'Agenda 2030 e gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile delle Nazioni Unite. Tale strategia, lanciata dalla Commissione Europea nel dicembre 2019, si configura come un piano ambizioso e trasformativo volto ad affrontare la sfida del cambiamento climatico e favorire la transizione verso un'Europa sostenibile nei decenni a venire. Essa coinvolge tutti i settori dell'economia e fornisce un quadro completo per il raggiungimento di una società più verde, pulita, resiliente e a impatto climatico zero trasformando il modo in cui produciamo e consumiamo [18]. L'obiettivo principale, ovvero raggiungere la neutralità climatica entro il 2050 portando le emissioni nette di gas serra a zero, è in linea con i limiti stabiliti dagli Accordi di Parigi del 2015 che puntano a mantenere l'incremento della temperatura globale al di sotto di 1,5°C rispetto ai livelli preindustriali. Sono inoltre previsti due obiettivi climatici intermedi,

uno con scadenza nel 2030 e un altro nel 2040. Il primo di questi prevede l'impegno da parte dell'Unione Europea per il raggiungimento di una riduzione di almeno il 55% delle emissioni nette di gas serra entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990, nella prospettiva della neutralità climatica entro il 2050. Questo impegno è sostenuto dal pacchetto "Pronti per il 55%", un insieme di proposte legislative, revisioni della normativa UE esistente e nuove iniziative strategiche nei settori del clima, dell'energia e dei trasporti. Il secondo obiettivo, invece, mira a ridurre del 90% le emissioni nette di gas serra entro il 2040 rispetto ai livelli del 1990. Raggiungere questo traguardo intermedio permetterebbe all'UE di mantenere il suo impegno di conseguire la neutralità climatica entro il 2050 [16]. I passaggi fondamentali e i trattati internazionali che hanno sancito la nascita e il consolidamento del concetto di sviluppo sostenibile sono sintetizzati nella cronologia sottostante in figura n.3.

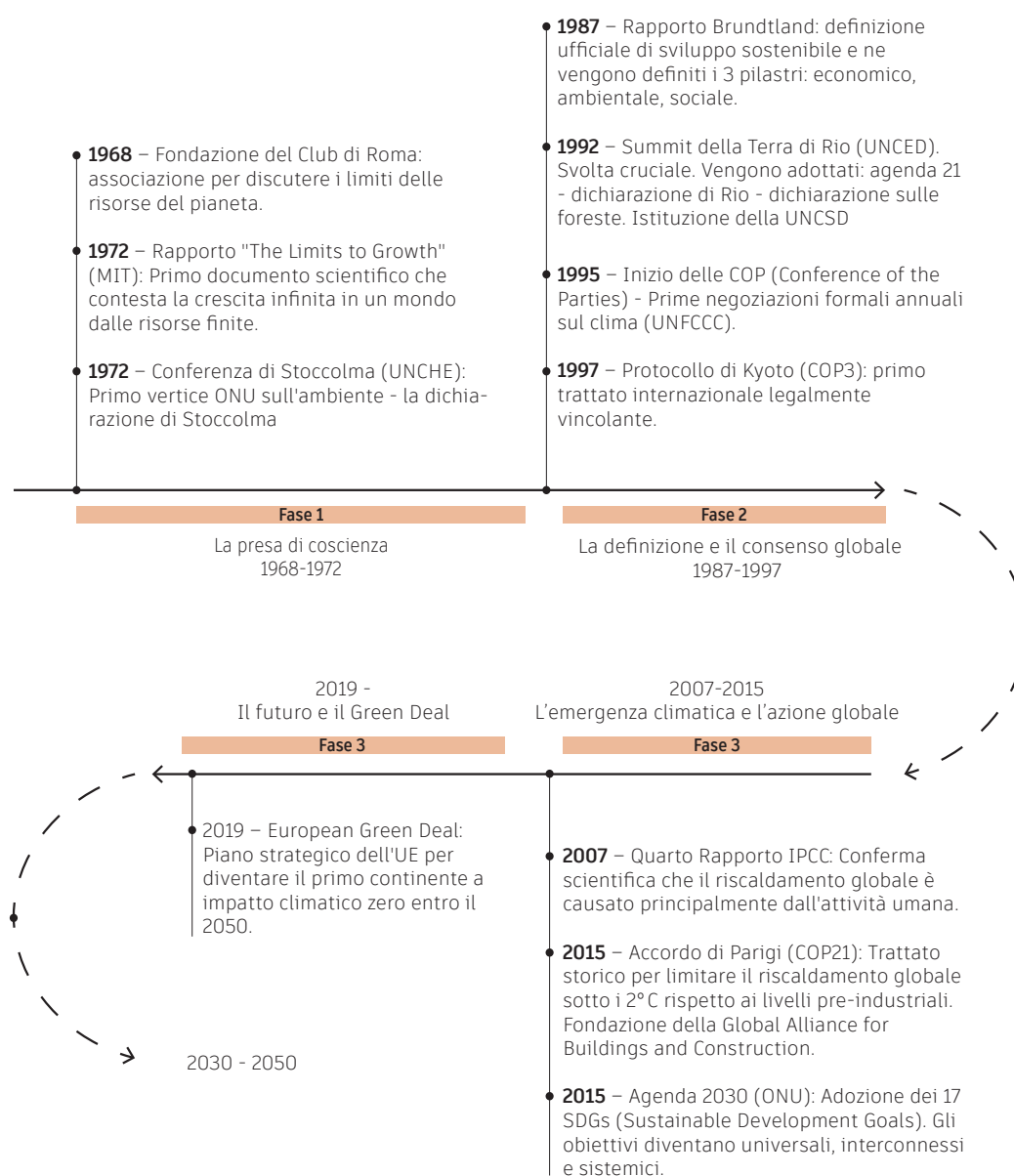


Figura 3 - Linea temporale delle tappe fondamentali dello sviluppo sostenibile

1.1.3 La sostenibilità del mondo delle costruzioni

Tenendo in considerazione quanto esposto in precedenza, la sostenibilità, nella sua triplice dimensione, sta acquisendo una rilevanza sempre più centrale nell'agenda di numerose istituzioni, nonché di governi e organismi sovranazionali, che sono sempre più consapevoli del ruolo delle imprese nella determinazione delle traiettorie di sviluppo di un territorio. Infatti, Il mondo aziendale riveste un ruolo centrale per l'adozione di comportamenti sostenibili. Le imprese, agendo come intermediari, fungono da veicoli di diffusione della sostenibilità, ponendosi come una sorta di "cuscinetto" che colma il divario tra le politiche istituzionali e il comportamento della società [11]. Per massimizzare la diffusione di una cultura della sostenibilità e incoraggiare azioni responsabili e consapevoli, è indispensabile valorizzare in maniera adeguata il potenziale ruolo delle imprese. Queste ultime dovrebbero fungere da catalizzatori per lo sviluppo sostenibile, adottando un comportamento che non solo sia efficace dal punto di vista economico-finanziario, ma che rispetti anche l'ambiente e sia socialmente responsabile. Quando si parla di sostenibilità nelle aziende, si intende un nuovo approccio all'attività imprenditoriale, dove l'obiettivo non è solo quello di massimizzare i profitti nel breve periodo, ma anche di generare valore a lungo termine, a vantaggio di tutti gli interlocutori aziendali e delle esigenze delle generazioni future: *«per essere sostenibile un'azienda deve trovare, quindi, nuovi modelli di operatività che le permettano di generare valore per i proprietari (equi risultati economici), valore per i propri interlocutori (risultati sociali in linea con le attese) e preservare il valore delle risorse naturali (impatto positivo sull'ambiente)»* [16, pag.38].

Per utilizzare il concetto di sostenibilità nel campo delle costruzioni, è necessario adottare una visione ampia. Ciò implica che, per considerare un edificio come sostenibile, le strategie di sostenibilità devono essere implementate non solo durante la costruzione, ma anche su scala locale, regionale e globale. Un edificio sostenibile deve essere analizzato e documentato in tutte le sue tre dimensioni precedentemente descritte. Questa visione è stata sostenuta da Charles Kibert già nel 1994, durante la prima conferenza internazionale sull'edilizia sostenibile a Tampa. Qui, Kibert ha introdotto la definizione di "edilizia sostenibile" [16] come *«la creazione e la gestione responsabile di un ambiente costruito sano, basato su principi ecologici ed efficienti dal punto di vista delle risorse»* [16, pag. 18]. Agire in modo sostenibile nel settore delle costruzioni implica progettare e realizzare edifici con obiettivi specifici, tra cui l'efficienza energetica, il miglioramento della salute e del comfort degli occupanti, e la valutazione dell'impatto ambientale durante l'intero ciclo di vita della costruzione, a partire dalle fasi iniziali del progetto. A differenza del passato, quando la progettazione si concentrava principalmente sui costi di costruzione, sui

tempi di realizzazione e sulla qualità dell'opera come indicatori del ritorno sull'investimento, l'approccio attuale incorpora una maggiore attenzione all'ambiente [19]. Le problematiche legate allo sfruttamento delle risorse, all'inquinamento (quali emissioni nell'aria, suolo, acqua) e al degrado degli ecosistemi sono ora elementi cruciali. A ciò si aggiunge la ricerca di un maggiore equilibrio sociale, volto a ridurre le disuguaglianze e garantire condizioni di vita dignitose per tutti. La natura multidimensionale del tema si manifesta investendo ogni fase del processo costruttivo, dalla progettazione e costruzione fino all'uso, gestione e dismissione dell'opera edilizia. Inoltre, si estende a diverse scale, che vanno dal singolo materiale all'edificio, per poi abbracciare la città, il territorio e il pianeta [3]. Questo approccio integrato implica l'analisi di svariati ambiti connessi al vivere quotidiano, come il benessere psicofisico, la produzione, il lavoro e la mobilità: *«L'approccio dell'architettura sostenibile è un approccio che pone al centro la qualità e la sostenibilità, intese come obiettivi comuni delle diverse competenze specialistiche che prendono parte al processo di progettazione e, al contempo, il fine ultimo della progettazione integrata»* [19, pag. 31]. Un edificio sostenibile, quindi, si configura come un sistema in grado di garantire il benessere dell'utente e mantenere costanti le proprie prestazioni nel tempo, caratterizzato da un ridotto consumo di energia, materiali, risorse ambientali e inquinamento. La sostenibilità di un edificio è un concetto complesso che coinvolge molteplici aspetti, tra cui l'esposizione ambientale, la selezione dei materiali da costruzione, l'efficienza energetica (inclusa l'adozione di fonti alternative), il consumo idrico, la qualità della vita degli occupanti, la durabilità del manufatto e i processi di decostruzione e di gestione del fine vita di materiali e componenti.

Il settore delle costruzioni si posiziona come un attore critico e al contempo fondamentale per il raggiungimento degli obiettivi di sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite, data la sua significativa impronta ambientale ed economica. È infatti globalmente *«responsabile del 36% delle emissioni annuali di anidride carbonica, del 40% del consumo energetico, del 50% delle estrazioni di materie prime e del 21% del consumo di acqua potabile, oltre a impiegare 18 milioni di persone»* [16, pag.29]. In questa prospettiva di edilizia sostenibile e per favorire il raggiungimento degli obiettivi correlati, in occasione della COP21 è stato indetto il primo "Building Day", una giornata dedicata al ruolo dell'edilizia nelle politiche ambientali e climatiche [20]. Nel corso dell'evento, diverse organizzazioni del settore hanno proposto e presentato obiettivi significativi, tra cui si distinguono i Green Building Council (GBC), che fanno parte del World GBC, la più grande organizzazione internazionale dedicata al mercato delle costruzioni sostenibili, e il programma ambientale delle Nazioni Unite (UNEP). Il "Building Day" ha dato l'impulso per avviare la Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC), una partnership volontaria che riunisce

governi, imprese, associazioni con l'obiettivo comune di realizzare un settore edile a zero emissioni, efficiente e resiliente. Queste organizzazioni operano attraverso piani e programmi che consentono di analizzare i livelli di sostenibilità delle entità che ne usufruiscono e di delineare percorsi per ridurre l'impatto ambientale. La proliferazione di queste organizzazioni ha favorito la diffusione di nuovi modelli aziendali e di progettazione ispirati agli obiettivi degli SDGs [21].

1.2 | STRUMENTI PER LA VALUTAZIONE DELLA SOSTENIBILITA' AMBIENTALE NEL CICLO DI VITA

1.2.1 Il pensiero Life Cycle Thinking e il concetto di economia circolare

In seguito all'analisi dell'evoluzione del concetto di sostenibilità, dalla sua prima apparizione fino all'Agenda 2030, e dopo averlo contestualizzato sia nel settore delle costruzioni che nel mondo aziendale, si rende necessario approfondire gli strumenti e i metodi esistenti per la quantificazione del livello di sostenibilità. A partire dagli anni '80, sono emersi i primi strumenti volti a conferire oggettività ai principi di sostenibilità, specialmente nel settore edile [19]. Questi strumenti si sono successivamente evoluti nei primi sistemi di valutazione e certificazione della sostenibilità degli edifici, con l'obiettivo di accrescere la trasparenza sull'uso dell'energia e gli effettivi impatti che quest'ultimi hanno sull'ambiente. Ad esempio, durante questi anni sono comparsi sul mercato vari standard per i prodotti ecologici. Questi standard, differenziati in base al tipo di prodotto o progetto, sono nati in risposta alle crescenti preoccupazioni relative alla tossicità dei prodotti e al loro impatto sulla salute umana e sulla qualità dell'aria. Da allora, numerose iniziative sono state lanciate per promuovere lo sviluppo sostenibile e limitare il consumo eccessivo di risorse. A livello globale, sono stati sviluppati numerosi schemi di certificazione per prodotti ecologici e di programmi di valutazione delle prestazioni ambientali e di sostenibilità degli edifici. Nel 1990 è stato introdotto il Building Research Establishment's Environmental Assessment Method

(BREEAM) [16], noto come il primo sistema di valutazione globale per edifici sostenibili. In seguito, lo United States Green Building Council (USGBC) ha creato il proprio sistema, il Leadership in Energy and Environmental Design (LEED), per migliorare l'efficienza ambientale delle costruzioni [3]. Nel corso del tempo, a questi due protocolli si sono affiancati numerosi altri strumenti, creando un vasto ecosistema di certificazioni ambientali volontarie.

In conclusione, la crescente consapevolezza dell'impatto ambientale, sociale ed economico del settore edile ha spinto verso l'adozione di un approccio olistico. Sebbene i sistemi di valutazione e certificazione volontaria, come BREEAM e LEED, abbiano fornito un quadro di riferimento essenziale per valutare la sostenibilità degli edifici, essi rappresentano spesso una valutazione su base parametrica, focalizzata su specifici criteri. In un contesto di sviluppo sostenibile, è fondamentale che il progresso del settore edilizio consideri anche i possibili compromessi ambientali, garantendo al contempo che gli obiettivi energetici e climatici siano compatibili con altri eventuali impatti [18].

La Commissione Europea, a partire dagli anni '90, ha affrontato l'obiettivo di definire un approccio metodologico standardizzato per permettere agli Stati membri di comunicare e confrontare le prestazioni ambientali dei prodotti. L'intento era quello di divulgare gli impatti ambientali generati durante l'intero ciclo di vita di un prodotto. In questo contesto, l'analisi del ciclo di vita (LCA, life cycle assessment) è stata identificata come lo strumento più idoneo per misurare l'impatto ambientale complessivo di un prodotto. Questo metodo si posiziona come un'evoluzione fondamentale, in quanto permette di misurare in modo rigoroso l'impatto ambientale di un prodotto, servizio o processo, dalla sua estrazione e produzione al suo smaltimento, fornendo così la base per decisioni più informate e realmente sostenibili.

Le origini del Life Cycle Thinking (LCT) risalgono alla fine degli anni '60, quando i ricercatori iniziarono a impiegare metodi scientifici per analizzare le problematiche legate al consumo di risorse e alla produzione di scarti nei processi industriali. I primi esempi pratici del LCT si collocano nei primi anni '70, grazie all'iniziativa di grandi aziende statunitensi e dell'Environmental Protection Agency (EPA), l'agenzia americana per la protezione dell'ambiente [1]. In questo periodo, si diffuse anche la consapevolezza della finitezza delle risorse naturali e dell'insostenibilità dei ritmi di sfruttamento indiscriminato che si erano instaurati. La questione divenne oggetto di studio a livello mondiale, coinvolgendo accademici e ricercatori del settore industriale, nel tentativo di trovare soluzioni a questa problematica di cruciale importanza. Di conseguenza, in tale scenario e

all'interno di questa nuova concezione di sviluppo, emerge la necessità di adottare un approccio metodologico che, per valutare la reale sostenibilità di un sistema, superasse lo studio dei singoli elementi dei processi produttivi, a favore di una logica basata sull'intero ciclo di vita [22]. Da questa esigenza ha avuto origine l'innovativa filosofia del LCT. La principale novità del pensiero consiste nel considerare un prodotto come la somma di tutte le operazioni, dei flussi di entrata e uscita di materiali ed energia associati a ogni fase del suo ciclo di vita. È definito LCT: *«l'approccio per la valutazione degli impatti che un prodotto ha nel suo intero ciclo di vita, andando a proporre come obiettivi l'ottimizzazione delle risorse, degli impatti ambientali e sociali includendo i costi di produzione»* [11, pag.99]. È fondato sul presupposto che la prestazione di un servizio implichi molteplici attività correlate fra loro, con l'obiettivo finale di minimizzare l'impatto di prodotti, processi e servizi, tenendo in considerazione ogni loro fase, non solo per ragioni ambientali ma anche per evitare sprechi e accrescere la competitività [22]. In sostanza, si tratta di un approccio che suggerisce di considerare tutti gli aspetti del ciclo di vita di un prodotto, processo o servizio prima di procedere con la sua progettazione, realizzazione e distribuzione. Inoltre, questo approccio collega gli impatti sociali e ambientali al valore economico del prodotto stesso.

Tale pensiero rappresenta un cambiamento cruciale rispetto ai tradizionali approcci di analisi della sostenibilità ambientale, i quali si concentravano sulla valutazione dei singoli componenti all'interno dei processi produttivi. Gli approcci tradizionali non consideravano la possibilità che i benefici ottenuti in una fase specifica potessero creare problemi in altre fasi del ciclo di vita del prodotto, compromettendo o addirittura aggravando l'impatto complessivo [23]. Valutare un prodotto tramite l' LCT implica, di conseguenza, un'analisi olistica dell'impatto di tutte le attività lungo la catena di valore, dalla fase di progettazione iniziale fino alla dismissione.

Il modello di economia circolare rappresenta un approccio economico sistemico per affrontare questa situazione e per implementare il pensiero LCT. Negli ultimi anni l'economia circolare sta assumendo un ruolo sempre più importante nell'orientare le strategie di sviluppo in ambito industriale a livello globale, differenziandosi dal modello tradizionale lineare, *«i futuri scenari economici stanno accentuando i limiti dell'attuale sistema economico lineare e stanno accelerando lo sviluppo di nuovi modelli economici per la sostenibilità, in particolare ambientale e sociale»* [24]. Questo modello economico si contrappone a quello lineare, in cui il ciclo del prodotto si conclude con il consumo, trasformandosi in rifiuto e obbligando la catena economica a ripetere costantemente lo stesso schema: estrazione, produzione, consumo, smaltimento. L'economia

circolare, invece, offre un insieme di strategie e pratiche concrete che consente di andare oltre ai limiti dell'economia tradizionale, permettendo di mettere in pratica il pensiero del ciclo di vita. Infatti, si fonda sulla filosofia “dalla culla alla culla”, resa popolare negli anni 2000 grazie a William McDonough, per la quale tutto il materiale coinvolto in un processo produttivo deve tornare a essere nutriente per la sfera biologica o tecnica. La sua metodologia può essere ricondotta al “paradigma delle 10 R”, un principio cardine dell'economia circolare che definisce le linee guida su “come fare” l'economia circolare, ovvero le strategie da adottare per orientare il sistema verso la circolarità: R0. Rifiutare, R1. Ripensare, R2. Ridurre, R3. Riutilizzare, R4. Riparare, R5. Rinnovare, R6. Rigenerare, R7. Riconvertire, R8. Riciclare, R9. Recuperare [16].

L'economia circolare, quindi, sostituisce l'idea di fine vita con quella di conservazione, si orienta verso l'impiego di energie rinnovabili, elimina l'uso di sostanze chimiche tossiche che ostacolano il riutilizzo e punta all'eliminazione dei rifiuti attraverso la progettazione ad alto livello di materiali, prodotti, sistemi e, all'interno di questi, di nuovi modelli di business [23].

In conclusione, l' LCT e l'economia circolare non sono da considerarsi concetti separati, in quanto rappresentano due facce di un'unica realtà: una fornisce la filosofia di pensiero necessaria per comprendere l'impatto sistemico dei prodotti, mentre l'altra offre il modello economico e operativo per tradurre tale comprensione in azioni concrete. Il LCT permette di identificare gli impatti ambientali e sociali in ogni fase del ciclo di vita, guidando le decisioni verso soluzioni più sostenibili [22]. L'economia circolare, a sua volta, implementa queste soluzioni attraverso un sistema rigenerativo e progettato per eliminare gli sprechi e massimizzare il valore delle risorse. L'interazione tra questi due approcci è cruciale per la transizione verso un futuro in cui la crescita economica è disaccoppiata dallo sfruttamento indiscriminato delle risorse, ponendo le basi per un'autentica sostenibilità a lungo termine.

1.2.2 La metodologia del Life Cycle Assessment

Uno dei modi per valutare la qualità ambientale su diverse scale dell'ambiente costruito o, più in generale, di qualsiasi prodotto, nonché uno degli strumenti operativi dell' LCT è la metodologia del Life Cycle Assessment (LCA) [11]. Essa è il riferimento per la quantificazione dettagliata e oggettiva degli impatti ambientali di un prodotto o di un edificio lungo l'intero ciclo di vita, attraverso la quantificazione dei flussi di materiali e di energia in entrata e delle emissioni inquinanti e dei rifiuti da smaltire in uscita nelle fasi di estrazione delle materie prime, trasporto, produzione, installazione, uso e gestione, dismissione e fine vita.

Tale procedura cominciò a svilupparsi durante gli anni '80 come strumento a supporto delle attività produttive, subendo successivi miglioramenti ed assumendo diverse denominazioni, quali ad esempio Life Cycle Analysis e Cradle to Grave Analysis [22]. Solo nel 1990, durante il congresso della società di tossicologia e chimica ambientale (SETAC, Society of Environmental Toxicology and Chemistry) tenutosi a Vermont in Canada, fu coniato ufficialmente il termine Life Cycle Assessment, analisi del ciclo di vita, definita come: *«un procedimento oggettivo di valutazione di carichi energetici ed ambientali relativi ad un processo o un'attività, effettuato attraverso l'identificazione dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente. La valutazione include l'intero ciclo di vita del processo o attività, comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale»* [16].

Il termine divenne di uso comune negli anni successivi alla pubblicazione delle prime linee guida nel 1993, a seguito di una serie di seminari organizzati dalla SETAC che culminarono nella redazione di un "Codice di condotta per l'LCA" [16]. Durante lo stesso congresso, del 1993, fu proposto lo schema in quattro fasi principali da seguire ciclicamente, che costituisce tuttora la struttura fondamentale di un'analisi LCA.

Da quel momento, il crescente interesse per lo strumento ha condotto a un riconoscimento e una standardizzazione a livello internazionale attraverso le prime normative ISO del 1997 successivamente aggiornate in norme UNI nel 2006. In particolare, le normative che fanno riferimento alla LCA sono la UNI EN ISO 14040:2006 e UNI EN ISO 14044:2006 [2].

In seguito, la metodologia LCA ha guadagnato sempre più attenzione a livello istituzionale. Dal 2003, l'Unione Europea ha progressivamente incentivato il suo utilizzo in maniera crescente. La Comunicazione 302 del 2003 della Commissione Europea l'ha inclusa tra i cinque principi fondamentali delle politiche integrate di prodotto (Integrated Product Policy, IPP), mirate alla riduzione degli impatti ambientali attraverso il miglioramento delle prestazioni dei prodotti e l'incremento della competitività industriale. Questo ha costituito un primo incentivo per le piccole e medie imprese a sviluppare e utilizzare prodotti e servizi a basso impatto, permettendo loro di migliorare le prestazioni ambientali ed economiche [1].

In ultimo, La Comunicazione del 2008 (European Commission, 2008) su "Produzione e consumo sostenibili" ha ribadito l'importanza di perseguire modelli di sviluppo sostenibili e ha identificato

nell’LCA uno strumento valido per favorire tale processo [16]. Nello specifico, la comunicazione riconosce il metodo LCA come un pilastro per l’analisi e la valutazione degli impatti ambientali dei prodotti, dalla fase di progettazione fino al fine vita; promuove l’uso dell’LCA per guidare le imprese verso lo sviluppo di “prodotti verdi”, ovvero beni con prestazioni ambientali migliori lungo tutto il loro ciclo di vita. Questa comunicazione mira a instaurare un circolo virtuoso: migliorare l’impatto ambientale complessivo dei prodotti lungo tutto il loro ciclo di vita, promuovere e incentivare la domanda di prodotti e tecnologie di produzione più avanzati, e aiutare i consumatori a fare scelte più consapevoli grazie a un’etichettatura più coerente e semplificata [1]. In sintesi, la Comunicazione del 2008 ha consolidato l’LCA come uno strumento operativo essenziale, non solo per la valutazione, ma anche per l’indirizzo delle politiche industriali e per la creazione di un mercato più sostenibile e competitivo a livello globale.

La metodologia LCA, dunque, prende in considerazione tutti i tipi di impatto in un quadro completo di indicatori e tutte le fasi del ciclo di vita. La valutazione, strutturata in fasi, oltre alla definizione degli obiettivi e dell’oggetto da analizzare, prevede un accurato inventario di tutti i processi del ciclo di vita del prodotto analizzato, che si traduce in un diagramma di flusso con la quantificazione di materia, acqua, energia in entrata e di rifiuti ed emissioni di sostanze in aria, acqua e suolo in uscita [25]. Questi flussi in entrata e in uscita vengono tradotti, attraverso una caratterizzazione, in impatti ambientali (riscaldamento globale, assottigliamento dello strato di ozono, ecc.) e successivamente valutati con un punteggio che indica la gravità del danno apportato alle aree di protezione o, in termini più generali, l’entità dell’impronta ambientale del prodotto (“single score”).

Condurre un’analisi LCA, delineando le prestazioni energetiche e ambientali attraverso specifici modelli operativi, significa esaminare il ciclo di vita di un prodotto o di un processo dalla sua produzione fino allo smaltimento. Questo periodo è anche comunemente chiamato, attraverso la nota locuzione, “cradle to grave” ossia “dalla culla alla tomba” [26]. Tuttavia, con sempre maggiore frequenza, la fase di smaltimento sta evolvendo verso il riciclo, che consente di trasformare i prodotti di scarto o i loro componenti in nuove materie prime. Questo processo modifica il ciclo di vita del prodotto da una traiettoria lineare a una circolare, spesso definita con l’espressione “cradle to cradle” ossia “dalla culla alla culla”. Sotto l’impulso dei principi dell’economia circolare, si sta registrando un incremento significativo nel numero di studi che applicano la valutazione del ciclo di vita per quantificare e validare i benefici ambientali derivanti dal riciclo.

Una certezza essenziale che si sta diffondendo nell’architettura e nell’edilizia è l’importanza di

divulgare la conoscenza degli impatti ambientali a lungo termine di materiali, componenti e soluzioni tecnologiche per gli edifici. Tuttavia, è ancora necessaria una campagna di sensibilizzazione per far comprendere come l'applicazione della metodologia LCA in architettura e l'uso di indicatori sintetici di impatto ambientale debbano servire a ottimizzare il ciclo di vita di un sistema come un edificio, al fine di comprendere, di volta in volta e per ogni specifico caso, su quali fasi agire per ridurre gli impatti ambientali [27].

Nell'approccio all'uso dell'LCA in architettura, una completa ottimizzazione di tutte le fasi del ciclo di vita non è facilmente raggiungibile; pertanto, è essenziale definire chiari obiettivi di ottimizzazione. Infatti, si possono esaminare solo alcuni sottoinsiemi legati ai processi di produzione, escludendo la complessità di un edificio. È quindi necessario adottare integrazioni metodologiche adeguate per valutare le prestazioni complessive di un edificio. Se le scelte di materiali e componenti vengono fatte prestando attenzione agli impatti ambientali della fase di produzione e trasporto, per migliorare la fase pre-consumo, non è scontato che ciò porti a impatti altrettanto bassi nella fase di gestione e manutenzione e a fine vita [25]. La selezione della strategia deve essere effettuata in base al contesto del progetto e al tipo di edificio, alla sua forma e funzione, nonché alla sua durata prevista. La traduzione di questi concetti in termini di metodologia LCA implica la definizione degli obiettivi e dei confini del sistema da esaminare.

Un concetto importante è che il ruolo della valutazione ambientale LCA deve continuare in parallelo con le fasi di progettazione dell'edificio e non essere solo un controllo finale, e deve essere uno strumento operativo e di supporto decisionale rispetto agli obiettivi prefissati [25]. In definitiva, l'analisi LCA si configura come un metodo sistematico e ampiamente riconosciuto per valutare gli impatti ambientali di un prodotto, un processo o un servizio lungo l'intero arco del suo ciclo di vita. Tale valutazione abbraccia ogni fase, dall'estrazione delle materie prime alla loro dismissione, offrendo una visione completa dell'impronta ecologica di un sistema. L'obiettivo principale dell'LCA è quello di facilitare un processo decisionale informato in materia di sostenibilità, fornendo una comprensione olistica degli impatti ambientali associati a un prodotto o a un sistema specifico, in linea con l'esigenza di integrare questa metodologia fin dalle prime fasi della progettazione edilizia per ottimizzare il ciclo di vita dell'edificio nel suo complesso [28].

1.2.3 I riferimenti normativi: le norme della serie ISO14040

Le norme ISO della serie 14040 sono considerate un punto di riferimento a livello internazionale per la gestione ambientale e per i sistemi di gestione ambientale nei processi produttivi. Queste norme sono state elaborate dal comitato tecnico per la gestione ambientale ISO/TC 207 con l'obiettivo di offrire una guida operativa per l'implementazione o il perfezionamento di un piano di gestione ambientale all'interno di un'organizzazione [29]. Forniscono, inoltre, strumenti affidabili per comunicare in modo trasparente le informazioni relative agli aspetti energetici e ambientali dei processi produttivi. È essenziale aderire alle norme di riferimento per garantire che l'analisi LCA effettuata sia conforme agli standard stabiliti, conferendo in tal modo affidabilità ai risultati agli occhi di terzi, come operatori esterni.

Attualmente rientrano in questa famiglia due norme principali di riferimento per uno studio LCA: ISO 14040:2006 (Principi e Struttura) e la ISO 14044:2006 (Requisiti e Linee guida), entrambe aggiornate con rispettivi emendamenti pubblicati nel 2020 [30] [31]. Esse costituiscono le principali linee guida da seguire per realizzare un'analisi del ciclo di vita per qualsiasi tipologia di prodotto. La prima norma ha un carattere più generale e descrive in modo sommario i principi, le fasi e i punti chiave di un'analisi LCA. Si tratta del documento principale della serie, in cui sono specificate la struttura di uno studio LCA, i principi e i requisiti per la sua conduzione e per la successiva diffusione dei risultati tramite un rapporto. Fornisce un quadro generale della valutazione, specificando la normativa di riferimento e le definizioni utili. La norma ISO 14044:2006, invece, è uno strumento pratico da utilizzare durante lo svolgimento dell'analisi, in quanto offre le direttive per la valutazione del ciclo di vita suddividendola in quattro fasi: definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione; analisi dell'inventario; valutazione dell'impatto ambientale e interpretazione dei risultati [32].

1.3 | LA STRUTTURA DI UNA ANALISI LCA

Secondo le definizioni fornite negli standard dell'Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione (ISO) e dalla SETAC, come riportato in figura n.4, un'LCA si articola in 4 fasi tra loro strettamente interconnesse.

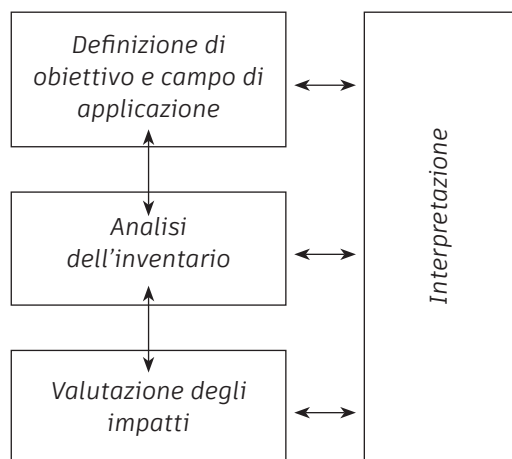


Figura 4 - Fasi della metodologia LCA

- Fase 1, definizione di obiettivo e campo di applicazione: Fase preliminare dell'analisi, in cui viene descritto il problema, vengono definiti gli obiettivi e il campo di applicazione dello studio. A questo punto vengono determinati una serie di elementi cruciali: la funzione del sistema, l'unità funzionale rispetto alla quale verranno espressi tutti i dati di input e output, e i confini del sistema.
- Fase 2, analisi dell'inventario: Lo scopo è quello di quantificare le emissioni inquinanti in aria, acqua e suolo, così come le estrazioni di materie prime rinnovabili e non rinnovabili, i consumi energetici e i rifiuti da smaltire. Individuazione dei flussi in entrata e in uscita. Risulta fondamentale distinguere tra i flussi di input e di output generici, che circolano all'interno della tecnosfera, e i flussi elementari. Questi ultimi sono cruciali per l'analisi, poiché rappresentano i flussi che attraversano il confine di sistema tra tecnosfera ed ecosfera, essendo i veri responsabili degli impatti ambientali, sia prelevando risorse dall'ambiente sia rilasciando sostanze inquinanti. Raccolta e validazione dei dati, e successiva elaborazione dei dati.
- Fase 3, valutazione degli impatti: Studio degli impatti ambientali dovuti ai flussi di materiali e di

energia inventariati. Questa fase può essere suddivisa nei seguenti passaggi: selezione categorie di impatto, classificazione, caratterizzazione (midpoint analysis). Il suo scopo è quello di valutare l'entità delle conseguenze ambientali generate a seguito dei consumi di risorse e dei rilasci inclusi nell'inventario. Tuttavia, per ottenere una visione completa degli impatti ambientali, l'analisi può estendersi a definire il “damage assessment”, valutazione dei danni, (endpoint analysis) che permette di tradurre gli indicatori intermedi in danni effettivi su tre aree specifiche: la salute umana, la qualità degli ecosistemi e la scarsità delle risorse. I risultati possono essere successivamente sottoposti a normalizzazione, per rapportare l'entità degli impatti a valori di riferimento globali o regionali, e alla fase di pesatura, che assegna un valore di importanza relativa alle diverse categorie sulla base di criteri scientifici o politici. Questo percorso metodologico culmina nella determinazione del single score, un indicatore finale che aggrega i diversi impatti in un unico punteggio numerico, facilitando il confronto diretto tra scenari alternativi e fornendo una valutazione complessiva della sostenibilità del sistema analizzato.

- Fase 4, interpretazione dei risultati: Fase conclusiva dell'analisi. I risultati finali vengono interpretati e le incertezze vengono valutate. In base agli hotspot individuati, si propongono i cambiamenti necessari a ridurre l'impatto ambientale dei processi o attività considerati.

1.3.1 Fase 1: Definizione dell'obiettivo e campo di applicazione

La prima fase è la “definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione”, “Goal and scope definition” (UNI EN ISO 14044, 2006). Il suo scopo è definire l'obiettivo e il campo di applicazione dello studio, inclusa l'identificazione delle motivazioni che ne favoriscono la realizzazione e del pubblico a cui è rivolto. Questa fase determina l'approccio da seguire per l'analisi dell'inventario e il livello di dettaglio con cui essa viene condotta [33].

Obiettivo: Tale fase consiste nello stabilire e descrivere gli obiettivi dell'analisi LCA. Nel definire l'obiettivo, o gli obiettivi, dello studio, è necessario descrivere chiaramente l'applicazione prevista, le ragioni che hanno portato alla realizzazione dello studio, il pubblico a cui sono indirizzati i risultati, e se questi risultati saranno comunicati al pubblico [34]. La definizione dell'obiettivo rappresenta una fase cruciale, poiché da essa dipende l'estensione dell'analisi. «*Il campo di applicazione, inclusi i confini del sistema e il livello di dettaglio, di un'LCA dipende dall'argomento e dall'uso previsto dello studio. La profondità e l'ampiezza dell'LCA possono differire notevolmente a seconda dell'obiettivo di una particolare analisi LCA*» [30, pag.10]. In sintesi gli obiettivi

specifici dell'analisi devono riflettere l'uso previsto dei risultati e rispondere alle motivazioni per cui viene svolta, indicando come si intende applicare i risultati dello studio e a chi verrà comunicato.

Campo di applicazione: Il campo di applicazione dovrebbe essere definito in modo sufficientemente chiaro da garantire che l'ampiezza, la profondità e il livello di dettaglio dello studio siano compatibili e sufficienti per affrontare l'obiettivo dichiarato. La norma ISO 14044:2006, nella definizione del campo di applicazione, raccomanda di considerare e descrivere con chiarezza una serie di elementi, inclusi: il sistema prodotto da studiare; le funzioni del sistema di prodotto o, nel caso di studi comparativi, dei sistemi; l'unità funzionale; il confine del sistema; le procedure di allocazione; la metodologia LCIA (Life Cycle Impact Assessment) e i tipi di impatto; i requisiti sui dati; le assunzioni; le scelte di valore e gli elementi opzionali; le limitazioni; i requisiti di qualità dei dati; il tipo di revisione critica, se presente; il tipo e il formato del report richiesto per lo studio [35]. La definizione dell'ambito, proprio come quella degli obiettivi, è influenzata dall'uso previsto dei risultati, determinando il livello di ampiezza, profondità e dettaglio richiesto, oltre al grado di affidabilità necessario. Poiché l'analisi LCA è un processo iterativo, questa fase e altri aspetti dello studio possono essere modificati in corso d'opera per aderire meglio agli obiettivi iniziali. La necessità di tali modifiche emerge con il progredire dell'analisi e la valutazione dei risultati, e può essere dovuta a limitazioni, vincoli impreveduti o alla disponibilità di nuove informazioni.

Funzione e unità funzionale: L'ambito di un'analisi LCA deve specificare chiaramente le funzioni, intese come caratteristiche prestazionali, del sistema oggetto di studio [30]. Al fine di valutare in modo obiettivo le diverse alternative, è fondamentale definire correttamente tali funzioni, garantendo che l'unità funzionale sia coerente con l'obiettivo e l'ambito dello studio. L'unità funzionale rappresenta la prestazione quantificata di un sistema di prodotto da utilizzare come unità di riferimento. Uno dei principali obiettivi di un'unità funzionale è quello di offrire un punto di riferimento rispetto al quale i dati in ingresso (input) e in uscita (output) siano normalizzati. Per questo motivo, è essenziale che essa sia definita in modo chiaro e misurabile [36]. Una volta stabilita l'unità funzionale, deve essere definito il flusso di riferimento, ovvero la quantità di prodotto necessaria per soddisfare la funzione individuata [30].

Confine del sistema: Il confine del sistema determina quali processi unitari devono essere considerati nell'LCA. Questa definizione del limite del sistema deve essere coerente con l'obiettivo dello studio, e i criteri utilizzati per stabilire il confine del sistema devono essere identificati e

spiegati [37]. Occorre stabilire quali processi unitari includere nello studio e il livello di dettaglio con cui essi devono essere esaminati. L'esclusione di fasi del ciclo di vita, processi, input o output è permessa solo se non modifica in modo sostanziale le conclusioni generali dello studio. Stabilire i confini del sistema è fondamentale per decidere quali processi verranno considerati nell'analisi e quali verranno esclusi. Questo passaggio è cruciale e deve necessariamente precedere la creazione del diagramma di flusso del ciclo produttivo, seguito dalla raccolta dei dati necessari per sviluppare un inventario accurato [37]. In conformità con le direttive della norma UNI EN ISO 14040: «I modelli utilizzati, dovrebbero essere descritti e le ipotesi che sottintendono alle scelte effettuate dovrebbero essere identificate. I criteri di esclusione utilizzati nello studio dovrebbero essere compresi e descritti con chiarezza. I criteri utilizzati per definire il confine del sistema sono importanti per il grado di fiducia nei risultati di uno studio e la possibilità di raggiungere l'obiettivo» [30, pag.10]. A questo proposito, è utile chiarire le diverse tipologie di confini, riportate in figura n.5, che possono essere adottate:

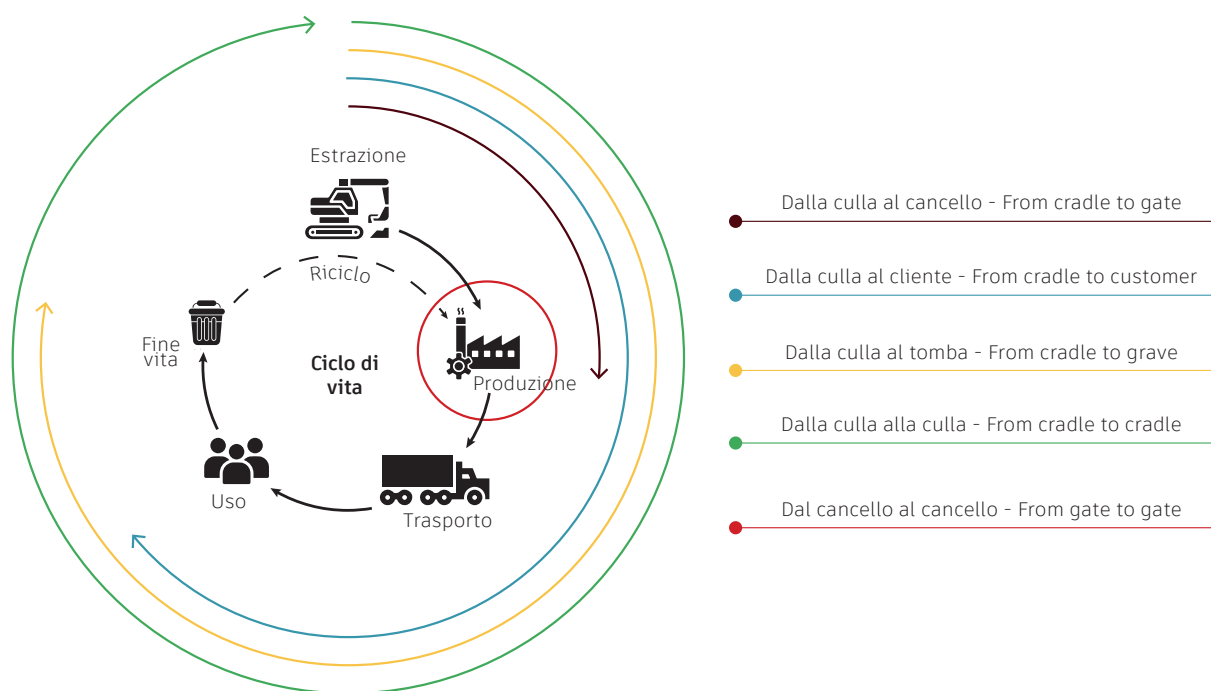


Figura 5 - Confini di sistema di una analisi LCA

1. “Dalla culla al cancello” - “From cradle to gate”: Questa tipologia di confine prende in considerazione i processi che vanno dall'estrazione delle materie prime fino alla lavorazione e produzione del prodotto finito. Questa metodologia viene impiegata quando si desidera esaminare, ad esempio, i diversi impatti che derivano dall'uso di materie prime differenti impiegate per la produzione dello stesso prodotto, escludendo quindi i processi di distribuzione, utilizzo, smaltimento e fine vita [38].

2. “Dalla culla al cliente” - “From cradle to customer”: Il confine include tutti i processi che vanno dall'estrazione delle materie prime fino al momento in cui il prodotto viene consegnato al cliente finale [39]. Un'analisi che considera gli impatti ambientali dall'estrazione delle materie prime, passando per la produzione e la distribuzione fino alla fase di utilizzo del prodotto (inclusa), escludendo la fase di fine vita.

3. “Dalla culla alla tomba” - “From cradle to grave”: Valuta l'intero impatto ambientale di un prodotto o servizio, dall'estrazione delle materie prime fino alla sua dismissione finale, copre le fasi del ciclo di vita in un'ottica lineare [38].

4. “Dalla culla alla culla” - “From cradle to cradle”: Confine di sistema che si riferisce a un'analisi che si focalizza su un modello di economia circolare. Tale approccio esamina tutti i processi facenti parte del ciclo di vita del prodotto oggetto di studio, dall'estrazione delle materie prime utilizzate per la sua produzione fino al suo smaltimento e fine vita [36]. Infatti, in questo confine, il ciclo di vita di un prodotto non termina con la fase di smaltimento, ma con il suo riutilizzo o riciclo completo per creare e mettere in circolo un nuovo prodotto, eliminando in questo modo il concetto di rifiuto.

5. “Dal cancello al cancello” - “From gate to gate”: Con questo confine, si considerano esclusivamente i processi che si svolgono all'interno dell'azienda, ovvero la fase produttiva [34]. Rimangono quindi esclusi i processi a monte, come l'estrazione delle materie prime e la produzione dei materiali, e quelli a valle, quali la distribuzione, lo smaltimento e il fine vita del prodotto.

Oltre ai confini fisici precedentemente menzionati, per ogni sistema è necessario definire i confini temporali e geografici, oltre che il livello tecnologico di riferimento. I confini temporali individuano l'intervallo di tempo entro il quale i potenziali impatti del prodotto o servizio vengono valutati. Poiché alcuni parametri del sistema possono evolvere nel tempo, è fondamentale mediarli in un intervallo temporale definito [40]. I confini geografici, invece, sono essenziali poiché l'assunzione di contesti geografici differenti può portare a risultati notevolmente diversi. Questo accade perché i dati utilizzati per i vari processi, come quelli relativi all'approvvigionamento energetico, cambiano in base al contesto nazionale [40]. Infine, è cruciale specificare anche il livello tecnologico di riferimento assunto per l'analisi, a ulteriore supporto della validità e della coerenza dello studio.

1.3.2 Fase 2: Analisi dell'inventario

La definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione di uno studio fornisce il punto di partenza per l'analisi dell'inventario (LCI, Life Cycle Inventory) del ciclo di vita. L'analisi dell'inventario rappresenta una fase cruciale e, al contempo, uno dei processi che richiede il maggiore impiego di tempo e risorse. In questa fase, infatti, si procede alla raccolta dei dati di processo, che sono fondamentali per l'intera analisi. Attraverso questi dati, viene realizzato un modello della realtà in grado di rappresentare in maniera quanto più fedele possibile tutti gli scambi tra il sistema in esame e l'ambiente [34].

L' LCI prevede la raccolta di dati e lo svolgimento di calcoli, ove richiesti, per quantificare gli input e gli output di ogni processo del sistema relativamente al confine di sistema adottato [38]. Gli input possono includere l'energia, l'acqua e le risorse naturali, mentre gli output possono includere le emissioni e i rifiuti.

Inoltre, la raccolta di dati è un procedimento iterativo in quanto, man mano che si procede con l'acquisizione delle informazioni, si va ad ampliare la comprensione del sistema, il che potrebbe richiedere l'identificazione di nuovi requisiti o restrizioni sui dati stessi, influenzando in questo modo le procedure di raccolta [32]. Il processo di raccolta dei dati per l'analisi dell'inventario si articola in diverse fasi, alcune delle quali, sono descritte nello standard internazionale ISO 14044:2006. Queste includono: la rappresentazione dei passaggi per la produzione e l'utilizzo di un prodotto tramite diagrammi di flusso, che coprono sia i processi diretti che indiretti; la raccolta dei dati; il calcolo e la verifica dei dati; e l'allocazione dei flussi e dei rilasci [30].

Realizzazione diagramma di flusso del processo: Prima di avviare la raccolta dei dati, si suddivide il processo in varie sotto-fasi attraverso la stesura di un diagramma di flusso. Tale diagramma rappresenta graficamente e in modo qualitativo tutte le fasi e i processi relativi al ciclo di vita del sistema [34]. Questo strumento si rivela particolarmente utile per descrivere il sistema, poiché illustra i processi unitari e le loro interrelazioni.

Raccolta dei dati: Secondo la norma UNI EN ISO 14044:2006 «I dati qualitativi e quantitativi da includere nell'inventario devono essere raccolti per ogni processo unitario che è incluso all'interno all'interno del confine del sistema. I dati raccolti, siano essi misurati, calcolati o stimati, sono utilizzati per quantificare gli input e gli output di un processo unitario» [30, pag.26]. I dati relativi a ciascun processo unitario all'interno dei confini del sistema possono essere suddivisi

in quattro categorie principali: input di energia, input di materie prime, input ausiliari, altri input fisici; prodotti, coprodotti e rifiuti; emissioni in aria, scarichi in acqua e suolo; infine, altri aspetti ambientali. All'interno di queste categorie, i dati individuali devono essere ulteriormente specificati per raggiungere l'obiettivo dello studio. Inoltre, i dati utilizzabili nella fase di inventario possono essere di tre tipi, a seconda della loro origine [41]. I dati primari sono raccolti direttamente sul campo e riguardano il processo produttivo specifico. I dati secondari si trovano all'interno dei database commerciali di LCA, pubblicazioni scientifiche, brevetti e schede tecniche di prodotto. I dati terziari ricadono in stime, assunzioni e valori generici (medie di categoria).

Calcolo e validazione dei dati: Questa è la fase in cui i dati sull'impatto ambientale vengono elaborati e associati all'unità funzionale del prodotto. Durante questo passaggio, utilizzando il diagramma di flusso, si collegano i flussi di tutti i processi unitari al flusso di riferimento. I calcoli dovrebbero consentire di collegare tutti i dati relativi agli elementi in entrata e in uscita dal sistema all'unità funzionale. Questo processo deve essere applicato a tutte le sostanze coinvolte in ciascun processo.

Allocazione dei flussi e dei rilasci: L'ultima fase dell'analisi di inventario è il processo di allocazione, che implica la distribuzione dei flussi in entrata e in uscita tra i vari prodotti del processo. Questa fase è necessaria solo in caso di multifunzionalità, ovvero quando un processo analizzato produce diversi prodotti e sottoprodotti come output [33]. In questi casi, la prima soluzione suggerita dalla ISO è affrontare la multifunzionalità valutando se sia possibile assegnare direttamente i flussi di input e output ai singoli prodotti oppure espandere i confini del sistema per includere i processi associati ai coprodotti. Qualora non sia possibile evitare l'allocazione, diventa indispensabile ripartire i flussi di materie prime ed energia in base a due criteri principali. Il primo criterio si fonda sulle relazioni di carattere fisico, attraverso cui la ripartizione viene eseguita considerando le proprietà fisiche dei prodotti e dei coprodotti, come ad esempio la loro massa o il contenuto energetico. Un altro approccio si basa sul valore economico, nel quale la ripartizione è proporzionale al prezzo dei prodotti, attribuendo gli impatti maggiori al prodotto con il valore più elevato [33].

1.3.3 Fase 3: Valutazione dell'impatto del ciclo di vita

La terza fase di uno studio LCA, nota come Valutazione degli Impatti del Ciclo di Vita (LCIA, Life Cycle Impact Assessment), ha l'obiettivo di tradurre i dati raccolti nella fase LCI in indicatori numerici specifici.

Questi indicatori possono essere modellati a due diversi livelli lungo la catena causa-effetto: il livello Midpoint e il livello Endpoint. I primi analizzano l'impatto in fasi intermedie (riscaldamento globale, il consumo di risorse, l'acidificazione ecc.), impact assessment, offrendo una maggiore precisione scientifica e minore incertezza. Gli indicatori di Endpoint, invece, modellano l'effetto finale del danno su tre specifiche categorie, damage assessment, quali: la salute umana, la qualità degli ecosistemi e la scarsità delle risorse [35]. Secondo la ISO 14044:2006 la fase di valutazione degli impatti è composta da cinque fasi, di cui le prime tre obbligatorie e le ultime due facoltative: selezione delle categorie di impatto; classificazione degli impatti; caratterizzazione; normalizzazione; attribuzione dei pesi.

MIDPOINT ANALYSIS

Selezione delle categorie di impatto: La prima fase della valutazione degli impatti prevede la selezione delle categorie di impatto da analizzare. Tra le più comuni si annoverano il riscaldamento globale, l'acidificazione, l'eutrofizzazione, l'assottigliamento dello strato di ozono stratosferico, il consumo di risorse non rinnovabili e la tossicità [40]. È fondamentale che la scelta di tali categorie sia coerente con gli obiettivi dello studio e che le categorie selezionate siano pertinenti per il prodotto analizzato.

Classificazione degli impatti: In questa fase, i flussi elementari individuati nella fase di inventario, vengono assegnati alle diverse categorie di impatto ambientale a cui contribuiscono [39]. Al termine di questa fase, ogni categoria di impatto ambientale conterrà tutti gli input e gli output del ciclo di vita che influenzano la specifica problematica ambientale.

Caratterizzazione: La fase di caratterizzazione comporta il calcolo dei risultati degli indicatori di categoria: *«Il calcolo dei risultati dell'indicatore (caratterizzazione) implica la conversione dei risultati LCI in unità comuni e l'aggregazione dei risultati convertiti all'interno della stessa categoria di impatto. Questa conversione utilizza i fattori di caratterizzazione. Il risultato del calcolo è un risultato numerico dell'indicatore»* [30, pag. 32]. In questa fase, si transita da un

approccio qualitativo a uno quantitativo, poiché ogni sostanza contribuisce in modo differente sul medesimo problema ambientale.

ENDPOINT ANALYSIS

Normalizzazione e attribuzione dei pesi: Le fasi di normalizzazione e attribuzione dei pesi rappresentano fasi facoltative della valutazione degli impatti, possono essere applicate in accordo con l'obiettivo e il campo di applicazione dello studio LCA. La normalizzazione è il processo di calcolo della grandezza dei risultati degli indicatori di categoria in relazione a informazioni di riferimento. Il suo scopo principale è quello di facilitare la comprensione della grandezza relativa per ogni risultato dell'indicatore del sistema di prodotto in studio. Questo elemento, sebbene facoltativo, si rivela utile per diverse finalità, tra cui la verifica di eventuali incongruenze, la comunicazione della rilevanza dei risultati e la preparazione per ulteriori procedure, come il raggruppamento e la ponderazione. In concreto, *«la normalizzazione avviene trasformando un risultato dell'indicatore attraverso la divisione per un valore di riferimento selezionato»* [30, pag. 33]. La ponderazione consiste nel ricondurre i risultati degli indicatori delle varie categorie di impatto in una scala comune, utilizzando fattori numerici basati su scelte di valore. Questo processo consente di combinare i risultati in un unico punteggio sintetico (single score), agevolando il confronto diretto tra categorie di impatto diverse [40].

1.3.4 Fase 4: Interpretazione del ciclo di vita

Lo scopo della fase di interpretazione è identificare le fasi del ciclo di vita in cui l'intervento può ridurre sostanzialmente gli impatti ambientali del sistema o del prodotto, oltre ad analizzare le incertezze coinvolte. Questa fase dell'LCA consente quindi all'analista di valutare i risultati, trarre conclusioni, spiegare le limitazioni dello studio e formulare raccomandazioni, il tutto basato sui risultati delle precedenti fasi di inventario e di valutazione dell'impatto [39]. Per raggiungere questi obiettivi, la fase di interpretazione implica l'identificazione dei punti critici nel ciclo di vita, ad esempio dove si verifica la maggior parte dell'impatto, e la valutazione della qualità e della robustezza dei risultati utilizzando una serie di controlli: controllo di completezza, controllo di sensibilità e controllo di coerenza.

Identificazione delle problematiche significative: L'obiettivo di questo passo è quello di analizzare i risultati delle fasi precedenti, inventario del ciclo di vita e valutazione dell'impatto del ciclo di

di vita, per determinare le problematiche maggiormente rilevanti dal punto di vista ambientale, in conformità con l'obiettivo dello studio e con il campo di applicazione [41].

I problemi significativi possono derivare da scelte metodologiche e ipotesi, da un inventario di dati errato o incompleto per processi cruciali del ciclo di vita e/o dai fattori di caratterizzazione, normalizzazione o ponderazione impiegati nella valutazione degli impatti.

Valutazione: Questa fase ha un duplice scopo: da un lato, stabilire e rafforzare l'affidabilità e la robustezza dei risultati ottenuti e, dall'altro, fornire una base solida per la formulazione delle conclusioni e delle raccomandazioni finali dello studio. Tale processo mira a determinare la stabilità e la consistenza dei risultati, ponendo particolare attenzione ai problemi cruciali individuati nella fase precedente [38].

Controllo di completezza, sensibilità e coerenza: Una delle prime azioni consiste nel verificare che tutte le informazioni e i dati rilevanti necessari per l'interpretazione siano completi e disponibili [31]. Se si riscontrano lacune informative ritenute essenziali per individuare le questioni significative, è necessario riconsiderare le fasi precedenti (LCI o LCIA) oppure, in alternativa, ricalibrare l'obiettivo e il campo di applicazione dello studio. Successivamente, il controllo di sensibilità ha lo scopo di valutare l'affidabilità delle conclusioni finali. Questo si realizza determinando quanto i risultati siano influenzati dalle incertezze dei dati, dai metodi di allocazione e dal calcolo degli indicatori di impatto. Tale verifica deve integrare i risultati delle analisi di sensibilità e incertezza già condotte nelle fasi precedenti, offrendo una visione chiara di come le variazioni possano influire sull'esito dello studio [41]. Infine, il controllo di coerenza è fondamentale per accertare che le assunzioni, i metodi e i dati utilizzati siano uniformi e conformi all'obiettivo e al campo di applicazione dello studio. A tal fine, è essenziale porsi domande specifiche: *«le differenze nella qualità dei dati tra le diverse fasi del ciclo di vita o tra sistemi di prodotto sono coerenti con lo scopo dell'analisi? Le differenze regionali o temporali sono state applicate in modo uniforme? Le regole di allocazione e i confini del sistema sono stati mantenuti coerenti per tutti i sistemi di prodotto in esame?»* [30, pag. 38].

Conclusioni, limitazioni e raccomandazioni: Basandosi sui risultati principali delle fasi precedenti, l'ultima componente dell'LCA ha il compito di trarre conclusioni, identificare i limiti dello studio e sviluppare raccomandazioni pertinenti per il pubblico di riferimento. Le conclusioni devono garantire coerenza e essere supportate da tutte le fasi di analisi [37]. Si verifica quindi se sono

conformi ai requisiti della definizione dello scopo dello studio. Le raccomandazioni, al contrario, devono essere fondate sulle conclusioni definitive dello studio e devono rappresentare una conseguenza logica e ragionevole di tali conclusioni.

1.4 | *CRITICITA' E POTENZIALITÀ DI UNA ANALISI LCA*

Dopo aver esaminato la metodologia del ciclo di vita e la sua struttura, è essenziale delineare i vantaggi e gli svantaggi che ne influenzano l'applicazione pratica. Come strumento di valutazione, l'LCA offre una prospettiva complessiva e approfondita degli impatti ambientali di un prodotto, processo o servizio, lungo l'intero ciclo di vita, garantendo una visione estesa degli effetti ambientali e fornendo dati oggettivi e quantificabili. Questo approccio globale permette di individuare i punti critici, promuovere miglioramenti e sostenere decisioni consapevoli da parte di progettisti e aziende, specialmente nella scelta di materiali e tecnologie. L'LCA si configura quindi come uno strumento indispensabile per l'ecodesign e la transizione verso l'economia circolare. Pur essendo efficace, l'applicazione pratica dell'analisi comporta diverse difficoltà. La sua messa in opera può richiedere tempo e risorse considerevoli, e la necessità di ricorrere a numerose assunzioni metodologiche può limitare la comparabilità tra studi diversi [37]. Inoltre, la valutazione si concentra unicamente su effetti potenziali e non può essere verificata sperimentalmente. È pertanto fondamentale analizzare in dettaglio queste criticità e opportunità, riportate rispettivamente in tabella n.2 e in tabella n.3, per una comprensione completa e consapevole dello strumento.

Tab. 2. - Potenzialità della metodologia LCA

POTENZIALITÀ	1. VISIONE OLISTICA E COMPLETA Fornisce una visione complessiva e approfondita degli effetti ambientali lungo l'intero ciclo di vita di un prodotto, processo o servizio, includendo tutte le fasi, dalla produzione fino allo smaltimento o al riciclo, in un contesto di economia circolare [35], e tenendo conto simultaneamente di molteplici indicatori, così da ridurre il rischio di burden-shifting.
	2. STRUMENTO DECISIONALE Fornisce dati oggettivi e quantificabili che supportano scelte informate per il miglioramento dei processi produttivi e dei prodotti, con l'obiettivo di raggiungere la performance ottimale [36].
	3. IDENTIFICAZIONE DI OPPORTUNITÀ Consente di individuare debolezze, punti critici e possibilità di miglioramento lungo la catena di valutazione del prodotto [35].
	4. QUANTIFICAZIONE E COMPARABILITÀ Gli indicatori analizzati permettono una quantificazione degli impatti ambientali, consentendo la comparazione tra soluzioni equivalenti, diverse ipotesi progettuali o materiali [38].
	5. INTEGRAZIONE CON ALTRI STRUMENTI La possibilità di combinare l'LCA con l'analisi dei costi del ciclo di vita (LCC) e degli impatti sociali (S- LCA) permette la realizzazione di uno studio completo sulla sostenibilità [36].

Tab. 3. - Criticità della metodologia LCA

CRITICITÀ	1. COMPLESSITÀ E COSTI L'implementazione è un processo che richiede tempo e risorse, a seconda dei confini del sistema, del numero di processi e dell'intensità della raccolta dati. Questo include il reperimento di dati di input e output e, ove questi non fossero disponibili, l'accesso al database che forniscano dati di archivio [37].
	2. NATURA DEGLI EFFETTI La LCA valuta impatti potenziali, basati su dati stimati, anziché effetti reali misurati sul campo
	3. LIMITI METODOLOGICI Limiti che derivano dalle semplificazioni necessarie per modellare processi complessi [37].
	4. QUALITÀ DEI DATI La mancanza, o la non reperibilità, di database specifici (come nel contesto italiano) e l'uso di dati medi di settore possono ridurre la precisione dei dati [38].
	5. SOGGETTIVITÀ I risultati sono condizionati dalle assunzioni e dalle scelte metodologiche adottate. Tuttavia, questo grado di soggettività varia a seconda del livello di analisi: mentre la midpoint analysis si basa su modelli scientifici più oggettivi e consolidati legati ai fenomeni fisici, la endpoint analysis introduce un livello maggiore di incertezza e discrezionalità [36].
	6. LIMITAZIONI NELL'AMBITO L'analisi, limitandosi alla dimensione ambientale (Environmental LCA), esclude gli aspetti economici e sociali necessari per una valutazione integrata della sostenibilità; quest'ultima richiederebbe infatti l'impiego di strumenti complementari quali la Life Cycle Costing (LCC) e la Social LCA (S-LCA).

Capitolo II – Strategie di decarbonizzazione nell'industria del cemento: valorizzazione delle scorie EAF tramite mineralizzazione e possibile riuso come materiale cementizio supplementare

2.1 | STRATEGIE DI DECARBONIZZAZIONE NELL'INDUSTRIA DEL CEMENTO

La filiera del cemento rappresenta un pilastro fondamentale dell'edilizia moderna, con livelli di produzione in costante aumento per rispondere al fabbisogno mondiale di infrastrutture e complessi abitativi [42]. Tuttavia, se da una parte questo sistema industriale garantisce la produzione del principale materiale da costruzione, dall'altra rappresenta anche una rilevante fonte di emissioni di GHG. Secondo le analisi della Commissione Europea, infatti, il settore delle costruzioni globalmente è il maggiore produttore di gas serra, responsabile di circa il 37% delle emissioni globali [43], all'interno del quale la sola produzione di cemento contribuisce per il 5 % delle emissioni totali di CO₂ [44]. Di conseguenza il settore oggi è al centro di una crescente attenzione normativa e mediatica. Il quadro legislativo europeo è in continua evoluzione: nel luglio 2025, la Commissione Europea ha proposto di integrare la legge europea sul clima (regolamento UE 2021/1119) con un nuovo obiettivo vincolante per il 2040, che prevede una riduzione del 90% delle emissioni di gas serra nette a livello comunitario rispetto ai livelli del 1990 [43]. Questo valore definisce la traiettoria per l'intera economia europea, imponendo ai settori ad alta intensità energetica e con emissioni di GHG difficili da abbattere, come quello del cemento, un'accelerazione verso soluzioni tecnologiche avanzate. Tale tappa intermedia, tra l'obiettivo del -55% entro il 2030 e la neutralità nel 2050, delinea una tabella di marcia accelerata verso la transizione verde del settore.

Per far fronte al forte impatto sul cambiamento climatico e alla domanda incessante del materiale da costruzione più diffuso al mondo [44], l'industria del cemento è attualmente impegnata nella trasformazione più significativa della sua storia. I principali produttori mondiali di cemento, guidati da organizzazioni come la GCCA (Global Cement and Concrete Association) e Cembureau (European Cement Association), hanno infatti sottoscritto l'impegno per un futuro a “zero emissioni nette” (net zero emission) entro il 2050, promuovendo l'adozione di sistemi di decarbonizzazione del settore [45]. Tale percorso di decarbonizzazione si articola su diverse leve strategiche, descritte

in una specifica Roadmap [46], che intervengono lungo l'intera catena di produzione. Tra le soluzioni più immediate, la Roadmap evidenzia la progressiva riduzione del contenuto di clinker nel cemento attraverso l'uso di materiali cementizi supplementari (supplementary cementitious materials, SCM) [44] e il potenziamento del co-processing, che prevede la sostituzione dei combustibili fossili con combustibili alternativi derivati da rifiuti non riciclabili o biomasse [46] in modo tale da raggiungere un tasso di sostituzione calorica dei combustibili fossili del 47% entro il 2030, per poi salire all'80% entro il 2050 [43]. Secondo le proiezioni di Cembureau, l'insieme delle azioni relative alla ricerca di materiali di sostituzione del clinker, l'impiego di materie prime già decarbonatate e lo sviluppo di nuovi leganti a basse emissioni di CO₂ rappresenteranno circa il 15% della riduzione totale di CO₂ necessaria per la neutralità carbonica prevista per il 2050 [42]. Parallelamente, per abbattere le emissioni di CO₂ residue definite "difficili da abbattere" (hard-to-abate) [45], l'industria punta in modo decisivo sulle tecnologie di cattura, utilizzo e stoccaggio del carbonio (Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS) [46]. In particolare, i sistemi di cattura e utilizzo (Carbon Capture and Utilization, CCU) permettono di intercettare la CO₂ dai gas di scarico, per trasformarla in una nuova risorsa, attraverso due processi: la conversione della CO₂ e la carbonatazione minerale. Con la prima è possibile produrre combustibili e prodotti rinnovabili attraverso il riciclo di carbonio, mentre la carbonatazione minerale consente di catturare la CO₂ all'interno di materiali, in particolare per il settore dell'edilizia, garantendo uno stoccaggio permanente sotto forma di carbonato di calcio [42]. Tuttavia, per il raggiungimento degli obiettivi di neutralità, risulta altrettanto fondamentale il ricorso alla cattura e stoccaggio (Carbon Capture and Storage, CCS), che prevede lo stoccaggio permanente della CO₂ in siti geologici sicuri.

In conclusione, la sfida della decarbonizzazione del settore risiede nella natura stessa del suo ciclo industriale. La maggior parte delle emissioni di CO₂, infatti, deriva dalle reazioni chimiche intrinseche e indispensabili per la produzione del clinker, il costituente base del cemento portland. Poiché circa il 60-70% delle emissioni dirette è generato dal fenomeno della calcinazione del calcare [43], tale quota risulta 'incomprimibile' attraverso la sola ottimizzazione energetica. Questa consapevolezza rende il ricorso alle tecnologie di CCU una necessità cruciale per il settore.

2.1.2 Emissioni nella produzione di cemento – il clinker

Il cemento è definito, dalla normativa europea UNI EN 197-1 come: *«un legante idraulico, cioè un materiale inorganico finemente macinato che, quando viene mescolato con acqua, forma una*

pasta che si fissa e indurisce per mezzo di reazioni e processi di idratazione e che, dopo l'indurimento, mantiene la sua resistenza e stabilità anche sotto l'acqua» [47 pag.19]. A livello nazionale, secondo i dati del 2024, la sua produzione si attesta intorno ai 18 milioni di tonnellate annue [43], mentre a livello globale il GCCA la stima a volumi superiori ai 4 miliardi di tonnellate [45]. In questo scenario, il riferimento industriale predominante è il cemento Portland tradizionale (CEM I), composto per almeno il 95% da clinker e gesso, e solitamente impiegato per le classi di resistenza più elevate, come la classe 52,5 MPa [49]. Il cemento Portland è il tipo di cemento più comune, costituendo di gran lunga la maggior parte della produzione globale di cemento annuale, stimata a 1,7 miliardi di tonnellate all'anno secondo dati del 2014 [47]. Tuttavia, per limitare l'impronta carbonica, la normativa ha introdotto i cementi di tipo II, CEM II, definiti come cemento Portland composito. Oltre al clinker, che varia dal 65 al 94% nella composizione, questi materiali includono principalmente loppe granulate d'altoforno, microsilice, pozzolane, ceneri volanti, scisti calcinati e calcare [50]. Le loro proprietà sono molto simili a quelle dei CEM I, rendendoli adatti per i più comuni usi nella produzione di calcestruzzi armati normali e precompressi, così come di elementi prefabbricati.

In conformità alla norma UNI EN 197-1, i cementi comuni vengono classificati non solo in base alla loro composizione chimica, ma anche in funzione delle loro prestazioni meccaniche. La classe di resistenza di un cemento è determinata principalmente dalla finezza di macinazione e dal rapporto tra silicato tricalcico e bicalcico [52]: una maggiore finezza accelera l'idratazione e ne aumenta il grado, permettendo il raggiungimento di valori di resistenza meccanica più elevati, ed in tempi minori [52]. Per ogni tipologia di cemento, dai CEM I ai CEM V, la norma definisce tre classi di resistenza normalizzata espresse in MPa: 32,5 – 42,5 – 52,5. Questi valori rappresentano la resistenza a compressione che provini prismatici standardizzati, da normativa, devono raggiungere dopo 28 giorni di stagionatura [53]. All'interno di queste categorie, le classi sono ulteriormente differenziate in base alla rapidità di indurimento iniziale (resistenza iniziale), valutata a 2 o 7 giorni: la classe N (normale) indica una resistenza iniziale standard, la classe R (rapido) identifica cementi a rapido indurimento. Di seguito si riporta la tabella n.4 di sintesi delle classi di resistenza a compressione (MPa) prevista dalla normativa:

Tab. 4. - Normativa 197-1 – Classi di resistenza dei cementi

CLASSE DI RESISTENZA	Resistenza a compressione Mpa			
	Resistenza iniziale		Resistenza normalizzata	
	2 giorni	7 giorni	28 giorni	
32,5 N		$\geq 16,0$	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
32,5 R	$\geq 10,0$			
42,5 N	$\geq 10,0$		$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
42,5 R	$\geq 20,0$			
52,5 N	$\geq 20,0$		$\geq 52,5$	
52,5 R	$\geq 30,0$			

L'impatto ambientale che deriva dalla produzione del cemento, come citato nel paragrafo precedente, è significativo: la media globale di emissioni di CO₂ per tonnellata di cemento prodotto sono pari a 0,80 ton [48]. Tuttavia, l'impronta carbonica del settore deriva quasi interamente dalla produzione di clinker, il costituente principale di base della produzione di cemento. Per comprendere l'origine di tali emissioni, è necessario analizzare le fasi del processo produttivo, che si articola tipicamente in: estrazione delle materie prime, preparazione della miscela cruda, preriscaldamento, cottura nel forno rotante per la clinkerizzazione e, infine, la preparazione del cemento [53]. Il processo di produzione è raffigurato in figura n.6:

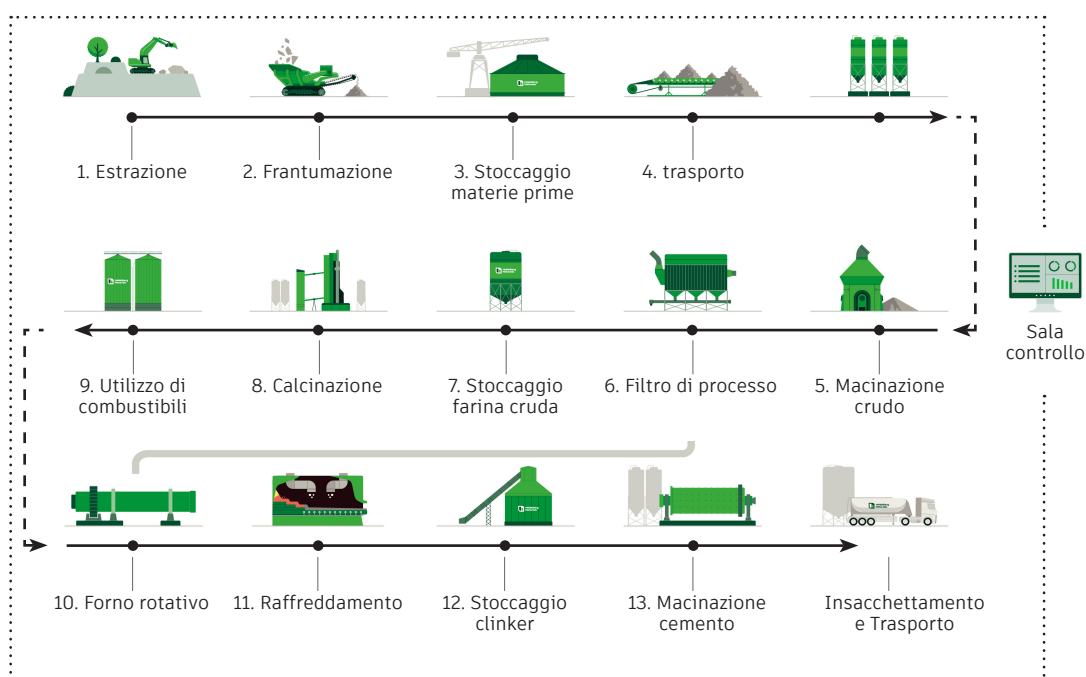


Figura 6 - Processo di produzione del cemento. Fonte: Heidelberg Materials, disponibile su <https://www.heidelbergmaterials.it/it/alla-scoperta-del-cemento> (consultato il 19/01/2026)

Estrazione delle materie prime: Le materie prime sono estratte dalla cava sotto forma di blocchi di dimensioni variabili, generalmente inferiori a un metro cubo. Una volta estratti, i blocchi vengono frantumati, un processo che richiede l'applicazione di forze di impatto, attrito, taglio o compressione. Inizialmente, le materie prime vengono trasportate utilizzando pale gommate, veicoli cingolati e camion. Successivamente, dopo la frantumazione, vengono spostate tramite nastri trasportatori, catene, elevatori e sistemi idraulici. La materia prima è composta da una miscela di rocce, in particolare argilla e calcare, quest'ultimo costituente circa l'80% della miscela [47].

Preparazione della miscela cruda: La seconda fase inizia con l'omogeneizzazione, che consiste in una serie di operazioni di miscelazione e macinazione delle materie prime. Durante la macinazione, quest'ultime vengono inserite in un mulino e sottoposte a processi meccanici per produrre una polvere fine, chiamata farina cruda, che viene poi immagazzinata in silos [43]. La seconda fase si conclude con la depolverazione, una tecnica che mira a ridurre le emissioni di polveri durante il trasporto della farina utilizzando filtri a maniche o elettrofiltri [49]. Questo metodo, essenziale per garantire la compatibilità ambientale delle unità produttive, viene applicato anche in altre fasi del processo produttivo, come la cottura e la macinazione del cemento.

Preriscaldamento: In questa fase i gas di scarico caldi emessi dal forno vengono utilizzati per preriscaldare la farina cruda in polvere prima che questa entri nel forno stesso. Un preriscaldatore è composto da una serie di cicloni attraverso i quali la farina cruda viene fatta passare, mentre i gas di scarico caldi ruotano in direzione opposta al flusso del materiale. All'interno di questi cicloni, il calore viene recuperato, il che comporta il vantaggio di preriscaldare la farina cruda, migliorare l'efficienza del processo e ridurre il consumo di combustibile [53].

Produzione di clinker nel forno rotante: la farina preriscaldata viene introdotta nel forno a una temperatura di circa 1000 °C. Il combustibile, che può essere carbone, coke di petrolio, gas, petrolio o combustibili alternativi, viene bruciato direttamente nel forno rotante, raggiungendo fino a 2000 °C per assicurare che le materie prime arrivino alla temperatura di 1450 °C. [54] Il forno, un cilindro metallico rivestito di mattoni con un diametro di 3-5 metri e una lunghezza di 30-60 metri, ha una velocità di rotazione di 3-5 giri al minuto, permettendo alla farina cruda di avanzare attraverso zone progressivamente più calde fino a raggiungere la fiamma [53]. L'intenso calore innesca reazioni chimiche e fisiche che decompongono e fondono parzialmente la farina, trasformandola in clinker.

Preparazione del cemento: dal forno, il clinker caldo viene raffreddato con grandi quantità di aria e successivamente si aggiunge circa il 4-5% di gesso, per regolare il tempo di presa del cemento finale [53]. La miscela di clinker e gesso, una volta raffreddata, viene macinata fino a diventare una polvere grigia nota come Cemento Portland Ordinario [49]. In alternativa, può essere macinato insieme ad altri componenti minerali per creare, ad esempio, cementi Portland compositi.

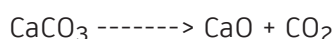
Nonostante la complessità dell'intero ciclo produttivo, il cuore del problema emissivo e il punto critico per la sostenibilità risiedono quasi esclusivamente nella fase di cottura della miscela cruda all'interno del forno rotativo per la produzione del clinker. Per valutare l'entità di questo impatto, è necessario esaminare le trasformazioni chimico-fisiche che si verificano durante la clinkerizzazione. Una volta introdotta nel forno, la farina cruda attraversa diverse zone termiche [54]:

- **Zona di essiccamento:** zona che raggiunge i 20-100 °C di temperatura, nella quale avviene l'evaporazione dell'acqua non legata e dell'umidità complessiva [49].
- **Zona di preriscaldamento:** si raggiungono i 450-600 °C, zona in cui viene persa l'acqua di cristallizzazione dei minerali argillosi [49].
- **Zona di calcinazione:** fase cruciale all'interno della quale il calcare (CaCO_3), che compone circa il 75-79% della miscela, alla temperatura di 650-900 °C, si decompone liberando CO_2 [47].
- **Zona di clinkerizzazione:** alla temperatura di 900-1450 °C avviene la fusione parziale (sinterizzazione) e la formazione di granuli di clinker [49], ognuno dei quali si compone di quattro composti: i silicati di calcio, silicato bicalcico C_2S e silicato tricalcico C_3S , e gli alluminati di calcio, alluminato tricalcico C_3A e ferroalluminato tetracalcico C_4AF [14].
- **Zona di raffreddamento:** In questa fase il clinker viene sottoposto a un processo di tempra rapida, necessario per stabilizzare la struttura mineralogica. Tale fase di raffreddamento improvviso permette di preservare le giuste proporzioni di C_2S - C_3S - C_3A - C_4AF , garantendo le proprietà idrauliche del prodotto finito [43].

Le emissioni totali di questa fase, stimate mediamente in 0,80 ton di CO₂ per tonnellata di cemento [48], si distinguono in due categorie principali:

- Emissioni da combustione: rappresentano il 35-40 % delle emissioni di GHG della fase in forno rotante e derivano dal calore necessario per mantenere il forno a temperature prossime ai 1450°C. Storicamente legate ai combustibili fossili (carbon coke e olio combustibile), queste emissioni sono oggi oggetto di mitigazione attraverso il co-processing [55]. Tale pratica prevede la sostituzione dei combustibili tradizionali con combustibili alternativi derivati da rifiuti non riciclabili o biomasse, con l'obiettivo di raggiungere un tasso di sostituzione del 95% entro il 2050 [43].

- Emissioni da calcinazione: rappresentano il 60-65% delle emissioni di CO₂ [15] e sono considerate “inevitabili” poiché derivano direttamente dalle reazioni chimiche necessarie alla produzione di clinker, ovvero la decomposizione chimica del calcare secondo la reazione:



Il carbonato di calcio CaCO₃, quando viene esposto alle elevate temperature dei forni, subisce una reazione che lo decompone in ossido di calcio CaO, rilasciando contemporaneamente CO₂ nell'atmosfera.

L'industria del cemento è dunque impegnata in una trasformazione radicale lungo l'intera catena di produzione per abbattere questa impronta carbonica “incomprimibile”. Se da un lato l'efficienza termica e l'uso di materie prime alternative decarbonatate possono offrire una riduzione parziale [46], la vera sfida risiede nella capacità di catturare la CO₂ rilasciata nel processo. In questa prospettiva, l'adozione di approcci circolari e l'integrazione di tecnologie avanzate diventano fondamentali.

2.1.3 Strategie di decarbonizzazione nel settore cementizio

Il cammino verso la neutralità carbonica entro il 2050 richiede all'industria del cemento di adottare un approccio su più livelli, fondato su strategie che influenzano sia le emissioni derivanti dalla combustione che quelle di processo [43]. Le strategie attuali si articolano lungo tre direttrici fondamentali: la riduzione del fattore clinker, l'implementazione di tecnologie CCUS e l'ottimizzazione operativa e del co-processing [45, 46].

Riduzione del rapporto clinker-cemento e materiali SCM

La sostituzione parziale del clinker con SCM rappresenta la leva più efficace nell'immediato per ridurre l'impronta di carbonio del cemento Portland [42]. Questo processo permette di limitare la quantità di calcare riducendo le emissioni da calcinazione, agendo direttamente alla radice del problema emissivo [43].

L'attuale panorama industriale degli SCM si basa prevalentemente sull'impiego di calcare, loppa granulata basica d'altoforno (Ground Granulated Blast furnace Slag, GGBS) e ceneri volanti [42]. Tuttavia, se da un lato il calcare gode di un'ampia disponibilità, dall'altro la reperibilità di GGBS e ceneri volanti è destinata a ridursi nel prossimo futuro. Tale scarsità è la conseguenza diretta della chiusura delle centrali elettriche a carbone e della transizione strutturale del settore siderurgico verso i forni elettrici ad arco (Electric Arc Furnace, EAF), processi che riducono alla fonte la produzione di questi sottoprodotti tradizionali [42]. In questo contesto, per perseguire gli obiettivi di economia circolare, il settore siderurgico sta esplorando con crescente interesse l'utilizzo di materie prime seconde e nuovi sottoprodotti industriali. Tra le soluzioni più promettenti figurano le scaglie di laminazione, i gessi chimici e le stesse scorie EAF, il cui reimpiego permette di trasformare potenziali rifiuti in risorse strategiche per la produzione di leganti a bassa impronta carbonica utilizzabili per la produzione di cemento.

Tecnologie di cattura, utilizzo e stoccaggio del carbonio (CCUS)

Le tecnologie CCUS sono considerate il pilastro portante per l'abbattimento delle emissioni di CO₂ "hard-to-abate", con un potenziale di riduzione stimato pari al 36% [45]. Questo metodo tecnologico si articola in due percorsi principali, differenziati dalla destinazione finale del gas catturato. Il CCS punta alla neutralizzazione definitiva della CO₂. Una volta catturata dai gas di scarico degli impianti, viene trasportata e iniettata in formazioni geologiche profonde – come acquiferi salini o giacimenti di idrocarburi esauriti – garantendo uno stoccaggio permanente, sicuro e isolato dall'atmosfera [46]. In un'ottica di economia circolare, invece, l'approccio del CCU non si limita a stoccare il carbonio, ma lo reintegra in nuovi cicli produttivi [42]. Sebbene la CO₂ possa essere usata per creare carburanti sintetici, la filiera del cemento sta sviluppando soluzioni interne di grande interesse [43]. Tra queste spiccano l'iniezione di CO₂ nel calcestruzzo fresco e la stagionatura accelerata di elementi prefabbricati, processi che migliorano le prestazioni del materiale sequestrando il gas. Un ambito di ricerca particolarmente promettente è la

carbonatazione minerale di materiali di scarto, che permette di “intrappolare”, quindi di incorporare, stabilmente la CO₂ all’interno di nuovi componenti edilizi, trasformando uno scarto in una risorsa [46].

Sostituzione dei combustibili, co-processing e ottimizzazione operativa

Oltre all’utilizzo di materiali cementizi supplementari e delle tecnologie CCUS, l’industria punta alla progressiva eliminazione dei combustibili fossili, come il carbon coke e l’olio combustibile, a favore del miglioramento del co-processing [57]. Questa pratica utilizza il combustibile solido secondario (CSS), derivante da rifiuti non riciclabili e biomasse, in sostituzione ai combustibili fossili garantendo un doppio vantaggio ambientale: la riduzione delle emissioni di GHG in atmosfera e la riduzione dei rifiuti, evitando il loro conferimento in discarica o l’incenerimento inefficiente [43, 46]. Questo processo si svolge dopo la raccolta differenziata: il sistema identifica ed elimina i materiali che possono essere recuperati per il riciclo, come vetro, alluminio o plastiche clorurate come il polivinilcloruro (PVC), isolando una parte con un alto potere calorifico che altrimenti finirebbe in discarica o in inceneritori meno efficienti [56]. In sintesi, la transizione dell’utilizzo dei combustibili fossili al co-processing trasforma il cementificio in un protagonista centrale dell’economia circolare, in grado di ridurre le proprie emissioni di GHG dirette e, allo stesso tempo, affrontare le problematiche gestionali del sistema dei rifiuti a livello territoriale.

Completano il quadro le strategie volte al miglioramento dell’efficienza energetica degli impianti tramite soluzioni digitali, l’elettrificazione dei trasporti e l’approvvigionamento di energia elettrica da fonti rinnovabili [43]. Fondamentale per la competitività del settore sarà l’implementazione del meccanismo di adeguamento del carbonio alle frontiere (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM). Si tratta di un meccanismo che impone agli importatori di determinati prodotti fuori dall’Unione Europea, tra cui il cemento, il pagamento di un prezzo per le emissioni di carbonio incorporate nella produzione. Tale strumento ha lo scopo di prevenire il fenomeno della rilocalizzazione delle emissioni (carbon leakage): si evita, in questo modo, che la produzione europea venga sostituita da importazioni provenienti da Paesi con normative ambientali meno stringenti, preservando l’efficacia delle politiche climatiche dell’UE senza svantaggiare l’industria locale [43].

2.1.4 Opportunità e barriere all'adozione di approcci circolari nel settore cementizio

L'implementazione delle strategie illustrata nei paragrafi precedenti non si basa esclusivamente sulla maturità tecnologica, ma è strettamente connessa a un ecosistema di fattori normativi e sociali. Sebbene l'industria abbia elevato i propri obiettivi per raggiungere la neutralità carbonica nel settore, deve anche affrontare sfide strutturali che ne rallentano l'attuazione. La tabella n.5 seguente riassume le principali opportunità offerte dalla transizione circolare e le barriere che attualmente ne impediscono il pieno sviluppo:

Tab. 5. - Transizione circolare nel settore cementizio – *Analisi delle opportunità e delle barriere*

CATEGORIA	OPPORTUNITÀ	BARRIERE E SFIDE
Normativa e autorizzazioni di valutazione del	Nuovi regolamenti End of Waste (es. DM 127/2024 sugli inerti) che facilitano l'uso di macerie da demolizione per produrre clinker [43]	Nuovi regolamenti End of Waste (es. DM 127/2024 sugli inerti) che facilitano l'uso di macerie da demolizione per produrre clinker [43]
Infrastrutture (CCUS)	Potenziale di cattura fino a 62 mln di ton di CO ₂ /anno nel 2050. Riconoscimento della mineralizzazione permanente come forma di stoccaggio circolare [46]	Assenza di una rete nazionale di gasdotti e siti di stoccaggio geologico; [46]
Mercato e competitività	Meccanismo CBAM per proteggere i produttori UE dalle importazioni "low-cost" da paesi con standard ambientali inferiori [43]	Rischio concreto di delocalizzazione (carbon leakage) dovuto alla crescita delle importazioni extra-UE (superiori del 15% nel 2024 rispetto al 2014 [43]
Sociale e territoriale	Creazione di "simbiosi industriali" con altri settori e valorizzazione dei rifiuti locali tramite il recupero energetico (CSS) [57]	Sindromi NIMBY (Not In My Back Yard) e NIMTO (Not In My Team Office) che bloccano i progetti locali; scarsa accettabilità pubblica dovuta a una comunicazione non sempre trasparente o corretta [46]
Tecnico-scientifica	Utilizzo di strumenti come EPD (Environmental Product Declaration) dichiarazioni ambientali di prodotto, e certificazioni CSC (Concrete Sustainability Council) per garantire la trasparenza lungo l'intero ciclo di vita (LCA) dei materiali [43] Impiego di nuovi sottoprodotti industriali come SCM [46]	Scarsità futura di materiali tradizionali come loppe e ceneri volanti a causa della decarbonizzazione dei settori siderurgico ed energetico [43] .

2.2 | LA SCORIA EAF: UN RESIDUO INDUSTRIALE CON POTENZIALE STRATEGICO

2.2.1 La scoria da forno ad arco elettrico – EAF slag

L'acciaio rappresenta oggi il materiale metallico più utilizzato al mondo per via della sua versatilità e delle innumerevoli applicazioni industriali [58]. Tuttavia, il settore siderurgico è uno dei maggiori contributori alle emissioni globali di GHG, rilasciando circa 3,7 Gt di CO₂ all'anno, che corrispondono a circa il 7% delle emissioni totali [58]. Attualmente, il processo produttivo si basa su due percorsi principali: l'altoforno-convertitore ad ossigeno (BF, Blast Furnace e BOF, Basic Oxygen Furnace), che domina il mercato con il 70,7% della produzione, e il forno elettrico ad arco (EAF) [58]. Quest'ultimo sta raccogliendo un interesse crescente come leva per la decarbonizzazione delle scorie che derivano dal suo processo. Infatti, la scoria da forno ad arco elettrico (EAF slag) rappresenta il principale sottoprodotto della produzione siderurgica basata sul riciclo del rottame ferroso [59]. L'EAF è un impianto flessibile che trasforma l'energia elettrica in calore attraverso tre elettrodi in grafite, i quali innescano un arco elettrico che fonde la carica metallica raggiungendo temperature superiori ai 2000°C [60]. All'interno del forno, la fusione è accompagnata dall'aggiunta di agenti fondenti come calce e dolomite e dall'insufflaggio di ossigeno [60, 59]. Questi elementi reagiscono con le impurità del rottame e con i prodotti dell'ossidazione, formando una fase liquida silicatica – la scoria – che, avendo una densità inferiore, galleggia sul metallo fuso riducendo l'usura dei refrattari [59].

La generazione di scoria EAF è considerevole: si stima una produzione compresa tra 100 e 169 kg di scoria per ogni tonnellata di acciaio [61]. Una volta terminata l'affinazione, la scoria viene estratta e sottoposta a raffreddamento, processo che ne determina la struttura finale. Dal punto di vista chimico, la scoria EAF è principalmente costituita da ossidi di diversi metalli. Circa il 90% del peso delle scorie è composto da ossidi di calcio, ferro, alluminio, magnesio e silicio. Il restante 10% è formato da impurità legate alla qualità del rottame metallico, come cromo, molibdeno, titanio, vanadio, rame [60]. In base alla tipologia di acciaio prodotto, la scoria può essere classificata in due categorie principali: la scoria EAF-C, derivante dalla produzione di acciaio al carbonio, e la scoria EAF-S, originata dalla produzione di acciai inossidabili o altamente legati [61]. Tale distinzione è fondamentale poiché la natura del rottame e gli additivi utilizzati

influenzano direttamente la presenza di fasi reattive e di elementi potenzialmente nocivi, condizionandone le possibilità di recupero [60]. Nonostante le ottime proprietà fisiche di resistenza meccanica e abrasione [58], che la rendono un aggregato pregiato in ambito ingegneristico, il riutilizzo della scoria EAF incontra ostacoli legati alla variabilità della composizione e, soprattutto, all'instabilità volumetrica causata dalla presenza di calce libera (CaO) e magnesio libero (MgO), che tendono a idratarsi provocando fenomeni di espansione [61]. Tuttavia, queste criticità si trasformano in un'opportunità strategica: la natura fortemente basica, dovuta all'elevato contenuto di ossidi basici, e l'elevato contenuto di composti ricchi in Ca e Mg, tra cui gli stessi ossidi basici responsabili dell'alcalinità, rendono la scoria EAF una candidata ideale per il sequestro permanente della CO_2 [61], trasformandola da semplice residuo industriale a risorsa strategica. Attraverso processi di carbonatazione, è possibile non solo stabilizzare il materiale riducendone l'espansività, ma anche produrre SCM reattivi, trasformando un residuo industriale in una risorsa fondamentale per la sostenibilità del settore edilizio [62].

2.2.2 Potenzialità della scoria EAF come materiale basico per la mineralizzazione della CO_2

La scoria EAF possiede un'elevata basicità naturale, derivante dall'alto contenuto di ossidi (CaO e MgO) e silicati di calcio e magnesio, che le conferisce un potenziale teorico di sequestro del carbonio significativo [58]. Il concetto fondamentale alla base della mineralizzazione della CO_2 rispecchia il processo geologico di degradazione meteorica, in cui i silicati di calcio e magnesio reagiscono naturalmente con la CO_2 atmosferica per formare minerali carbonatati termodinamicamente stabili [58]. Questo meccanismo è considerato il sistema di intrappolamento più sicuro e permanente per lo stoccaggio della CO_2 , sebbene in natura avvenga a ritmi estremamente lenti [63]. Per superare tale limite, la ricerca scientifica si è concentrata sul processo di carbonatazione accelerata, che permette di simulare il processo naturale in tempi ridotti [58].

L'interesse scientifico per la scoria EAF risiede nella duplice opportunità offerta dalla carbonatazione: da un lato, il sequestro permanente della CO_2 in forma solida; dall'altro, la stabilizzazione chimica e fisica del sottoprodotto [61]. Durante la reazione, la trasformazione della calce libera f- CaO e della magnesio f- MgO in carbonato di calcio (CaCO_3) e carbonato di magnesio (MgCO_3) riducono i fenomeni di espansione volumetrica associata all'idratazione di tali ossidi, e conseguente conversione in fasi idrossidiche, rendendo il materiale sicuro per il riutilizzo industriale [61]. Un aspetto fondamentale

per la sostenibilità della filiera è l'utilizzo della scoria EAF come SCM. La transizione verso l'uso della scoria come SCM è di estremo interesse poiché permette di ridurre le emissioni di CO₂ dell'industria del cemento, evitando le fasi di calcinazione e clinkerizzazione tipiche del processo produttivo tradizionale [62].

Nello specifico, la reattività della scoria come SCM è influenzata dalla sua composizione mineralogica: mentre le fasi cristalline sono generalmente considerate inerti, la presenza di fasi amorfe è un prerequisito essenziale per garantire la reattività idraulica [62]. Gli studi dimostrano che il processo di carbonatazione può modificare la reattività superficiale della scoria. Ad esempio, tecniche di valutazione come il Rapid Reliable Relevant test, conosciuto come R³ ed introdotto dal comitato RILEM (The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, System and Structures) hanno confermato che è possibile generare SCM basati su scoria EAF con promettenti capacità di sviluppo della resistenza meccanica [42]. L'integrazione di scoria EAF carbonatata nei cementi Portland non solo riduce l'impiego di clinker e il fabbisogno di estrazione di calcare, ma permette di incorporare "carbonio negativo" all'interno del materiale edilizio.

Tuttavia, affinché questa potenzialità si traduca in un processo industriale concreto, è necessario superare la lentezza intrinseca della reazione naturale attraverso tecniche di carbonatazione accelerata [58]. Tra i diversi percorsi studiati, la carbonatazione acquosa diretta emerge come una delle soluzioni più promettenti: l'utilizzo di una fase liquida agisce infatti da catalizzatore, facilitando la dissoluzione dei silicati di calcio e magnesio e la successiva precipitazione dei carbonati [63]. Questa metodologia permette di operare in condizioni blande – spesso a temperatura e pressione ambiente – riducendo drasticamente il consumo energetico del processo e favorendo un elevato grado di fissazione della CO₂ [64]. Le specifiche dinamiche fisico-chimiche di questo processo, i parametri che ne influenzano l'efficienza e i meccanismi di reazione in soluzione acquosa verranno analizzati nel dettaglio nel paragrafo successivo.

2.2.3 Processo di carbonatazione acquosa della scoria d'acciaio EAF

Il processo di carbonatazione acquosa diretta rappresenta oggi una delle strategie tecnologiche più promettenti per la valorizzazione della scoria EAF, permettendo di trasformare un residuo industriale in una risorsa ambientale e tecnica di valore [65]. Questa tecnica sfrutta l'interazione tra la scoria polverizzata e la CO₂ in presenza di acqua, la quale agisce come mezzo di reazione

fondamentale per superare i limiti della carbonatazione naturale. L'acqua, infatti, agisce come catalizzatore e favorisce la mobilità ionica e la precipitazione di nuove fasi minerali, accelerando un processo che altrimenti richiederebbe tempi geologici [61,63]. Dal punto di vista chimico-fisico, il processo si sviluppa attraverso una sequenza di fasi concatenate: inizialmente, la CO₂ si dissolve nell'acqua acidificando la soluzione; questo calo del pH innesca la lisciviazione dei cationi di calcio e magnesio dalle fasi minerali (principalmente silicati e ossidi liberi) della scoria, i quali infine reagiscono con gli ioni carbonato per formare cristalli solidi e stabili, come la calcite o l'aragonite [63]. Tali fasi si depositano sulla superficie e all'interno della porosità del materiale, modificandone la tessitura e migliorandone la stabilità [42].

Sebbene il potenziale di questa tecnologia sia elevato, è importante sottolineare che attualmente le applicazioni sono validate principalmente su scala di laboratorio e in impianti pilota, con la ricerca che punta a bilanciare l'efficienza di sequestro con la futura fattibilità economica su scala industriale [62]. In un tipico set-up sperimentale, come quello descritto da Bonfante et al. (2025) [62], la scoria viene mantenuta in sospensione all'interno di un reattore termo controllato dove l'anidride carbonica viene insufflata con portate costanti. Al termine della reazione, la sospensione ottenuta (slurry) viene sottoposta a un processo di centrifugazione per separare la fase solida da quella liquida. Il residuo solido viene successivamente essiccato in forno per 24 ore a una temperatura controllata di 60 °C [42]. Questo passaggio è cruciale per preservare l'integrità dei silicati di calcio idrati (C-S-H) formati durante il trattamento, evitando la loro decomposizione che avverrebbe a temperature superiori e garantendo così la futura reattività idraulica del materiale.

Per valutare l'efficacia di questo processo, la quantità di CO₂ effettivamente catturata (CO₂ uptake) viene misurata con estrema precisione attraverso analisi termogravimetriche (TGA/TG-DTA) o decomposizione termica. Questi strumenti quantificano il carbonio sequestrato misurando la perdita di peso del campione durante il riscaldamento, in corrispondenza della decomposizione dei carbonati formati che avviene nell'intervallo di temperatura 550-850 °C [65, 66]. I risultati ottenuti in queste condizioni "mild" sono estremamente incoraggianti: si registrano capacità di cattura medie tra il 7,9% e il 9% in peso, con un punto di massimo nel grado di carbonatazione, definito come il rapporto tra la CO₂ catturata sperimentalmente e la CO₂ teoricamente catturabile sulla base del contenuto di calcio, del 34%. Tali risultati sono ottenuti attraverso processi condotti per tempi di reazione brevi, tra i 20 e i 60 minuti [64]. In definitiva, questi dati confermano che la carbonatazione acquosa non è solo una strategia di sequestro, ma un vero trattamento di "upcycling" capace di trasformare un residuo instabile in un componente edilizio decarbonizzato e tecnicamente performante, aprendo la strada a futuri sistemi integrati direttamente nei flussi produttivi industriali [66].

Bibliografia

- [1] Manfredi M., *Application of LCA (Life Cycle Assessment) for the evaluation of the environmental sustainability of products, processes and technologies in the agri-food sector*, [Dottorato di ricerca], Università degli studi di Parma, 2023/2024.
- [2] Arcese G., *Il Life Cycle Sustainability Assessment per la valutazione della sostenibilità aziendale*, [Dottorato di ricerca], Sapienza – Università di Roma, 2023/2024.
- [3] Nesci V., *La sostenibilità energetico-ambientale nel settore edilizio: analisi critica e applicazione della Tassonomia dell'UE*, [Tesi di laurea magistrale], Politecnico di Torino, 2022/2023.
- [4] Meadows D. H.; Meadows D.L.; Randers J.; Behrens W.W., *I limiti dello sviluppo: rapporto del System Dynamics Group Massachusetts Institute of Technology (MIT) per il progetto del Club di Roma sui dilemmi dell'umanità*, edizioni scientifiche e tecniche Mondadori, Milano, 1972.
- [5] Santandrea M., *Pensare il futuro: Aurelio Peccei e il Club di Roma*, chimica e storia della scienza CNS, 2011.
- [6] Principi F., *LCA analysis: the case study of the archibald armchair by poltrona frau*, [Tesi di laurea], Università politecnica delle Marche, 2020/2021.
- [7] Brundtland, G., *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*, United Nations General Assembly document A/42/427, 1987
- [8] Santoro F., *Progettare la sostenibilità*, [Tesi di laurea magistrale], Politecnico di Milano, 2009/2010.
- [9] Boggia A.; Cortina C., *Un modello per la valutazione della sostenibilità dello sviluppo a livello territoriale*, AESTIMUM 52, (2008), pp. 31-52.
- [10] Ronchi E.; Leoni S.; Vigni F.; Pettinao E.; Barucci V.; Galli L., *Rapporto sull'economia circolare in italia –2021*, Roma: a cura del Circular Economy Network, 2021
- [11] Fregonara E., *Valutazione Sostenibilità Progetto, Life Cycle Thinking e indirizzi internazionali, ricerche di tecnologia dell'architettura*, Franco Angeli, 2016.
- [12] Dichiarazione di Rio su ambiente e sviluppo, *rapporto delle nazioni unite sull'ambiente e lo sviluppo*, Allegato I, 12 agosto 1992.
- [13] Agenda 21 –Capitolo 28, *La sostenibilità energetico ambientale nel settore edilizio*, Analisi critica e applicazione della Tassonomia dell'UE.
- [14] Spinelli M., *Sostenibilità nel campo dell'edilizia: analisi critica dell'implementazione dell'obiettivo "Economia Circolare" richiesto dalla Tassonomia Europea e per il rispetto del Principio DNSH attraverso il caso studio di una ricostruzione di un edificio scolastico*, [Tesi di laurea magistrale], Università Ca'Foscari Venezia, 2022/2023.
- [15] Alini L.; Antonello M., *Progettare la sostenibilità. metodi e strategie di valutazione ambientale*, «innovazione e sviluppo industriale/ innovation and industrial development, pp. 267-275, DOI: 10.36253/techne-15289, 2023
- [16] Sesana M.M.; Dell'Oro P., *White Paper: Progettare e costruire edifici sostenibili e resilienti in acciaio – White Paper*. Fondazione Promozione Acciaio – Commissione Sostenibilità, 1Università degli Studi di Brescia. Pubblicazione: Settembre 2024. ISBN: 9791221053869.
- [17] Piana V., *L'Accordo di Parigi sul clima*, Lulu Editore, Gennaio 2016

- [18] Giovannini E.; Riccaboni A., *Agenda 2030: un viaggio attraverso gli Obiettivi di sviluppo sostenibile*, ASviS e Santa Chiara Lab, Roma, 2021. ISBN 979-12-80634-01-6.
- [19] Baratta F. L.; Calcagnini L.; Magarò A.; *Decarbonizzazione dei manufatti edilizi: metodologie per la valutazione della Whole Life Carbon e focus sulla fase di fine vita*, Intervento presentato al convegno REcycling V Convegno Internazionale. Il valore della materia nella transizione ecologica del settore delle costruzioni, 2023, pp.26-35
- [20] Green Building Council Italia, *Economia circolare in edilizia*, Rovereto: gbcitalia, 2019.
- [21] Direttiva (UE) 2024/1760 del parlamento europeo e del consiglio del 13 giugno 2024 relativa al dovere di diligenza delle imprese ai fini della sostenibilità e che modifica la direttiva (UE) 2019/1937 e il regolamento (UE) 2023/2859.
- [22] Evangelisti A., *Approcci LCC (Life Cycle Costing) e LCA (Life Cycle Assessment) congiunti per la valutazione economico-ambientale di soluzioni tecnologiche alternative*, [Tesi di laurea magistrale], Politecnico di Torino, 2019/2020.
- [23] Giorgi S.; Lavagna M.; Campioli A., *Economia circolare, gestione dei rifiuti e life cycle thinking: fondamenti, interpretazioni e analisi dello stato dell'arte*, «Ingegneria dell'Ambiente», vol. 4, 2017, n. 3, pp. 263 – 276.
- [24] McLennan, World Economic Forum, 2011
- [25] Lavagna D., *LCA in edilizia: ambiti applicativi e orientamenti futuri della metodologia Life Cycle Assessment nel settore delle costruzioni*, Santarcangelo di Romagna: Maggioli editore, 2022.
- [26] Sola A.; Rosa R.; Ferrari A.M., *Environmental Impact of Fused Filament Fabrication: What Is Known from Life Cycle Assessment?*, *Polymers* 2024, 16, 1986. <https://doi.org/10.3390/polym16141986>.
- [27] Iacovacci S., *Roadmap per la decarbonizzazione: applicazione della metodologia whole life carbon e sue prospettive di sviluppo*, [Tesi di laurea magistrale], Politecnico di Torino, 2023/2024.
- [28] Beatriz Munar Bonilla N., *A Comparative Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Sweden Cement Industry*, [Tesi di dottorato], Politecnico di Torino, 2024.
- [29] Zausta A., *Life Cycle Assessment: principi e applicazioni a componenti strutturali*, [Tesi di laurea], Università degli studi di Padova, 2023/2024.
- [30] BS EN ISO 14040:2006+A1:2020, *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*, European Committee for Standardization, BSI Standards Limited, 2020.
- [31] BS EN ISO 14044:2006+A2:2020, *Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*, European Committee for Standardization, BSI Standards Limited, 2020.
- [32] Giurato M., *Valutazione LCA del sistema di riciclo dei rifiuti a base di gesso in regione lombardia*, [Tesi di laurea magistrale], Politecnico di Milano, 2016/2017.
- [33] Bandera B., *Implementazione di processi funzionali ad uno studio LCA applicato ad un servizio di pulizia in ottica di etichettatura ecologica*, [Tesi di laurea], Università di Bologna, 2019/2020.
- [34] Jolliet O.; Saadé-Sbeih M.; Shaked S.; Jolliet A.; Crettaz P., *Environmental life cycle assessment*, 2016.
- [35] Luiso M., *Analisi del ciclo di vita di macchine di misura a coordinate mediante la metodologia LCA*, [Tesi di laurea magistrale], Politecnico di Torino, 2020/2021.
- [36] Ordonselli N., *LCA Life Cycle Assessment comparativa tra tre sistemi costruttivi: legno Xlam, acciaio e C.A Applicazione del software eTool come strumento di valutazione ambientale*, [Tesi di laurea magistrale],

- [37] Valentini A.M., *Valutazione dell'impatto ambientale generato dalla produzione di una tonnellata di PVC mediante la metodologia Life Cycle Assessment*, [Tesi di laurea magistrale], Politecnico di Milano, 2021/2022.
- [38] Rosato F., *Valutazione del ciclo di vita di pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso*, [Tesi di laurea magistrale], Politecnico di Torino, 2021/2022.
- [39] Rondini I., *Applicazione della metodologia LCA ai cereali: il caso della cooperativa agricola Capa Cologna*, [Tesi di laurea], Università di Bologna, 2013/2014.
- [40] Squadrone L., *Analisi di ciclo di vita (LCA) ed energetica del riciclo chimico tramite pirolisi dei rifiuti poliolefinici misti*, [Tesi di laurea magistrale], Politecnico di Torino, 2022/2023.
- [41] Bányaï T.; Veres P., *Life Cycle Assessment Recent Advances and New Perspectives*, Londra: IntechOpen, 2023.
- [42] Bonfante F.; Tulliani J. M.; Ferrara G.; Palmero P.; Humbert P.; Garufi D., *Aqueous carbonation of EAF steel slag to produce Supplementary Cementitious Material: Effects on mineral composition, hydration reactivity and mechanical properties*, «Construction and Building Materials», vol. 479, 2025, pp. 1-16.
- [43] Federbeton, *Rapporto di Sostenibilità Federbeton 2024*, disponibile sul sito ufficiale https://www.federbeton.it/Portals/0/PubDoc/Pubblicazioni/Rapporti/Rapporto_di_Sostenibilit%C3%A0_Federbeton_2024.pdf (16/01/26)
- [44] Francesco P., *Il ruolo cruciale degli additivi innovativi per la riduzione della CO₂ nella produzione del cemento*, Chryso, 2025.
- [45] GCCA - Global Cement and Concrete Association, *Cement Industry Net Zero Progress Report*, 2024/25.
- [46] Cembureau - *The road travelled, pathways and levers to scale up our net zero ambition*, 2025.
- [47] Santagati A. G., *Materiali cementizi con incrementata resistenza e conduttività elettrica*, [Tesi di Laurea Magistrale], Politecnico di Torino, 2020.
- [48] Vinci A., *Calcestruzzi innovativi: applicazione per strutture sostenibili*, [Tesi di Laurea Magistrale], politecnico di Torino, 2018/19.
- [49] Calzavara A., *Studio dell'interazione tra gli additivi ed i cementi di natura pozzolanica*, [Tesi di Laurea], università degli studi di Padova, 2011/2012.
- [50] <https://www.aitecweb.com/Il-Cemento/Classificazione-dei-cementi> (16/01/2026).
- [51] <https://www.studiomadera.it/-cemento-classificazione> (16/01/2026).
- [52] <https://alpacem.it/prodotti-e-servizi/cemento/norma/> (16/01/2026).
- [53] <https://cembureau.eu/about-our-industry/the-manufacturing-process/> (16/01/2026).
- [54] Ruello A., *Materiali innovativi per il settore delle costruzioni: Conglomerati a base di calce additivati con materiali bidimensionali*, [Tesi di Laurea Magistrale], Università degli studi di Genova, 2023/2024.
- [55] Mache E.; Rajczakowska M.; Cwirzen A.; *Process Residues in Cement Clinker Production: A Review*, Waste Management Bulletin, 2025.
- [56] *La strategia di decarbonizzazione del settore del cemento*, Federbeton, giugno 2020.
- [57] Santilli F., *I rifiuti, da problema a risorsa - Il CSS e l'industria del cemento. La Buzzi Unicem e le "alternative" introdotte nel processo produttivo del Clinker*. [Tesi di laurea], Università degli studi di Modena e Reggio Emilia,

- [58] Andersson A.; Jenny Isaksson J.; Lennartsson A.; Engström F., *Insights into the Valorization of Electric Arc Furnace Slags as Supplementary Cementitious Material*, Journal of Sustainable Metallurgy (2024) 10:96–109 <https://doi.org/10.1007/s40831-023-00778-y>.
- [59] Fusar Poli M., *Studio Energetico Sull'efficienza Di Un Forno EAF Al Variare Del Materiale Di Carica E In Funzione Della Regolazione Dell'impianto Fumi*, [Tesi di laurea], Politecnico di Milano, 2011/2012.
- [60] Massari A., *Applicazione su scala industriale del processo di inertizzazione di scoria nera*, [Tesi di laurea], Politecnico di Milano, 2012/2013.
- [61] Bonfante F.; Ferrara G.; Humbert P.; Garufi D.; Tulliani J.M.; Palmero P., *CO₂ Sequestration Through Aqueous Carbonation of Electric Arc Furnace Slag*, «Journal of Advanced Concrete Technology», vol. 22, 2024, pp. 207 - 218.
- [62] Andersson A.; Isaksson J.; Lennartsson A.; F., *Insights into the Valorization of Electric Arc Furnace Slags as Supplementary Cementitious Material*, Journal of Sustainable Metallurgy, 2024, 10:96–109 <https://doi.org/10.1007/s40831-023-00778-y>.
- [63] Veetil S. P.; Hitch M., *Recent developments and challenges of aqueous mineral carbonation: a review*, International Journal of Environmental Science and Technology, 202, 17:4359–4380 <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02776-z>.
- [64] Bonfante F.; Ferrara G.; Humbert P.; Garufi D.; Tulliani J.M.; Palmero P., *Direct aqueous carbonation of electric arc furnace slag: process optimisation through experimental design*, Materials and Structures, 2025, 58:127 <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02661-6>.
- [65] Thonemann N.; Zacharopoulos L.; Fromme F.; Nühlen J.; *Environmental impacts of carbon capture and utilization by mineral carbonation: A systematic literature review and meta life cycle assessment*, Journal of Cleaner Production 332, 2022, 130067.
- [66] Nieddu A., *Contenimento delle emissioni di anidride carbonica da sorgenti puntiformi attraverso carbonatazione accelerata di rifiuti industriali*, [Dottorato di ricerca], Università degli studi di Cagliari, 2017.

PARTE SECONDA

- LIFE CYCLE ASSESSMENT -

Analisi LCA applicata alla produzione di cemento: valutazione comparativa degli impatti ambientali del cemento Portland (I – II) e del cemento a ridotto contenuto di clinker con aggiunta di scoria EAF carbonatata.

INTRODUZIONE

Il presente studio Life Cycle Assessment (LCA) ha l'obiettivo di valutare e quantificare i benefici ambientali derivanti dall'adozione di un cemento innovativo a ridotto contenuto di clinker e contenente il 10% di scoria di acciaio carbonatata per il primo scenario esaminato e il 30% per il secondo. L'analisi è stata condotta in conformità con le norme ISO 14040 e ISO 14044. I confini del sistema sono stati definiti dalla culla al cancello (cradle to gate) e l'unità funzionale (UF) è stata definita come la produzione di 1 tonnellata di cemento. L'analisi è stata suddivisa in due scenari, scenario A e B, effettuando un confronto tra quattro sistemi di produzione differenti. La suddivisione è necessaria poiché i cementi analizzati risultano funzionalmente equivalenti, a parità di prestazioni meccaniche, a due a due:

- **SCENARIO A:** confronto tra il cemento Portland tradizionale, CEM I, con classe di resistenza 52,5 MPa e composto al 95% da clinker - 5% gesso; e il cemento innovativo, CEM_{innovativo} composto all'85% da clinker - 10% da scoria di acciaio proveniente dal processo in forno ad arco elettrico (EAF), successivamente sottoposta a processo di carbonatazione - 5% gesso.

- **SCENARIO B:** confronto tra il cemento Portland di tipo II, CEM II, con classe di resistenza 42,5 MPa e composto al 76,80% da clinker - 18,36% da calcare - 5% gesso; e il cemento innovativo, CEM_{innovativo} composto all'46,7% da clinker - 18,36% da calcare - 30% da scoria di acciaio proveniente dal processo in forno ad arco elettrico (EAF), successivamente sottoposta a processo di carbonatazione - 5% gesso.

Nel seguito si identifica la scoria come 'Supplementary Cementitious Material' (SCM).

I risultati della valutazione degli impatti del ciclo di vita (LCIA), misurati con il metodo EF 3.0, hanno confermato i benefici ambientale conseguenti alla produzione di una tonnellata di cemento innovativo, in entrambi gli scenari, su tutte le categorie di impatto analizzate. Il beneficio si articola in un doppio impatto ambientale positivo. In primo luogo, la parziale sostituzione del clinker comporta una significativa riduzione del fabbisogno energetico legato alla sua fase di cottura ed evita la decarbonatazione delle materie prime richieste per la produzione di clinker stesso, portando in questo modo a una riduzione delle emissioni di CO₂ derivanti dalla calcinazione del calcare. In secondo luogo l'utilizzo della scoria EAF carbonatata non solo valorizza un sottoprodotto industriale, allineandosi ai principi dell'economia circolare, ma contribuisce attivamente alla

“cattura” della CO₂ a seguito del processo di carbonatazione acquosa delle scorie EAF, utilizzate come SCM, contribuendo in questo modo positivamente al bilancio degli impatti ambientali. Lo scenario A ha registrato una riduzione dell’impatto sul cambiamento climatico del 16,51%, passando da 883,89 kgCO₂eq per la produzione di 1 ton di cemento CEM I a 737,91 kgCO₂eq per la produzione di 1 ton di cemento CEMinnovativo (10%). Lo scenario B ha registrato una riduzione dell’impatto sul cambiamento climatico del 26,8%, passando da 800,12 kgCO₂eq per la produzione di 1 ton di cemento CEM II a 587,43 kgCO₂eq per la produzione di 1 ton di cemento CEMinnovativo (30%). Si riscontra lo stesso andamento di riduzione in tutte le restanti categorie di impatto considerate.

3 | FASE 1: DEFINIZIONE DI OBIETTIVO E CAMPO DI APPLICAZIONE - *Goal and Scope definition* -

Come descritto nel paragrafo 1.3.1, la fase iniziale dell’analisi prevede, in primo luogo, la definizione degli obiettivi e dello scopo dello studio, specificando le ragioni che hanno contribuito a concretizzare l’indagine e gli utenti a cui è indirizzato. In secondo luogo, la definizione del campo di applicazione dello studio richiede la definizione di elementi fondamentali, come la funzione del sistema, l’unità funzionale da cui dipenderanno le emissioni di inquinanti e i confini del sistema [1].

3.1 Obiettivo

L’obiettivo dell’analisi consiste nella valutazione e nella successiva comparazione degli impatti associati alla produzione di quattro distinte tipologie di cemento. Le prime varietà sono quelle riferite al: cemento portland tradizionale con classe di resistenza 52,5 MPa, CEM I costituito per il 95% - 100% da clinker e dalla restante percentuale da costituente secondario (quantità di gesso tra lo 0% - 5%) [2]; cemento portland di tipo II con classe di resistenza 42,5 MPa, CEM II costituito per l’80%-94% da clinker, dal 6%-20% da calcare e dalla restante percentuale da gesso in quantità tra lo 0% e 5% [2].

La seconda tipologia è rappresentata dal cemento innovativo, ovvero cemento Portland che vede una percentuale di clinker sostituita da scorie EAF carbonatate, considerate come SCM. L'obiettivo primario del presente studio è la valutazione e il confronto degli impatti ambientali che derivano dai processi di produzione di queste quattro distinte tipologie di cemento. Nello specifico, l'analisi si propone di indagare gli impatti derivanti dalla sostituzione parziale del clinker con scorie carbonatate utilizzate come SCM. Le motivazioni dell'analisi risiedono, quindi, nella necessità di quantificare oggettivamente le variazioni nel profilo degli impatti ambientali del cemento innovativo, a ridotto contenuto di clinker, rispetto al cemento Portland CEM I e CEM II. Lo studio mira a esaminare gli effetti di tale sostituzione lungo la catena del valore all'interno del confine di sistema "cradle to gate", promuovendo l'utilizzo di materiale di scarto analizzando in questo modo la potenziale riduzione del consumo di risorse e delle emissioni legate alla fase di estrazione delle materie prime, e alle successive di produzione: frantumazione – macinazione – cottura – macinazione e aggiunta di gesso. Inoltre, l'analisi intende verificare il potenziale duplice beneficio ambientale derivante dall'utilizzo delle scorie carbonatate: oltre a dare valore a un sottoprodotto industriale, in un'ottica di economia circolare, e consentire una riduzione della produzione di clinker, le scorie assorbono CO₂ durante il loro processo di carbonatazione. L'uso di scorie carbonatate come materiale supplementare cementizio evita, quindi, di generare elevate emissioni di GHG derivanti dal processo di produzione del clinker e permette di diminuire la quantità di CO₂, "catturandola" durante il trattamento di carbonatazione, contribuendo alla riduzione degli impatti ambientali. Dal punto di vista metodologico, l'analisi impiega un approccio di tipo attribuzionale (attributional LCA), finalizzato a quantificare gli impatti ambientali direttamente associati ai flussi di materia ed energia, e alle emissioni rilasciate in aria, dei sistemi produttivi analizzati.

3.2 Definizione del campo di applicazione e sistemi a confronto

Funzione e unità funzionale: La funzione del sistema consiste nella fornitura di un legante idraulico per la produzione di calcestruzzi che soddisfino prestazioni tecniche richieste (di durabilità e sicurezza), raggiungendo specifiche classi di resistenza, in conformità alle normative vigenti UNI EN 196-1 [3] e 197-1 [2]. L'unità funzionale di riferimento adottata, a cui si legano i flussi di entrata e uscita, nell'analisi è stata scelta pari a 1 tonnellata [ton] di cemento prodotto e disponibile per la successiva distribuzione. Pertanto, in questo studio, l'unità funzionale è basata sulla massa del prodotto in esame e funge da riferimento quantitativo per le fasi successive. Si assume che le tipologie di cemento analizzate sono funzionalmente equivalenti a coppie per prestazioni meccaniche [4] e applicazione finale.

Le quattro tipologie di cemento analizzate vengono differenziate e confrontate a coppie sulla base delle rispettive classi di resistenza meccanica. Al fine di garantire il rigore del confronto, per ciascun cemento innovativo contenente scorie carbonatate è stato individuato un cemento di riferimento con caratteristiche prestazionali e applicazioni finali analoghe. Nello specifico, la validazione dell'equivalenza funzionale, per prestazioni meccaniche, si basa sulle evidenze sperimentali fornite dallo studio di Bonfante et al. (2025) [4], il quale ha dimostrato che:

- Classe di resistenza 52.5 MPa: il cemento con una sostituzione del 10% di clinker a favore delle scorie mantiene proprietà meccaniche equiparabili al benchmark CEM I 52.5 MPa.
- Classe di resistenza 42.5 MPa: il cemento che vede la sostituzione del 30% di clinker con scorie presenta un profilo di resistenza coerente con quello del benchmark CEM II 42.5 MPa.

Confini di sistema: Il confine di sistema adottato è “dalla culla al cancello”, “from cradle to gate”. Vengono analizzati in questo approccio: gli impatti che derivano dal processo di estrazione (culla) delle materie prime, il loro trasporto e le fasi della loro lavorazione, la produzione di energia elettrica, il consumo di acqua, le fasi di produzione della scoria carbonatata (per quanto riguarda il cemento innovativo), fino ad arrivare al cancello (gate) della produzione di cemento, ovvero fino al cancello del cementificio. Nello specifico, l'analisi ha riguardato le fasi del ciclo di vita dei cementi portland, CEM I e CEM II, e del cemento innovativo, articolate come segue:

- **CEMENTO PORTLAND:** produzione del cemento portland CEM I e cemento portland CEM II: • Estrazione e preparazione delle materie prime (frantumazione, macinazione e omogeneizzazione): calcare, argilla. • Trasporto delle materie prime al cementificio. • Produzione del clinker (compresa la calcinazione e la combustione del combustibile), componente principale, prodotto dalla cottura (fase maggiormente impattante). • Macinazione del clinker con aggiunta di gesso. • Imballaggio e carico del cemento al cancello dello stabilimento.
- **CEMENTO INNOVATIVO:** produzione del cemento a ridotto contenuto di clinker con addizione di scorie EAF carbonatate: • Estrazione e preparazione delle materie prime (frantumazione, macinazione e omogeneizzazione): calcare, argilla. • Trasporto delle materie prime al cementificio • Produzione del clinker in una quantità ridotta rispetto al cemento tradizionale, in quanto una percentuale del clinker vede la sostituzione da parte delle scorie carbonatate. • Produzione e preparazione delle scorie carbonatate SCM (processo di carbonatazione) a partire dal processo di produzione dell'acciaio (gestione dello scarto EAF). • Trasporto delle scorie al cementificio.

- Macinazione del clinker con aggiunta del materiale cementizio supplementare.
- Imballaggio e carico del cemento al cancello dello stabilimento.

Metodo di valutazione degli impatti: Per la fase di valutazione degli impatti è stato adottato il metodo EF 3.0 che indaga 16 diverse categorie di impatto riportate nel paragrafo 5.1.

4 | FASE 2: ANALISI DELL'INVENTARIO LCI

- Life Cycle Inventory -

L'Analisi di inventario del ciclo di vita, in conformità alla norma ISO 14044, costituisce la seconda fase metodologica della LCA. In questa fase, lo scopo è la raccolta di dati e la quantificazione di tutti i flussi di input e output associati ai due sistemi di produzione del cemento presi in esame [1]. I valori dei flussi sono rapportati all'unità funzionale e riferiti al confine di sistema stabiliti nella fase precedente: 1 tonnellata di cemento [ton] per un confine "dalla culla al cancello". L'inventario è stato modellato con il software OpenLCA v.2.5 [5] (GreenDelta, sede in Germania – Berlino) utilizzando il database ELCD v.3.2 [6] (European reference Life Cycle Database – database europeo di riferimento per il ciclo di vita). La raccolta dei dati dell'inventario è stata suddivisa, per tipologia di prodotto, in due scenari: il primo dato dalla produzione di 1 ton di cemento portland tradizionale CEM I costituito al 95% da clinker e cemento innovativo caratterizzato dalla sostituzione del 10% di clinke con SCM, il secondo dato dalla produzione di 1 ton di cemento portland CEM II costituito al 76,80 % da clinker e cemento innovativo caratterizzato dalla sostituzione del 30% di clinke con SCM.

4.1 Raccolta dati e fonti

Al fine della modellazione su software OpenLCA, dei due scenari analizzati, è stata utilizzata una combinazione di dati secondari e terziari.

Dati secondari: dati contenuti all'interno del database ELCD, integrato nel software, usati per modellare i flussi generici. Questi ultimi comprendono: la generazione di energia, il trasporto dei materiali, il consumo di acqua e i processi di estrazione e preparazione delle materie prime. L'uso di questi dati secondari garantisce la coerenza metodologica e l'utilizzo di valori medi di riferimento per l'ambiente europeo.

Dati terziari: dati provenienti dalla letteratura scientifica pubblicata e report specifici del settore cementizio pubblicati, usati per costruire l'inventario dei dati legati al processo di produzione del cemento. In particolare, per quanto riguarda i valori terziari, i dati riguardanti la produzione di cemento ricavati per l'inventario del presente studio sono ricavati dalle seguenti pubblicazioni:

- *“Corrosione delle armature in calcestruzzi con cementi eco-sostenibili”* tesi magistrale condotta da Cappello P. e Ghirotto A., 2014 [14].
- Studio *“Aqueous carbonation of EAF steel slag to produce Supplementary Cementitious Material: Effects on mineral composition, hydration reactivity and mechanical properties”* condotto da Bonfante F., Ferrara G., Humbert P., Garufi D., Tulliani J.M., Palmero P., 2025 [4].
- Studio *“CO₂ Sequestration Through Aqueous Carbonation of Electric Arc Furnace Slag”* condotto da Bonfante F., Ferrara G., Humbert P., Garufi D., Tulliani J.M., Palmero P., 2024 [8].
- *“Studio LCA della filiera del cemento”* condotto da Sposato P., Luciano A., Corrado S., Altamura P., Rinaldi C., 2022. Contenente: dati medi forniti da AITEC relativi agli anni 2019 e 2020, fattori di emissione medi nazionali per l'anno 2019 (ISPRA, 2019) relativi alla produzione di cemento, dati ambientali Buzzi Unicem per i consumi idrici per la produzione di cemento [18].
- *“Guida Operativa per il Settore di produzione del Cemento”* a cura di De Santis A. e Lavinia C., 2014 (ENEA) [16].
- Studio *“Water Use Efficiency Assessment of Cement Production Based on Life Cycle Analysis”* condotto da Liu J., Bai X., Kong L., Bai Y., 2025 [17].
- Studio *“Lea’s Chemistry of Cement and Concrete”* condotto da Hewlett P. C., & Liska, M., 2019 [19].

- “From laboratory to industrial scale: a scale-up framework for chemical processes in life cycle assessment studies”, condotto da Piccinno F., Hischier R., Seeger S., Som C., 2016 [9].
- EPD - dichiarazione ambientale di prodotto, Colacem. In accordo con ISO 14025:2006 e EN 15804:2012+A2:2019/AC:2021, 2024 [20].
- EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook - Technical guidance to prepare national emission inventories, 2023 [22].

4.2 Assunzioni e modellazione del cemento innovativo con basso TRL

In merito alla modellazione dell'inventario, necessario per il confronto tra il cemento portland (CEM I e CEM II) e il cemento innovativo con scorie EAF carbonatate, sono state adottate determinate assunzioni metodologiche e numeriche. Tali assunzioni sono state necessarie al fine di colmare il divario del livello di maturità tecnologica (TRL - Technology Readiness Level) tra i processi produttivi maturi, come la produzione del clinker, e le nuove tecnologie innovative in fase di sviluppo. Il processo di produzione del portland, infatti, è un processo industriale tecnologicamente maturo e ampiamente documentato, con dati specifici disponibili sia in letteratura sia a livello primario di impianto del settore. Diversamente da quest'ultimo processo, il ciclo produttivo di carbonatazione acquosa della scoria EAF finalizzato a produrre materiale cementizio supplementare risulta attualmente in una posizione di basso TRL in quanto la maturità della tecnologia è in fase di ricerca e sviluppo sperimentale [7]. Tale processo produttivo, al momento della stesura dell'analisi LCA, è stato dimostrato principalmente su piccola scala funzionale e prevalentemente confinato alla ricerca di laboratorio. Conseguentemente non esistono dati primari di settore rapportati a grandi unità funzionali per i consumi energetici, idrici e per l'efficienza di cattura della CO₂ associati a questo processo. Tutti i dati relativi alla fase di carbonatazione acquosa e preparazione del SCM sono dati terziari basati sulla letteratura e scalati direttamente all'unità funzionale di riferimento. Tale assunzione metodologica è necessaria per valutare il potenziale impatto ambientale futuro derivante dall'utilizzo di questo materiale innovativo. Come riportato all'interno delle tabelle n. 5-8, per la modellazione dell'inventario del cemento innovativo sono state adottate le seguenti assunzioni quantitative:

1] Percentuale di sostituzione del clinker: è stata assunta una sostituzione del 10% del clinker con scorie EAF carbonatate, nello scenario A, e del 30% nello scenario B [4]. La composizione del cemento vede quindi: l'85% di clinker, 10% di materiale cementizio supplementare, 5% di aggiunta di gesso nel primo scenario e il 46,7% di clinker, 30% di SCM, 18,36% di calcare, 5% di gesso

relativamente al secondo scenario. Tali valori percentuali di sostituzione sono stati scelti tenendo in considerazione i risultati sperimentali riportati nello studio di Bonfante et al. (2025) [4]. Lo studio ha infatti dimostrato che l'integrazione di scoria d'acciaio, sottoposta a carbonatazione acquosa, come SCM permette di mantenere prestazioni meccaniche analoghe a quelle dei cementi di riferimento, che non vedono l'integrazione della scoria, all'interno delle rispettive classi di resistenza. Nello specifico, i test di resistenza a compressione hanno confermato che, nonostante la riduzione del contenuto di clinker, l'impiego della scoria EAF carbonatata garantisce il raggiungimento di parità di prestazioni meccaniche equivalenti ai cementi tradizionali di pari grado, ovvero il CEM I 52,5 per la sostituzione al 10% e il CEM II 42,5 per quella al 30%. Questo risultato valida la confrontabilità tra i processi di produzione analizzati nell'ambito di questa analisi LCA.

2] CO₂ catturata da processo di carbonatazione: l'efficienza di sequestro della CO₂ da parte della scoria EAF tramite carbonatazione acquosa rappresenta il dato più critico per l'analisi LCA. Per la modellazione dei dati di inventario, si è assunto il tasso di cattura del 7,9% in peso di CO₂ per tonnellata di scoria EAF secca [79 kgCO₂/tonscoria] [8]. Questo valore è stato assunto per rappresentare il massimo potenziale ambientale della tecnologia innovativa in condizioni operative ottimizzate. Data l'unità funzionale definita come 1 ton (che richiede 0,092 ton di scoria EAF in input per ottenere un output di 0,1 ton di SCM carbonatata per lo scenario A; e 0,278 ton in input per ottenere 0,3 ton in output per lo scenario B, dove la massa finale di SCM, Massa SCM_{finale}, è data dalla somma della massa della scoria EAF e della massa di CO₂ catturata), la massa di CO₂ sequestrata e sottratta all'atmosfera è quantificata in 7,32 kg e 21,96 kg, rispettivamente. Questo sequestro è di natura permanente, in quanto la CO₂ è fissata nella struttura stabile del carbonato di calcio. La tabella n.6 riporta i dati specifici per la cattura di CO₂ nel processo di carbonatazione per entrambi gli scenari analizzati:

Tab. 6. - Assunzioni adottate per la cattura di CO₂ da processo di carbonatazione acquosa

	FORMULA DI CALCOLO	VALORE	UNITÀ
Unità funzionale del cemento innovativo		1	ton
Quantità finale SCM (output del processo di carbonatazione)	1 ton cemento x 10% [scenario A] 1 ton cemento x 30% [scenario B]	0,1 0,3	ton _{SCM}
Tasso di cattura CO ₂ per ton di scoria grezza	7,9%	79,0	kgCO ₂ /ton _{Scoria}
Quantità scoria grezza (input del processo di carbonatazione)	MassaSCM/ (1 + 0,079) [scenario A] MassaSCM/ (1 + 0,079) [scenario B]	0,092 0,278	ton _{Scoria}
CO ₂ catturata	0,092 tonsoria x 79 kgCO ₂ /tonscoria [A] 0,278 tonsoria x 79 kgCO ₂ /tonscoria [B]	7,32 21,96	kgCO ₂

3] Consumi energetici specifici per processo di carbonatazione: Al fine di stimare l'inventario energetico relativo alla carbonatazione della scoria EAF, è stata adottata la metodologia di scale-up proposta da Piccinno et al. (2016) [9]. Tale approccio consente di convertire i parametri ottenuti a bassi livelli di maturità tecnologica verso una dimensione industriale, correggendo i consumi teorici con coefficienti di efficienza tipici dei processi mineralogici su larga scala [9]. Questo passaggio è stato effettuato per colmare il divario tra i dati sperimentali di laboratorio e la realtà di un cementificio. Sebbene i dati di riferimento siano dati di laboratorio [4], i consumi energetici siano stati riportati in tabella n.6 e scalati alla scala industriale con le seguenti assunzioni quantitative:

- *Energia elettrica (macinazione):* adottando l'utilizzo di un mulino a sfere per raggiungere una finezza minore di 63 micron [4] è stato assunto un consumo elettrico di 165 kWh/ton_{scoria}, il dato permette di tenere in considerazione l'elevato indice di macinabilità delle scorie di acciaio, rispetto a quello del clinker tradizionale, se trattate in sistemi produttivi industriali [10]. Scalando sull'input del caso studio (0,092 ton_{scoria} e 0,278 ton_{scoria}), i consumi totali di elettricità per il processo di macinazione adottato sono pari a 15,18 kWh e 46 kWh.

- *Energia elettrica (carbonatazione):* il processo di carbonatazione acquosa diretta è stato modellato come un sistema a bassa intensità energetica, promuovendo l'uso di temperatura e pressione ambiente [4]. L'energia necessaria per il pompaggio della CO₂ è stata stimata in 12 kWh/ton_{scoria}, considerando modelli di reattori industriali a cisterna agitata (STR – Stirred Tank Reactor) per il sequestro minerale [11]. Scalando sull'input del caso studio (0,092 ton_{scoria} e 0,278 ton_{scoria}), i consumi totali di elettricità per il processo di carbonatazione sono pari a 1,10 kWh e 3 kWh.

- *Energia elettrica (centrifugazione):* per quanto riguarda la separazione solido-liquido post carbonatazione [4], è stato considerato un consumo di 8 kWh/ton_{scoria}, coerente con le prestazioni di decanter centrifughi industriali a ciclo continuo [11]. Scalando sull'input del caso studio (0,092 ton_{scoria} e 0,278 ton_{scoria}), i consumi totali di elettricità per il processo di centrifugazione sono pari a 0,74 kWh e 2 kWh.

- *Energia termica (essiccazione):* il trattamento termico a 60 °C per la durata di 24h per la rimozione dell'umidità residua [4] è stato tradotto in un fabbisogno energetico di 95 MJ/ton_{scoria} [12]. Tale calore può essere recuperato dai flussi termici residui dell'impianto di produzione del clinker minimizzando l'impatto ambientale netto del trattamento [4] [12]. Scalando sull'input del caso studio (0,092 ton_{scoria} e 0,278 ton_{scoria}), i consumi totali di energia termica per il processo di

essiccazione sono pari a 8,74 MJ e 26 MJ.

Tab. 7. - Assunzioni adottate per i consumi energetici da processo di carbonatazione

CONSUMI ENERGETICI			
		Fonte	Input analisi LCA scoria
Energia elettrica (macinazione)	165 kWh/ton _{scoria}	Tsakiridis P., et al (2008) [10]	15,18 kWh [A] 46 kWh [B]
Energia elettrica (carbonatazione)	12 kWh/ton _{scoria}	Huijgen WJ., et al (2006) [11]	1,10 kWh [A] 3 kWh [B]
Energia elettrica (centrifugazione)	8 kWh/ton _{scoria}	Huijgen WJ., et al (2006) [11]	0,74 kWh [A] 2 kWh [B]
Energia Termica (essiccazione)	95 MJ/ton _{scoria}	Biava G., et al (2024) [12]	8,74 MJ [A] 26 MJ [B]

4] Consumi di acqua processo di carbonatazione – rapporto liquido/solido: Per il consumo della quantità di acqua, utilizzata come solvente per la reazione nel processo di carbonatazione, si è adottato un rapporto liquido/solido pari a 3, come specificato dalle condizioni sperimentali di laboratorio da Bonfante et al. (2025) [4] (tre parti di liquido, acqua, e una parte di solido, scoria). Scalando il rapporto L/S sull’input di scoria grezza del processo (0,092 ton_{scoria} e 0,278 ton_{scoria}), il consumo di acqua totale del sistema è riportato in tabella n.8.

Tab.8. - Assunzioni adottate per il consumo di acqua da processo di carbonatazione

CONSUMO ACQUA			
	Liquido (acqua)	Solido (scoria grezza – input materia prima)	Fonte (rapporto L/S)
Rapporto liquido/solido di 3	0,276 m ³ [A] 0,834 m ³ [B]	0,092 ton _{scoria} [A] 0,278 ton _{scoria} [B]	Bonfante et al. (2025) [4]

5] Trasporto delle scorie: per quanto riguarda la modellazione della fase logistica, avente un input energetico e emissivo, è stata assunta una distanza media di trasporto per le scorie EAF non trattate dal sito di produzione siderurgico EAF al cementificio, dove affronteranno il processo di

di carbonatazione acquosa, pari a 120 km **[13]**, come riportato in tabella n.9. Tale assunzione riflette un'ipotesi spaziale realistica in quanto presuppone che i siti di produzione, di acciaio e cemento, siano prossimi geograficamente simulando un sistema industriale integrato. I carichi ambientali associati a questo trasporto, calcolati in ton*km tenendo conto delle 0,1 ton e 0,3 ton di scoria per unità funzionale, sono stati quantificati utilizzando i dati specifici sul consumo di carburante e sui fattori di emissione del trasporto su gomma disponibili nel database ELCD, garantendo la tracciabilità e la standardizzazione del processo.

Tab. 9. - Assunzioni adottate per il trasporto della scoria EAF

TRASPORTO SU GOMMA		
	Distanza	Fonte
Distanza di trasporto	120 km	Blengini G.A. et al, (2019) [13]

La tabella n.10, riassuntiva, riporta le assunzioni effettuate riguardanti la scoria carbonatata e le fonti da cui sono state ricavate.

Tab. 10. - Assunzioni adottate per il processo di produzione del cemento innovativo e il processo di produzione scoria carbonatata

TABELLA RIASSUNTIVA			
	Assunzione quantitativa	Metodologia	Fonte
1	Percentuale Sostituzione Clinker (10% e 30%)	Parità di prestazioni meccaniche	Bonfante F. et al., (2025) [4]
2	Tasso di cattura di CO ₂ (79kgCO ₂ /ton _{scoria})	Assorbimento medio di CO ₂	Bonfante F. et al., (2024) [8]
3.1	Consumo energia elettrica (macinazione)	Assunzione utilizzo mulino a sfere	Tsakiridis P., et al, (2008) [10]
3.2	Consumo energia elettrica (carbonatazione)	Assunzione modelli di reattori industriali a cisterna agitata	Huijgen WJ., et al, (2006) [11]
3.3	Consumo energia elettrica (centrifugazione)	Assunzione decanter centrifughi industriali a ciclo continuo	Huijgen WJ., et al, (2006) [11]
3.4	Consumo energia termica (essiccazione)	Assunzione trattamento termico per la rimozione umidità residua	Biava G., et al (2024) [12]
4	Consumo acqua	Assunzione consumo di acqua per un rapporto Liquido/Solido di 3	Bonfante F., et al, (2025) [4]
5	Trasporto Scorie EAF non trattata	ipotesi di sistema industriale integrato (prossimità acciaieria-cementificio)	Blengini G.A., et al, (2019)

4.3 Gestione della multifunzionalità e allocazione della la scoria EAF

L'analisi del cemento innovativo introduce la problematica della multifunzionalità nel presente studio, poiché la scoria EAF carbonatata utilizzata come SCM è un sottoprodotto [4] derivante dal processo industriale primario di produzione dell'acciaio. La produzione di acciaio tramite forno ad arco elettrico genera, quindi, simultaneamente due prodotti utili: l'acciaio stesso, che rappresenta il prodotto principale, e la scoria, derivante dal processo primario, definita come sottoprodotto destinato al riutilizzo in un'ottica di economia circolare. Per la gestione della multifunzionalità, si è applicata l'Allocazione Zero (Zero Burden), seguendo l'approccio metodologico del "cut-off" [1]. In questo modo la scoria EAF viene considerata come un sottoprodotto o uno scarto che sarebbe destinato allo smaltimento e non al riuso. Questo approccio considera lo scarto dal momento in cui diventa tale. Infatti, la presente analisi LCA non tiene conto degli stadi e processi che lo hanno generato. Per massimizzare il beneficio derivante dal riutilizzo in un'ottica di economia circolare si è assunto che il 100% dei carichi ambientali associati al processo siderurgico EAF (consumi energetici/idrici, estrazione e uso materie prime, e le relative emissioni) sia attribuito completamente al prodotto principale, ovvero all'acciaio. Di conseguenza, l'inventario della scoria EAF nel sistema del cemento innovativo inizia a seguito della sua generazione nel forno EAF. Gli unici carichi ambientali imputati direttamente alla scoria sono quelli relativi al suo trasporto, assunto su 120 km [13], e ai successivi processi di preparazione e trattamento della carbonatazione acquosa e prodotto SCM. Tale scelta metodologica garantisce che l'analisi rifletta correttamente il beneficio ambientale derivante dal recupero di un sottoprodotto industriale, in linea con l'obiettivo dello studio di identificare soluzioni a ridotto impatto ambientale.

4.4 Diagrammi di flusso

I dati d'inventario, riportati nel seguente paragrafo, sono stati utilizzati per la realizzazione del modello LCA. Di seguito, nelle figure n. 7 e n. 8, sono riportati i diagrammi di flusso realizzati per le diverse tipologie di cemento: la figura n. 7 descrive il ciclo produttivo relativo ai cementi portland, CEM I e CEM II, mentre la figura n. 8 rappresenta il sistema di produzione dei cementi innovativi, integrando la fase di carbonatazione della scoria EAF.

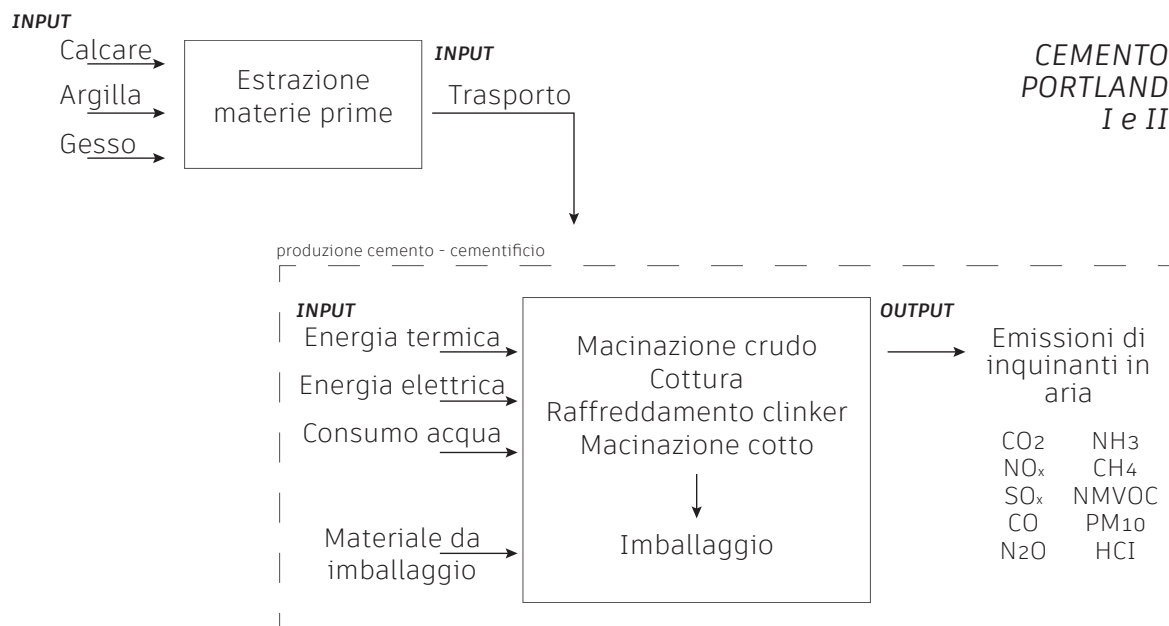


Figura 7. - Produzione cementi Portland (I e II) – Diagramma di flusso

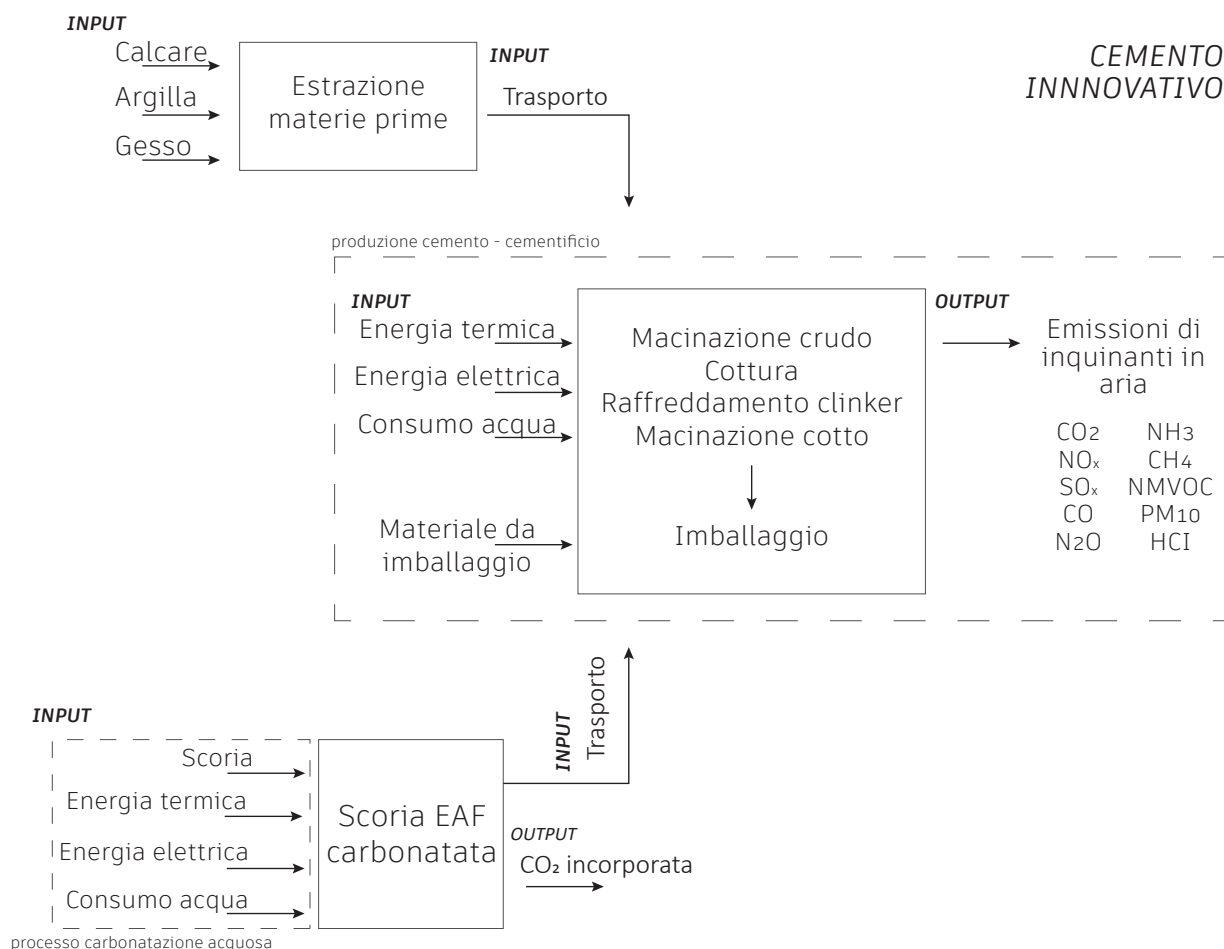


Figura 8. - Produzione cementi innovativi– Diagramma di flusso

4.5 LCI: flussi in ingresso e flussi in uscita

L'Analisi di inventario del ciclo di vita (LCI) è stata modellata attraverso la quantificazione dei flussi di input (materie prime, energia, acqua, trasporto) e di output (emissioni in aria) associati alla produzione dell'unità funzionale, 1 ton di cemento, per entrambi gli scenari. Di seguito si riporta l'inventario per i due scenari a confronto: cemento Portland, CEM I con resistenza 52,5 MPa - CEM_{innovativo} con sostituzione del clinker al 10% (Scenario A) e cemento Portland, CEM II con resistenza 42,5 MPa - CEM_{innovativo} con sostituzione del clinker al 30% (Scenario B).

SCENARIO A

CEM I, RESISTENZA 52,5 MPa – CEM INNOVATIVO CON 10% DI SOSTITUZIONE CLINKER CON SCORIA CARBONATA

• *Inventario del cemento portland CEM I con presenza di clinker al 95% e resistenza 52,5 MPa*

L'inventario rappresenta la raccolta dati per la produzione di 1 tonnellata di cemento Portland CEM I, composto al 95% da clinker e al 5% da gesso [2].

La tabella n.11 presenta l'inventario dei flussi di materie prime in ingresso. I dati raccolti quantificano in modo specifico l'input di calcare (1,146 ton) e argilla (0,279 ton) per la produzione di clinker [14].

Tab. 11. - Dati d'inventario per la produzione di 1 ton di cemento portland CEM I, resistenza 52,5 MPa – *Input materie prime*

MATERIE PRIME - INPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
Calcare (estrazione per la produzione di clinker)	1,146	ton	Limestone, in ground	Cappello P., Ghirotto A., (2014) [14]
Argilla (estrazione per la produzione di clinker)	0,279	ton	Clay, in ground	Cappello P., Ghirotto A., (2014) [14]
Gesso	0,05	ton	Gypsum, in ground	Cappello P., Ghirotto A., (2014) [14]

La tabella n.12 presenta il consumo di energia sotto forma di calore. L'energia termica è impiegata principalmente nella fase ad alta intensità energetica della cottura del clinker (si raggiunge una temperatura di 1450 °C) [15], e i dati riportano l'utilizzo significativo di carbone (fossile e petcoke) (3.026,7 MJ), olio combustibile denso (103,07 MJ) e metano (46,17MJ) e combustibile non convenzionale CCS (376,58) [16].

Tab. 12. - Dati d'inventario per la produzione di 1 ton di cemento portland CEM I, resistenza 52,5 MPa – *Input consumo energia termica per 0,95 t clinker*

CONSUMO RISORSE ENERGETICHE - ENERGIA TERMICA - INPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
Carbone (fossile e petcoke)	3.026,7	MJ	Hard coal	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Olio combustibile denso	103,07	MJ	Heavy oil	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Metano	46,17	MJ	Methane	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Combustibile non convenzionale (CCS)	376,58	MJ	Secondary fuel renewable	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Totale:	3.552,52	MJ		

La tabella n.13 riporta il consumo di energia elettrica totale di 110 kWh, distinto per le varie sotto-fasi del processo di produzione del cemento. Le cifre indicano il fabbisogno energetico per: la macinazione del crudo (30,8 kWh), la cottura del clinker (24,4 kWh), macinazione del cotto (41,8 kWh) e altre attività per la produzione di cemento (13,2 kWh) [16].

Tab. 13. - Dati d'inventario per la produzione di 1 ton di cemento portland CEM I, resistenza 52,5 MPa – *Input consumo energia elettrica per 0,95 t clinker*

CONSUMO RISORSE ENERGETICHE - ENERGIA elettrica - INPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
Macinazione del crudo (compresa essiccazione materiale grezzo/clinker)	30,8	kWh	Electricity mix	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Cottura del clinker	24,4	kWh	Electricity mix	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Macinazione del cotto	41,8	kWh	Electricity mix	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]

Altro (ventilatori, riscaldamento del combustibile...)	13,2	kWh	Secondary fuel renewable	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Totale:	110	kWh		

In tabella n.14 è riportato il consumo di acqua. Il dato quantifica l'input idrico per la produzione di 0,95 ton di clinker in 0,240 m³ [17] rappresentando l'acqua consumata prelevata da fonti non specificate.

Tab. 14. - Dati d'inventario per la produzione di 1 ton di cemento portland CEM I, resistenza 52,5 MPa – Input consumo di acqua.

CONSUMO RISORSE NON ENERGETICHE - CONSUMO DI ACQUA - INPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
Acqua (produzione clinker)	0,240	m ³	Water, process, unspecified natural origin	Liu J., et. al, (2025) [17]

In tabella n.15 viene riportato l'inventario di output delle emissioni in aria. Nello specifico, i dati raccolti indicano un'emissione di CO₂ suddivisa in una quota derivante dal processo di calcinazione (480 kg) e una prodotta dalla combustione (290 kg), per un totale di 770 kg di CO₂ rilasciata [18].

Tab. 15. - Dati d'inventario per la produzione di 1 ton di cemento portland CEM I, resistenza 52,5 MPa – Output emissioni in aria.

EMISSIONI IN ARIA - OUTPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
CO ₂ Anidride carbonica (calcinazione)	480	kg	Carbon dioxide	Sposato P., et. al, (2022) [18]
CO ₂ Anidride carbonica (combustibile)	290	kg	Carbon dioxide	Sposato P., et. al, (2022) [18]
NO _x (Ossidi di azoto)	0,988	kg	Nitrogen oxides	Sposato P., et. al, (2022) [18]

SO _x (Ossidi di zolfo)	0,113	kg	Sulfur oxides	Sposato P., et. al, (2022) [18]
CO (Monossido di carbonio)	0,988	kg	Carbon monoxide	Sposato P., et. al, (2022) [18]
N ₂ O (protossido di azoto)	0,065	kg	Dinitrogen monoxide	Sposato P., et. al, (2022) [18]
NH ₃ (Ammoniaca)	0,043	kg	Ammonia	Sposato P., et. al, (2022) [18]
CH ₄ (Gas metano)	0,028	kg	Methane	Sposato P., et. al, (2022) [18]
NMVOC (Composti organici volatili non metanici)	0,028	kg	NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Sposato P., et. al, (2022) [18]
Particolato PM10	0,006	kg	Particulates < 10um	Sposato P., et. al, (2022) [18]
HCl (Acido cloridrico)	0,005	kg	Hydrochloric acid	Sposato P., et. al, (2022) [18]

I dati relativi ai trasporti riguardano le distanze percorse per il trasferimento delle materie prime al cementificio, per l'analisi si è assunta la distanza di 120 km **[13]**. Le operazioni di trasporto di queste ultime comprendono il loro trasferimento dal luogo di estrazione al sito di produzione del cemento mediante autocarri su gomma. Inoltre per quanto riguarda la tipologia di imballaggio si è assunto il formato standard del sacco da 50 kg, rapportando il dato all'unità funzionale si ottengono 20 sacchi per tonnellata di cemento. Si è assunto un peso medio di 0,20 kg di materiale da imballaggio per sacco (plastica) per sacco da 50 kg **[19]**. I dati sono riportati in tabella n.16.

Tab. 16. - Dati d'inventario per la produzione di 1 ton di cemento portland CEM I, resistenza 52,5 MPa – Input trasporto e materiale imballaggio

TRASPORTO - MATERIALE IMBALLAGGIO - INPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
Trasporto materie prime	177	tkm	Transport in t*km	Blengini G.A. et al. (2019) [13]
Materiale da imballaggio	4,0	kg	Packaging waste, plastic	Hewlett P., et al. (2019) [19]

• **Inventario del CEMENTO innovativo con sostituzione del 10% di clinker con scoria d'acciaio carbonatata – Inventario processo di carbonatazione acquosa**

L'inventario rappresenta la raccolta dati per la produzione di 1 tonnellata di cemento innovativo, composto all' 85% da clinker, da 10% di scorie carbonatate e al 5% da gesso. I flussi relativi alla quota di clinker presente nel cemento innovativo sono stati calcolati attraverso i dati del CEM I mediante un'allocazione di massa. Nello specifico, il dato d'inventario del CEM I è stato diviso per 0,95 per isolare l'impatto riferito alla singola unità di clinker (essendone il CEM I composto al 95%); il valore così ottenuto è stato successivamente moltiplicato per 0,85, corrispondente alla percentuale di clinker presente nel cemento innovativo. Oltre all'inventario di quest'ultimo, di seguito vengono riportate le tabelle d'inventario del processo di carbonatazione acquosa necessaria per modellazione del processo di produzione del cemento innovativo totale.

La tabella n.17 riporta l'inventario delle materie prime in ingresso. La principale differenza rispetto alla produzione di CEM I è la riduzione dell'estrazione di calcare (1,025 ton) e argilla (0,250 ton), direttamente collegata alla minor quantità di clinker da produrre.

Tab. 17. - Dati d'inventario per la produzione di 1 ton di cemento innovativo, CEM_{innovativo} – 10% – Input materie prime

MATERIE PRIME - INPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
Calcare (estrazione per la produzione di clinker)	1,025	ton	Limestone, in ground	Cappello P., Ghirotto A., (2014) [14]
Argilla (estrazione per la produzione di clinker)	0,250	ton	Clay, in ground	Cappello P., Ghirotto A., (2014) [14]
Gesso	0,05	ton	Gypsum, in ground	Cappello P., Ghirotto A., (2014) [14]
Scoria EAF carbonatata	0,10	ton	Creazione processo scoria carbonatata	Bonfante F., et al. (2025) [4]

In tabella n.18 viene rappresentato il consumo di risorse energetiche per la produzione di calore (esclusa l'elettricità). Il confronto con la Tabella n.11 mostra una diminuzione nei consumi di

carbone (2.708,1 MJ) e degli altri combustibili fossili, riflettendo la minore richiesta di energia termica per la cottura di una quantità ridotta di clinker.

Tab. 18. - Dati d'inventario per la produzione di 1 ton di cemento innovativo, CEM_{innovativo} – 10% – *Input consumo energia termica per 0,85 t clinker*

CONSUMO RISORSE ENERGETICHE - ENERGIA TERMICA - INPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
Carbone (fossile e petcoke)	2.708,1	MJ	Hard coal	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Olio combustibile denso	92,22	MJ	Heavy oil	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Metano	41,31	MJ	Methane	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Combustibile non convenzionale (CCS)	336,94	MJ	Secondary fuel renewable	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Totale:	3.178,6	MJ		

La tabella n.19 dettaglia il consumo di energia elettrica per la produzione di cemento innovativo. Similmente all'energia termica, indicata nella Tabella n. 17, si osserva una riduzione dei consumi elettrici nelle fasi di macinazione del crudo (27,6 kWh) e cottura del clinker (21,8 kWh), dovuta alla riduzione dell'uso di materie prime e alla minor quantità di clinker prodotta. L'inventario elettrico è di 104 kWh totali.

Tab. 19. - Dati d'inventario per la produzione di 1 ton di cemento innovativo, CEM_{innovativo} – 10% – – *Input consumo energia elettrica*

CONSUMO RISORSE ENERGETICHE - ENERGIA elettrica - INPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
Macinazione del crudo (compresa essiccazione materiale grezzo/clinker)	27,6	kWh	Electricity mix	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Cottura del clinker	21,8	kWh	Electricity mix	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Macinazione del cotto	41,8	kWh	Electricity mix	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Altro (ventilatori, riscaldamento del combustibile...)	13,2	kWh	Secondary fuel renewable	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]

Totale:	104	kWh
---------	-----	-----

La tabella n.20 riporta i consumi di acqua per la produzione del cemento innovativo. Il dato complessivo riflette la diminuzione del fabbisogno idrico legato alla minor produzione di clinker, ma evidenzia anche l’acqua necessaria per il trattamento del SCM.

Tab. 20. - Dati d’inventario per la produzione di 1 ton di cemento innovativo, CEMinnovativo – 10% – *Input consumo di acqua*

CONSUMO RISORSE NON ENERGETICHE - CONSUMO DI ACQUA - INPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
Acqua (produzione clinker)	0,21	m ³	Water, process, unspecified natural origin	Liu J., et. al, (2025) [17]

La tabella n.21 riporta le emissioni in aria in uscita.

Tab. 21. - Dati d’inventario per la produzione di 1 ton di cemento innovativo, CEMinnovativo – 10% – *Output emissioni in aria.*

EMISSIONI IN ARIA - OUTPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
CO ₂ Anidride carbonica (calcinazione)	429	kg	Carbon dioxide	Sposato P., et. al, (2022) [18]
CO ₂ Anidride carbonica (combustibile)	259	kg	Carbon dioxide	Sposato P., et. al, (2022) [18]
NO _x (Ossidi di azoto)	0,884	kg	Methane	Sposato P., et. al, (2022) [18]
SO _x (Ossidi di zolfo)	0,101	kg	Sulfur oxides	Sposato P., et. al, (2022) [18]
CO (Monossido di carbonio)	0,884	kg	Carbon monoxide	Sposato P., et. al, (2022) [18]
N ₂ O (protossido di azoto)	0,058	kg	Dinitrogen monoxide	Sposato P., et. al, (2022) [18]

NH ₃ (Ammoniaca)	0,038	kg	Ammonia	Sposato P., et. al, (2022) [18]
CH ₄ (Gas metano)	0,025	kg	Methane	Sposato P., et. al, (2022) [18]
NMVOC (Composti organici volatili non metanici)	0,025	kg	NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Sposato P., et. al, (2022) [18]
Particolato PM10	0,005	kg	Particulates < 10um	Sposato P., et. al, (2022) [18]
HCl (Acido cloridrico)	0,004	kg	Hydrochloric acid	Sposato P., et. al, (2022) [18]

I dati relativi ai trasporti e al materiale da imballaggio sono i medesimi utilizzati per il cemento portland, ovvero una distanza dal punto di estrazione al cementificio di 120 km **[13]** e una massa di 0,20 kg **[19]** di materiale da imballaggio per sacco. Inoltre per tale produzione è stato aggiunto il dato relativo al trasporto su gomma della scoria EAF al cementificio.

Tab. 22. - Dati d'inventario per la produzione di 1 ton di cemento innovativo, CEM_{innovativo} – 10% – *Input trasporto e materiale imballaggio*

TRASPORTO - MATERIALE IMBALLAGGIO - INPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
Trasporto materie prime	159	tkm	Transport in t*km	Blengini G.A. et al. (2019) [13]
Materiale da imballaggio	4,0	kg	Packaging waste, plastic	Hewlett P., et al. (2019) [19]
Trasporto scoria EAF	12	tkm	Transport in t*km	Blengini G.A. et al. (2019) [13]

• Processo di CARBONATAZIONE ACQUOSA

L'Inventario per la produzione della scoria EAF carbonatata (output SCM) è modellato come un processo indipendente all'interno del software OpenLCA. Tale scelta metodologica permette di quantificare separatamente i carichi ambientali, di energia e acqua, e i benefici, sequestro di CO₂, prima che il prodotto finale SCM sia immesso come input di materia prima nel processo di

produzione del cemento innovativo. Le assunzioni adottate nel seguente inventario sono riportate nel precedente paragrafo 4.2. Inoltre la CO₂ usata nel processo è considerata come prelevata da un sistema secondario. Pertanto, la CO₂ non catturata non è considerata una nuova emissione generata dal processo di carbonatazione, ma è CO₂ che è stata immessa in ricircolo e rilasciata nuovamente nello stesso ciclo atmosferico/industriale. Tale inventario viene riportato nelle tabelle n.23, con i dati relativi ai flussi in input, e n.24, con i dati di output.

Tab. 23. - Dati d’inventario per la produzione di 0,01 ton di scoria carbonatata – *Input processo di carbonatazione*

PROCESSO DI CARBONATAZIONE - INPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
Scoria EAF grezza (materia prima a impatto zero)	0,092	ton	Creazione flusso scoria EAF	Bonfante F., et al. (2025) [4]
Acqua	0,276	m ³	Water, unspecified natural origin	Bonfante F., et al. (2025) [4]
CO ₂ (Totale immessa nell’impianto)	92,66	kg	Carbon dioxide	Bonfante F., et al. (2025) [4]
Energia elettrica (macinazione)	15,18	kWh	Electricity mix	Tsakiridis P., et al, (2008) [10]
Energia elettrica (centrifuga)	0,74	kWh	Electricity mix	Huijgen WJ., et al, (2006) [11]
Energia elettrica (carbonatazione)	1,10	kWh	Electricity mix	Huijgen WJ., et al, (2006) [11]
Energia termica (essiccazione)	8,74	kWh	Thermal energy	Biava G., et al (2024) [12]
Trasporto scoria carbonatata (SCM)	12	tkm	Transport in t*km	Blengini D., et al, (2019) [13]

Tab. 24. - Dati d’inventario per la produzione di 0,01 ton di scoria carbonatata – *Output processo di carbonatazione*

PROCESSO DI CARBONATAZIONE - OUTPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
Scoria EAF carbonatata (SCM)	0,1	ton	Creazione flusso SCM	Bonfante F., et al. (2025) [4]
CO ₂ (catturata nel processo)	-7,32	kg	Carbon dioxide	Bonfante F., et al. (2025) [4]

Nei seguenti paragrafi vengono riportate le tabelle di inventario relative allo scenario B. La metodologia di costruzione dell'inventario è analoga a quella esposta per lo scenario A, differenziandosi tuttavia per la configurazione dei sistemi produttivi esaminati: i dati di riferimento sono relativi al cemento portland CEM II con classe di resistenza 42,5 MPa, mentre il sistema di produzione del cemento innovativo vede una sua parte di clinker sostituita al 30% con scoria EAF carbonatata.

SCENARIO B

CEM I, RESISTENZA 42,5 MPa – CEM INNOVATIVO CON 30% DI SOSTITUZIONE CLINKER CON SCORIA CARBONATA

• *Inventario del cemento portland CEM II con presenza di clinker al 76,8% e resistenza 42,5 MPa*

L'inventario rappresenta la raccolta dati per la produzione di 1 tonnellata di cemento Portland CEM II, composto al 76,8% da clinker, al 18,36% da calcare e al 5% da gesso [2].

La tabella n.25 presenta l'inventario dei flussi di materie prime in ingresso. I dati raccolti quantificano in modo specifico l'input di calcare (0,950 ton), argilla (0,245 ton) [20] per produzione di clinker e di calcare (filler – 0,181 ton) [20].

Tab. 25. - Dati d'inventario per la produzione di 1 ton di cemento portland CEM II, resistenza 42,5 MPa – *Input materie prime*

MATERIE PRIME - INPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
Calcare (estrazione per la produzione di clinker)	0,950	ton	Limestone, in ground	EPD Colacem, (2024) [20]
Argilla (estrazione per la produzione di clinker)	0,245	ton	Clay, in ground	EPD Colacem, (2024) [20]
Gesso	0,05	ton	Gypsum, in ground	EPD Colacem, (2024) [20]
Calcare (filler)	0,181	ton	Limestone, in ground	EPD Colacem, (2024) [20]

La tabella n.26 presenta il consumo di risorse termiche. I dati riportano l'utilizzo significativo di carbone (fossile e petcoke) (2.324,5 MJ), olio combustibile denso (79,2 MJ) e metano (35,5 MJ) e combustibile non convenzionale CCS (289,21) [16].

Tab. 26. - Dati d'inventario per la produzione di 1 ton di cemento portland CEM II, resistenza 42,5 MPa – *Input, consumo energia termica per 0,768 t clinker*

CONSUMO RISORSE ENERGETICHE - ENERGIA TERMICA - INPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
Carbone (fossile e petcoke)	2.324,5	MJ	Hard coal	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Olio combustibile denso	79,2	MJ	Heavy oil	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Metano	35,5	MJ	Methane	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Combustibile non convenzionale (CCS)	289,21	MJ	Secondary fuel renewable	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Totale:	2.728,3	MJ		

La tabella n.27 riporta il consumo di energia elettrica totale di 100,1 kWh, distinto per le varie sotto-fasi del processo di produzione del cemento. Le cifre indicano il fabbisogno energetico per: la macinazione del crudo (23,7 kWh), la cottura del clinker (18,7 kWh), la macinazione del cotto (44,5kWh) [21] e altre attività per la produzione di cemento (13,2 kWh) [16].

Tab. 27. - Dati d'inventario per la produzione di 1 ton di cemento portland CEM II, resistenza 42,5 MPa – *Input consumo energia elettrica*

CONSUMO RISORSE ENERGETICHE - ENERGIA elettrica - INPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
Macinazione del crudo (compresa essiccazione materiale grezzo/clinker)	23,7	kWh	Electricity mix	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Cottura del clinker	18,7	kWh	Electricity mix	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Macinazione del cotto	44,5	kWh	Electricity mix	Rapporto sostenibilità Federbeton (2023) [21]
Altro (ventilatori, riscaldamento del combustibile...)	13,2	kWh	Secondary fuel renewable	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Totale:	100,1	kWh		

In tabella n.28 è riportato il consumo di acqua. Il fabbisogno idrico risulta superiore per il CEM II rispetto al CEM I, da 0,24 m³ a 1,32 m³ [20], a causa dell'intensificazione dei processi di macinazione e dei relativi sistemi di raffreddamento necessari per ottenere la finezza richiesta dalle norme tecniche per il cemento CEM II.

Tab. 28. - Dati d'inventario per la produzione di 1 ton di cemento portland CEM II, resistenza 42,5 MPa – *Input consumo di acqua*

CONSUMO RISORSE NON ENERGETICHE - CONSUMO DI ACQUA - INPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
Acqua (produzione clinker)	1,32	m ³	Water, process, unspecified natural origin	EPD Colacem, (2024) [20]

In tabella n.29 viene riportato l'inventario di output delle emissioni in aria.

Tab. 29. - Dati d'inventario per la produzione di 1 ton di cemento portland CEM II, resistenza 42,5 MPa – *Output emissioni in aria.*

EMISSIONI IN ARIA - OUTPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
CO ₂ Anidride carbonica	710	kg	Carbon dioxide	EPD Colacem, (2024) [20]
NO _x (Ossidi di azoto)	0,950	kg	Methane	EPD Colacem, (2024) [20]
SO _x (Ossidi di zolfo)	0,110	kg	Sulfur oxides	Air Pollutant Emission Inventory Guidebook (2023) [22]
CO (Monossido di carbonio)	0,950	kg	Carbon monoxide	Air Pollutant Emission Inventory Guidebook (2023) [22]
N ₂ O (protossido di azoto)	0,015	kg	Dinitrogen monoxide	EPD Colacem, (2024) [20]
NH ₃ (Ammoniaca)	0,040	kg	Ammonia	Air Pollutant Emission Inventory Guidebook (2023) [22]
CH ₄ (Gas metano)	0,002	kg	Methane	EPD Colacem, (2024) [20]

NM VOC (Composti organici volatili non metanici)	0,028	kg	NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Air Pollutant Emission Inventory Guidebook (2023) [22]
Particolato PM10	0,018	kg	Particulates < 10um	EPD Colacem, (2024) [20]
HCl (Acido cloridrico)	0,005	kg	Hydrochloric acid	EPD Colacem, (2024) [20]

I dati relativi ai trasporti riguardano le distanze percorse per il trasferimento delle materie prime al cementificio. Per l’analisi si è assunta la distanza di 120 km [13]. Le operazioni di trasporto delle materie prime comprendono il loro trasferimento dal luogo di estrazione al sito di produzione del cemento mediante autocarri su gomma. Inoltre per quanto riguarda la tipologia di imballaggio si è assunto il formato standard del sacco da 50 kg, rapportando il dato all’unità funzionale si ottengono 20 sacchi per tonnellata di cemento. Si è assunto un peso medio di 0,20 kg di materiale da imballaggio per sacco (plastica) per sacco da 50 kg [19]. I dati sono riportati in tabella n.30.

Tab. 30. - Dati d’inventario per la produzione di 1 ton di cemento portland CEM II, resistenza 42,5 MPa – *Input trasporto e materiale imballaggio*

TRASPORTO - MATERIALE IMBALLAGGIO - INPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
Trasporto materie prime	171,12	tkm	Transport in t*km	Blengini G.A. et al. (2019) [13]
Materiale da imballaggio	4,0	kg	Packaging waste, plastic	Hewlett P., et al. (2019) [19]

• **Inventario del cemento innovativo con sostituzione del 30% di clinker con scoria d'acciaio carbonatata – Inventario processo di carbonatazione acquosa**

L’inventario rappresenta la raccolta dati per la produzione di 1 tonnellata di cemento innovativo, composto all’ 46,7% da clinker, al 18,36% da calcare, da 30% di scorie carbonatate e da 5% da gesso. I flussi relativi alla quota di clinker presente nel cemento innovativo sono stati calcolati attraverso i dati del CEM II. Nello specifico, il dato d’inventario del CEM II è stato diviso per 0,768

per isolare l'impatto riferito alla singola unità di clinker (essendone il CEM II composto al 76,8%); il valore così ottenuto è stato successivamente moltiplicato per 0,467, corrispondente alla percentuale di clinker presente nel cemento innovativo. Oltre all'inventario di quest'ultimo di seguito viene riportata l'analisi LCI del processo di carbonatazione acquosa necessaria per modellazione del processo di produzione del cemento innovativo totale.

La tabella n.31 riporta l'inventario delle materie prime in ingresso. La principale differenza rispetto alla produzione di CEM II è la riduzione dell'estrazione di calcare (0,569 ton) e argilla (0,147 ton), direttamente collegata alla minor quantità di clinker da produrre.

Tab. 31. - Dati d'inventario per la produzione di 1 ton di cemento innovativo, CEMinnovativo – 30% – Input materie prime

MATERIE PRIME - INPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
Calcare (estrazione per la produzione di clinker)	0,569	ton	Limestone, in ground	EPD Colacem, (2024) [20]
Argilla (estrazione per la produzione di clinker)	0,147	ton	Clay, in ground	EPD Colacem, (2024) [20]
Gesso	0,05	ton	Gypsum, in ground	EPD Colacem, (2024) [20]
Calcare (filler)	0,181	ton	Limestone, in ground	EPD Colacem, (2024) [20]
Scoria EAF carbonatata	0,30	ton	Creazione processo scoria carbonatata	Bonfante F., et al. (2025) [4]

In tabella n.32 viene rappresentato il consumo di risorse energetiche. Il confronto con la Tabella n.26 mostra una diminuzione nei consumi di carbone (1.392,3 MJ) e degli altri combustibili fossili.

Tab. 32. - Dati d'inventario per la produzione di 1 ton di cemento innovativo, CEMinnovativo – 30% – Input, consumo energia termica

CONSUMO RISORSE ENERGETICHE - ENERGIA TERMICA - INPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte

Carbone (fossile e petcoke)	1.392,3	MJ	Hard coal	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Olio combustibile denso	47,4	MJ	Heavy oil	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Metano	21,2	MJ	Methane	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Combustibile non convenzionale (CCS)	173,2	MJ	Secondary fuel renewable	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Totale:	1.634,2	MJ		

La tabella n.33 dettaglia il consumo di energia elettrica per la produzione di cemento innovativo, che include il fabbisogno energetico per la ridotta produzione di clinker. L'inventario elettrico totale è di 83,1 kWh.

Tab. 33. - Dati d'inventario per la produzione di 1 ton di cemento innovativo, CEMinnovativo – 30% – Input consumo energia elettrica

CONSUMO RISORSE ENERGETICHE - ENERGIA elettrica - INPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
Macinazione del crudo (compresa essiccazione materiale grezzo/clinker)	14,2	kWh	Electricity mix	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Cottura del clinker	11,2	kWh	Electricity mix	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Macinazione del cotto	44,5	kWh	Electricity mix	Rapporto sostenibilità Federbeton (2023) [21]
Altro (ventilatori, riscaldamento del combustibile...)	13,2	kWh	Secondary fuel renewable	De Santis A., Lavinia C., (2014) [16]
Totale:	83,1	kWh		

La tabella n.34 riporta i consumi di acqua per la produzione del cemento innovativo

Tab. 34. - Dati d'inventario per la produzione di 1 ton di cemento innovativo, CEMinnovativo – 30%– Input consumo di acqua

CONSUMO RISORSE NON ENERGETICHE - CONSUMO DI ACQUA - INPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
Acqua (produzione clinker)	1,32	m ³	Water, process, unspecified natural origin	EPD Colacem, (2024) [20]

La tabella n.35 riporta le emissioni in aria in uscita.

Tab. 35. - Dati d'inventario per la produzione di 1 ton di cemento innovativo, CEMinnovativo – 30% – *Output emissioni in aria.*

EMISSIONI IN ARIA - OUTPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
CO ₂ Anidride carbonica	425	kg	Carbon dioxide	EPD Colacem, (2024) [20]
NO _x (Ossidi di azoto)	0,570	kg	Methane	EPD Colacem, (2024) [20]
SO _x (Ossidi di zolfo)	0,070	kg	Sulfur oxides	Air Pollutant Emission Inventory Guidebook (2023) [22]
CO (Monossido di carbonio)	0,570	kg	Carbon monoxide	Air Pollutant Emission Inventory Guidebook (2023) [22]
N ₂ O (protossido di azoto)	0,009	kg	Dinitrogen monoxide	EPD Colacem, (2024) [20]
NH ₃ (Ammoniaca)	0,024	kg	Ammonia	Air Pollutant Emission Inventory Guidebook (2023) [22]
CH ₄ (Gas metano)	0,001	kg	Methane	EPD Colacem, (2024) [20]
NM VOC (Composti organici volatili non metanici)	0,017	kg	NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	Air Pollutant Emission Inventory Guidebook (2023) [22]
Particolato PM10	0,011	kg	Particulates < 10um	EPD Colacem, (2024) [20]
HCl (Acido cloridrico)	0,003	kg	Hydrochloric acid	EPD Colacem, (2024) [20]

I dati relativi ai trasporti e al materiale da imballaggio sono i medesimi utilizzati per il cemento portland II, ovvero una distanza dal punto di estrazione al cementificio di 120 km [13] e una massa di 0,20 kg [19] di materiale da imballaggio per sacco. Inoltre per tale produzione è stato aggiunto il dato relativo al trasporto su gomma della scoria EAF al cementificio.

Tab. 36. - Dati d'inventario per la produzione di 1 ton di cemento innovativo, CEMinnovativo – 30% – Input trasporto e materiale imballaggio

TRASPORTO - MATERIALE IMBALLAGGIO - INPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
Trasporto materie prime	114	tkm	Transport in t*km	Blengini G.A. et al. (2019) [13]
Materiale da imballaggio	4,0	kg	Packaging waste, plastic	Hewlett P., et al. (2019) [19]
Trasporto scoria EAF	36	tkm	Transport in t*km	Blengini G.A. et al. (2019) [13]

• **Processo di CARBONATAZIONE ACQUOSA**

L’Inventario per la produzione della scoria EAF carbonatata, nello scenario B, (output SCM) è riportato nelle tabelle n.37 e n.38

Tab. 37. - Dati d'inventario per la produzione di 0,03 ton di scoria carbonatata – Input processo di carbonatazione

PROCESSO DI CARBONATAZIONE - INPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
Scoria EAF grezza (materia prima a impatto zero)	0,278	ton	Creazione flusso scoria EAF	Bonfante F., et al. (2025) [4]
Acqua	0,834	m ³	Water, unspecified natural origin	Bonfante F., et al. (2025) [4]
CO ₂ (Totale immessa nell’impianto)	277,98	kg	Carbon dioxide	Bonfante F., et al. (2025) [4]
Energia elettrica (macinazione)	46	kWh	Electricity mix	Tsakiridis P., et al, (2008) [10]
Energia elettrica (centrifuga)	2	kWh	Electricity mix	Huijgen WJ., et al, (2006) [11]
Energia elettrica (carbonatazione)	3	kWh	Electricity mix	Huijgen WJ., et al, (2006) [11]
Energia termica (essiccazione)	26	kWh	Thermal energy	Biava G., et al (2024) [12]
Trasporto scoria carbonatata (SCM)	36	tkm	Transport in t*km	Blengini G.A., et al, (2019) [13]

Tab. 38. - Dati d'inventario per la produzione di 0,03 ton di scoria carbonatata – *Output processo di carbonatazione*

PROCESSO DI CARBONATAZIONE - OUTPUT				
	Quantità	Unità di misura	Modello del dato in ELCD	Fonte
Scoria EAF carbonatata (SCM)	0,3	ton	Creazione flusso EAF	Bonfante F., et al. (2025) [4]
CO ₂ (catturata nel processo)	-21,96	kg	Carbon dioxide	Bonfante F., et al. (2025) [4]

5 | FASE 3: VALUTAZIONE DELL'IMPATTO DEL CICLO DI VITA LCIA - *Life Cycle Impact assessment* -

La fase di valutazione degli impatti del ciclo di vita (LCIA) rappresenta il momento metodologico in cui i flussi quantificati nella fase precedenti, LCI, vengono convertiti in indicatori di impatto ambientale. Il suo scopo è di evidenziare l'entità delle modificazioni ambientali che si generano a seguito dei rilasci nell'ambiente e del consumo di risorse provocati dai sistemi di prodotto analizzati **[18]**, permettendo una comparazione diretta tra gli scenari analizzati: cemento portland CEM I avente resistenza 52,5 MPa con cemento innovativo (sostituzione clinker al 10%) per lo scenario A e cemento portland CEM II avente resistenza 42,5 MPa con cemento innovativo (sostituzione clinker al 30%) nello scenario B. Tale fase consiste quindi nell'imputare i consumi e le emissioni a specifiche categorie di impatto, riferibili ad effetti ambientali conosciuti. Di seguito sono analizzate le prime tre sotto fasi della LCIA obbligatorie da norma ISO 14040/44 e le successive due non obbligatorie: selezione delle categorie di impatto, classificazione degli impatti, caratterizzazione, normalizzazione e pesatura **[1]**.

5.1 Selezione delle categorie di impatto e classificazione degli impatti

Per la LCIA, nel presente studio comparativo, è stato adottato il metodo di calcolo d'impatto EF 3.0 method (Environmental Footprint), metodo integrato con normalizzazione e pesatura. La scelta di EF 3.0 method è strategica e motivata dal suo riconoscimento come metodo raccomandato dalla Commissione Europea, garantendo in questo modo la comparabilità e l'affidabilità dei dati. Ulteriore elemento di valore del metodo è la sua completezza, EF 3.0 comprende sedici diverse categorie di impatto fornendo una panoramica completa dei potenziali impatti ambientali del settore. In ultimo, tale allineamento metodologico, integrato direttamente in OpenLCA, è stato scelto in quanto già impiegato ampiamente in letteratura per l'analisi del ciclo di vita di materiali cementizi [18] [23]. La tabella n.39 presenta un elenco predefinito delle categorie di impatto EF e dei relativi modelli per la determinazione dei coefficienti di caratterizzazione [24] considerati nella presente LCA:

Tab. 39. - Categorie di impatto EF con i rispettivi indicatori e modelli di caratterizzazione – Commissione Europea, 2021

CATEGORIA D'IMPATTO EF	INDICATORE DELLA CATEGORIA DI IMPATTO	UNITÀ	MODELLO DI CARATTERIZZAZIONE
Cambiamenti climatici, totale	Potenziale di riscaldamento globale (GWP100)	kg di CO ₂ eq	Modello di Berna - Potenziali di riscaldamento globale (GWP) in un arco temporale di 100 anni (sulla base di IPCC 2013) [24]
Riduzione dello strato di ozono	Potenziale di riduzione dell'ozono (ODP)	kg CFC-11 eq	Modello EDIP basato sui potenziali di riduzione dello strato di ozono dell'Organizzazione meteorologica mondiale (OMM) in un arco di tempo infinito (OMM 2014 + integrazioni) [24]
Tossicità per gli esseri umani - effetti cancerogeni	Unità tossica comparativa per gli esseri umani(CTUh)	CTUh	Sulla base del modello USEtox2.1 (Fantke P. et al. 2017) [25], adattato come in Saouter E. et al., 2018 [26]
Tossicità per gli esseri umani - effetti non cancerogeni	Unità tossica comparativa per gli esseri umani(CTUh)	CTUh	Sulla base del modello USEtox2.1 (Fantke P. et al. 2017) [25], adattato come in Saouter E. et al., 2018 [26]
Particolato	impatto sulla salute umana)	Incidenza delle malattie	Modello PM (Fantke P. et al., 2017 in UNEP 2017) [25]
Radiazione ionizzante, salute umana	Efficienza dell'esposizione umana all'U235	kBq U235 eq	Modello degli effetti sulla salute umana elaborato da Dreicer et al. 1995 (Frischknecht R. et al., 2000) [27]
Formazione di ozono fotochimico, salute umana	Aumento della concentrazione di ozono troposferico	kg NMVOC eq	Modello LOTOS-EUROS (Van Zelm R. et al., 2008) applicato in ReCiPe 2008 [28]

Acidificazione	Superamento accumulato	moli di H ⁺ eq	Superamento accumulato (Seppälä J. et al., 2006) [29]
Eutrofizzazione, terrestre	Superamento accumulato	moli di N eq	Superamento accumulato (Seppälä J. et al., 2006) [29]
Eutrofizzazione, acque dolci	Frazione di nutrienti che raggiunge il comparto finale acque dolci (P)	kg P eq	Modello EUTREND (Struijs J. et al., 2009) applicato in ReCiPe [30]
Eutrofizzazione, marina	Frazione di nutrienti che raggiunge il comparto finale acque marine (N)	kg N eq	Modello EUTREND (Struijs J. et al., 2009) applicato in ReCiPe [30]
Ecotossicità, acque dolci	Unità tossica comparativa per gli ecosistemi (CTUe)	CTUe	Sulla base del modello USEtox2.1 (Fantke P. et al. 2017) [25], adattato come in Saouter E. et al., 2018 [26]
Uso del suolo	Indice di qualità del suolo	Valore adimensionale (pt)	Indice di qualità del suolo basato sul modello LANCA (De Laurentiis V. et al. 2019) [31]
Uso d'acqua	Potenziale mancanza d'acqua per l'utilizzatore (consumo di acqua ponderato in funzione della mancanza)	m ³ acqua equivalente di mancanza d'acqua	Modello Available Water REmaining (AWARE) (Boulay A.M. et al., 2018; UNEP 2016) [32]
Uso delle risorse – minerali e metalli	Impoverimento delle risorse abiotiche (ADP riserve finali)	kg Sb eq	Van Oers L. et al., 2002 come nel metodo CML 2002, v.4.8 [33]
Uso delle risorse – fossili	Impoverimento di risorse abiotiche – combustibili fossili (ADP – fossili)	MJ	van Oers L. et al., 2002 come nel metodo CML 2002, v.4.8 [33]

5.2 Caratterizzazione – confronto scenario A e scenario B

In questa fase i flussi classificati vengono convertiti nelle unità di misura comuni della categoria di impatto consentendo la sommatoria dei contributi e la determinazione del risultato finale per ciascuna categoria analizzata. Tale processo si realizza applicando un fattore di caratterizzazione specifico ad ogni flusso di inventario e per ognuna delle categorie di impatto, come mostrato in tabella n.39. In tabella n. 40 sono indicati i risultati di caratterizzazione, per lo scenario A: risultanti dalla produzione di 1 ton di cemento portland CEM I con resistenza 52,5 MPa (95% clinker – 5% gesso) e dalla produzione di 1 ton di cemento innovativo CEMinnovativo (85% clinker – 10% SCM – 5% gesso).

In tabella n. 41 sono indicati i risultati di caratterizzazione, per lo scenario B: risultanti dalla produzione di 1 ton di cemento portland CEM II con resistenza 45,5 MPa (76,8% clinker – 18,36% calcare – 5% gesso) e dalla produzione di 1 ton di cemento innovativo CEMinnovativo (46,7% clinker – 18,36% calcare – 30% SCM – 5% gesso).

Tab. 40. - *Caratterizzazione* – Confronto risultati di caratterizzazione relativi allo scenario A: CEM I, resistenza 52,5 MPa e CEMinnovativo (10%)

SCENARIO A			
CATEGORIA DI IMPATTO	UNITÀ	CEM I – 52,5 MPa	CEMinnovativo – 10%
Cambiamento climatico	kgCO ₂ eq	883,89	737,91
Assottigliamento dell'ozono	kg CFC11 eq	0,0000091095	0,0000086404
Radiazioni ionizzanti	kBq U-235 eq	14,47088369	13,72570186
Formazione di ozono fotochimico	kg NMVOC eq	1,596797395	1,455704175
Particolato	disease inc.	0,00000862627	0,00000762627
Tossicità umana - non cancerogena	CTUh	0,0000011895	0,0000010606
Tossicità umana - cancerogena	CTUh	0,00000007747	0,0000000735
Acidificazione	mol H+ eq	2,33597438	2,157147341
Eutrofizzazione - acqua dolce	kg P eq	0,000362367	0,000343481
Eutrofizzazione - marina	kg N eq	0,582540774	0,530302355
Eutrofizzazione - terrestre	mol N eq	7,038388376	6,397573005
Eco-tossicità - acqua dolce	CTUe	124,827	120,768
consumo di acqua	m ³ depriv	8,709	7,506
Consumo di risorse - fossili	MJ	4961	4175
Consumo di risorse - minerali e metalli	kg Sb eq	0,00000002928	0,0000000278
Consumo di suolo	Pt	0	0

Tab. 41. - *Caratterizzazione* – Confronto risultati di caratterizzazione relativi allo scenario B: CEM II, resistenza 42,5 MPa e CEMinnovativo (30%)

SCENARIO B			
CATEGORIA DI IMPATTO	UNITÀ	CEM I – 52,5 MPa	CEMinnovativo – 10%
Cambiamento climatico	kgCO ₂ eq	800,12	587,43
Assottigliamento dell'ozono	kg CFC11 eq	0,0000083067	0,00000700835
Radiazioni ionizzanti	kBq U-235 eq	13,19537291	11,13313148
Formazione di ozono fotochimico	kg NMVOC eq	1,525549851	1,132168804
Particolato	disease inc.	0,0000134856	0,000010730
Tossicità umana - non cancerogena	CTUh	0,0000010211	0,000000860
Tossicità umana - cancerogena	CTUh	0,0000000707	0,000000060
Acidificazione	mol H+ eq	2,190710717	1,703032071
Eutrofizzazione - acqua dolce	kg P eq	0,00033149	0,000278535
Eutrofizzazione - marina	kg N eq	0,556585986	0,41118412
Eutrofizzazione - terrestre	mol N eq	6,706384194	4,946417039
Eco-tossicità - acqua dolce	CTUe	291,17	244,87
consumo di acqua	m ³ depriv	57,794	38,287
Consumo di risorse - fossili	MJ	3987,82	3325,74
Consumo di risorse - minerali e metalli	kg Sb eq	0,0000000266	0,0000000225
Consumo di suolo	Pt	0	0

5.3 Normalizzazione e Pesatura – confronto scenario A e scenario B

La fase di normalizzazione, integrata in OpenLCA, è stata effettuata rispetto ai valori di impatto globale pro capite (global environmental impacts), utilizzando come benchmark il consumo annuo medio di un cittadino [34]. La pesatura è stata applicata seguendo il set di pesi predefinito della Commissione Europea (EF 3.0 weighting set), basato su priorità ambientali del contesto geografico europeo, che permette di aggregare le diverse categorie di impatto in un unico punteggio adimensionale (Single Point) [34]. I valori di normalizzazione e pesatura sono riportati in tabella n.42 relativamente allo scenario A e in tabella n. 43 per lo scenario B.

Tab. 42. - Normalizzazione e Pesatura – Confronto risultati normalizzati e pesati relativi allo scenario A: CEM I, resistenza 52,5 MPa e CEM_{innovativo} (10%)

SCENARIO A				
CATEGORIA DI IMPATTO	CEM I – resistenza 52,5 MPa		CEM _{innovativo} – 10%	
	Normalizzazione	Pesatura	Normalizzazione	Pesatura
Cambiamento climatico	1,09E-01	2,30E-02 Pt	9,11E-02	1,92E-02 Pt
Consumo di risorse - fossili	7,63E-02	6,35E-03 Pt	6,42E-02	5,34E-03 Pt
Acidificazione	4,21E-02	2,61E-03 Pt	3,88E-02	2,41E-03 Pt
Eutrofizzazione - terrestre	3,98E-02	1,48E-03 Pt	3,62E-02	1,34E-03 Pt
Formazione di ozono fotochimico	3,93E-02	1,88E-03 Pt	3,59E-02	1,71E-03 Pt
Eutrofizzazione - marina	2,98E-02	8,80E-04 Pt	2,71E-02	8,00E-04 Pt
Particolato	2,31E-02	2,07E-03 Pt	2,15E-02	1,93E-03 Pt
Tossicità umana - non cancerogena	4,87E-03	8,96E-05 Pt	4,62E-03	8,50E-05 Pt
Tossicità umana - cancerogena	4,58E-03	9,76E-05 Pt	4,35E-03	9,26E-05 Pt
Radiazioni ionizzanti	3,43E-03	1,70E-04 Pt	3,25E-03	1,60E-04 Pt
Eco-tossicità - acqua dolce	2,92E-03	5,61E-05 Pt	1,31E-03	4,91E-05 Pt
consumo di acqua	7,60E-04	6,46E-05 Pt	6,65E-04	5,57E-05 Pt
Eutrofizzazione - acqua dolce	2,30E-03	6,31E-05 Pt	2,10E-03	5,98E-05 Pt
Assottigliamento dell'ozono	1,70E-04	1,07E-05 Pt	1,60E-04	1,02E-05 Pt
Consumo di risorse - minerali e metalli	4,59E-06	4,47E-08 Pt	4,36E-06	3,00E-08 Pt
Consumo di suolo	0	0 Pt	0 Pt	0 Pt

Tab. 43. - Normalizzazione e Pesatura – Confronto risultati normalizzati e pesati relativi allo scenario B: CEM II, resistenza 42,5 MPa e CEM_{innovativo} (30%)

SCENARIO B				
CATEGORIA DI IMPATTO	CEM II – resistenza 42,5 MPa		CEM _{innovativo} – 30%	
	Normalizzazione	Pesatura	Normalizzazione	Pesatura
Cambiamento climatico	9,88E-02	2,08E-02 Pt	8,11E-02	1,75E-02 Pt
Consumo di risorse - fossili	6,13E-02	5,10E-03 Pt	5,11E-02	4,26E-03 Pt
Acidificazione	3,94E-02	2,44E-03 Pt	3,07E-02	1,90E-03 Pt
Eutrofizzazione - terrestre	3,79E-02	1,41E-03 Pt	2,80E-02	1,04E-03 Pt
Formazione di ozono fotochimico	3,76E-02	1,80E-03 Pt	2,79E-02	1,33E-03 Pt
Eutrofizzazione - marina	2,85E-02	8,43E-04 Pt	2,10E-02	6,23E-04 Pt
Particolato	2,27E-02	2,03E-03 Pt	1,80E-02	1,62E-03 Pt
Eco-tossicità - acqua dolce	6,82E-03	1,35E-04 Pt	5,74E-03	1,10E-04 Pt
consumo di acqua	5,04E-03	4,29E-04 Pt	3,34E-03	2,84E-04 Pt

Tossicità umana - non cancerogena	4,45E-03	8,18E-05 Pt	3,74E-03	6,89E-05 Pt
Tossicità umana - cancerogena	4,18E-03	8,91E-05 Pt	3,53E-03	7,51E-05 Pt
Radiazioni ionizzanti	3,13E-03	1,57E-04 Pt	2,64E-03	1,32E-04 Pt
Eutrofizzazione - acqua dolce	2,06E-04	5,78E-06 Pt	1,73E-04	4,85E-06 Pt
Assottigliamento dell'ozono	1,55E-04	9,77E-06 Pt	1,31E-04	8,24E-06 Pt
Consumo di risorse - minerali e metalli	4,19E-07	3,16E-08 Pt	3,54E-07	2,67E-08 Pt
Consumo di suolo	0	0 Pt	0	0 Pt

In fine, i valori ottenuti dalla pesatura sono stati sommati per calcolare il valore del single score relativo alle quattro tipologie di cemento esaminate, come mostrato in tabella n.44. Questo indicatore sintetico consente di rappresentare l'impatto ambientale totale di ciascun prodotto con un'unica unità di misura, semplificando il confronto diretto tra i vari scenari. Un single score più basso indica un profilo ambientale migliore, poiché riassume il contributo di tutte le categorie di impatto, calcolate e pesate secondo il metodo EF 3.0.

Tab. 44. - Single score

SCENARIO A		SCENARIO B	
CEM I, 52,5 MPa	CEM _{innovativo} , 10%	CEM II, 42,5 MPa	CEM _{innovativo} , 30%
3,88E-02 Pt	3,32E-02 Pt	3,53E-02 Pt	2,89E-02 Pt

6 | FASE 4: INTERPRETAZIONE DEL CICLO DI VITA

- Life Cycle Interpretation -

La fase conclusiva dell'LCA consiste nel comparare e discutere i risultati ottenuti nella fase precedente, LCIA, in relazione all'obiettivo e al campo di applicazione dello studio. Nella presente analisi lo scopo finale di questa fase è comparare i risultati ottenuti da i due diversi scenari analizzati e trarre conclusioni, studiando il beneficio ambientale derivante dall'utilizzo del cemento innovativo, sia nel caso di sostituzione del clinker al 10% da SCM sia in quello del 30% di sostituzione da SCM.

6.1 Confronto risultati e comparazione Scenario A e Scenario B

La figura n.9 mostra i risultati relativi alle categorie di impatto del modello EF 3.0 per lo scenario A. È stata omessa la categoria relativa al consumo di suolo in quanto il risultato ottenuto tramite il software OpenLCA è pari a zero. Tale valore nullo è riconducibile alla combinazione di due fattori: da un lato, l'assenza di flussi elementari specifici riguardanti l'uso e la trasformazione del suolo all'interno dei dati di inventario raccolti; dall'altro, la mancanza di fattori di caratterizzazione

applicabili ai processi esaminati nel metodo EF 3.0 per il confine di sistema “cradle-to-gate” adottato. Di conseguenza, l’impatto su questa categoria è stato ritenuto trascurabile per il confronto tra i vari scenari. La figura n. 10 mostra i risultati analoghi relativi allo scenario B.

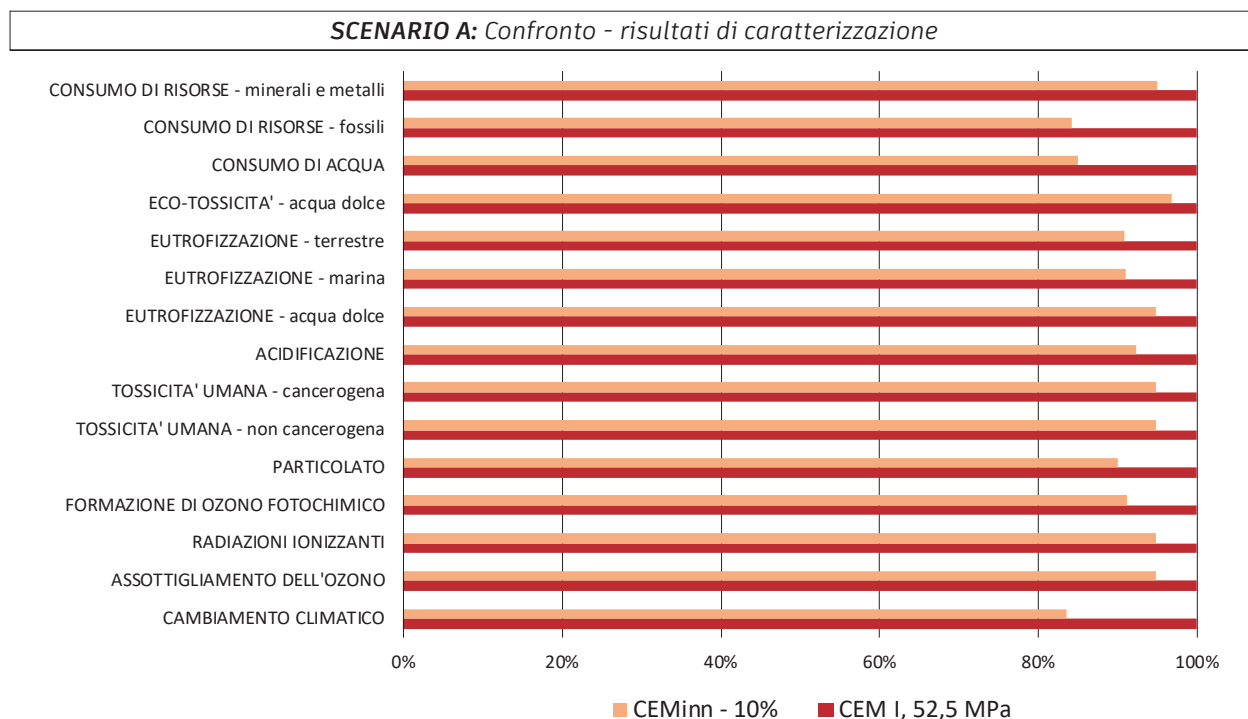


Figura 9. - Caratterizzazione – Confronto risultati (livello midpoint) tra CEM I 52,5 MPa e CEMinnovativo 10%

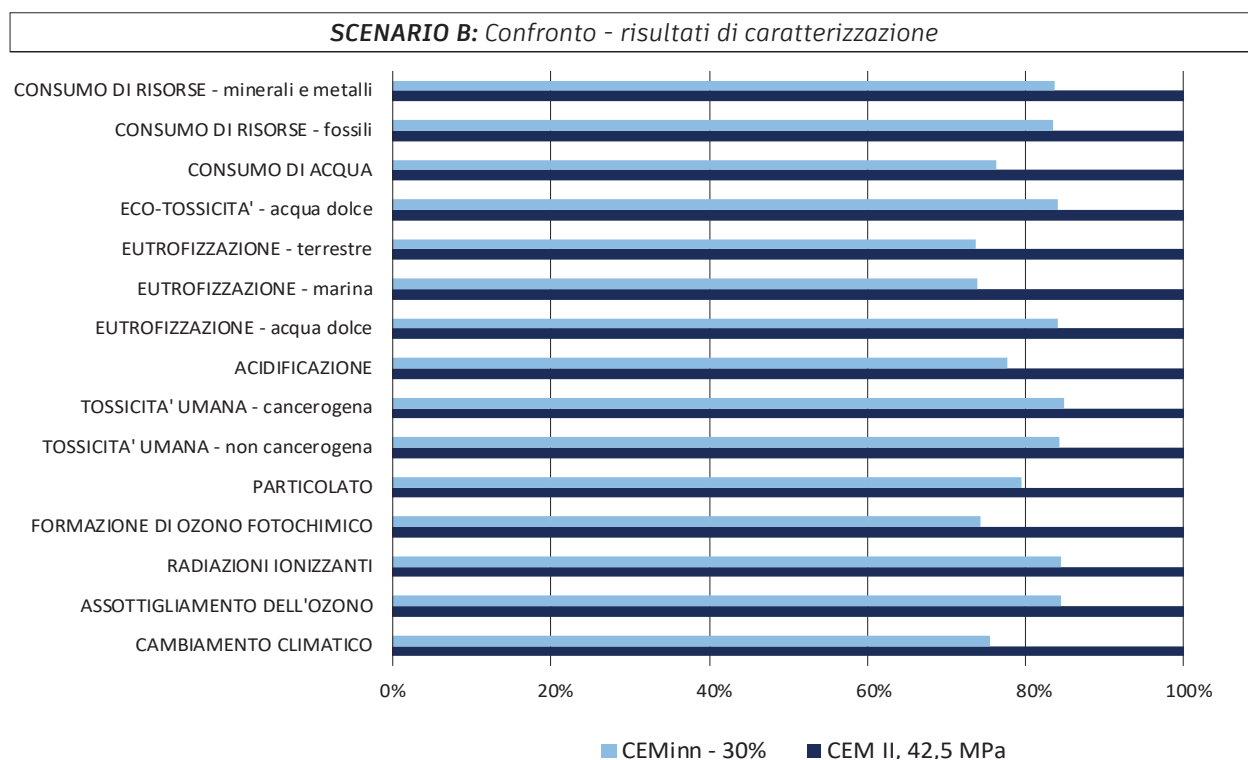


Figura 10. - Caratterizzazione – Confronto risultati (livello midpoint) tra CEM I 42,5 MPa e CEMinnovativo 30%

Dai grafici si può notare come l'andamento relativo per i due diversi scenari risulti essere simile, ovvero per tutte le categorie di impatto analizzate la produzione di una tonnellata di cemento innovativo, che vede l'utilizzo di SCM al 10% e al 30%, risulta essere la meno impattante. Al contrario, la produzione di una tonnellata di CEM I e CEM II risulta meno conveniente dal punto di vista ambientale. Per quanto riguarda gli scenari, le differenze maggiori si riscontrano nelle categorie di cambiamento climatico, consumo di risorse fossili e acidificazione. Si osserva una riduzione del cambiamento climatico con la produzione del cemento innovativo che emette il 16,5% in meno di kgCO_2eq rispetto al sistema di riferimento del cemento tradizionale CEM I (52,5 MPa). La diminuzione degli impatti ambientali è supportata dai dati dell'inventario delle materie prime (tabella 11), che quantificano un input di calcare pari a 1,146 ton e di argilla pari a 0,279 ton per la produzione di clinker nel CEM I; valori che sottolineano un elevato consumo di risorse minerali non rinnovabili che la produzione di cemento innovativo riesce a ridurre. Tale riduzione evidenzia il primo beneficio ambientale della produzione del cemento che vede l'utilizzo di SCM al 10%, ovvero la conservazione di risorse naturali attraverso la sostituzione di materie prime non rinnovabili con un sottoprodotto industriale. Sempre nello Scenario A, il beneficio ambientale è legato alla riduzione dei consumi di combustibili fossili (tabella 12) che, nel caso del CEM I, ammontano a 3.553 MJ, rappresentando una delle maggiori fonti di impatto. L'integrazione del 10% di scorie permette inoltre di diminuire l'input elettrico richiesto per le operazioni meccaniche di macinazione del crudo (14,2 kWh) e per la cottura del clinker (11,2 kWh), come evidenziato nell'inventario energetico elettrico (tabella 13). La tabella n.21 è la più rilevante per la comparazione degli impatti, poiché riporta le emissioni in aria in uscita. I dati mettono in luce il duplice beneficio ambientale dello scenario innovativo: in primo luogo, l'impiego di una ridotta quantità di clinker riduce le emissioni di CO_2 rispetto alla produzione del cemento Portland, con le emissioni da calcinazione pari a 429 kg e quella da combustibile pari a 259 kg. In secondo luogo, il processo innovativo introduce un flusso di CO_2 negativo di 7,32 kg, ovvero CO_2 catturata e sequestrata stabilmente durante la carbonatazione della scoria, come riportato in tabella n.24, dimostrando l'efficacia del cemento innovativo nel mitigare l'impatto sul cambiamento climatico.

La riduzione del cambiamento climatico è ancora più marcata nello scenario B, con il 26,6% di emissioni di kgCO_2eq in meno della produzione di cemento innovativo, con sostituzione mediante SCM al 30%, rispetto a quella del CEM II. In questo scenario, l'inventario evidenzia una diminuzione nei consumi di energia termica, ridotti a 1.392,3 MJ (tabella 32), riflettendo la minore richiesta di energia termica per la cottura di una quantità ridotta di clinker. Coerentemente, la tabella 33 mostra una contrazione dei consumi elettrici

nelle fasi di macinazione e cottura dovuta alla minore quantità di materiale processato.

Inoltre si osserva una riduzione nella categoria di impatto del consumo di risorse fossili tra il 15% e il 17% in entrambi gli scenari per la produzione di cemento innovativo. Per quanto riguarda la categoria di impatto dell'acidificazione si osserva una riduzione del 7,6% relativamente allo scenario A e una maggiore riduzione nello scenario B, del 22,2%, entrambe legate alla produzione di cemento innovativo. In alcune categorie, come l'assottigliamento dell'ozono, le radiazioni ionizzanti e la formazione di ozono fotochimico, il vantaggio del cemento innovativo è presente ma più contenuto, con una riduzione costante che si attesta intorno al 5% - 8% rispetto al CEM I. Tale riduzione risulta più marcata all'interno dello scenario B, infatti la produzione del cemento innovativo ne porta un calo tra il 15% e il 20%.

In conclusione, nonostante entrambi gli scenari confermino il vantaggio della produzione di cemento innovativo, lo scenario B si delinea come l'opzione a maggiore beneficio ambientale. Questo è riconducibile a due fattori principali:

- *Massimizzazione del SCM e del processo di carbonatazione*: l'impiego di una quota di scoria carbonata al 30%, rispetto al 10% (0,3 ton nello scenario B rispetto alle 0,1 ton dello scenario A) agisce su un doppio binario. Da un lato, porta ad una maggiore quantità di CO₂ incorporata nel SCM attraverso il processo di carbonatazione delle scorie d'acciaio; dall'altro consente una marcata riduzione di utilizzo di clinker nel mix finale. Poiché la produzione di clinker rappresenta la fase più dispendiosa dal punto di vista energetico e maggiormente impattante dell'intero ciclo di vita, la sua sostituzione da parte di SCM rappresenta un fattore chiave per l'abbattimento degli impatti.

- *Sistema produttivo di riferimento*: lo scenario B beneficia del fatto che il termine di paragone, il CEM II 42,5 MPa, parte intrinsecamente con un contenuto di clinker inferiore rispetto al CEM I 52,5 MPa (utilizzato invece nello scenario A). Questo vantaggio di partenza viene ulteriormente potenziato dall'aggiunta delle SCM innovative, portando a riduzioni degli impatti più marcate, come osservato per il cambiamento climatico e l'acidificazione. Sebbene il fabbisogno idrico risulti superiore per il CEM II rispetto al CEM I, passando da 0,24 m³ a 1,32 m³ (tabella 27) a causa dell'intensificazione dei processi di macinazione e dei relativi sistemi di raffreddamento necessari

per ottenere la finezza richiesta dalle norme tecniche per il cemento CEM II, il bilancio ambientale complessivo resta favorevole.

Tuttavia, bisogna bilanciare risultati ottenuti dall'analisi con una considerazione sulle prestazioni meccaniche. Il confronto tra i due scenari mette in luce un compromesso: se da un lato lo scenario B è meno impattante e risulta ottenere benefici maggiori, dall'altro bisogna accettare che il cemento innovativo ottenuto sia meno resistente rispetto a quello dello scenario A. Infatti la riduzione del clinker comporta inevitabilmente una minore resistenza meccanica finale. Nonostante lo scenario B risulti portare maggiori benefici ambientali, l'effettiva adozione di questa soluzione dovrà valutare se la resistenza 42,5 MPa sia sufficiente per i requisiti previsti.

La figura n.11 mostra il contributo percentuale di ogni categoria di impatto sul profilo ambientale totale per lo Scenario A. La figura n.12 mostra il contributo percentuale di ognuna delle categorie di impatto sul profilo ambientale totale per lo Scenario B.

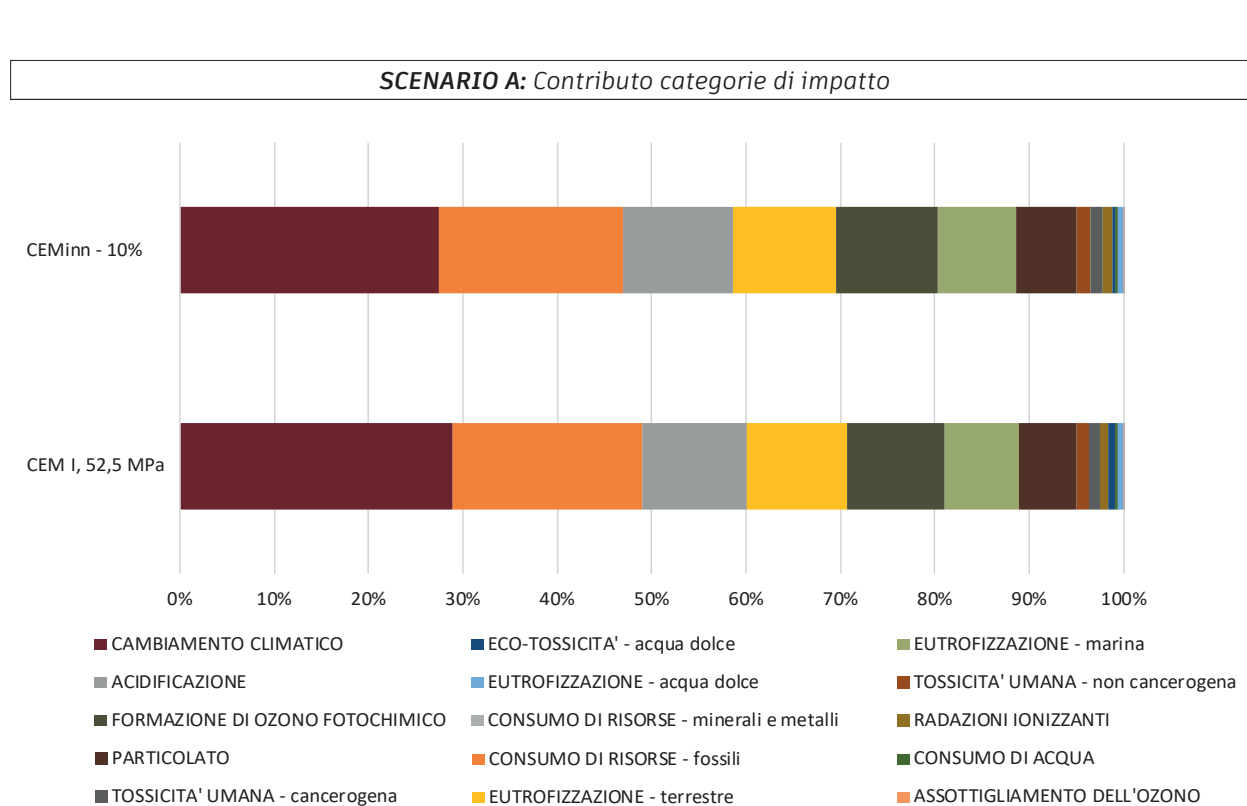


Figura 11. - Contributo delle categorie di impatto sul profilo ambientale totale - CEM I 52,5 MPa e CEMinnovativo 10%

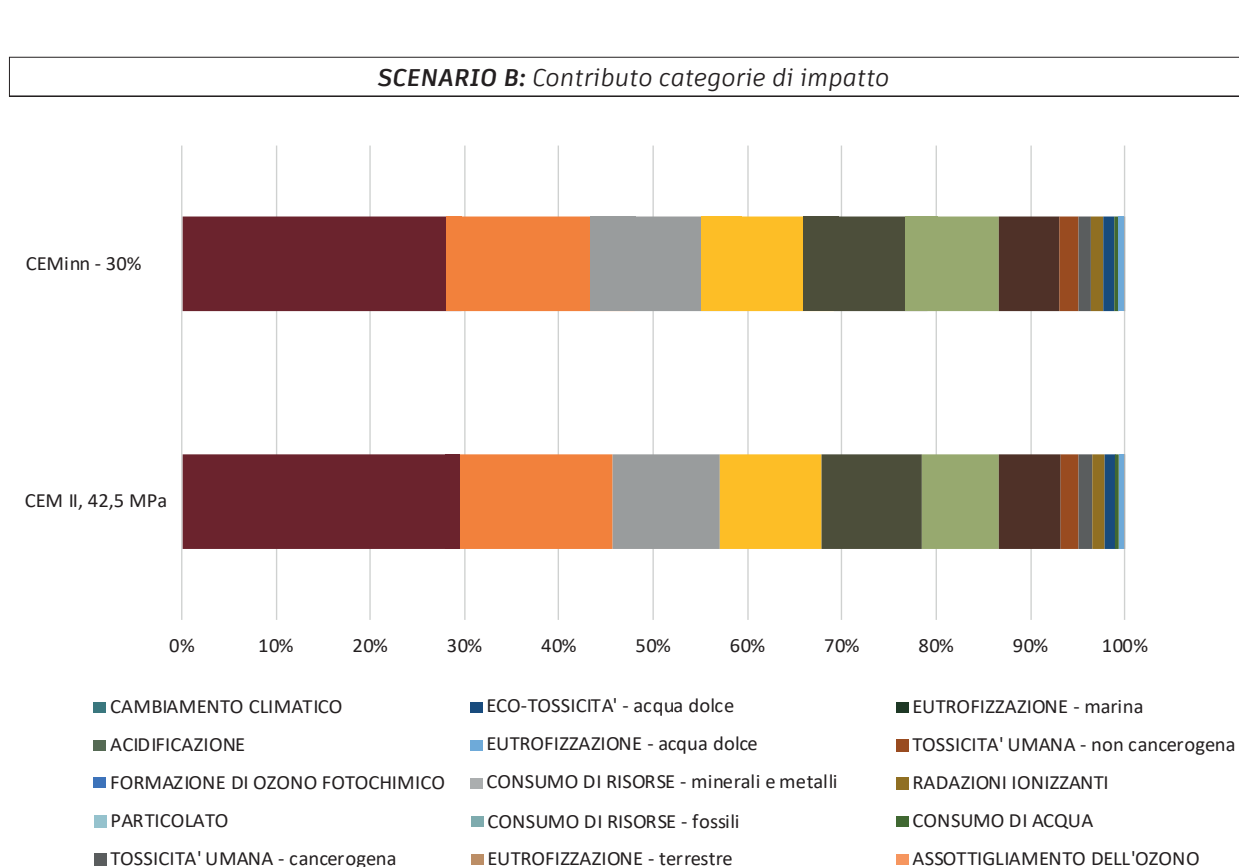


Figura 12. - Contributo delle categorie di impatto sul profilo ambientale totale - CEM II 42,5 MPa e CEMinnovativo 30%

In entrambi gli scenari si osserva che il contributo dominante è dato dalla categoria di impatto del cambiamento climatico, che occupa circa il 30%, seguito dal consumo di risorse fossili e dall'acidificazione. Tale distribuzione conferma che, indipendentemente dal sistema produttivo analizzato, le emissioni di inquinanti e l'uso di combustibili fossili rappresentano i principali punti critici ambientali del settore. Nello Scenario B, la maggiore presenza di SCM (30%) e l'uso del CEM II portano a una ripartizione degli impatti ancora più bilanciata, dove i benefici derivanti dalla minore quota di clinker e dalla CO₂ incorporata dalle scorie si riflettono in una riduzione di tutte le categorie di impatto.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi ha dimostrato l'efficacia dell'integrazione di scorie d'acciaio EAF (Electric Arc Furnace) carbonatate come strategia concreta per la decarbonizzazione dell'industria del cemento. Dall'inquadramento teorico è emerso come il settore sia responsabile del 7% delle emissioni globali di CO₂, con una quota critica del 60% derivante dalla calcinazione del calcare durante la fase di produzione del clinker. In tale contesto, la ricerca ha identificato nell'economia circolare e nella riduzione del clinker le leve fondamentali per affrontare queste emissioni "hard-to-abate". Lo studio dei processi innovativi ha evidenziato il ruolo cruciale della carbonatazione minerale: questo processo trasforma una scoria industriale in un materiale cementizio supplementare (SCM) capace di sequestrare attivamente CO₂. In questo modo, il materiale innovativo non si limita a ridurre le emissioni di CO₂ di processo, ma agisce come un deposito stabile di carbonio.

I risultati della valutazione del ciclo di vita (Life Cycle Assessment, LCA), condotta mediante il metodo EF 3.0, hanno validato quantitativamente il vantaggio ambientale dei cementi innovativi, evidenziando i seguenti dati relativi alle categorie più rilevanti:

- Cambiamento Climatico: si registra una riduzione dell'impronta carbonica del 16,5% per la miscela al 10% di SCM e del 26,6% per quella al 30%. Tali risultati sono determinati sia dalla minore produzione di clinker, sia dalla capacità di sequestro di CO₂ della scoria.
- Tasso di cattura della CO₂: il processo di carbonatazione permette di incorporare stabilmente 7,32 kgCO₂ nello scenario al 10%, valore che sale a 21,96 kgCO₂ nello scenario al 30%.

L'analisi ha mostrato riduzioni significative anche per il consumo di risorse fossili (fino al 17%) e l'acidificazione (fino al 22,2%), confermando un miglioramento del profilo ambientale rispetto ai benchmark tradizionali CEM I e CEM II.

In conclusione, lo studio dimostra che la sostituzione del clinker con scorie d'acciaio carbonatate apporta benefici ambientali lungo il processo produttivo. È tuttavia necessario evidenziare come l'integrazione delle scorie EAF comporti una riduzione delle prestazioni meccaniche in termini di resistenza rispetto a un cemento composto esclusivamente da clinker. La scelta tra gli scenari analizzati permetterà di bilanciare gli obiettivi di sostenibilità con le specifiche necessità strutturali, definendo un nuovo standard per l'edilizia a ridotta impronta carbonica.

Bibliografia

- [1] BS EN ISO 14044:2006+A2:2020, Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines, European Committee for Standardization, BSI Standards Limited, 2018.
- [2] UNI EN 197-1
- [3] UNI EN 196-1
- [4] Bonfante F.; Tulliani J.M.; Ferrara G.; Palmero P.; Humbert P.; Garufi D., *Aqueous carbonation of EAF steel slag to produce Supplementary Cementitious Material: Effects on mineral composition, hydration reactivity and mechanical properties*, «Construction and Building Materials», vol. 479, 2025, pp. 1-16.
- [5] OpenLCA - Basic Modelling in openLCA- Software Version: Manual Version: 1.3 (June 2020).
- [6] Commissione europea - raccomandazione della commissione del 16.12.2021 sull'uso dei metodi dell'impronta ambientale per misurare e comunicare le prestazioni ambientali del ciclo di vita dei prodotti e delle organizzazioni. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=PI_COM:C\(2021\)9332](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=PI_COM:C(2021)9332) (22/01/2026)
- [7] Eloneva S., *Reduction of CO₂ emissions by mineral carbonation: Steelmaking slags as raw material with a pure calcium carbonate end product*, Doctoral dissertation, Aalto University, 2010.
- [8] Bonfante F.; Ferrara G.; Humbert P.; Garufi D.; Tulliani J.M.; Palmero P., *CO₂ Sequestration Through Aqueous Carbonation of Electric Arc Furnace Slag*, «Journal of Advanced Concrete Technology», vol. 22, 2024, pp. 207 - 218.
- [9] Piccinno F.; Hischier R.; Seeger S.; Som C., *From laboratory to industrial scale: a scale-up framework for chemical processes in life cycle assessment studies*, Journal of Cleaner Production, Volume 135, 2016, Pages 1085-1097, ISSN 0959-6526.
- [10] Tsakiridis P.E.; Papadimitriou G.D.; Tsvivilis S.; Koroneos C.; *Utilization of steel slag for Portland cement clinker production*. J Hazard Mater. 2008 Apr 1;152(2):805-11. doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.07.093. Epub 2007 Aug 2. PMID: 17869414.
- [11] Huijgen WJJ.; Comans RNJ.; Witkamp GJ.; Ruijg GJ., *Consumo energetico e sequestro netto di CO₂ della carbonatazione minerale acquosa. Ricerca in chimica industriale e ingegneristica*, 45 (26), 2006, 9184-9194.
- [12] Biava G.; Depero L.E.; Bontempi E., *Accelerated Carbonation of Steel Slag and Their Valorisation in Cement Products: A Review*, Spanish Journal of Soil Science, 14, 2024, 12908.
- [13] Blengini G.A.; Santagata E.; Farina A.; Zanetti M.C., *Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement*, Journal of Resources, Conservation and Recycling 117, 2019, 204-212.

- [14] Cappello P.; Ghirotto A., *Corrosione delle armature in calcestruzzi con cementi eco-sostenibili* [Tesi di laurea magistrale], Politecnico di Milano, 2013/2014.
- [15] Vinci A.; *Calcestruzzi innovativi: applicazione per strutture sostenibili*, [Tesi di laurea magistrale], Politecnico di Torino, 2018/2019.
- [16] De Santis A.; Lavinia C., Gruppo di lavoro ENEA sui certificati bianchi – settore cemento, 2014.
- [17] Liu J.; Bai, X.; Kong, L.; Bai, Y. *WaterUseEfficiencyAssessmentof CementProductionBasedonLife Cycle Analysis*. Sustainability, 2025, 17, 8225. <https://doi.org/10.3390/su17188225>.
- [18] Sposato P.; Luciano A.; Corrado S.; Altamura P., Rinaldi C., *Studio LCA della filiera del cemento - progetto Arcadia* - approccio ciclo di vita nei contratti pubblici e banca dati italiana LCA per l'uso efficiente delle risorse, febbraio 2022.
- [19] Hewlett, P. C., & Liska, M., *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 0081007736, 9780081007730 Elsevier, 2019.
- [20] EPD, Colacem, 2024
- [21] Federbeton, Rapporto di Sostenibilità Federbeton 2023
- [22] EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2023
- [23] Pavl ůu, T.; Pešta, J.; Vlach, T.; Fořrtová, K. *Environmental Impact of Concrete Slab Made of Recycled Aggregate Concrete Based on Limit States of Load-Bearing Capacity and Serviceability– LCA Case Study*. Materials 2023, 16, 616.
- [24] RACCOMANDAZIONE DELLA COMMISSIONE, del 16.12.2021, sull'uso dei metodi dell'impronta ambientale per misurare e comunicare le prestazioni ambientali del ciclo di vita dei prodotti e delle organizzazioni - Categorie di impatto dell'EF
- [25] Fantke P.; Jolliet O.; Apte J.S.; Hodas N.; John Evans J.; Weschler C.J.; Stylianou K.; Jantunen M.; McKone T, *Characterizing Aggregated Exposure to Primary Particulate Matter: Recommended Intake Fractions for Indoor and Outdoor Sources*, , «Enviromental science and technology», Vol. 51 n.16, 2017
- [26] Saouter E.; Biganzoli F.; Ceriani L.; Versteeg D.; Crenna E.; Zampori L.; Sala S.; Pant R., *Impronta ambientale: aggiornamento dei metodi di valutazione dell'impatto del ciclo di vita - Ecotossicità delle acque dolci, tossicità umana, cancro e non cancro*, EUR 29495 EN, Ufficio delle pubblicazioni dell'Unione europea, Lussemburgo, 2018.
- [27] Frischknechta R.; Braunschweigb A.; Hofstetterc P.; Suter P., *Human health damages due to ionising radiation in life cycle impact assessment*, Environmental Impact Assessment Review, 159-189, 300.
- [28] Van Zelm R.; Huijbregts M.; Den Hollander A.; Van Jaarsveld H.; Sauter F.; Struijs J., Van Wijnen H., Van de Meent D., *European characterization factors for human health damage of PM10*

and ozone in life cycle impact assessment, *Atmospheric Environment*, Volume 42, Issue 3, Pages 441-453, 2008.

[29] Seppälä J.; Posch M.; Johansson M.; Hettelingh J.P., *Country-dependent Characterisation Factors for Acidification and Terrestrial Eutrophication Based on Accumulated Exceedance as an Impact Category Indicator*, *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2006.

[30] Struijs J.; Zwart A.; Huijbregts M., *Characterization factors for inland water eutrophication at the damage level in life cycle impact assessment*. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 16. 59-64, 2009.

[31] De Laurentiis V.; Secchi M.; Bos U.; Horn R.; Laurent A.; Sala S., *Soil quality index: Exploring options for a comprehensive assessment of land use impacts in LCA*, *Journal of Cleaner Production*, Volume 215, 2019.

[32] Boulay AM.; Bare J.; Benini L., *Il modello di caratterizzazione consensuale WULCA per le impronte di scarsità idrica: valutazione degli impatti del consumo idrico in base all'acqua disponibile rimanente (AWARE)*. *Int J Life Cycle Assess*, 368-378, 2018.

[33] van Oers L.; Guinée JB.; Heijungs R.; *Potenziali di esaurimento delle risorse abiotiche (ADP) per gli elementi rivisitati: aggiornamento delle stime delle riserve definitive e introduzione di serie temporali per i dati di produzione*, *Int J Life Cycle Assess*, 294-308, 2002.

[34] Report, Joint Research Centre, 2024.

Ringraziamenti

Alla conclusione di questo percorso, vorrei esprimere i miei più sinceri ringraziamenti a tutti coloro che, con dedizione e pazienza, hanno contribuito alla realizzazione di questa tesi.

Ringrazio la mia Relatrice, la Prof.ssa Paola Palmero, per avermi guidata con estrema professionalità durante tutto lo sviluppo della tesi. La ringrazio per la fiducia dimostrata e per il fondamentale supporto fornito in ogni fase del lavoro.

Desidero ringraziare i miei Correlatori per il tempo e le energie dedicati a questo progetto. Ringrazio la Prof.ssa Antonella Sola, la Dott.ssa Francesca Bonfante e il Dott. Giuseppe Ferrara per il prezioso contributo tecnico e la costante disponibilità.

A tutti loro rivolgo la mia profonda gratitudine per le attente correzioni fornite e per la precisione dei suggerimenti forniti, essenziali per la qualità di questo elaborato.

Un immenso grazie va ai miei genitori, per aver sempre creduto in me e per avermi sostenuta con amore.

Infine, un pensiero speciale va ai miei amici: a Margherita ed Elisa, sorelle indispensabili senza le quali non potrei vivere; a Vittoria, Arianna e Matteo, per la loro costante presenza che mi fa sentire a casa. Un grazie ai “salamini del mio cuore” – Fabio, Matteo D., Dad, Martino, Giulia C. e Giulia B. – per la serenità dei momenti passati insieme a guardare il mare. Ringrazio infine Davide e Leandro, i migliori compagni di lavoro che un team di Atelier possa desiderare.