

Position Paper 2024

n.7

LIFE CYCLE ASSESSMENT E LA CATENA DEL VALORE DELLE INFRASTRUTTURE SOSTENIBILI



Position Paper 2024

n.7

LIFE CYCLE ASSESSMENT
E LA CATENA DEL VALORE
DELLE INFRASTRUTTURE
SOSTENIBILI



An aerial photograph of a highway tunnel. The tunnel has two large arched entrances. Inside, there is traffic including a white van, a dark car, a white truck, and a blue truck. On the right side of the tunnel, several workers in high-visibility vests are standing near a red and white barrier. The surrounding area is lush with green trees and vegetation.

AMPLIA

INFRASTRUCTURES

Gruppo Autostrade per l'Italia

**Leader in Italia
nella realizzazione
di infrastrutture complesse**

CONTATTI +39 0645682101 - mail@ampliaspa.it - www.ampliaspa.it

Life Cycle Assessment e la catena del valore delle Infrastrutture Sostenibili

INDICE

<i>Premessa</i>	6
<i>Introduzione</i>	7
Parte prima:	
LA METODOLOGIA DELLA LCA E LE INFRASTRUTTURE	11
1.1 Il Life Cycle Thinking e il Life Cycle Assessment di una Infrastruttura	12
1.1.1 <i>Una visione sistemica</i>	
1.1.2 <i>Il Green Deal della Comunità Europea</i>	
1.2 Dare un valore misurabile alla sostenibilità: cosa manca per rendere sostenibile la supply chain delle costruzioni	15
1.3 Life Cycle Thinking e Infrastrutture	16
1.3.1 <i>Il ciclo di vita dell'infrastruttura</i>	
1.3.2 <i>Il nuovo Asset Management</i>	
1.4 Life Cycle Assessment e Infrastrutture	23
1.4.1 <i>I tre livelli di applicazione del Life Cycle Assessment nelle Infrastrutture</i>	
1.4.2 <i>Il framework Europeo dell'Impronta Ambientale</i>	
1.4.3 <i>Maturità del settore delle Infrastrutture rispetto all'impiego del Life Cycle Assessment: opportunità e limitazioni</i>	
1.5 La dichiarazione ambientale di prodotto	36
1.5.1 <i>Cosa è una EPD e come si relaziona alla LCA</i>	
1.5.2 <i>Contenuto di una EPD</i>	
1.5.3 <i>La verifica di terza parte e la pubblicazione dell'EPD</i>	
1.5.4 <i>La Confrontabilità</i>	
1.5.5 <i>L'utilizzo di una EPD</i>	
1.6 Life Cycle Assessment e Protocolli per la Sostenibilità	41
1.6.1 <i>I protocolli di sostenibilità e la diffusione della cultura della sostenibilità</i>	
1.6.2 <i>Il Protocollo Envision</i>	
1.6.3 <i>La sinergia fra protocolli di sostenibilità e la Life Cycle Assessment</i>	
1.6.4 <i>Il criterio DNSH e il Protocollo Envision: le Linee Guida ICMQ</i>	
1.6.5 <i>Il ciclo di vita delle infrastrutture: tecnologie e materiali sostenibili con l'indirizzo strategico di Envision</i>	
1.6.6 <i>Scegliere le fasi del ciclo di vita e i materiali rilevanti</i>	
1.6.7 <i>Approfondire le performance ambientali di un processo costruttivo</i>	
1.6.8 <i>Confrontare performance di processi alternativi</i>	
1.7 Life Cycle Assessment (LCA) nelle fasi preliminari di progettazione: vantaggi e limitazioni	57
1.8 Life Cycle Assessment e Green Procurement	61
1.8.1 <i>La revisione in corso della Construction Products Regulation della Unione Europea</i>	
1.8.2 <i>Investire nella sostenibilità</i>	
1.9 Processi digitali a supporto di analisi LCA	64
1.9.1 <i>Introduzione di BIM e digitalizzazione per la sostenibilità</i>	
1.9.2 <i>Metodologia BIM e Life Cycle Assessment</i>	
1.9.3 <i>Digitalizzazione delle Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (Environmental Product Declaration)</i>	
1.9.3 <i>Modelli di dati per l'uso delle Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD)</i>	
1.10 Bibliografia	71
Parte seconda:	
LA METODOLOGIA LCA APPLICATA AI CONGLOMERATI CEMENTIZI PER LE INFRASTRUTTURE	87
2.1 Introduzione	87
2.2 Il calcestruzzo	87
2.2.1 <i>Life Cycle Assessment e calcestruzzi</i>	
2.2.2 <i>Riferimenti normativi</i>	
2.3 Glossario	89
2.4 Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione	91
2.4.1 <i>Unità dichiarata</i>	
2.4.2 <i>Confini del sistema</i>	
2.4.3 <i>Qualità dei dati</i>	
2.4.4 <i>Metodo per la valutazione dell'impatto</i>	
2.5 Inventario (Life Cycle Inventory, LCI)	93

2.6 Valutazione degli impatti (Life Cycle Impact Assessment, LCIA)	95
2.6.1 <i>Classificazione</i>	
2.7.2 <i>Caratterizzazione</i>	
2.7 Risultati della Life Cycle Assessment e interpretazione	98
2.8 Classificazione del calcestruzzo – stato dell’arte in Europa	102
2.9 Conclusioni	105
2.10 Bibliografia	106
Parte terza:	
LA METODOLOGIA LCA APPLICATA ALLE ARMATURE PER I CONGLOMERATI CEMENTIZI	110
3.1 Premessa	110
3.1.1 <i>Life Cycle Assessment e armature per il calcestruzzo</i>	
3.1.2 <i>Riferimenti normativi</i>	
3.1.3 <i>Glossario</i>	
3.2 Definizione dell’obiettivo e campo di applicazione	115
3.2.1 <i>Unità dichiarata</i>	
3.2.2 <i>Confini del sistema</i>	
3.2.3 <i>Qualità dei dati</i>	
3.2.4 <i>Rappresentatività temporale dei dati</i>	
3.2.5 <i>Rappresentatività geografica dei dati</i>	
3.2.6 <i>Metodo per la valutazione dell’impatto</i>	
3.3 Inventario (Life Cycle Inventory, LCI)	118
3.4 Valutazione degli impatti (Life Cycle Impact Assessment, LCIA)	119
3.4.1 <i>Classificazione</i>	
3.4.2 <i>Caratterizzazione</i>	
3.5 Descrizione dell’opera oggetto di studio	122
3.5.1 <i>Soluzione tradizionale: muro con armatura in acciaio</i>	
3.5.2 <i>Muro rinforzato con macro fibre sintetiche a parziale sostituzione dell’armatura in acciaio</i>	
3.5.3 <i>Muro con sostituzione delle armature in acciaio con barre in vetroresina</i>	
3.6 Risultati della Life Cycle Assessment e interpretazione	124
3.6.1 <i>Confronto tra EPD di diversi produttori di acciaio</i>	
3.6.2 <i>Confronto tra opere in calcestruzzo armato</i>	
3.7 Conclusioni	129
3.8 Addendum normativo per materiali compositi	131
3.9 Bibliografia	134
Parte quarta:	
LA METODOLOGIA LCA APPLICATA AI CONGLOMERATI BITUMINOSI PER LE INFRASTRUTTURE	137
4.1 Introduzione	137
4.2 Glossario	138
4.3 Conglomerato bituminoso: descrizione del prodotto	139
4.3.1 <i>Classificazione</i>	
4.4 Produzione	140
4.5 Il quadro normativo	141
4.6 Analisi delle differenze in termini di impatto ambientale	142
4.6.1 <i>Composizione - A1</i>	
4.6.2 <i>Movimentazione delle quantità – A2</i>	
4.6.3 <i>Processi di produzione – A3</i>	
4.6.4 <i>Trasporto e posa – A4 e A5</i>	
4.6.5 <i>Circolarità della miscela</i>	
4.6.6 <i>Conclusioni</i>	
4.7 LCA di una pavimentazione flessibile	146
4.7.1 <i>Fase di uso (B)</i>	
4.7.2 <i>Fine vita (C)</i>	
4.7.3 <i>Benefici oltre i confini del sistema (D)</i>	
4.8 Analisi dei dati di flusso	150
4.8.1 <i>Bitume</i>	
4.8.2 <i>Aggregati</i>	
4.8.3 <i>Additivi</i>	
4.9 Limiti di metodologia e di database e semplificazioni da adottare	156
4.10 Conclusioni	157
4.11 Bibliografia	158
Gruppo di lavoro	160

Premessa

C'è un'affermazione in questo settimo position paper prodotto dalla nostra associazione che ben sintetizza una delle principali motivazioni che ci hanno spinto a creare un gruppo di lavoro dedicato all'importanza del Life Cycle Assessment (di seguito LCA) per la catena del valore delle infrastrutture sostenibili, ovvero la persistenza di un 'sentire' diffuso nel mondo delle costruzioni che la sostenibilità sia un costo aggiuntivo.

Per convincere chi lo ritiene un ostacolo rilevante ad un approccio sostenibile al costruire vi è un solo modo: dimostrare attraverso metriche, metodologie e strumenti di misurazione comparabili che scegliere soluzioni che premiano la sostenibilità ambientale procura anche vantaggi economici. Ed è ciò che vogliamo dimostrare con questo position paper che è il frutto non solo di riflessioni condivise basate su esperienze concrete, ma anche il risultato di specifiche applicazioni di laboratorio relativamente ai tre principali materiali utilizzati nelle infrastrutture: il calcestruzzo, le armature in ferro e vetro resina e il conglomerato bituminoso. L'analisi LCA sui materiali costituisce il punto di partenza e il principale riferimento per valutare gli impatti rispetto ad un lotto stradale o autostradale, a una tratta ferroviaria, o un ramo di rete elettrica o altri similari, per il suo intero ciclo di vita, che comprende la costruzione, la manutenzione e l'esercizio.

Come si ricorda nell'introduzione "la Life Cycle Assessment è lo strumento che sia nella fase di costruzione sia nella fase di esercizio, fornisce le informazioni necessarie alla valorizzazione in senso economico, ambientale e sociale dell'asset infrastrutturale, in linea con le indicazioni della ISO 55000 e delle moderne metodologie di asset management." Nel position paper si evidenzia la stretta correlazione tra LCA ed EPD (Environmental Product Declaration), così come l'importanza di guardare e trovare adeguate correlazioni con la Tassonomia europea, l'applicazione del DNSH e il ricorso a protocolli di sostenibilità.

L'integrazione tra LCA ed EPD costituisce una soluzione determinante nel favorire un dialogo trasparente e basato su dati quantitativi oggettivi tra i produttori e i loro clienti, favorendo scelte coerenti verso una sempre maggiore sostenibilità delle infrastrutture da parte delle committenze. Senza dimenticare come queste ultime possono in questo modo stimolare la filiera green attraverso politiche premiali e allo stesso tempo rendere le opere più appetibili da parte del mondo finanziario. Ed è in quest'ottica che accanto ad alcune indicazioni puntuali rivolte ai produttori dei materiali considerati vengono avanzate due proposte per valutare soluzioni alternative basate su parametri oggettivi di impatto a cui collegare modalità innovative di premialità.

Lorenzo Orsenigo

Presidente AIS Associazione Infrastrutture Sostenibili

Introduzione

Questo position paper mira a definire delle linee guida per l'utilizzo della Life Cycle Assessment (LCA) come strumento per quantificare l'impatto ambientale di specifici processi di costruzione all'interno dell'ecosistema infrastrutturale, con la finalità di migliorare la sostenibilità della filiera delle costruzioni. Sebbene la Life Cycle Assessment sia stata utilizzata nel mondo delle infrastrutture principalmente per impostare la strategia generale di politiche e progetti, può diventare un potente fattore abilitante per le pratiche di approvvigionamento sostenibile quando è supportato da dati specifici sui materiali e sui processi tecnologici: scegliendo il giusto obiettivo in termini di fase (cradle-to-gate, cradle-to-site, ecc.) e utilizzando dati specifici relativi al processo (ad esempio, quelli provenienti dalle Dichiarazioni Ambientali di Prodotto), la LCA consente di comparare diversi scenari di impiego di materiali o di dimensionare il beneficio nell'impiego di uno approccio costruttivo innovativo o più sostenibile. I principali obiettivi di questo documento sono i seguenti:

1. Come individuare le fasi critiche del ciclo di vita per le analisi LCA e come anticipare le decisioni strategiche in merito alla sostenibilità.
2. Quali materiali, e i relativi dati, sono rilevanti per le analisi dell'LCA e come creare un inventario specifico del processo.
3. Definire quali sono i criteri.
4. Come utilizzare l'LCA come supporto alle scelte di approvvigionamento.
5. Come utilizzare l'LCA di processo, partendo da casi pratici del settore della costruzione delle infrastrutture.
6. Come utilizzare l'LCA per fornire elementi quantitativi alla valutazione di infrastrutture effettuata con protocolli di sostenibilità.
7. Fornire spunti sulle opportunità che la digitalizzazione offre in relazione alla condivisione e alla trasparenza dei dati sulla sostenibilità.

Il paper è organizzato in quattro sezioni:

- Sezione 1: La metodologia Life Cycle Assessment e le Infrastrutture.
- Sezione 2: La metodologia Life Cycle Assessment applicata ai conglomerati cementizi per le infrastrutture.
- Sezione 3: La metodologia Life Cycle Assessment applicata alle armature per i conglomerati cementizi.
- Sezione 4: La metodologia Life Cycle Assessment applicata ai conglomerati bituminosi per le infrastrutture.

La misura della sostenibilità di una infrastruttura è stata affrontata negli ultimi anni in maniera non sempre sistematica e con approcci a volte qualitativi e altre volte quantitativi. In questo paper abbiamo evidenziato come sia opportuno mettere ‘a sistema’ alcune di queste metodologie e dar luogo ad un approccio integrato che consenta di supportare quantitativamente le decisioni relative alla sostenibilità nei tre diversi livelli di articolazione di un progetto infrastrutturale: a livello della rete modale, a livello dello specifico progetto e a livello del particolare processo costruttivo.

Sono tutti e tre importanti per definire e spingere lo sviluppo di una catena del valore ‘green’ nel mondo delle costruzioni infrastrutturali. La definizione quantitativa delle prestazioni, in particolare ambientali, passa attraverso l’applicazione del life cycle thinking e del life cycle assessment (LCA). Ne abbiamo evidenziato le 7 potenzialità e lo stato dell’arte e abbiamo sottolineato come una analisi LCA possa costituire il fondamento quantitativo di altri assessment importanti, come quelli effettuati attraverso i Protocolli di Sostenibilità (come Envision) o i criteri della Tassonomia Europea (il criterio DNSH).

In particolare, abbiamo evidenziato come una analisi del ciclo di vita al livello degli specifici processi costruttivi di una infrastruttura possa essere determinante per definire scenari progettuali, tecnologici e di approvvigionamento alternativi, in una ottica di sostenibilità. In questi casi, la rispondenza fra dati di progetto/processo e realtà del cantiere è determinante e può essere essenziale per supportare lo sviluppo della green supply chain della costruzione di infrastrutture. Abbiamo visto come, sotto questo aspetto, la diffusione delle Environmental Product Declarations nel mondo delle costruzioni, in particolare per quel che riguarda prodotti da ‘confezionare al cancello-cantiere’, fornisce quegli ‘elementi base’ di conoscenza che inquadrano quantitativamente la sostenibilità del singolo processo. Nelle prossime sezioni affronteremo in dettaglio il caso del calcestruzzo, dei conglomerati bituminosi e delle armature per i conglomerati cementizi stessi (in acciaio o in vetroresina).

Un ulteriore, e forse definitivo, passo in questa direzione può essere rappresentato dalla diffusione degli EPD di progetto, ovvero di dichiarazioni ambientali che inquadrino lo specifico mix design di sito e la specifica logistica di cantiere: così facendo diventa possibile una misura puntuale della performance di sostenibilità a tutto vantaggio delle decisioni strategiche che ogni giorno devono prendere committenti, progettisti e contractors sia in fase di realizzazione di nuove opere, sia in fase di manutenzione e rigenerazione di quelle esistenti.



ICMQ

Società Benefit



IMPARZIALITÀ E COMPETENZA PER L'INNOVAZIONE E LA SOSTENIBILITÀ



Affidabilità, professionalità e tempestiva analisi dei *trend* consentono a ICMQ di essere il leader delle certificazioni di sostenibilità in Italia e un riferimento a livello internazionale.



ICMQ propone valutazioni e certificazioni ad aziende e professionisti sui sistemi di gestione, sui prodotti/servizi e le competenze, garantendo l'imparzialità di un ente terzo, indipendente e accreditato.



Sostenibilità, innovazione digitale e criteri ESG sono gli ambiti della nuova leadership di ICMQ.

WWW.ICMQ.IT





Parte prima

La metodologia della Life Cycle Assessment e le Infrastrutture

1. La metodologia della Life Cycle Assessment e le Infrastrutture

La nuova strategia industriale dell'Unione Europea del maggio 2021 ha identificato l'ecosistema delle costruzioni come uno dei 14 ecosistemi europei prioritari e, di conseguenza, attentamente monitorati dalla Commissione. Questo settore impiega 25 milioni di persone e comprende 5,3 milioni di imprese, il 99,9 % delle quali sono PMI. Inoltre, rappresenta quasi il 10 % del valore aggiunto dell'UE e 430 000 aziende sono attive nell'industria dei prodotti da costruzione europea, che ha un fatturato annuo di 800 miliardi di euro e un valore aggiunto lordo di 240 miliardi di euro. Durante l'ultimo triennio, molti prodotti da costruzione (come quelli che derivano da alluminio, rame, acciaio o legno) sono stati colpiti da significative oscillazioni tra domanda e offerta e picchi di prezzo dovuti a forte richiesta, a dinamiche globali relative all'estrazione o costi di trasporto elevati. Inoltre, il fatto che la produzione di alcuni prodotti da costruzione (come quelli in acciaio, vetro e alluminio) sia ad alta intensità energetica la rende particolarmente suscettibile agli effetti dell'attuale crisi energetica [EPRS, 2022].

Il settore delle costruzioni utilizza 1,6 miliardi di tonnellate di materiali all'anno. La produzione di questi materiali comporta 250 milioni di tonnellate di emissioni di anidride carbonica equivalente (CO₂eq) e, nel caso di un edificio, la fase della sua costruzione mobilita circa la metà della emissione complessiva nel corso della sua vita. Ci succederà ancora, nell'ambito di un position paper sulle infrastrutture, di citare dati riferiti al caso di un edificio: il mondo delle infrastrutture è rimasto indietro, dal punto di vista della sostenibilità, rispetto a quello dell'edilizia e i dati ambientali di settore sono principalmente relativi a quest'ultima. A completamento del quadro, va rilevato che i rifiuti da costruzione e demolizione costituiscono il più grande flusso di rifiuti nell'Unione Europea, rappresentando oltre un terzo di tutti i rifiuti prodotti. Per contro, i tassi di riutilizzo e riciclo variano notevolmente all'interno della stessa UE. Sebbene essi siano generalmente elevati, (la direttiva quadro sui rifiuti, 2008/98/CE, ha fissato un obiettivo di recupero per questo flusso di rifiuti del 70 % in peso entro il 2020), il recupero si basa ancora principalmente su operazioni di stoccaggio (in discariche più o meno specializzate) e/o di recupero di bassa qualità tecnologica (ad esempio il riutilizzo di aggregati riciclati nei sottofondi stradali e nei conglomerati in genere).

Un quadro di questo tipo richiede un intervento importante sulla catena del valore del settore delle costruzioni per renderla sostenibile alla luce degli obiettivi sempre più stringenti ed ambiziosi che via via la Commissione Europea e i Paesi membri stabiliscono. Il life cycle thinking e gli strumenti che esso ha prodotto, il life cycle assessment in particolare, possono svolgere un ruolo essenziale in questo contesto. Essi rendono possibile la valutazione quantitativa della performance di sostenibilità dei prodotti e dei processi che analizzano.

Questo position paper intende mettere in evidenza il contributo che la metodologia della Life Cycle Assessment applicata ai processi di costruzione (anche in cantiere) può dare a tutti i decisori (committenti, progettisti, decisori del procurement, costruttori, gestori di infrastrutture) nell'orientare la value chain del settore delle costruzioni verso la sostenibilità. Risulterà anche evidente come le strategie di sostenibilità più incisive ed efficaci siano quelle che anticipano il più possibile le valutazioni di impatto incorporandole nella progettazione e predisponendo momenti/fasi del processo decisionale dedicate alla valutazione di alternative di processo che massimizzino il beneficio in termini di sostenibilità.

1.1 IL LIFE CYCLE THINKING E IL LIFE CYCLE ASSESSMENT DI UNA INFRASTRUTTURA

1.1.1 Una visione sistemica

Lo sviluppo sostenibile ha visto la sua definizione formale nel rapporto Brundtland del 1987 e focalizza la nostra attenzione sulla necessità di mantenere un equilibrio fra le esigenze delle generazioni del presente e quelle del futuro [Paulsen, 2001]. La crescita della nostra consapevolezza rispetto alla sostenibilità è anche una conseguenza del sempre più evidente cambiamento climatico, della scarsità di risorse, di territorio libero e di energia.

Gli effetti che lo sfruttamento incontrollato del pianeta ingenera hanno un significativo impatto sull'intero ecosistema e come tali non possono essere schematizzati con delle analisi lineari tradizionali. È possibile che una re-azione volta a minimizzare un impatto in particolare, comporti la massimizzazione involontaria di un altro o che la focalizzazione su una particolare fase di impiego non permetta di vedere la retroazione sulle altre. Questa è la ragione per cui, nel prendere in considerazione gli effetti della produzione o della costruzione di una infrastruttura, è fondamentale considerare l'intero ciclo di vita dell'opera. Si possono ridurre le fasi del ciclo di vita di un prodotto o di un processo tecnologico a (a) come si ricavano i materiali che lo costituiscono, (b) come se ne realizzano le parti, (c) come lo si costruisce, (d) come lo si usa e lo si gestisce, (e) come lo si mantiene in buone condizioni, (f) come lo si distrugge/demolisce e (g) come si recupera o smaltisce, secondo una visione from cradle to grave ('dalla culla alla tomba') [Simonen, 2014]. Per prevenire ciò che viene definito "burden shifting" (ovvero lo spostamento degli impatti lungo la stessa catena del valore o da una catena all'altra), è necessario prendere in considerazione tutti questi momenti del ciclo di vita. Concentrare le azioni su una potrebbe, involontariamente, incrementare l'impatto di una delle altre [Haushild, 2017].

La disciplina della valutazione del ciclo di vita (o Life Cycle Assessment, LCA) risponde a questa esigenza di misurare l'effetto (o meglio, l'impatto) complessivo di prodotti e processi

rispetto all'ambiente. Da quando è stata sviluppata per la prima volta negli anni '60, la LCA ha avuto un'evoluzione significativa in termini metodologici ed applicativi. Con particolare riferimento al caso delle costruzioni e delle infrastrutture, la LCA può aiutare ingegneri, progettisti e produttori a prendere decisioni più efficaci, valutando il modo in cui i materiali, le componenti e i processi della costruzione influiscono sull'ambiente e supportandoli nella scelta di strategie e modalità per ridurre questi effetti.

Quando si parla di ciclo di vita le metafore di riferimento sono sempre, e volutamente, biologiche e sistemiche: il life-cycle rende conto della evoluzione biologica di un organismo o di un ecosistema da quando nasce (nel nostro caso l'estrazione dei materiali originari) a quando muore (l'obsolescenza, la demolizione, il riuso ecc. di una infrastruttura). Una seconda metafora arriva per interposizione delle scienze sociali (la creò Lord Beveridge, l'inventore del concetto di Stato Sociale) ed è quella del *from cradle to grave* (dalla culla alla tomba). E' un altro modo di parlare di life cycle, e consente tutta una serie di varianti: (1) *from cradle to cradle* (dalla culla alla culla), come recita il titolo del famoso libro di William McDonough e Michael Braungart, per riferirsi all'adozione dei criteri di circolarità nella gestione dei rifiuti, (2) *from cradle to gate* o *from cradle to site* (dalla culla al cancello), per riferirsi a processi che vanno dalle materie di origine al 'cancello' del sito di utilizzo, (3) *from gate to gate* o *from gate to grave* (da cancello a cancello o da cancello alla tomba), per indicare le fasi del ciclo di vita che vanno da una fase intermedia all'altra o da una fase intermedia a quella finale.

Questo position paper mira a definire delle linee guida per l'utilizzo dell'LCA come strumento per quantificare l'impatto ambientale di specifici processi di costruzione all'interno dell'ecosistema infrastrutturale, con la finalità di migliorare la sostenibilità della filiera delle costruzioni. Sebbene l'LCA sia stata utilizzata nel mondo delle infrastrutture principalmente per impostare la strategia generale di politiche e progetti, può diventare un potente fattore abilitante per le pratiche di approvvigionamento sostenibile quando è supportato da dati specifici sui materiali e sui processi tecnologici: scegliendo il giusto obiettivo in termini di fase (*cradle-to-gate*, *cradle-to-site*, ecc.) e utilizzando dati specifici relativi al processo (ad esempio, quelli provenienti dalle Dichiarazioni Ambientali di Prodotto), la LCA consente di comparare diversi scenari di impiego di materiali o di dimensionare il beneficio nell'impiego di uno approccio costruttivo innovativo o più sostenibile.

I principali obiettivi di questo documento sono, quindi:

1. Come individuare le fasi critiche del ciclo di vita per le analisi LCA e come anticipare le decisioni strategiche in merito alla sostenibilità.
2. Quali materiali, e i relativi dati, sono rilevanti per le analisi dell'LCA e come creare un inventario specifico del processo.
3. Definire quali sono i criteri.

4. Come utilizzare l’LCA come supporto alle scelte di approvvigionamento.
5. Come utilizzare l’LCA di processo, partendo da casi pratici del settore della costruzione delle infrastrutture.
6. Come utilizzare l’LCA per fornire elementi quantitativi nel processo di valutazione delle infrastrutture, in conformità con i protocolli di sostenibilità.
7. Fornire spunti sulle opportunità che la digitalizzazione offre in relazione alla condivisione e alla trasparenza dei dati sulla sostenibilità.

1.1.2 Il Green Deal della Comunità Europea

Il Green Deal europeo è un pacchetto di iniziative strategiche che mira ad avviare l’UE sulla strada di una transizione verde, con l’obiettivo ultimo di raggiungere la neutralità climatica entro il 2050. Le iniziative del Green Deal mettono in evidenza la necessità di un approccio sistemico e intersettoriale in cui tutti i settori strategici pertinenti contribuiscono all’obiettivo ultimo in materia climatica. Il pacchetto comprende iniziative riguardanti clima, ambiente, energia, trasporti, industria, agricoltura e finanza sostenibile, tutti settori fortemente interconnessi. Per aiutare nel processo di rendere sia la produzione che il consumo più consapevoli (e responsabili) dal punto di vista ambientale, la Commissione europea (CE) ha creato un approccio di riferimento per l’impronta ambientale dei prodotti e delle organizzazioni che si fonda sul life cycle thinking; la creazione di questo approccio metodologico è stata indirizzata da quattro criteri principali in base ai quali essa deve potere:

- **Coprire l’intero ciclo di vita lungo tutta la catena del valore:** prendere in considerazione tutte le interazioni ambientali rilevanti associate al prodotto o al processo da ogni punto di vista della catena del valore, a partire dalla fase di estrazione delle risorse primarie per continuare attraverso le fasi di elaborazione, distribuzione, utilizzo fino all’eventuale smaltimento o riutilizzo. Poiché impatti significativi possono verificarsi “a monte” o “a valle” di un particolare punto, e poiché tali effetti possono non essere immediatamente evidenti, un approccio di questo tipo permette una gestione efficiente delle incidenze ambientali senza involontarie ‘esternalizzazioni’.
- **Prevedere valutazioni ambientali multicriterio:** incorporare tutti i pertinenti criteri di prestazione ambientale anziché una sola dimensione (come invece spesso avviene, ad esempio, con le emissioni di gas a effetto serra).
- **Aumentare la riproducibilità e la comparabilità delle analisi:** garantire che questa metodologia sia applicata in modo coerente, all’interno e tra i diversi studi comparativi.
- **Garantire che l’analisi descriva accuratamente i flussi di risorse materiali ed energetiche e le emissioni** associate alle catene di approvvigionamento direttamente collegate alle attività dell’organizzazione, al fine di fornire la base più realistica possibile per una migliore valutazione e gestione ambientale.

1.2 DARE UN VALORE MISURABILE ALLA SOSTENIBILITÀ: COSA MANCA PER RENDERE SOSTENIBILE LA SUPPLY CHAIN DELLE COSTRUZIONI

Le diverse linee guida per gli appalti dell'Unione Europea orientate alla valorizzazione delle filiere sostenibili (green procurement guidelines [EU, *Green Procurement Toolkit*, 2022]) consentono al decisore di includere nelle specifiche tecniche di fornitura dei requisiti riguardanti la fabbricazione o le caratteristiche di esercizio degli stessi orientate al miglioramento della loro prestazione ambientale. Nello specifico, acquisisce particolare rilevanza il concetto di misurabilità: come può un acquirente assicurarsi che gli standard stabiliti per i processi di produzione siano proporzionati agli obiettivi ambientali definiti dal decisore? L'orientamento dei normatori dell'Unione è quello di favorire una valutazione quantitativa basata sull'analisi del ciclo di vita dei prodotti e dei processi tecnologici che si intende acquistare. Laddove una analisi di dettaglio possa diventare onerosa, le linee guida aprono anche alla possibilità di appoggiarsi a valutazioni di settore o 'labeling' che possono essere di aiuto nel determinare quali criteri siano più appropriati o di riferimento per il caso specifico.

I criteri per gli appalti verdi dell'UE prendono spesso in considerazione questi riferimenti e identificano le tecniche di produzione applicabili per determinati gruppi di prodotti e servizi, come cibo, energia e prodotti tessili.

Nonostante gli evidenti benefici che gli appalti pubblici sostenibili potrebbero generare, nei fatti (e in letteratura) esiste da tempo un ampio dibattito sui tipi di barriere e sugli ostacoli che ne limitano l'effettiva diffusione. Eccone alcuni messi in evidenza.

- **È essenziale la piena consapevolezza e la conoscenza del tema della sostenibilità.**

Le principali Committenze e gli operatori più rilevanti del mercato nella realizzazione e gestione delle infrastrutture hanno sviluppato negli ultimi anni una significativa sensibilità nei confronti della sostenibilità e delle strategie di gestione degli asset. Tuttavia, nell'ambito operativo delle catene di fornitura legate in particolare alla fase di cantiere, permangono alcune criticità nell'attuare tali indirizzi. Ad esempio può succedere che gli specialisti del mondo degli acquisti non abbiano a disposizione le competenze tecniche e l'esperienza necessarie per ideare ed applicare procedure di approvvigionamento sostenibili (anche perché la sostenibilità è di per sé un concetto che viene declinato in maniera sempre diversa e spesso inutilmente complicata) [Montalban, 2017; Brammer e Walker 2011]. La stessa normativa EU, fornisce chiare linee guida strategiche ma risulta carente nei dettagli operativi. In altre parole, mancano framework ed esempi condivisi, consolidati e pratici rispetto a cosa significhi la sostenibilità sociale, economica e ambientale di un cantiere o di una tecnologia costruttiva [Testa et al., 2016], in particolare, non è ancora ben visibile un orientamento esplicito in merito alla formulazione di criteri e specifiche che della sostenibilità consentano la definizione univoca, la misurabilità e verificabilità: si tratta di un limite che si intende affrontare con il presente documento.

• **È determinante la congruenza e la comunicazione fra le funzioni aziendali che si occupano di sostenibilità nell'ambito delle organizzazioni.** Anche se può sembrare un fatto secondario, a volte, l'organizzazione (o la parte dell'organizzazione) che è responsabile degli investimenti e degli acquisti non è la stessa organizzazione (o la parte dell'organizzazione) che è responsabile del bilancio operativo per l'intero ciclo di vita dell'attività e quindi della 'certificazione' e delle metriche di sostenibilità. Poiché non è la stessa componente organizzativa a raccogliere la documentazione dei benefici ottenuti durante il ciclo di vita della struttura con pratiche sostenibili, possono nascere dei disallineamenti. Questioni operative di dettaglio come (a) la mancanza di comunicazione e coordinamento sia all'interno dell'organizzazione che tra fornitori e clienti, (b) la mancanza di supporto da parte della direzione, (c) la resistenza al cambiamento o (d) la mancanza di inclusione di strategie di sostenibilità nei documenti di politica degli appalti, possono creare difficoltà nell'implementazione di pratiche sostenibili. La settorializzazione ostacola la sostenibilità anche nell'ambito delle specifiche tecniche di fornitura dove va rilevato che i consulenti e i professionisti delle costruzioni in genere toccano il tema della sostenibilità per ultimo, il che contribuisce, attraverso i loro prodotti intellettuali, ad incrementare la mancanza di chiarezza sul tema dell'approvvigionamento sostenibile. In sintesi, le organizzazioni a volte adottano un approccio "frammentato" alla sostenibilità, e quindi i loro sforzi in quest'area possono apparire e risultare "scollegati" dalla strategia più ampia dell'azienda. Naturalmente, gli esempi positivi non mancano come succede per le grandi Committenze (quali RFI, Enel, Terna, Autostrade...) dove la sostenibilità della supply chain comincia ad essere significativamente stimolata.

• **L'impegno nei confronti della sostenibilità non deve essere influenzato dall'andamento dei cicli economici** o alimentare la percezione che affrontare la sostenibilità porti spesso a sostenere maggiori costi. Il 'sentire' molto diffuso del mondo delle costruzioni che la sostenibilità sia un costo aggiuntivo, rappresenta forse una delle sfide più significative alla pratica dell'approvvigionamento sostenibile su scala globale. Una presa di posizione da parte delle aziende della filiera delle costruzioni (committenza, consulenza, costruzioni, gestioni) potrebbe indirizzare in maniera significativa i decisori in genere, e i professionisti degli acquisti in particolare, ad optare per soluzioni più sostenibili. Certamente, l'impulso generato dal Resilience Recovery Plan Europeo ed il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza ha dato al tema della sostenibilità una rilevanza significativa; difatti anche nei casi in cui il breve termine non sembri premiare i temi della sostenibilità, se la prospettiva sia ampia (bottom line) o si allunga (medio e lungo termine) i benefici delle politiche sostenibili diventano evidenti.

1.3 LIFE CYCLE THINKING E INFRASTRUTTURE

Il concetto di ciclo di vita è particolarmente efficace per la gestione di patrimoni infrastrutturali, dove degli asset come strade, ponti, reti idriche, energetiche e di comunicazione, che hanno una vita utile molto lunga, si portano dietro impatti ambientali potenzialmente significativi ed

estesi. Affrontare la gestione di un asset infrastrutturale dal punto di vista del life cycle thinking e della sostenibilità significa puntare ad identificare e a prioritizzare gli impatti ambientali, così come quelli di costo e di gestione durante l'intero ciclo di vita, compresa la costruzione, la manutenzione e l'esercizio.

Il concetto di ciclo di vita utilizza un approccio sistemico per valutare gli impatti ambientali, ad esempio attraverso l'analisi quantitativa dell'impiego di materiali ed energia, delle emissioni e della produzione di rifiuti. Grazie ad una visione di questa natura, i responsabili delle decisioni nel processo di gestione degli asset sono indotti a concentrarsi soprattutto sui punti seguenti:

- Implementare pratiche sostenibili lungo tutte le fasi del ciclo di vita, tra cui: la progettazione per la sostenibilità, l'impiego di materiali e metodologie di costruzione sostenibili, la manutenzione e le pratiche operative che riducono al minimo l'impatto ambientale.

- Migliorare continuamente la gestione operativa ricorrendo estesamente a monitoraggio e rivalutazione, comprese le valutazioni periodiche del ciclo di vita e l'implementazione delle migliori pratiche e delle tecnologie emergenti.

- Considerare le esigenze e le aspettative delle parti interessate, comprese le comunità, le autorità di regolamentazione e gli utenti, in tutti i processi decisionali.

- Collaborare con i partner e le parti interessate per promuovere la sostenibilità e l'innovazione nella gestione degli asset infrastrutturali.

Come si vede, gli aspetti economici (e tecnici, ad esempio la durabilità, la resilienza, ecc.), gli aspetti ambientali e quelli sociali (gli impatti sulle comunità territoriali, i benefici economici indotti, ecc.) contribuiscono tutti alla logica del ciclo di vita e consentono un arricchimento a 360° della valutazione della performance di un asset di questo tipo.

La specificità delle infrastrutture rende l'applicazione di questi principi molto articolata ma, soprattutto, richiede una profonda conoscenza delle caratteristiche, della storia e del potenziale dell'asset specifico e, come abbiamo visto, ogni rete infrastrutturale rappresenta un 'prototipo' a sé, e quindi, dal punto di vista del Life Cycle Assessment, un 'inventario' sempre diverso e molto di prossimità.

1.3.1 Il ciclo di vita dell'infrastruttura

Riprendendo una visione suggestiva degli economisti del Collettivo per l'Economia Fondamentale [Barbera, Salento et al. 2018], le grandi infrastrutture che servono la vita quotidiana rappresentano non soltanto elementi di supporto ad altre attività economiche, né sono soltanto asset molecolari e isolati; al contrario, le grandi infrastrutture definiscono le coordinate spaziali e temporali della nostra esperienza.

Gran parte delle infrastrutture europee sono state costruite prima del 1960, e sono, ormai, prossime alla fine della loro vita utile teorica, che all'epoca si stimava in 30 o 50 anni. In alcuni casi, la qualità del servizio che esse rendono non è ottimale e lo stato di conservazione è critico. Anche se, come evidenziato da Farhani et al. (2019), la 'cultura' della manutenzione resta ancora relativamente debole per opere che furono pensate come 'sostanzialmente eterne', la rigenerazione delle infrastrutture esistenti richiede uno sforzo congiunto ed una attenzione enorme da parte del mondo politico, economico e tecnico. Diventa irrinunciabile una gestione strategica delle attività rigenerative, che passa dalla manutenzione ordinaria a quella straordinaria sulla base di assessment e valutazioni approfondite, che devono fare i conti con le esigenze dell'esercizio e con la necessità di mantenere il livello di servizio che le comunità richiedono [Fregonara, 2020]. E quindi, di nuovo, ecco che il life cycle thinking e il Life Cycle Assessment diventano essenziali.

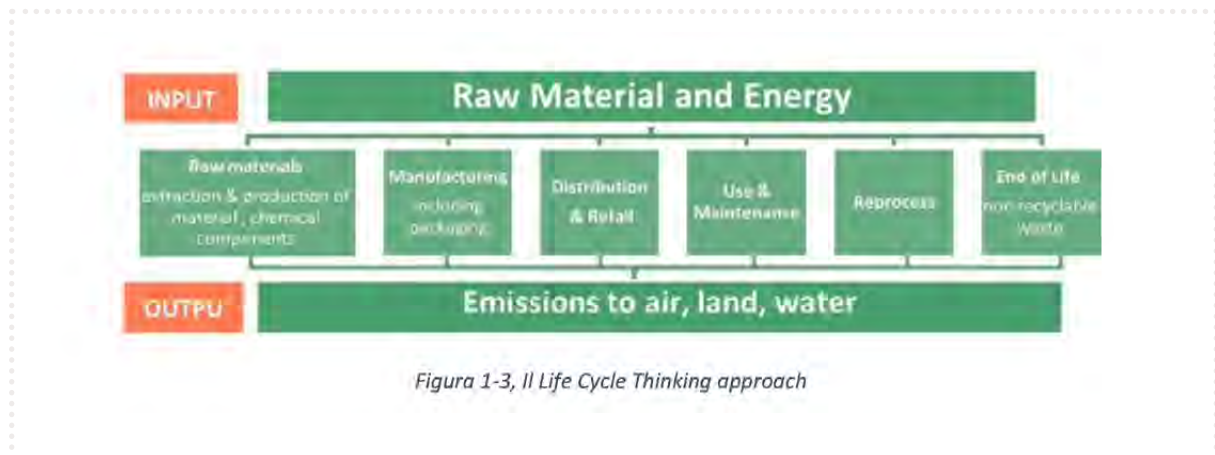
Fino a non molto tempo fa, l'economia del mondo delle costruzioni adottava una filosofia lineare: la sequenza logica di una economia lineare si può riassumere nella sequenza di verbi: prendere-fare-usare-smaltire (take- make-use-dispose), applicata a partire dalle materie prime.



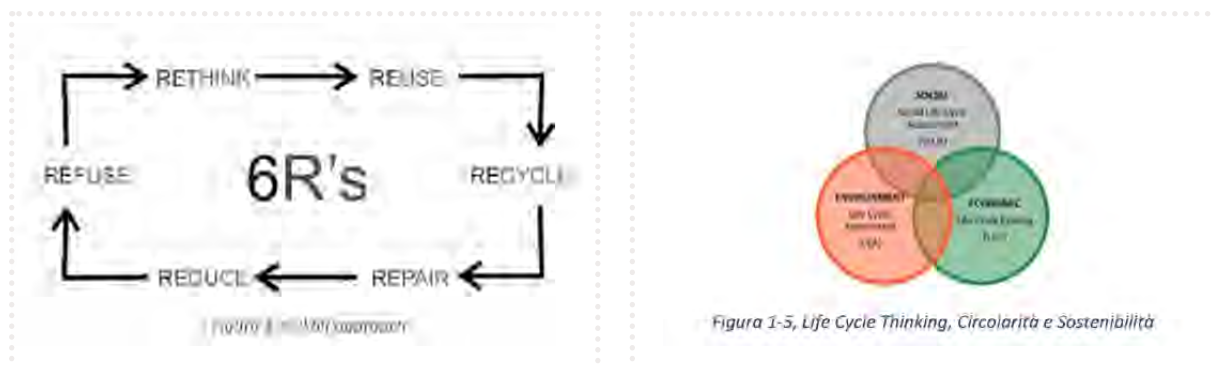
Si tratta di un approccio che mira a sfruttare al massimo le risorse materiali con un orizzonte di breve termine, e che ha ormai mostrato tutti i suoi limiti quando i livelli di inquinamento del pianeta hanno cominciato a non poter più essere ignorati. La presa di coscienza del cambiamento climatico ha fatto il resto [Bonviu, 2014]. A partire da questa presa d'atto è nato il concetto di economia circolare che possiamo definire 'di sviluppo economico autogenerante'. Questo principio presuppone che:

- lo sviluppo di un Paese avanzato possa avvenire anche senza dare luogo allo sfruttamento incontrollato delle risorse naturali e sociali del suo territorio e del pianeta su cui viviamo.
- Il modo in cui i decisori devono rappresentare un'infrastruttura attraverso il sistema che la rende possibile è la logica del ciclo di vita, ed è la metodologia che, già da qualche anno,

l'Unione Europea propone di utilizzare per cambiare la filiera e la resilienza (anche sociale) del mondo delle costruzioni infrastrutturali, proprio mentre se ne attua il programma di rigenerazione. La combinazione fra economia circolare e life cycle thinking sta alla base dei criteri che ispirano il Green Deal europeo [Dalmammar, 2015].



Ogni infrastruttura ha un processo e un ciclo di vita proprio e unico: una maniera interessante per rappresentarlo è quella di pensarlo secondo il principio delle sei 'r' rappresentato in figura, (a) ripensare al materiale o al prodotto e alle sue funzioni (re-think), (b) ridurre il consumo dell'energia e delle risorse naturali (re-duce), (c) sostituire con materiali/prodotti alternativi quelli che hanno effetti dannosi per l'ambiente (re- place), (d) riciclare il materiale/prodotto e ridurre i rifiuti (re-cycle), (e) riutilizzare gli asset esistenti (re-use), (f) riparare e rigenerare gli asset in obsolescenza (re-pair) [Nazir, 2017].



Va da sé che life cycle thinking e circolarità incarnano perfettamente la tripartizione del concetto di sostenibilità e permettono di analizzarne compiutamente tutte le parti: l'aspetto ambientale, affrontato con la Life Cycle Assessment, l'aspetto sociale, affrontato con la Social Life Cycle Assessment (SLCA), e quello economico, affrontato con il Life Cycle Costing (LCC).

La chiave per dar luogo ad infrastrutture sostenibili è quella di mantenere tutti e tre gli aspetti in equilibrio, e, a questo scopo, diventano estremamente utili i protocolli di sostenibilità, come Envision, che offrono una guida metodologica alla concezione e costruzione di una iniziativa infrastrutturale sostenibile.

Pertanto, l'obiettivo finale dell'life cycle thinking è quello di migliorare le prestazioni ambientali e socioeconomiche dell'infrastruttura durante il suo intero ciclo di vita. In particolare, esso cerca di aiutare le aziende, i committenti e i professionisti ad essere più consapevoli di come le loro azioni influiscono sull'ambiente, offrendo loro un punto di vista sistemico e invitandoli ad individuare efficaci alternative per ridurre le conseguenze ambientali e sociali nell'ambito della migliore economicità possibile.

Il tema sociale, nelle valutazioni del ciclo di vita, è sempre rilevante per le infrastrutture. Esse sono per definizione prossimali, quindi radicate, territoriali: sono economia nel territorio, non soltanto economia del territorio. Non si tratta di un radicamento eventuale e accessorio, ma intrinseco: sistemi infrastrutturali e insediamenti umani sono inseparabili (non si tratta di beni e servizi che possono essere realizzati 'lontano').

1.3.2 Il nuovo Asset Management

Come detto, gli asset infrastrutturali e i network di infrastrutture sono essenziali per il buon funzionamento della società e delle comunità territoriali così come le conosciamo. Per questo motivo, è fondamentale mantenere efficienti e migliorare questi sistemi, fino al punto in cui l'estensione della loro vita utile ne richiede la cosiddetta 'rigenerazione': si tratta di una fase che comporta investimenti vicini o superiori a quelli di costruzione (perché spesso si deve intervenire mantenendo simultaneamente in esercizio l'esistente).

Di fatto, man mano che le infrastrutture invecchiano, il portafoglio infrastrutturale richiede continue sostituzioni, rimozioni, rigenerazioni e miglioramenti: entro i limiti della vita utile, si tratta di una attività evolutiva. Pertanto, la gestione del ciclo di vita, o, in altre parole, la gestione integrata degli asset infrastrutturali durante il loro ciclo di vita [Fuchs et al., 2014], garantisce l'efficienza e la performance dell'asset stesso.

La ISO 55000 (2014) definisce la 'gestione' degli asset come l'insieme delle attività, fra loro coordinate, che vengono svolte su di essi e che sono in grado di restituire valore per l'azienda (o per la comunità di riferimento). La gestione del life cycle è intesa come la gestione delle prestazioni, dei rischi e dei costi di un asset nell'ambito della propria vita utile. Ecco alcune considerazioni metodologiche in merito.

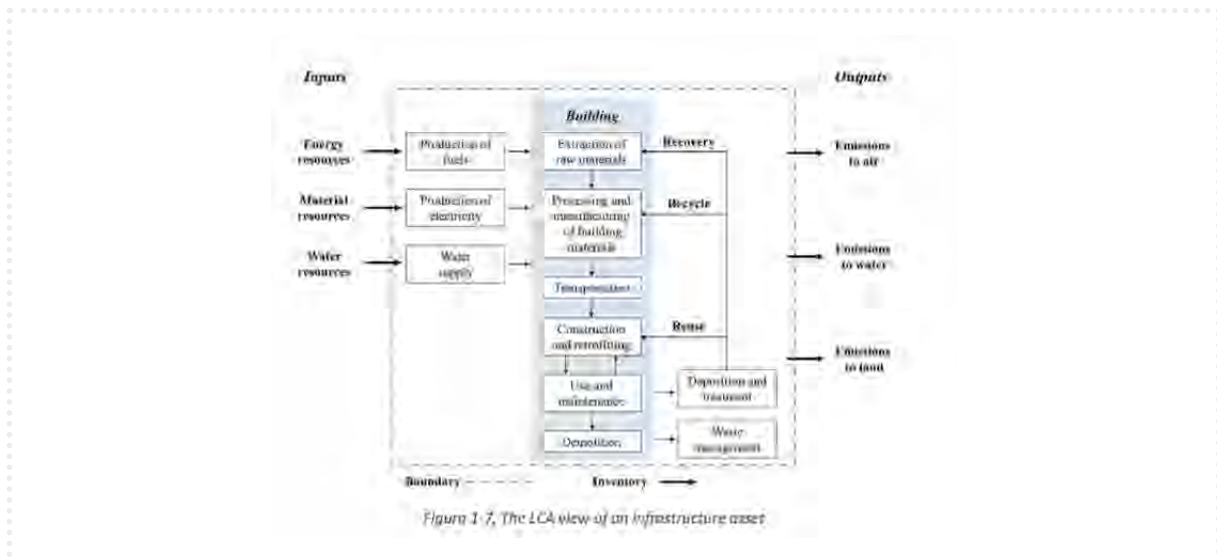


1. Nell'analisi e nella gestione degli asset infrastrutturali, è necessario riconoscere e rappresentare non solo il rischio, ma anche l'incertezza associata alla loro vita utile sempre più lunga. Possiamo garantire che le ipotesi che facciamo oggi continueranno ad essere valide anche dopo un ciclo di vita di cento anni? Di fronte a un futuro non noto, quali metodi possono essere utilizzati per fornire e mantenere operativi gli asset in gestione? Come possiamo parlare di performance ambientale rispetto a questa scala temporale?

2. La performance di un asset infrastrutturale, spesso valutata con i metodi del Life Cycle Costing, è un indicatore importante nella valutazione complessiva del valore dell'asset. Tuttavia, gli indicatori di performance ambientale e sociale lungo l'intero ciclo di vita dell'infrastruttura sono diventati un fattore di valutazione e di analisi sempre più importante. Lo sono nella fase di prima realizzazione, in particolare per le infrastrutture, dove è necessario trovare gli hot-spot in termini di prestazioni finanziarie, ambientali e sociali prima di poter partire. Ma lo sono anche per le opere esistenti per le quali, una gestione che sia stata attenta alla compatibilità e agli impatti ambientali anche nella fase di esercizio, si troverà a poter effettuare un investimento di rigenerazione con costi molto meno rilevanti.

3. Allo stesso modo, un asset ben gestito (in generale) non è solo quello che è impostato per avere i più bassi costi del ciclo di vita, ma anche quello che ha i più alti rendimenti del ciclo di vita. Nel caso di un asset infrastrutturale questo vale a maggior ragione: e quindi una gestione virtuosa degli attivi e dei passivi ambientali e sociali ne incrementa il valore e lo rende più appetibile dal punto di vista di interventi di rifinanziamento e di investimento orientati ai criteri della finanza green. L'attenzione verso una resilienza di lungo termine è un elemento distintivo dei moderni asset infrastrutturali.

Da questo punto di vista, la Life Cycle Assessment è lo strumento che sia nella fase di costruzione sia nella fase di esercizio, fornisce le informazioni necessarie alla valorizzazione in senso economico, ambientale e sociale dell'asset infrastrutturale, in linea con le indicazioni della ISO 55000 e delle moderne metodologie di asset management.



In sintesi, gli elementi chiave della gestione degli asset secondo i principi del life cycle thinking sono:

1. Un approccio al life cycle che vada dalla culla alla tomba (from cradle to grave), con un orientamento alla circolarità che, laddove possibile, lo trasformi in dalla culla alla culla (from cradle to cradle).
2. L'elaborazione e la messa in atto di soluzioni efficaci dal punto di vista dell'ottimizzazione dei costi, ma che abbiano sempre chiara la natura (e la performance) del servizio fornito dall'asset, in un'ottica di resilienza di lungo termine.
3. Il monitoraggio, la manutenzione e il miglioramento delle prestazioni degli asset, secondo l'evoluzione delle esigenze del servizio e delle prescrizioni regolatorie (man mano che si evolvono; considerata l'ampiezza della durata del ciclo di vita, è possibile che i termini normativi e i requisiti del servizio cambino per ragioni tecnologiche, sociali, politiche, di sensibilità ambientale o legate all'impatto del cambiamento climatico).
4. La gestione dei rischi legati al deterioramento e ai guasti degli asset, con la relativa attività previsionale, di pianificazione, di sorveglianza e operativa (distinguendo fra interventi ordinari, interventi straordinari, interventi di potenziamento e interventi rigenerativi).
5. L'utilizzo, la conservazione e lo sviluppo delle risorse finanziarie, fisiche e di personale del proprietario (o del concedente, del committente, ecc.) nel modo più efficiente, efficace e a lungo termine possibile, condividendo i passaggi decisionali secondo i contratti di gestione e secondo gli esiti delle attività operative e di monitoraggio.

Data la stretta relazione esistente tra il concetto di ciclo di vita e una metodologia moderna di gestione degli asset infrastrutturali, la Life Cycle Assessment è uno strumento indispensabile sia a livello di progetto che a livello di processo. Di conseguenza, la valutazione della sostenibilità con la LCA dovrebbe diventare un criterio essenziale sia a livello strategico che tattico, e l'analisi dovrebbe essere mantenuta per tutte le fasi essenziali del funzionamento, della gestione e della manutenzione. Va sottolineato che, perché ciò sia possibile nella pratica, è necessario che il progetto incorpori dei margini di flessibilità decisionale fin dalla fase di concettualizzazione: una definizione univoca e senza appello, magari vecchia di qualche anno, può rappresentare un ostacolo rispetto all'aggiornamento delle soluzioni costruttive o manutentive verso nuove tecnologie. Inoltre, lo stesso progetto deve coinvolgere, già in una fase molto preliminare, il numero maggiore possibile di stakeholder per poter mettere a frutto le opportunità che la condivisione e la trasversalità delle conoscenze può offrire.

In sintesi, il confronto con la durata porta a due considerazioni importanti:

- nel progettare e nel definire le strategie di gestione e di manutenzione l'approccio da seguire è quello bayesiano, che adegua le previsioni alle informazioni già note: in questo senso il progetto deve incorporare dei margini di flessibilità, ovvero deve essere strategicamente aperto alla possibilità di incorporare facilmente nelle proprie tattiche tutti quelle nuove soluzioni che l'evoluzione tecnologica rende via via disponibile.

- Altrettanto importante è, per la fase di costruzione, restare aperti a possibilità di ottimizzazione nell'uso dei materiali originate da una loro migliore performance. Un esempio su tutti: l'evoluzione prestazionale che è oggi possibile per i calcestruzzi può dar luogo a significativi risparmi di materiale e, quindi, a rilevanti riduzioni di impatto (il materiale più sostenibile è quello che non si usa, o che si usa solo dove serve...).

1.4 LIFE CYCLE ASSESSMENT E INFRASTRUTTURE

Abbiamo visto come la Life Cycle Assessment sia un approccio metodologico all'analisi di sistemi dal punto di vista ambientale che ne esamina le implicazioni (ambientali) lungo tutta la catena del valore e della produzione. Non è l'unico possibile: ad esempio, sono degli approcci alternativi la valutazione dell'impatto ambientale e l'analisi costi-benefici [Finnveden e Moberg, 2009]. Analizzare un sistema ambientale significa inquadrare i sistemi tecnologici (produttivi), i sistemi sociali (persone) e i sistemi naturali (l'ambiente), ed approfondire le loro interazioni. La componente sociale, certamente, 'governa' quella tecnica, che conseguentemente ricava prodotti e servizi dal sistema produttivo, sfruttando risorse naturali ed emettendo sostanze inquinanti e rifiuti nell'ambiente. Queste emissioni determinano, a loro volta, delle mutazioni nell'ecosistema. È questo il motivo per cui il framework di analisi degli impatti è un elemento essenziale dell'LCA, perchè è strettamente legato alla visione sociale e politica degli enti regolatori: esso si concentra sui sistemi tecnologici nell'ambito di questo quadro.

Un'LCA è strettamente connessa alla disciplina della ecologia industriale, che ispirandosi alla somiglianza fra sistemi tecnologici ed ecosistemi naturali, si concentra sulla ottimizzazione dei flussi di risorse (materiali, energia, prodotti, servizi) per ridurre le conseguenze ambientali. Per poter arrivare a questo, l'ecologia industriale pone l'accento sulla necessità di una visione sistemica nel processo decisionale tecnologico e ambientale, per questo l'LCA è uno strumento fondamentale per questa disciplina.

La LCA consente di individuare le conseguenze ambientali dei sistemi di prodotti e dei sistemi di produzione, ad esempio individuando il prodotto a minor impatto e migliore performance ambientale e indicare modalità per migliorarne le prestazioni ambientali. È una metodologia che permette sia l'analisi del singolo sistema, sia la comparazione di sistemi alternativi. Un'LCA può rilevare il possibile trasferimento di carichi ambientali tra le fasi del ciclo di vita, le categorie di impatto ambientale e le aree geografiche e politiche in maniera molto diretta e trasparente. Infatti, le conseguenze ambientali non sono necessariamente (o solo) associate al prodotto stesso, ma una analisi del ciclo di vita consente di individuare quelle indotte dal sistema complessivo che lo ha generato [ISO 14040, 2006]. Inoltre, la LCA, a differenza della valutazione di impatto ambientale, non si basa su misurazioni in situ dei carichi ambientali, ma piuttosto sulla modellazione di potenziali oneri ambientali derivanti dai flussi di materiali, di energia, di rifiuti e di emissioni da e verso il sistema di produzione. In questo modo, i risultati di una LCA potrebbero non rappresentare oneri effettivi del sito, ma piuttosto potenziali impatti a livello regionale o planetario! Una parte del ciclo di vita potrebbe essere ben presidiata dal punto di vista ambientale in una località, una regione o una nazione, ma una componente di input (o di output) potrebbe non esserlo e contribuire negativamente in un'altra regione o nazione (il cosiddetto 'burden shift').

Gli standard ISO 14040 (2006) e ISO 14044 delineano le basi metodologiche generali per una analisi LCA. È importante questa enfasi sulla standardizzazione e sulla certificazione dei dati, perché è il solo modo per consentire comparazioni di processi produttivi attraverso diverse filiere produttive e valutazioni transnazionali di flussi e materiali.

Una analisi del ciclo di vita comprende quattro fasi:

1. inizialmente, vengono stabiliti lo scopo e l'ambito di applicazione della LCA, i confini del sistema e l'unità funzionale.
2. Successivamente, gli input e gli output rilevanti del sistema di prodotto sono catalogati e quantificati nell'inventario del life cycle.
3. Nel terzo passo, attraverso la valutazione dell'impatto del sistema costituito da tutto il ciclo di vita, si valuta la rilevanza ambientale dei fattori produttivi e dei prodotti.
4. Infine, l'inventario del ciclo di vita e i risultati della valutazione dell'impatto sono determinati in relazione allo scopo dello studio.

Le linee guida ISO per la LCA non descrivono la tecnica LCA in dettaglio: “non esiste un modo per eseguire LCA”, e questo fa sì che esistano, in effetti, molte possibilità applicative e una moltitudine di approcci nel mondo della Life Cycle Assessment [Guinée et al., 2011].

1.4.1 I tre livelli di applicazione del Life Cycle Assessment nelle Infrastrutture

Livello di Rete

I sistemi infrastrutturali vengono concepiti (1) attraverso tre livelli decisionali di ordine strategico (di rete, di progetto e di processo) e (2) in termini di modalità di servizio (per l'energia: produzione, trasporto, distribuzione e utilizzo; per i trasporti: strada, ferrovia, aria o mare; per l'acqua: distribuzione, raccolta, trattamento, stoccaggio; ecc.). Inoltre, sono costituiti da una serie di componenti, strutture, manufatti, attrezzature, fonti energetiche e materiali primari d'origine, che sono ulteriormente suddivisi nei processi elementari (ma non meno complessi) che li producono. Un sistema di mobilità, ad esempio, è caratterizzato da modalità di trasporto (come mezzi su ruota, a guida vincolata, ecc.), da sistemi strutturali (come strade, treni, ponti e gallerie), da componenti e parti d'opera (come superfici stradali e traversine ferroviarie) e da materiali (come asfalto, acciaio e cemento).

Tutti questi elementi hanno un ciclo di vita che si estende dall'estrazione delle materie prime fino al termine della vita utile, termine che può essere anche molto in là nel tempo (50-100 anni, ma alcuni acquedotti romani funzionano ancora adesso...). Il primo problema nella letteratura esistente che ha per oggetto l'LCA è proprio questo, la difficoltà di delineare degli orizzonti comuni di spazio e di tempo. Facendo riferimento ad una classificazione che deriva dall'asset management (ISO 55000 ad esempio), è molto utile individuare queste macrofasi: concezione e creazione dell'infrastruttura, utilizzo e manutenzione dell'infrastruttura, demolizione e/o rigenerazione dell'infrastruttura.

Normalmente si assume che la produzione dei materiali (compresa l'estrazione e la lavorazione delle materie prime) e l'attività di costruzione (compreso il trasporto di materiali al cantiere, l'uso di macchine da costruzione e la movimentazione di materie e terreno scavati) facciano tutti parte del processo di costruzione delle infrastrutture.

L'utilizzo dell'infrastruttura, allo stesso modo, può essere ulteriormente suddiviso in esercizio e manutenzione. Esiste un confine ideale fra le attività di manutenzione ordinaria, che mantengono l'esercizio attivo, e quelle di manutenzione straordinaria che sono conseguenti ad eventi catastrofici o ad interventi necessari al presidio della vita utile dell'infrastruttura. Queste attività fanno parte della gestione corrente dell'infrastruttura.

Si parla di rigenerazione quando l'infrastruttura viene ri-costruita per rilanciarne un altro ciclo di vita utile, con una vera e propria opera di re-investimento.

La LCA si concentra sulle conseguenze ambientali misurabili dei materiali e delle tecnologie impiegate, evidenziando l'importanza di ridurre le implicazioni ambientali dei relativi sistemi

produttivi e gestionali. Poiché la LCA rende più evidenti gli impatti ambientali, diventa uno strumento essenziale per stabilire indicatori anche sociali e creare incentivi per la riforma di parti significative del sistema produttivo e, più in generale, sociale. In effetti, la LCA può fornire informazioni che possono essere utilizzate per calibrare scelte politiche e di pianificazione, ad esempio nel settore dei trasporti.

La pianificazione di un sistema infrastrutturale è un processo complicato articolato in più fasi. Il processo di pianificazione varia da paese a paese, ma sono generalmente quattro i principali livelli decisionali: 1) la scelta della modalità di servizio a livello nazionale, 2) la scelta del luogo e del tipo di costruzione (ad esempio, ponte o tunnel) del progetto specifico, 3) la scelta del progetto di costruzione specifico e 4) la scelta e influenza sulla catena di approvvigionamento coinvolta attraverso le specifiche di approvvigionamento [Miliutenko et al., 2016].

La LCA può essere eseguita in una qualsiasi di queste fasi di pianificazione, in ogni caso esso si relaziona con lo scopo per cui viene effettuato: ad esempio, se diventa uno strumento per orientare il procurement, esso deve soddisfare degli standard di trasparenza e coerenza al fine di fornire un confronto equo delle opzioni disponibili [Butt et al., 2015]. Storicamente, l'applicazione della LCA è stata focalizzata sulle prime fasi del processo decisionale, con l'obiettivo di fornire elementi sistemici nella selezione di scenari di impatto. Tuttavia, l'applicazione della LCA in questa fase è limitata dalla indeterminatezza dei dati disponibili a livello di progettazione preliminare e di fattibilità [Kluts e Miliutenko, 2012; Butt et al., 2020]. I dati sarebbero disponibili in fasi successive di progetto, ma a quel punto il potenziale di influenzare le conseguenze del ciclo di vita si riduce [Butt et al., 2015]. Tuttavia, se spinta verso i livelli più di dettaglio e di processo, la LCA può aiutare i responsabili delle decisioni di procurement e costruzione a influenzare la catena di approvvigionamento in una direzione sostenibile.

La situazione ideale sarebbe quella in cui, attraverso un'LCA nella fase preliminare (o di fattibilità) si potessero orientare le scelte di massima (ad esempio individuare hot-spot e top offender), e con successive ulteriori analisi LCA (ad esempio di processo) sia nelle fasi di progettazione esecutiva, sia in fase di procurement, fosse possibile affinare le scelte di materiali e tecnologie di dettaglio. Questa ricorsività può essere vista come una complicazione, ma porta sicuri benefici in termini di sostenibilità perché sfrutta al meglio il potenziale del life cycle thinking.

Livello di Progetto

Anche se è raro trovare una analisi LCA che dichiaratamente faccia riferimento ad una delle tre fasi che abbiamo individuato [Butt et al., 2015], è un fatto, ed è un grande limite, che la maggior parte delle analisi che si trovano nella letteratura specialistica e nei documenti di progetto vengano condotte sostanzialmente 'a posteriori', ovvero una volta che il progetto è stato completato in una forma anche molto dettagliata. Si tratta di una forzatura metodologica che nasce dalla necessità di restringere il margine di variabilità dell'inventario.

A volte l'analisi diventa una specie di adempimento successivo alla progettazione esecutiva, ad esempio quando viene impiegato come supporto ad una certificazione (Miliutenko et al., 2016, Bizjak et al., 2017), oppure sono puramente teorici (ad esempio Stripple et al., 2016). In effetti, questa modalità viene spesso riconosciuta come una fondamentale limitazione dell'impiego di analisi del ciclo di vita ad infrastrutture intere. Inoltre, sempre per la difficoltà (e la complessità) di modellare con adeguato dettaglio tutta la vita utile, è difficile trovare una LCA infrastrutturale che incorpori compiutamente anche scenari di manutenzione effettivi, il che ne può limitare la rappresentatività [Santero et al., 2010; Inym et al., 2016; Jiang e Wu, 2019]. Queste sono ragioni per cui, un secondo livello di applicazione della LCA è quello del progetto, in cui si abbandona l'ambizione di inquadrare diversi scenari complessivi per concentrarsi sullo sviluppo dello specifico life cycle ed incorporare gli scenari più rilevanti delle fasi di costruzione, di gestione e di manutenzione.

Considerato il fatto che l'estensione temporale dell'analisi è importante e che i criteri di gestione oltre l'arco di cinque/dieci anni sono difficilmente prevedibili (anche solo per una questione di evoluzione tecnologica), è il tema della manutenzione ad assumere un ruolo particolarmente critico. La manutenzione dell'infrastruttura ha tre componenti distinte: (1) il periodo di analisi, che determina per quanti anni viene contabilizzata la futura manutenzione; (2) la frequenza di manutenzione, che determina la cadenza con cui viene eseguita la manutenzione durante il periodo considerato; e (3) gli effetti del cambiamento climatico, che si prevede influenzeranno la durabilità delle infrastrutture e, quindi, la frequenza della manutenzione.

È chiaro che sono possibili solo delle approssimazioni poiché l'infrastruttura, come abbiamo detto, 'vive' a lungo (molto spesso più delle tecnologie e dei decisori che l'hanno resa possibile) e non è semplice identificarne il 'fine vita' [Saxe e Kasraian, 2020]; d'altra parte, il suo utilizzo e la sua funzionalità cambiano costantemente durante la sua vita a causa dell'usura, dell'obsolescenza, della mutazione del contesto sociale ed economico in cui opera e quindi, per citare un fattore, dei carichi. Il cambiamento climatico, lo si capisce bene, complica ulteriormente le cose.

Tuttavia, quanto più la LCA viene spinta al livello di progetto (anche a costo di semplificazioni e di utilizzo di tipologici) tanto più si svilupperanno inventari e dataset di informazioni che renderanno via, via più affidabili le analisi, generando un circolo virtuoso. Una strategia che può essere utile è quella di identificare, nell'ambito della vita utile, quelle fasi che si ritengono più rilevanti dal punto di vista dell'impatto (per i materiali, per le tecnologie, per le condizioni d'uso, ...) e, programmaticamente, focalizzare l'analisi su di esse, puntando a migliorare la performance di sostenibilità senza la pretesa di inquadrarla completamente. In questo modo sarà possibile standardizzare la modalità con cui, ad esempio, si affrontano le fasi di costruzione, di manutenzione straordinaria e, magari, di ricostruzione a fine vita. L'impatto sulla catena del valore delle costruzioni sarebbe immediato e positivo [Butt et al., 2015].

A livello di progetto, le modalità di conduzione dell’LCA possono diventare, se standardizzate e rese trasparenti, un framework di grande utilità per la conduzione delle politiche di procurement. Come proposto da più parti [Höjer et al., 2008] la definizione di scenari coerenti e standardizzati per tipologia di infrastruttura potrebbe essere integrata con requisiti di prestazione dell’infrastruttura tecnica. Tali esigenze tecnologiche dovrebbero essere definite sulla base di indagini preliminari generali (che arricchiscono di dettaglio l’inventario dell’analisi), e quindi potrebbero diventare la base anche per future analisi nello stesso ambito infrastrutturale.

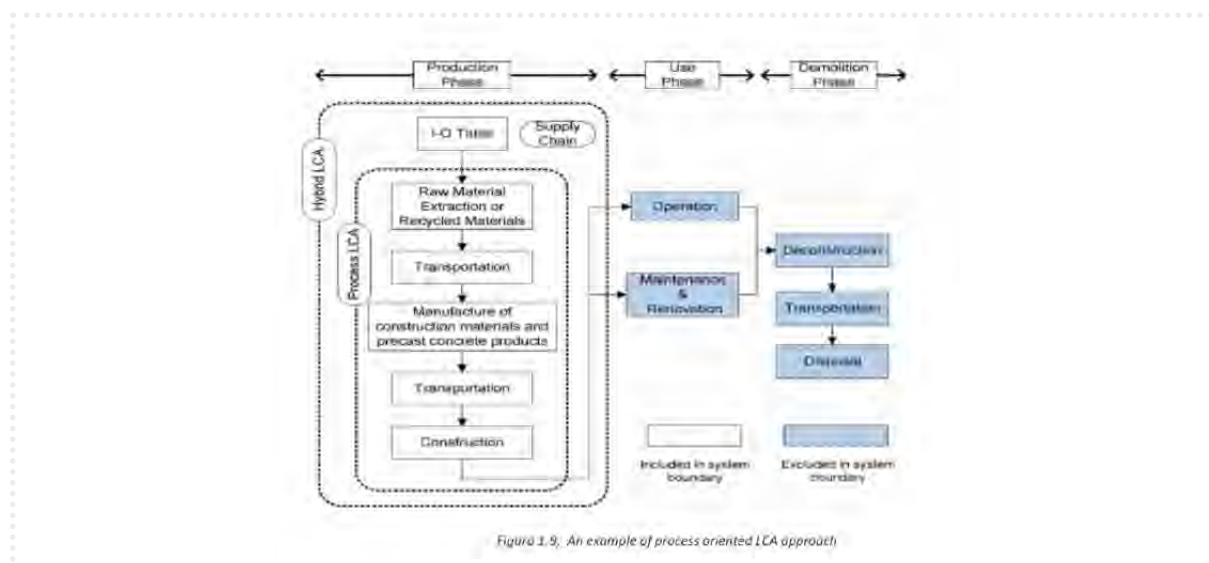
Livello di Processo Costruttivo

L’infrastruttura genera un contesto unico e complesso. Non è ripetibile (per geotecnica, paesaggio, funzione...), ha una vita utile molto lunga (a volte più di 100 anni) e che va oltre lo sguardo generazionale..., comporta lunghi tempi di realizzazione (una durata costruttiva da cinque a dieci anni non è sorprendente, e si noti che una durata di questo genere è decisamente più ampia degli attuali ‘cicli’ tecnologici o dei cicli normativi di qualunque paese). Si tratta solo di alcuni dei motivi per cui la complessità dell’analisi LCA sull’intera vita utile di una infrastruttura è spesso un compito che rende difficile definire un inventario di dati coerente e credibile. Una volta inquadrato il problema ad ampia scala, lo sforzo di analisi deve essere subito dopo concentrato sulla realistica e sulla pertinenza dei dati nelle fasi critiche (di maggiore impatto). Lo strumento della valutazione del ciclo di vita può essere molto utile, in effetti, anche quando è focalizzato su una specifica fase realizzativa o manutentiva, dove per fase si può intendere sia una fase tecnologica (una particolare opera geotecnica, un processo costruttivo critico, ecc.) sia una fase costruttiva (o manutentiva) (getto di calcestruzzo, spritz-beton di rivestimento, ripristino di una pavimentazione in asfalto), e dove l’unità funzionale dell’analisi è un’unità ‘tipica’ che rappresenta il processo [Pettinaroli, Susani et al., 2023; Susani et al., 2023]. Naturalmente, un aspetto ancora più significativo consiste nell’opportunità di restringere la durata e i parametri del modello LCA, il che consente di concentrarsi specificamente sui materiali e di utilizzare o cercare dati d’inventario che si adattino in modo più preciso alla “realtà” del processo in analisi.

Come vedremo nei casi applicativi di questo documento, l’approccio per processi (lo potremmo definire ‘life cycle construction process assessment’) consente di (a) isolare i materiali/tecnologie di “massimo/maggiore impatto” o “massima/maggiore influenza” e (b) concentrarsi sulle fasi di vita durante le quali viene espressa la maggiore parte dell’impatto complessivo dell’infrastruttura, riducendo la complessità dell’analisi e l’influenza di dati non specifici.

Un’analisi LCA orientata al processo costruttivo è, quindi, utile per diversi scopi:

1. Consente di confrontare diverse alternative tecnologiche e scegliere quella meno impattante (o quella con prestazioni ambientali più significative per una tipologia di impatto specifico).

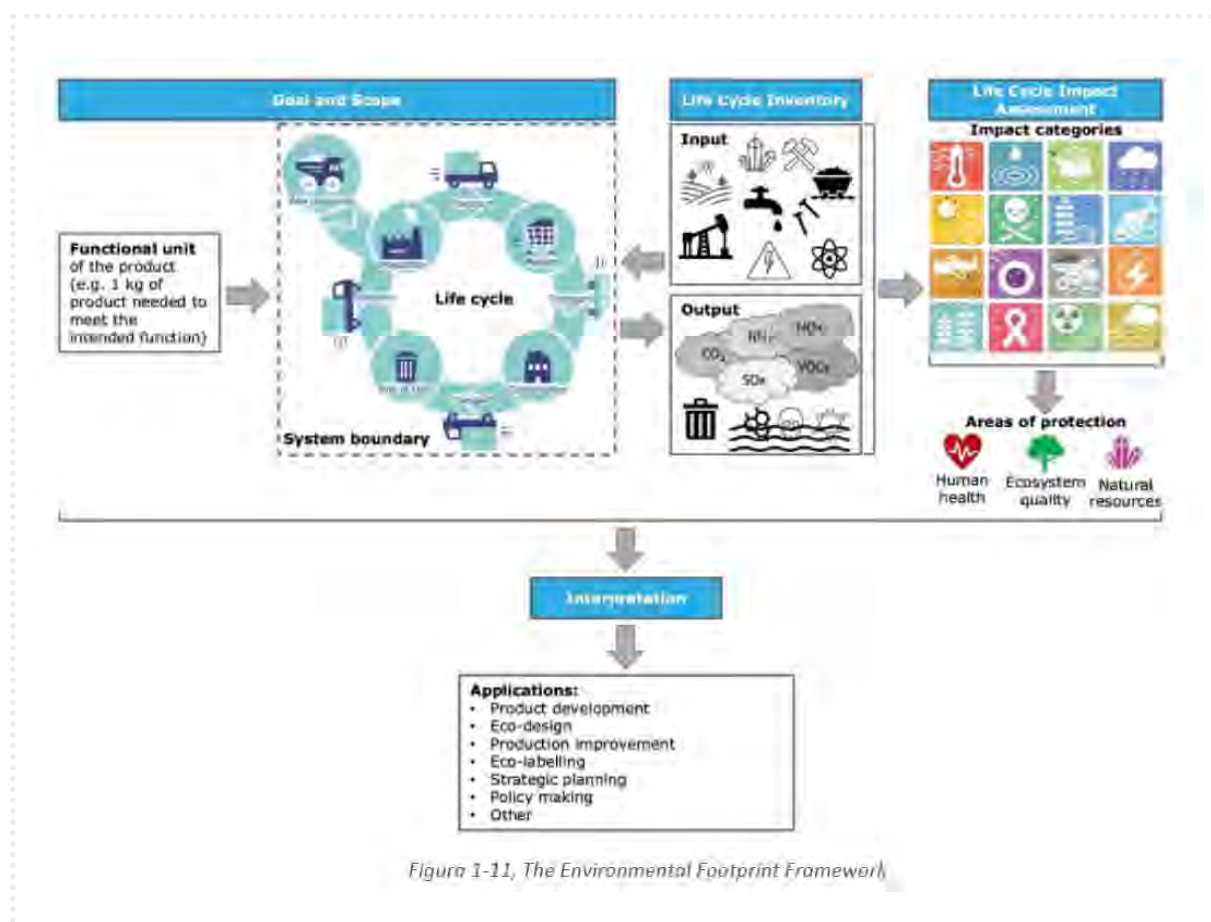


2. Consente di confrontare diverse opzioni di scelta di materiali per “misurare” le rispettive prestazioni di sostenibilità utilizzando i dati provenienti, ad esempio, dai loro certificati EPD o direttamente dai produttori.

Si tratta di un approccio vantaggioso non solo durante la fase di progettazione, laddove si mette a punto l’obiettivo o la performance di sostenibilità dell’infrastruttura, ma anche durante la fase di approvvigionamento, dove questo tipo di analisi può fornire preziose informazioni quantitative a supporto delle prestazioni di sostenibilità di un materiale o di una tecnologia all’interno di uno specifico processo di costruzione e di un progetto specifico.

1.4.2 Il framework Europeo dell’Impronta Ambientale

Uno dei principi fondamentali del life cycle thinking è che offre un punto di vista esaustivo nell’identificazione degli impatti e delle relative opportunità di mitigazione nelle fasi di scelta dei materiali e della strategia di approccio alla gestione delle infrastrutture. Ciascuno dei processi o delle strategie tecnologiche che compongono il ciclo di vita, che si tratti di un materiale o di una tecnologia di una costruzione, incorpora la valutazione del consumo di energia e di risorse e la relativa emissione di sostanze inquinanti. I processi di estrazione e lavorazione coinvolti nella produzione di materiali da costruzione sono responsabili di circa il 90% degli inquinanti ambientali prodotti durante il ciclo di vita di questi componenti. L’utilizzo di combustibili fossili comporta emissioni di ossidi di azoto (NO_x) e anidride carbonica (CO₂), che contribuiscono agli effetti negativi sull’ambiente che si verificano durante il trasporto e l’edilizia. La gestione dei rifiuti, specie nell’edilizia, ad esempio, comporta spesso la rimozione di rifiuti di intonaco e legno, entrambi fonti significative di acido organico nelle discariche. Quando il legno, la plastica e la carta vengono bruciati, vengono prodotti inquinanti come ammoniaca (NH₃), ioni di metalli



- **Un focus sul ciclo di vita:** ciò significa che vengono prese in considerazione tutte le fasi del ciclo di vita di un prodotto o servizio, dall'estrazione delle materie prime attraverso la lavorazione e la produzione, la distribuzione e l'utilizzo, fino alla fine della vita.
- **Una tipologia di analisi,** che tiene conto di una serie di tipi distinti di effetti ambientali, di fatto una analisi multicriteri.
- **Una metodologia quantitativa:** gli indicatori utilizzati sono numerici e derivano da modelli matematici che descrivono i collegamenti causa-effetto e che sono il risultato di una varietà di fattori di stress. (es. emissioni, uso di risorse naturali).
- **Una metodologia comparativa:** il metodo di valutazione del ciclo di vita (LCA) ha principalmente lo scopo di consentire la selezione della linea d'azione ottimale tra due o più risultati potenziali, dato il carattere quantitativo dell'approccio.
- **L'orizzonte della scala globale:** l'analisi può essere adattata a sistemi che vanno dalla scala locale a quella globale, cogliendo quindi le particolarità di questi sistemi in relazione alla variabilità dei loro ambienti.

La metodologia LCA è standardizzata da riferimenti normativi (ISO 14040 e ISO 14044) che descrivono i principi, l'applicazione, le fasi di una valutazione LCA, i requisiti, la revisione critica

e il reporting. Altri standard ISO della serie 14040 completano le linee guida generali come ISO 14046 per l'impronta idrica, e altri standard di gestione ambientale sono collegati a ISO 14040-44 come ISO 14006 (eco-design), ISO 14025 (etichettatura ambientale), ISO 14064 (impronta di carbonio delle organizzazioni), ISO 14067 (impronta di carbonio dei prodotti), ISO 14072 (LCA organizzativa). In questo modo, metodologia ed approccio sono uniformi e trasparenti.

1 – Goal and Scope Definition	2 – Life Cycle Inventory Analysis	3 – Life Cycle Impact Assessment
<ul style="list-style-type: none"> • Reasons and intended applications • Functional unit • System boundary • Impact categories • Allocations • Data requirements • Assumptions and limitations. 	Collection of primary and secondary data on elementary and non-elementary flows exchanged through the ecosphere and the technosphere: <ul style="list-style-type: none"> • input of energy, raw materials, and other physical inputs • output of products, co-products, waste, emissions. Data calculation relating to unit processes, functional unit, and allocations.	Calculation of potential Impact associated to the defined impact categories from inventory data. Optional grouping, normalisation, and weighting.
4 – Interpretation		
Interpretation of LCIA results, hotspot analysis to find relevant processes and flows, sensitivity analysis of modelling choices, recommendations. The interpretation may involve iteratively reviewing the choices made in the previous stages of the LCA.		

Tabella 1-2, Standardised steps of LCA according to ISO 14040-44. Two-way arrows suggest the iterative nature of an LCA. For the technical terms please refer to the section "Nomenclature and Definitions"

Il Joint Research Centre della Commissione europea ha dato un contributo significativo alla standardizzazione dell'LCA attraverso l'istituzione del Sistema internazionale europeo di dati sul ciclo di vita (ILCD). Al fine di migliorare la solidità scientifica, la coerenza, la riproducibilità e la comparabilità degli studi LCA, l'obiettivo dell'ILCD è stato quello di fornire linee guida approfondite per l'applicazione dell'LCA al contesto europeo, sia dal punto di vista procedurale che scientifico.

1.4.3 Maturità del settore delle Infrastrutture rispetto all'impiego del Life Cycle Assessment: opportunità e limitazioni

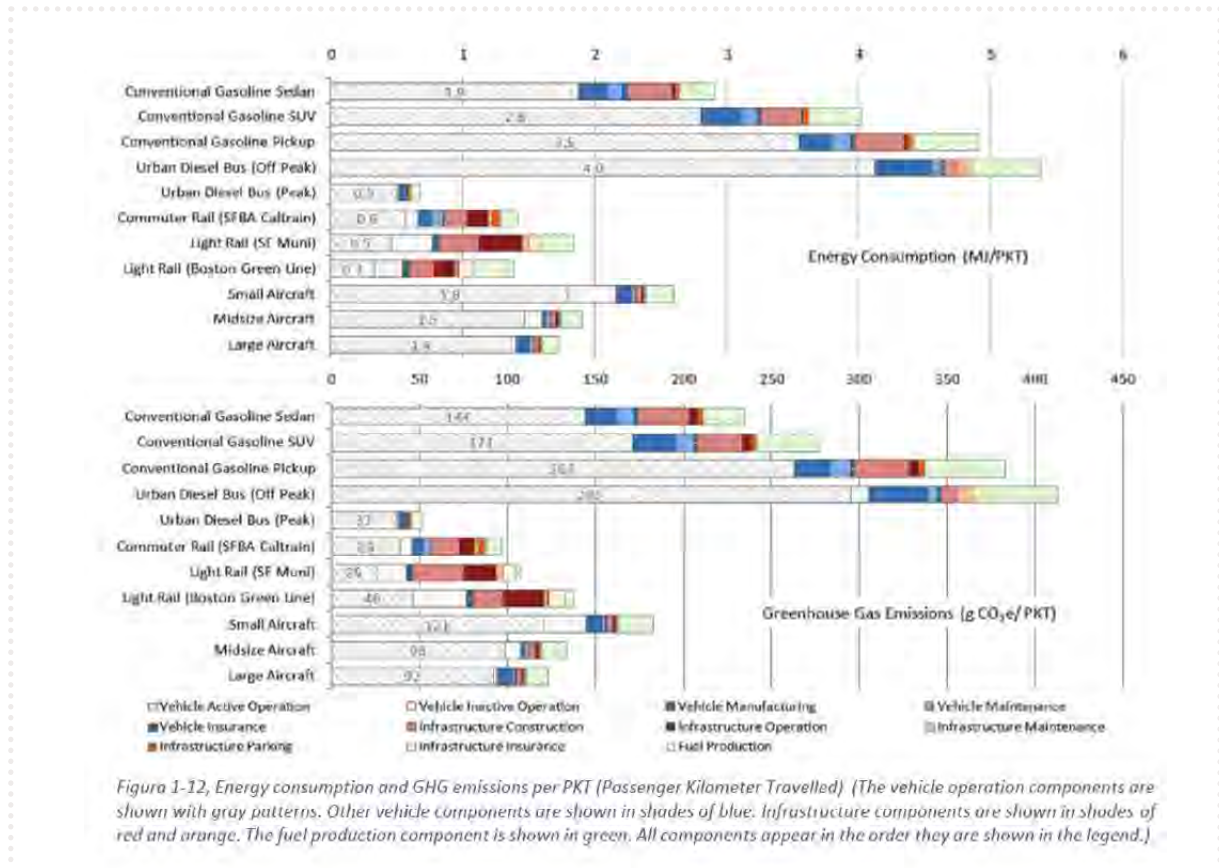
Innanzitutto, è necessario fare una precisazione. Quando si parla di performance di sostenibilità della infrastruttura, bisogna prima sforzarsi di considerarla nella sua interezza: il lotto di rete stradale, ferroviaria, autostradale, portuale oppure il ramo di rete elettrica ecc. Una volta inquadrato questo livello, si possono individuare gli elementi più ripetitivi o più tipologici (le opere d'arte, gli impianti, ecc.) e da lì particolarizzare l'analisi ai processi più importanti (di nuovo: più ripetitivi o più rilevanti dal punto di vista dei materiali coinvolti).

Se manteniamo questa gerarchia di visione, il life cycle thinking ci aiuta a tenerne tutti gli elementi connessi e a passare da un livello di generalità (ovvero da un componente del sistema) all'altro. La maggior parte della letteratura che applica l'analisi LCA al mondo delle costruzioni si concentra sui fabbricati. In una comprensibile logica di prodotto, sono stati i produttori specialistici a concentrarsi sulle opportunità di standardizzazione e di trasparenza offerte dai meccanismi della dichiarazione ambientale di prodotto (EPD). Il mondo delle infrastrutture, invece, dove la standardizzazione, ma soprattutto la ripetitività, è più difficile, è ancora lontano dall'aver affrontato in maniera sistematica la prospettiva di una 'disclosure' delle performance ambientali dei propri materiali e processi. Questo avviene, in particolare, per quei materiali che vengono confezionati su misura per cantieri specifici, o addirittura confezionati in cantiere: si pensi ai conglomerati, di qualunque natura, e alle relative tecnologie di posa che sono sito specifiche e legate a prescrizioni prestazionali connesse alla specificità della infrastruttura o della parte di infrastruttura considerata. Infine, se non si analizza l'intero sistema, si rischiano effetti di 'burden shifting', dove una tipologia di opere vede la propria performance ottimizzata, a discapito di altre.

Nel corso degli ultimi quindici anni, sono state fatte diverse analisi di sistema molto interessanti, che possono essere di grande aiuto nel definire una metodologia di approccio delle infrastrutture. La pubblicazione di Chester e Horvath (2009) è molto importante in questo senso. Il team di ricercatori ha effettuato una analisi LCA del sistema di trasporto in una regione degli Stati Uniti (nella regione metropolitana di Boston). Pur con i limiti del particolare contesto (e del fatto che la simulazione ha 'i suoi anni'), la performance di sostenibilità del sistema è stata affrontata nel complesso, dal veicolo all'infrastruttura (nella logica del concetto di mobility as a service). I dati sono stati poi raggruppati per tipologia di veicolo impiegato e rappresentati in termini di consumi energetici e di impatti (passeggero rispetto al chilometro percorso), consolidando sia le performance dei veicoli sia quelle delle infrastrutture su cui i veicoli stessi viaggiano. Il risultato è una interessante comparazione fra diverse modalità di spostamento. La figura riportata indica i consumi energetici e le emissioni, rappresentati secondo i criteri esposti.

Una analisi a livello di rete come questa, ci restituisce il fatto (importante) che la maggior parte dell'energia e delle emissioni sono legate alla circolazione e alla costruzione dei veicoli e, subito dopo ma con un contributo percentuale non superiore al 20-25%, arriva l'infrastruttura. Dal punto di vista di quest'ultima, la fase di maggiore rilevanza (per consumo e per emissioni) è quella della costruzione (che include l'approvvigionamento dei materiali) e/o quella della gestione (in particolare per il caso delle strade che include il rifacimento periodico dei manti). È interessante notare come, in un caso urbano e suburbano come quello analizzato, emerga in maniera chiara che l'impatto di infrastrutture ferroviarie leggere è comparabile a quello di infrastrutture stradali; sempre in questo caso, per le infrastrutture portuali e aeroportuali la componente di impatto è minimale rispetto a quella dei velivoli.

La rilevanza di analisi di sistema di questo genere sta nel fatto che esse ci indirizzano verso quelle che sono le fasi più condizionanti per la performance ambientale delle infrastrutture e permettono di concentrare la nostra attenzione sui materiali e processi tecnologici più rilevanti da questo punto di vista, ossia di indirizzare la catena del valore dell'infrastruttura verso obiettivi granulari e 'concretamente' sostenibili.



Vale anche la pena evidenziare che queste analisi individuano, grazie alla natura della metodologia LCA, molteplici categorie di impatto, che possono essere molto diverse in relazione alle diverse applicazioni. La rilevanza di queste classificazioni non ha soltanto una ricaduta ambientale, in quanto esse sono spesso correlate a significativi impatti sociali. In effetti una volta determinato, ad esempio, il contributo emissivo, a partire da questo dato è possibile valutare il costo sociale correlato sulla base di tabelle di valutazione dei diversi organismi nazionali o sovranazionali. Sulla base di quanto esposto fino ad ora, gli elementi critici per l'applicazione dell'LCA a progetti di infrastrutture possono essere elencati in questo modo:

- 1) I dati di inventario che possono essere usati per una LCA di infrastrutture non sono ancora sistematizzati e facilmente accessibili.

2) I framework di impatto sono tarati sulla produzione industriale, anche nel caso dei fabbricati sono orientati alla produzione di serie (serramenti, rivestimenti, impianti, ecc.) e meno sui materiali da costruzione veri e propri (di cantiere).

3) I materiali più impattanti sono spesso conglomerati/agglomerati che vengono confezionati, miscelati o assemblati in cantiere, e quindi è più complesso prenderli in considerazione in una procedura standardizzata come la LCA a meno di non certificare anche la filiera con un processo gate to gate.

4) I mezzi d'opera e le modalità di posa possono essere anche molto diversi fra loro nell'ambito della stessa applicazione e di sicuro risentono della localizzazione rispetto al sito di costruzione.

Per rispondere a questi limiti, la strategia con cui procedere nella valutazione della performance di sostenibilità delle infrastrutture usando la LCA potrebbe essere:

- Sviluppare più analisi ai livelli di rete, di progetto, di processo e iterativamente raffinarle, per poter cogliere la complessità del 'sistema' infrastruttura.
- Usare le analisi a livello di network e di processo per focalizzare l'origine degli impatti in termini di fasi del ciclo di vita, materiali critici, processi di costruzione critici.
- Decomporre l'infrastruttura in interventi tipologici (strada, opere d'arte, impianti, ecc.) ed individuare i processi costruttivi più ricorrenti o ripetitivi.
- Correlare questi interventi alle valutazioni del punto (1) ed individuare le catene di fornitura e i mezzi d'opera critici.
- Stimolare l'ecosistema delle costruzioni a costituire metodologie e set di dati predisposti per essere utilizzati in LCA di processo, per esempio standardizzando metodologie di predisposizione di EPD dei conglomerati al 'gate' del cantiere.
- Quantificare delle categorie di impatto rilevanti nei processi, determinate con analisi LCA, da poter impiegare come elementi quantitativi per la valutazione dei 'costi' di impatto e per fornire dei riferimenti, sempre quantitativi, per la scrittura di criteri di valutazione oggettivi delle prestazioni di sostenibilità delle lavorazioni (da impiegare, ad esempio, nel procurement e negli appalti).
- Certificare (o quantomeno standardizzare) con procedimenti condivisi ed Enti Terzi queste modalità di valutazione, per poter favorire l'alimentazione di inventari condivisi di settore e far crescere la supply chain in termini di sostenibilità.

Questo approccio è funzionale a favorire l'implementazione di inventari condivisi e sito-specifici. Man mano che questi dati si renderanno disponibili sarà possibile ampliare in maniera efficace il range dei processi costruttivi che possono essere modellati in maniera realistica, diminuire l'incertezza delle valutazioni LCA e rendere le valutazioni LCA di rete e di progetto più rappresentative in quanto basate su dati di processo direttamente derivanti dall'ecosistema delle costruzioni.

1.5 LA DICHIARAZIONE AMBIENTALE DI PRODOTTO

1.5.1 Cosa è una EPD e come si relaziona alla LCA

La valutazione del ciclo di vita (LCA, Life Cycle Assessment) di un prodotto o servizio è composta da numerosi calcoli e assunzioni che costituiscono un dossier molto “corposo”, di numerose pagine e di difficile lettura per l’utente. Per questo motivo lo standard internazionale ISO 14025 “*Etichette e dichiarazioni ambientali - Dichiarazioni ambientali di Tipo III - Principi e procedure*” ha previsto lo sviluppo di un documento che possa facilitare la diffusione sul mercato della LCA condotta e dei risultati ottenuti, mediante una efficace rappresentazione grafica e un set di dati facilmente interpretabili.

Nasce quindi la Dichiarazione ambientale di prodotto EPD (termine che deriva dall’inglese Environmental Product Declaration) che si definisce come:

- una *etichetta ambientale* (quindi una rappresentazione di un aspetto ambientale);
- di *tipo III*, che si differenzia da quelle di tipo I (come l’Eco Label, con soglie minime di accettabilità) e da quelle di tipo II (autodichiarazioni).

L’EPD rappresenta una forma di comunicazione importante, rivolta alla diffusione degli impatti ambientali relativi alla produzione di un prodotto/servizio e determinati da uno studio del ciclo di vita. Le fasi del ciclo di vita considerate possono differire da prodotto a prodotto a secondo delle regole specifiche previste. Per questo motivo si parla di cicli di vita “from cradle to gate” (dalla culla al cancello), vale a dire dall’estrazione delle materie prime al cancello della fabbrica, o cicli di vita “from cradle to grave” (dalla culla alla tomba), cioè l’intero ciclo di vita fino alla dismissione finale del prodotto. I suoi contenuti sono rivolti principalmente agli utilizzatori industriali e commerciali del prodotto, sfruttando appieno le peculiarità della comunicazione business to business. È necessario, pertanto, che la Dichiarazione ambientale sia trasparente, in modo da poter essere compresa e interpretata correttamente da tutti, e soprattutto credibile, per evitare il fenomeno del green-washing. Vi possono essere diversi tipologie di EPD presenti sul mercato, delle quali le più diffuse sono:

1. EPD di prodotto

- a) dichiarazione relativa a uno specifico prodotto da parte di uno specifico produttore;
- b) dichiarazione relativa alla produzione media di un prodotto eseguita in diversi impianti, da parte di uno specifico produttore;
- c) dichiarazione relativa al prodotto medio tra diversi prodotti in uno specifico impianto da parte di uno specifico produttore;

d) dichiarazione relativa al prodotto medio tra diversi prodotti in diversi impianti, da parte di uno specifico produttore;

2. EPD di settore

a) dichiarazione relativa alla produzione di uno specifico prodotto, come media della produzione eseguita in diversi impianti, da parte di diversi produttori;

b) dichiarazione relativa alla produzione di un prodotto medio, come media della produzione di differenti prodotti eseguita in diversi impianti, da parte di diversi produttori;

3. EPD di prodotto o di settore basata su un tool qualificato.

1.5.2 Contenuto di una EPD

Le regole chiave necessarie per redigere una EPD sono contenute nella citata norma ISO 14025, nella ISO 14040 e ISO 14044 (specificamente per lo studio LCA) e nella PCR (Product Category Rules) che, nel settore delle costruzioni, è la norma EN 15804 *“Sostenibilità delle costruzioni - Dichiarazioni ambientali di prodotto - Regole quadro di sviluppo per categoria di prodotto”*.

In una EPD devono essere incluse le seguenti informazioni [ISO 14025]:

- a) identificazione e descrizione dell'organizzazione che effettua la dichiarazione;
- b) descrizione del prodotto;
- c) identificazione del prodotto;
- d) riferimenti al Program Operator;
- e) identificazione delle PCR – Product Category Rules;
- f) data di pubblicazione e periodo di validità;
- g) dati di LCA - Life Cycle Assessment, LCI - Life Cycle Inventory o moduli informativi, inclusi gli impatti ambientali (ad esempio: consumo di risorse, emissioni in aria, acqua e suolo, cambiamenti climatici, distruzione dello strato di ozono stratosferico, acidificazione del terreno e delle falde acquifere, eutrofizzazione);
- h) informazioni ambientali aggiuntive;
- i) dichiarazione del contenuto del prodotto che copre materiali e sostanze da dichiarare (per esempio, informazioni in merito ai materiali e sostanze che possono avere effetti nocivi sulla salute umana e/o sull'ambiente, in tutte le fasi del ciclo di vita);
- j) dati di base e confini del sistema: identificazione delle fasi del ciclo di vita considerate, evidenziando al contempo quelle non dichiarate;
- k) affermazione che le dichiarazioni ambientali di programmi differenti possono non essere confrontabili;
- l) informazioni sui luoghi dove è possibile ottenere materiali esplicativi;
- m) informazioni su chi ha eseguito la verifica dei dati della EPD.

Inoltre, nell'ottica di una omogeneizzazione del formato delle Dichiarazioni, in ambito Eco Platform, associazione che riunisce i principali Program Operator internazionali nel settore delle costruzioni, sono incluse le seguenti sezioni, che riportano diverse informazioni utili al lettore per individuare immediatamente quanto di interesse e fornire tutte le informazioni ambientali quantificate sul prodotto:

1. *Cover*, dove si posizioneranno i loghi e il prodotto sarà immediatamente riconoscibile mediante una figura tipo. Si forniranno le indicazioni relative al nome dell'Organizzazione, al Program Operator e a Eco-Platform, con il logo Eco EPD. Andranno inseriti, inoltre, il numero di registrazione e le date dell'EPD (emissione, update e scadenza).
2. *Informazioni generali*, relative all'Organizzazione e al prodotto (indirizzo degli stabilimenti, nome del prodotto, sua funzionalità). Si inserirà l'identificazione della PCR di riferimento e lo scopo dell'EPD (dalla culla al cancello, dalla culla al cancello con opzioni oppure dalla culla alla tomba). La tipologia di EPD (EPD di prodotto, di settore, media...) e altre informazioni di carattere generale;
3. *Sezione C*, dedicata esclusivamente alla descrizione del prodotto oggetto di EPD;
4. *Sezione D*, dove si descrivono i risultati dell'LCA e si identificano gli impatti ambientali;
5. *Sezione E*, dove si descrivono le regole di calcolo adottate;
6. *Sezione F*, dedicata alle referenze bibliografiche.

1.5.3 La verifica di terza parte e la pubblicazione dell'EPD

Le EPD per essere valide e accettabili dal mercato devono essere pubblicate sul sito dell'Ente (Program Operator) che stabilisce i criteri di verifica e pubblica le regole affinché si possa soddisfare il criterio della confrontabilità degli impatti ambientali di due prodotti.

Perché l'EPD possa essere pubblicata da un Program Operator è necessario quindi che l'azienda sviluppi, autonomamente o avvalendosi di consulenti esperti in materia, un Report di studio LCA del prodotto o servizio, e da questo ricavi le informazioni ambientali da riportarsi sulla EPD stessa. L'EPD e la LCA dovranno quindi essere soggetti a verifica da parte di un soggetto indipendente, individuato secondo i requisiti definiti dal Program Operator stesso.

Una volta che l'EPD è verificata dal soggetto indipendente, questa viene inviata al Program Operator, che provvede alla sua pubblicazione in elenchi pubblicamente consultabili sul sito internet del Program Operator stesso. Alcuni di questi, come ad esempio il Program Operator italiano EPDIItaly, hanno individuato questi soggetti nei soli organismi di certificazione accredi-

tati per fare queste verifiche, dotando in tal modo il proprio sistema di una modalità di controllo di livello elevato, garantito dal sistema dell'accreditamento.

La verifica condotta da un Ente terzo ha il compito essenziale di garantire al mercato che i principi di competenza, indipendenza e imparzialità siano stati adeguatamente applicati.

Le meticolose procedure di verifica da parte dell'Ente terzo sono condotte sotto accreditamento. Al fine di promuovere la diffusione dell'EPD, alcuni Program Operator hanno sviluppato dei tool specifici per supportare lo sviluppo e la successiva verifica di studi LCA. Nel sistema EPDIItaly – ad esempio - è possibile trovare una modalità le cui verifiche sono condotte sotto accreditamento, chiamata LCA tool. In sostanza vi è la possibilità di sviluppare diversi studi LCA di prodotti ai fini della pubblicazione di diverse EPD, impiegando la medesima modellizzazione del calcolo (algoritmo).

Ciò comporta un'ottimizzazione delle attività di verifica di ciascuna EPD, mediante un processo di validazione dell'algoritmo impiegato e la successiva verifica del corretto impiego dello stesso per la specifica EPD.

Infatti, l'algoritmo di calcolo, basato sullo stesso modello LCA, permette di determinare i diversi impatti dei prodotti, al variare dei dati di input. La verifica delle EPD corrispondenti è semplificata in quanto non è necessario verificare ogni volta il modello di calcolo precedentemente validato. La verifica permette di accertarsi delle caratteristiche di identificazione del tool, completezza, correttezza, appropriatezza, sicurezza e integrità.

Qualora l'algoritmo di calcolo venga modificato, nelle parti di codice inerenti il modello LCA implementato o nelle tipologie di prodotto gestito o nei confini del sistema implementati, l'algoritmo stesso deve essere rivalidato.

È importante infine ricordare anche l'esistenza di accordi di mutuo riconoscimento tra EPDIItaly e diversi Program Operator internazionali che permettono di pubblicare una EPD sia in Italia che all'estero a patto che sia stata sviluppata in conformità con le norme e i requisiti internazionali pertinenti. Tale approccio è permesso, nel circuito Eco Platform e non solo, grazie a meticolose analisi tecniche delle caratteristiche di ciascun programma, in modo che le verifiche condotte da entrambi possano essere considerate equivalenti.

1.5.4 La Confrontabilità

L'utilizzo di un formato ben preciso per le EPD e di un formato comune per i prodotti da costruzione è un tentativo di armonizzare le diverse dichiarazioni ambientali di prodotto, in modo da facilitarne la lettura, l'interpretazione e il confronto. Il concetto di benchmarking, infatti, ha avuto nel corso degli anni un sempre più evidente sviluppo. La necessità di confronto tra prodotti immessi sul mercato e prodotti "rappresentativi" è sempre stato oggetto di discussioni e pareri, ancor di più quando sono dichiarati gli impatti ambientali.

La confrontabilità delle EPD di due prodotti può essere raggiunta con alcuni requisiti [ISO 14025]:

- stesso prodotto, funzione, prestazioni tecniche e uso;
- unità funzionale identica;
- confini del sistema equivalenti;
- descrizione dei dati equivalente;
- criteri per l'inclusione di input e output identici
- requisiti di qualità dei dati, includendo copertura, precisione, completezza, rappresentatività, coerenza, riproducibilità, sorgenti e incertezza equivalenti;
- unità di misura identiche;
- analisi d'inventario - metodologia di raccolta dati equivalenti;
- analisi d'inventario - procedure di calcolo identiche;
- analisi d'inventario - allocazione equivalente;
- la selezione delle categorie di impatto e le regole di calcolo identiche;
- categorie dei dati di inventario e indicatori di categoria di impatto identici;
- requisiti per le informazioni ambientali aggiuntive equivalenti;
- materiali e sostanze pericolose da dichiarare equivalenti;
- istruzioni per la produzione dei dati richiesti per sviluppare la dichiarazione equivalenti;
- istruzioni sul contenuto e il formato della EPD equivalenti;
- informazioni su quali fasi non si considerano equivalenti;
- periodo di validità equivalente.

1.5.5 L'utilizzo di una EPD

Negli ultimi tempi e in diversi ambiti, l'interesse verso l'EPD è aumentato.

Basti pensare che, nel settore delle costruzioni, esistono diversi casi di politiche di diffusione, che rappresentano un importante incentivo per le aziende produttrici che intendono differenziarsi dalla concorrenza meno attenta alle problematiche di carattere ambientale, garantendo nel contempo al mercato le caratteristiche di sostenibilità dei propri prodotti.

Nel settore delle infrastrutture, ad esempio, il sistema di certificazione volontaria Envision premia l'utilizzo delle EPD per i prodotti costituenti l'infrastruttura.

Per quanto riguarda i sistemi di certificazione volontaria dell'edificio, la versione 4 di Leed (Leadership in Energy and Environmental Design) ha introdotto, rispetto al passato, due nuovi crediti che valorizzano le scelte in campo ambientale:

- *Building Life Cycle Impact Reduction, che incorpora alcuni crediti preesistenti e incoraggia la valutazione del ciclo di vita completo dell'edificio;*
- *Building Product Disclosure and Optimization – Environmental Product Declarations, che premia l'utilizzo di prodotti con migliore ciclo di vita e che possiedono un'EPD.*

In Italia, il Decreto sui Criteri Ambientali Minimi (CAM) per l'edilizia, che prevede il soddisfacimento di alcuni criteri comuni a tutti i componenti edilizi: riduzione dell'impatto ambientale, aumento dell'uso di materiali riciclati e del recupero dei rifiuti, richiede la presentazione alla Stazione Appaltante di opportuna documentazione che dimostri il rispetto dei suddetti requisiti, e tra questi documenti è prevista l'EPD conforme alla norma EN 15804, pubblicata ad esempio su EPDIItaly.

1.6 LIFE CYCLE ASSESSMENT E PROTOCOLLI PER LA SOSTENIBILITÀ

1.6.1 I protocolli di sostenibilità e la diffusione della cultura della sostenibilità

L'uso di strumenti di valutazione della sostenibilità nel contesto dell'ambiente costruito è iniziato negli anni Novanta e Duemila, con strumenti dedicati agli edifici come BREEAM (Regno Unito), LEED (USA) e Green Star (Australia e Nuova Zelanda), ora decisamente affermati e altrettanto riconosciuti per il forte contributo che hanno dato alla rivoluzione della bioedilizia. All'inizio degli anni 2000, via via che i benefici sugli edifici diventavano evidenti, è aumentata la richiesta di strumenti analoghi per il mondo delle infrastrutture. Nel Regno Unito, l'industria delle infrastrutture civili, guidata dall'Institution of Civil Engineers, ha lanciato lo strumento di valutazione delle infrastrutture CEEQUAL nel 2003. Dopo il CEEQUAL, alcune iniziative specialistiche di settore hanno reso possibile la creazione di Greenroads e di Envision negli Stati Uniti e l'Infrastructure Sustainability Tool in Australia. Questi quattro sistemi di classificazione sono sempre più utilizzati nel settore delle infrastrutture e sono ormai disponibili numerosi esempi (e casi di studio) di progetti certificati.

Gli strumenti di valutazione della sostenibilità delle infrastrutture funzionano come i loro corrispondenti dell'edilizia e vengono utilizzati per valutare e certificare le prestazioni di progetti e sistemi infrastrutturali rispetto a una serie di criteri di sostenibilità (cui uso delle risorse, ecologia, coinvolgimento delle parti interessate, impatti sulla comunità, cambiamento climatico e resilienza, uso del suolo, progettazione urbana...). Questi strumenti sono generalmente promossi dai proprietari delle infrastrutture e dalla committenza istituzionale (come, ad esempio, agenzie di trasporto e autorità territoriali), e applicati a progetti di asset infrastrutturale da parte di team di specialisti.

I punti di forza e di debolezza di strumenti di valutazione di questo genere possono essere sintetizzati come segue [Griffiths et al., 2018].

I punti di forza

- Definiscono un approccio multidimensionale e basato su criteri, fornendo una metrica e un linguaggio comuni a tutti gli stakeholders della filiera infrastrutturale.
- Creano un meccanismo algoritmico per la definizione di una valutazione standard basata su prove verificabili da terze parti.
- Incoraggiano i proprietari e i committenti delle infrastrutture e i team di progetto a sforzarsi di ottenere livelli più elevati di prestazioni di sostenibilità.
- Sono uno strumento concreto per portare/indurre all'adozione di pratiche sostenibili nei meccanismi di regolamentazione e pianificazione e nella definizione di standard minimi; inoltre, rendono la sostenibilità codificabile, misurabile e gestibile.
- Consentono una comunicazione chiara degli obiettivi, degli sforzi e dei risultati messi in campo per la sostenibilità.
- Definiscono un quadro flessibile che consente la valorizzazione dell'innovazione nelle soluzioni progettuali e costruttive.

Le aree di miglioramento.

- Si basano sulla semplificazione di una situazione complessa ricorrendo ad un unico "punteggio" di rating con una potenziale perdita di visibilità dei driver sottostanti; la focalizzazione sul solo rating finale potrebbe non permettere di cogliere l'intero ambito delle azioni infrastrutturali sostenibili, in particolare le questioni sociali ed economiche.
- Potrebbero focalizzare gli sforzi sulla riduzione al minimo della "insostenibilità" piuttosto che sollecitare la filiera delle costruzioni infrastrutturali a creare qualcosa di sostenibile. Per lo stesso motivo, un approccio di questa natura potrebbe non favorire una strategia di integrazione degli sforzi, ma assegnare ad ogni esperto la 'sua' area limitata di azione.
- È sicuramente difficile coprire con un unico strumento di valutazione l'intera gamma di progetti infrastrutturali, che possono differire per scala, carattere e posizione.
- Potrebbero generare la tendenza ad "inseguire punti" attraverso requisiti obbligatori e soglie di valutazione, finendo con il guidare il progettista o il committente anziché favorirne l'iniziativa.
- Potrebbero tendere ad essere usati come 'suggello' di sostenibilità di un progetto (alla sua conclusione) invece di favorire l'analisi di alternative.

La sfida di questi sistemi è quella di raggiungere un compromesso tra l'affrontare adeguatamente ed esaustivamente i principi di sostenibilità e il fornire uno schema che sia comprensibile e accessibile ai committenti e ai professionisti. Nel loro studio, Griffiths et al. (2018) concludono che strumenti di valutazione di questa natura e tipologia sono determinanti nel diffondere le conoscenze e le pratiche di sostenibilità tra i soggetti che li utilizzano nei progetti, nelle comunità con cui interagiscono e all'interno delle organizzazioni per cui lavorano. Gli impatti

degli strumenti di valutazione della sostenibilità delle infrastrutture non si limitano ai progetti sottoposti a valutazione e certificazione (vale a dire il loro uso formale), ma si estendono a tutto il settore delle infrastrutture attraverso un loro uso informale a livello individuale, organizzativo e di settore.

1.6.2 Il Protocollo Envision

Il Protocollo Envision [Institute for Sustainable Infrastructure, 2018] è il primo sistema di rating specializzato in infrastrutture sostenibili che offre una griglia di analisi con una visione a 360 gradi sulla qualità di un investimento partendo dall'efficacia economica dello stesso, fino ad arrivare a temi sostenibili come il rispetto dell'ecosistema, il miglioramento della qualità della vita, l'efficienza energetica e la valutazione dei rischi e della resilienza ai cambiamenti climatici e non. Nasce negli Stati Uniti e arriva in Italia su iniziativa di ICMQ (Organismo di Certificazione specializzato nel settore delle infrastrutture) che ha ricevuto il mandato da ISI per la diffusione, in esclusiva, del protocollo sul territorio Italiano.

Envision supporta i professionisti, le imprese, le amministrazioni e i cittadini nello sviluppo di progetti sostenibili grazie alla valutazione indipendente delle informazioni e alla documentazione che gli stessi progettisti o i committenti mettono a disposizione. Il protocollo è applicabile in varie realtà della progettazione, intervenendo con un ruolo da protagonista nella realizzazione di grandi infrastrutture come ponti, strade, porti, aeroporti, centrali per energia ecc...

Il protocollo Envision si caratterizza per l'innovativa capacità di analisi delle fonti offrendo un punto di vista oggettivo e completo sul piano delle valutazioni costi/benefici per la comunità, della partecipazione degli stakeholder e dell'impiego efficiente delle risorse. L'obiettivo è fornire uno strumento per la misurazione dei parametri di sostenibilità, attraverso un percorso di autovalutazione che può proseguire con la registrazione del progetto, la verifica per mano di un Organismo di Terza Parte indipendente e, infine, la certificazione.

Il sistema di rating Envision è articolato in 64 criteri di sostenibilità (crediti), suddivisi in 5 categorie che identificano le potenziali esternalità delle infrastrutture: **Quality of Life, Leadership, Resource Allocation, Natural World, Climate and Resilience.**

Sono inoltre previsti crediti extra (Innovation), come riconoscimento dell'eventuale valore aggiunto in termini di innovazione, prestazioni esemplari o ulteriori aspetti di sostenibilità raggiunti dal progetto in esame. La somma del punteggio raggiunto per ciascun credito perseguito rapportato al punteggio massimo raggiungibile (1.000) determina il livello di certificazione dell'opera: Verified (20%), Silver (30%), Gold (40%) e Platinum (50%). Ciascun credito può essere perseguito attraverso 5 livelli che misurano il grado di approfondimento crescente della sostenibilità per ogni specifico credito (livelli di achievement).

Envision può essere utilizzato da progettisti, comunità, organizzazioni ambientaliste, costruttori, Amministrazioni pubbliche e private per soddisfare gli obiettivi di sostenibilità e ottenere un riconoscimento pubblico e super partes per i livelli di sostenibilità ottenuti, per ottimizzare la localizzazione del progetto, coadiuvare comunità locali e proponenti nel processo di progettazione partecipata e nella creazione di consenso. Il protocollo Envision permette di valutare la sostenibilità delle infrastrutture attraverso la misura degli effetti che queste producono su ogni aspetto della vita dell'uomo e dell'ambiente circostante.

Gli strumenti di Envision rappresentano un rilevante supporto al team di progetto:

- Facilitano il dialogo con gli stakeholder al fine di velocizzare il processo realizzativo e ridurre il rischio di contestazioni territoriali.
- Valorizzano scelte sostenibili, sia ambientali sia sociali e stimolano la discussione creativa all'interno del team.
- Hanno un ruolo importante all'interno del ciclo di valutazione dei costi e dei benefici lungo tutto il ciclo di vita dell'opera (localizzazione, progettazione, realizzazione, esercizio e dismissione).

1.6.3 La sinergia fra protocolli di sostenibilità e la Life Cycle Assessment

Oltre ad essere direttamente citato come requisito indispensabile per alcuni indicatori dei protocolli di sostenibilità, la metodologia Life Cycle Assessment ed in particolare la sua applicazione al livello dei processi di costruzione, diventa uno strumento attivo per promuovere azioni concrete nell'ambito della supply chain delle costruzioni.

La sinergia fra i protocolli di sostenibilità e la Life Cycle Assessment è determinata nella definizione della performance di sostenibilità di una infrastruttura. Di fatti, il protocollo con i suoi indicatori 'sistemici' permette un inquadramento strategico della visione sostenibile del progetto, che può appoggiarsi solidamente sulle determinazioni quantitative che l'analisi del ciclo di vita offre ai diversi livelli di applicazione che abbiamo illustrato in precedenza. Da un lato, la sola visione strategica rischia di essere troppo 'leggera' agli occhi di chi chiede concretamente che cosa sia la sostenibilità e come la si misuri, dall'altro, la sola valutazione quantitativa finisce con il concentrare 'attenzione su aspetti specialistici e non consente a tutti gli stakeholder di 'leggere' lo sforzo che il committente, i progettisti, i costruttori, i gestori compiono, tutti insieme, per il raggiungimento di una più elevata prestazione di sostenibilità dell'infrastruttura analizzata. Possiamo sintetizzare i vantaggi principali di questa azione sinergica.

- Ampliare la gamma degli impatti considerati, anche in ragione delle diverse conseguenze sociali di ciascuno di essi.

- Agevolare l'utilizzo della certificazione ambientale di prodotto e delle EPD certificate di settore, valorizzandone l'inserimento nella valutazione di processo.
- Stimolare lo sviluppo di piattaforme per la raccolta di dati certificati e standardizzati in merito alle prestazioni ambientali dei materiali e dei processi di costruzione infrastrutturali.
- Contribuire a realizzare un linguaggio comune e delle strategie consolidate per il continuo miglioramento.
- Favorire un dialogo basato su valutazioni quantitative fra il mondo della committenza, quello delle istituzioni e l'industria delle costruzioni.
- Stimolare la riflessione su risvolti e opportunità di circolarizzazione e di riuso.
- Favorire l'adozione di criteri di ecodesign e di integrazione di soluzioni di ecodesign. (?)

1.6.4 Il criterio DNSH e il Protocollo Envision: le Linee Guida ICMQ

È del marzo del 2018 la pubblicazione da parte della Commissione Europea del piano d'azione per finanziare la crescita sostenibile, attraverso un'ambiziosa strategia globale che prevede un riorientamento dei flussi di capitali verso investimenti che favoriscono la sostenibilità e grazie all'istituzione di un sistema di classificazione unificato per le attività economiche sostenibili. Il percorso trova la sua piena sistematizzazione l'11 dicembre 2019 con la pubblicazione della comunicazione sul «Green Deal europeo». Con questo atto la Commissione intende riorientare il processo di coordinamento macroeconomico del semestre europeo per integrarvi gli obiettivi di sviluppo sostenibile delle Nazioni Unite, ponendo la sostenibilità e il benessere dei cittadini al centro della politica economica e degli interventi della stessa Unione.

Ad orientare le nuove politiche dell'Unione è una strategia sistemica di adattamento ai cambiamenti climatici, che mette al centro programmi orientati alla resilienza, alla prevenzione e alla gestione degli impatti attesi. Si tratta di una strategia destinata ad influenzare gli investimenti pubblici e privati, affinché investitori, compagnie di assicurazione, imprese, istituzioni e cittadini possano mettere a punto iniziative concrete e misurabili per integrare i cambiamenti climatici nelle loro pratiche quotidiane di gestione dei rischi.

È in questo scenario e percorso che si colloca il varo del Regolamento europeo 2020/852, approvato dal Parlamento e dal Consiglio il 18 giugno 2020, con il quale si definiscono le regole per garantire investimenti sostenibili. Il Regolamento stabilisce i criteri per determinare se un'attività economica possa considerarsi ecosostenibile, al fine di individuare il grado di ecosostenibilità di un investimento.

Il Regolamento definisce un'attività economica 'ecosostenibile' quando contribuisce in modo sostanziale al raggiungimento di uno o più dei seguenti obiettivi ambientali:

- *la mitigazione dei cambiamenti climatici;*
- *l'adattamento ai cambiamenti climatici;*
- *l'uso sostenibile e la protezione delle acque e delle risorse marine;*
- *la transizione verso una economia circolare;*
- *la prevenzione e la riduzione dell'inquinamento;*
- *la protezione e il ripristino della biodiversità e degli ecosistemi.*

A ciascun obiettivo è dedicato un articolo di dettaglio nel quale vengono individuati i principali contributi per il loro raggiungimento (articoli da 10 a 16). Vengono altresì definite le garanzie minime di salvaguardia a cui ci si deve attenere (articolo 18). Ed è nel Regolamento 2020/852 che viene richiamato il principio secondo cui un'attività economica può considerarsi ecosostenibile se non arreca un danno significativo a nessuno degli obiettivi ambientali sopra richiamati, dedicando a questo argomento l'articolo 17, nel quale vengono indicati per ciascun obiettivo comportamenti e pratiche in contrasto con il principio del DNSH ("do no significant harm", cioè "non arrecare un danno significativo").

L'importanza data a questo principio trova piena conferma nella Comunicazione della Commissione dedicata agli "Orientamenti tecnici sull'applicazione del principio "non arrecare un danno significativo" a norma del "Regolamento sul Dispositivo per la Ripresa e la Resilienza."

Si tratta del Regolamento che istituisce il Dispositivo per la Ripresa e la Resilienza (RRF, Recovery and Resilience Facility) dove si stabilisce che nessuna misura inserita in un piano per la ripresa e la resilienza (RRP, Recovery and Resilience Plan) debba arrecare danno agli obiettivi ambientali ai sensi dell'articolo 17 del regolamento sulla Tassonomia, ovvero il 2020/852.

Ai sensi del regolamento RRF, infatti, la valutazione degli RRP deve garantire che ogni singola misura inclusa nel piano (ossia ciascuna riforma e ciascun investimento) sia conforme al principio DNSH ("do no significant harm"). Il Regolamento RRF stabilisce, inoltre, che la Commissione fornisca orientamenti tecnici sulle modalità di applicazione del principio DNSH nel contesto dell'RRF. Da qui la comunicazione della Commissione con cui, in sintesi, essa stabilisce che gli Stati membri devono fornire una valutazione DNSH per ogni singola misura del rispettivo RRP e che pertanto non sia possibile valutare positivamente l'RRP se una o più misure non sono conformi al principio DNSH. Pertanto, la valutazione DNSH non dovrà essere effettuata a livello del piano o delle singole componenti del piano, bensì a livello di misura. E questo vale sia per le misure che si considera diano un contributo alla transizione verde sia per tutte le altre misure incluse negli RRP.

La stretta correlazione tra il Regolamento RRF e il principio DNSH è stabilita nell'esplicito richiamo a quanto contenuto nell'articolo 17 del Regolamento 2020/852 là dove definisce il "danno

significativo” per i sei obiettivi ambientali. E specificatamente che un’attività arreca un danno significativo a:

- I.** la mitigazione dei cambiamenti climatici se conduce a significative emissioni di gas a effetto serra;
- II.** l’adattamento ai cambiamenti climatici se conduce a un peggioramento degli effetti negativi del clima attuale e del clima futuro previsto su sé stessa o sulle persone, sulla natura o sugli attivi;
- III.** l’uso sostenibile e la protezione delle acque e delle risorse marine se l’attività nuoce al buono stato o al buon potenziale ecologico di corpi idrici, comprese le acque di superficie e sotterranee, o al buono stato ecologico delle acque marine;
- IV.** l’economia circolare, compresi la prevenzione e il riciclaggio dei rifiuti, se conduce a inefficienze significative nell’uso dei materiali o nell’uso diretto o indiretto di risorse naturali, o se comporta un aumento significativo della produzione, dell’incenerimento o dello smaltimento dei rifiuti oppure se lo smaltimento a lungo termine dei rifiuti potrebbe causare un danno significativo e a lungo termine all’ambiente;
- V.** la prevenzione e la riduzione dell’inquinamento se comporta un aumento significativo delle emissioni di sostanze inquinanti nell’aria, nell’acqua o nel suolo;
- VI.** la protezione e il ripristino della biodiversità e degli ecosistemi se nuoce in misura significativa alla buona condizione e alla resilienza degli ecosistemi o nuoce allo stato di conservazione degli habitat e delle specie, compresi quelli di interesse per l’Unione.

Dal 1° gennaio 2022 è entrato in vigore il Regolamento delegato UE 2021/2139 della Commissione, che integra il Regolamento UE 2020/852 del Parlamento europeo e del Consiglio, fissando i criteri tecnici che determinano le condizioni per cui un’attività economica contribuisce in modo sostanziale alla mitigazione dei cambiamenti climatici o all’adattamento ai cambiamenti climatici e se non arreca un danno significativo a nessun altro obiettivo ambientale.

In questo contesto, mancando parametri certi all’interno delle linee guida, è emersa la difficoltà di misurare la sostenibilità delle infrastrutture. Un aiuto importante per gli stakeholder (professionisti, imprese, amministrazioni, cittadini) arriva dai protocolli di sostenibilità; in effetti, uno strumento come il protocollo Envision è l’ideale per misurare lo stato dei sei obiettivi DNSH e ottenere una certificazione di sostenibilità conforme alle richieste dell’UE.

Con un’integrazione fondamentale: mentre la valutazione DNSH si occupa solo di ambiente, il protocollo Envision tiene conto anche della parte economica e della parte sociale, soddisfacendo così i tre fattori ESG. I crediti Envision permettono di valutare la sostenibilità delle infrastrutture attraverso la misura degli effetti che queste producono su ogni aspetto della vita dell’uomo e dell’ambiente circostante.

Buona parte dei crediti Envision ha una ricaduta diretta sugli obiettivi indicati nel Regolamento 2020/852, ma non solo: all'interno del protocollo sono presenti ulteriori crediti che contribuiscono in maniera indiretta, ma efficace, al raggiungimento degli obiettivi stessi.

La certificazione di sostenibilità ottenuta attraverso la rispondenza del progetto ai requisiti previsti dai crediti del protocollo Envision rappresenta dunque un importante contributo per realizzare opere conformi a quanto indicato dal principio Do No Significant Harm.

In quest'ottica, l'impiego della LCA unito a quello di Envision consentono una definizione esplicita dei requisiti del criterio DNSH e del Regolamento Europeo in generale.

1.6.5 Il ciclo di vita delle infrastrutture: tecnologie e materiali sostenibili con l'indirizzo strategico di Envision

Alla luce di quanto illustrato fino a qui, il livello di applicazione della LCA che ci consente una focalizzazione dedicata a tecnologie, materiali e processi e che sia orientata alla massimizzazione di dati sito-specifici è quella di un approccio per processi (rispetto a quello di rete infrastrutturale o dell'interessa del progetto).

Allo stesso tempo, tuttavia, abbiamo bisogno di una guida 'strategica' che consenta di passare dalla valutazione di impatto di dettaglio che l'analisi LCA fornisce, ad un livello di visione di insieme della performance ambientale. Per far questo c'è bisogno di indicatori di sostenibilità, e li può fornire lo stesso protocollo Envision.

Inoltre, sempre alla luce di quanto discusso, è possibile correlare gli indicatori di Envision (i crediti, appunto) ai criteri del Regolamento EU (i cosiddetti criteri DNSH).

Nelle pagine seguenti si propone una correlazione concreta fra i set di indicatori Envision/DNSH e la finalità di una analisi LCA di processo sito-specifica. Si procederà secondo la classificazione delle categorie principali di Envision.

1.6.5.1 Categoria Quality of Life

La tabella seguente correla i crediti Envision con i criteri DNSH secondo la codifica della guida ICMQ [2022] e precisa quali possono essere presi in considerazione per focalizzare/contestualizzare una analisi LCA dedicata.

- **QL1.1, Improve Community Quality of Life:** Una analisi LCA può evidenziare, attraverso le categorie di impatto e una focalizzazione sulle tecnologie costruttive, gli effetti della lavorazione sulla qualità della vita della comunità in cui il cantiere opera.
- **QL1.2, Enhance Public Health & Safety Applicable:** Allo stesso modo dell'indicatore precedente, la correlazione impatti ambientali e impatti sociali, intrinseca ad esempio nel modello Environmental Footprint evidenziato.

Sub category	Envision Credit	Credit Assessment Through Process LCA	Climate Change mitigation OBJ 1	Climate Change adaptation OBJ 2	Sustainable use of water and marine resources OBJ 3	Circular economy transition OBJ 4	Pollution prevention OBJ 5	Biodiversity and ecosystem protection OBJ 6
Wellbeing	QL1.1 Improve Community Quality of Life	Applicable	-	-	-	-	-	-
	QL1.2 Enhance Public Health & Safety	Applicable	-	-	-	-	b, c, d	-
	QL1.3 Improve Construction Safety	Not Applicable	-	-	-	-	c, d	-
	QL1.4 Minimize Noise & Vibration	Not Applicable	-	-	-	-	-	-
	QL1.5 Minimize Light Pollution	Not Applicable	-	-	-	-	-	-
	QL1.6 Minimize Construction Impacts	Applicable	-	-	-	-	-	-
Mobility	QL2.1 Improve Community Mobility Access	Not Applicable	-	-	-	-	-	-
	QL2.2 Encourage Sustainable Transportation	Applicable	c	-	-	-	-	-
	QL2.3 Improve Access & Wayfinding	Not Applicable	-	-	-	-	-	-
Community	QL3.1 Advance Equity & Social Justice	Not Applicable	-	-	-	-	-	-
	QL3.2 Preserve Historic & Cultural Resources	Not Applicable	-	-	-	-	-	-
	QL3.3 Enhance Views & Local Character	Not Applicable	-	-	-	-	-	-
	QL3.4 Enhance Public Space & Amenities	Not Applicable	-	-	-	-	-	-

Tabella 1-3, Corrispondenza Envision/DNSH per la categoria Quality of Life

• **QL1.6, Minimize Construction Impacts:** In questo caso, se l’analisi incorpora gli effetti dei trasporti, del trattamento dei rifiuti, l’incidenza del consumo di risorse naturali ed energetiche, ecco che può dar conto di una minimizzazione complessiva dell’attività di costruzione. È poi possibile mettere a confronto diverse soluzioni realizzative e valutare quali hanno una performance ambientale migliore e quindi ottimizzare il processo nel suo complesso.

• **QL2.2, Encourage Sustainable Transportation:** Anche in questo caso l’indicatore Envision invita a porre attenzione alle modalità di trasporto che per l’analisi LCA possono diventare distanza, carburante, elettricità ad esempio.

In questa prima categoria la correlazione con gli indicatori DNS è meno rilevante e si riscontra solo con il QL1.2.

1.6.5.2 Categoria Leadership

La tabella seguente correla i crediti Envision con i criteri DNSH secondo la codifica della guida ICMQ [2022] per la categoria Leadership e precisa quali possono essere presi in considerazione per focalizzare/contestualizzare una analisi LCA dedicata.

		Credit Assessment Through Process LCA	Climate Change mitigation OBJ 1	Climate Change adaptation OBJ 2	Sustainable use of water and marine resources OBJ 3	Circular economy transition OBJ 4	Pollution prevention OBJ 5	Biodiversity and ecosystem protection OBJ 6
Collaboration	LD1.1 Provide Effective Leadership & Commitment	Not Applicable	-	-	-	-	-	-
	LD1.2 Foster Collaboration & Teamwork	Not Applicable	-	-	-	-	-	-
	LD1.3 Provide for Stakeholder Involvement	Not Applicable	-	-	-	-	-	-
	LD1.4 Pursue Byproduct Synergies	Applicable	-	-	-	a, c, e, f, g, h, j, k	-	-
Planning	LD2.1 Establish a Sustainability Management Plan	Not Applicable	-	-	-	-	-	-
	LD2.2 Plan for Sustainable Communities	Not Applicable	-	-	-	-	-	-
	LD2.3 Plan for Long-Term Monitoring & Maintenance	Not Applicable	-	-	-	b, e	-	-
	LD2.4 Plan for End-of-Life	Not Applicable	-	-	-	b, e	-	-
Economy	LD3.1 Stimulate Economic Prosperity & Development	Not Applicable	-	-	-	-	-	-
	LD3.2 Develop Local Skills & Capabilities	Not Applicable	-	-	-	-	-	-
	LD3.3 Conduct a Life-Cycle Economic Evaluation	Applicable	-	-	-	-	-	-

Tabella 1-4, Corrispondenza Envision/DNSH per la categoria Leadership

Sono stati trascurati gli indicatori che non hanno una rilevanza a livello di processo o che non possono essere valorizzati da una analisi LCA. Vediamo in dettaglio quelli rimanenti.

- **LD1.4 Pursue Byproduct Synergies:** Una analisi LCA può mettere bene in evidenza le correlazioni fra materiali e le opportunità per la valorizzazione di soluzioni circolari (aggregati riciclati ad esempio).
- **LD3.3 Conduct a Life-Cycle Economic Evaluation:** Effettuare una analisi LCA richiede la conoscenza di dettaglio di tutte le quantità e dei consumi coinvolti nel processo di costruzione analizzato, e quindi diventa decisamente semplice fare una valutazione cumulativa di costo e unire alla valutazione dell'impatto per la fase di ciclo di vita analizzata, anche quella relativa al costo della stessa.

Il DNSH interseca, questa volta, il credito LD3.3.

1.6.5.3 Categoria Resource Allocation

La tabella seguente correla i crediti Envision con i criteri DNSH secondo la codifica della guida ICMQ [2022] per la categoria Resource Allocation e precisa quali possono essere presi in considerazione per focalizzare/contestualizzare una analisi LCA dedicata.

	Credit Assessment Through Process LCA	Climate Change mitigation OBJ 1	Climate Change adaptation OBJ 2	Sustainable use of water and marine resources OBJ 3	Circular economy transition OBJ 4	Pollution prevention OBJ 5	Biodiversity and ecosystem protection OBJ 6
Materials	RA1.1 Support Sustainable Procurement Practices	Applicable	-	-	d	d	d
	RA1.2 Use Recycled Materials	Applicable	d	-	-	c, e, g	-
	RA1.3 Reduce Operational Waste	Applicable	c	-	-	f, g, h, j, k	-
	RA1.4 Reduce Construction Waste	Applicable	c	-	-	f, g, h, j, k	-
	RA1.5 Balance Earthwork On Site	Not Applicable	c	-	-	f	a
Energy	RA2.1 Reduce Operational Energy Consumption	Applicable	a	-	-	-	-
	RA2.2 Reduce Construction Energy Consumption	Applicable	c	-	-	-	-
	RA2.3 Use Renewable Energy	Applicable	a	-	-	-	-
	RA2.4 Commission & Monitor Energy Systems	Not Applicable	b	-	-	-	-
Water	RA3.1 Preserve Water Resources	Not Applicable	-	-	a, c	-	-
	RA3.2 Reduce Operational Water Consumption	Applicable	-	-	b, c	-	-
	RA3.3 Reduce Construction Water Consumption	Applicable	-	-	b, c	-	-
	RA3.4 Monitor Water Systems	Not Applicable					

Tabella 1-5, Corrispondenza Envision/DNSH per la categoria Resource Allocation

Sono stati trascurati gli indicatori che non hanno una rilevanza a livello di processo o che non possono essere valorizzati da una analisi LCA. Vediamo in dettaglio quelli rimanenti.

- **RA1.1 Support Sustainable Procurement Practices:** Una analisi LCA fornisce dati quantitativi che possono supportare una politica strutturata di green procurement.
- **RA1.2 Use Recycled Materials:** I benefici dell'impiego di materiali riciclati può essere valorizzato da una analisi LCA tenendo conto di tutta la catena del valore che ha dato luogo al riciclo in questione.
- **RA1.3 Reduce Operational Waste:** La riduzione di rifiuti operativi dà luogo ad un beneficio diretto in termini di riduzione delle categorie di impatto legate, ad esempio, al consumo di risorse.
- **RA1.4 Reduce Construction Waste:** come nel caso precedente.
- **RA2.1 Reduce Operational Energy Consumption:** Dal momento che la LCA misura flussi di energia e di materiale, la riduzione di consumo energetico riduce quantitativamente gli impatti.
- **RA2.2 Reduce Construction Energy Consumption:** come nel caso precedente.
- **RA2.3 Use Renewable Energy:** l'impiego di energie rinnovabili viene pienamente valorizzato da una analisi LCA.
- **RA3.2 Reduce Operational Water Consumption:** l'ottimizzazione della risorsa idrica si accompagna a riduzioni dei materiali coinvolti in generale e a una generale riduzione dei rifiuti prodotti.

• **RA3.3 Reduce Construction Water Consumption:** come nel caso precedente.

1.6.5.4 Categoria Natural World

La tabella seguente correla i crediti Envision con i criteri DNSH secondo la codifica della guida ICMQ [2022] per la categoria Natural World e precisa quali possono essere presi in considerazione per focalizzare/contestualizzare una analisi LCA dedicata.

		Credit Assessment Through Process LCA	Climate Change mitigation OBJ 1	Climate Change adaptation OBJ 2	Sustainable use of water and marine resources OBJ 3	Circular economy transition OBJ 4	Pollution prevention OBJ 5	Biodiversity and ecosystem protection OBJ 6
Siting	NW1.1 Preserve Sites of High Ecological Value	Not Applicable	f	-	-	-	-	a, d
	NW1.2 Provide Wetland & Surface Water Buffers	Not Applicable	-	-	c	-	-	a
	NW1.3 Preserve Prime Farmland	Not Applicable	f	-	-	-	-	c
	NW1.4 Preserve Undeveloped Land	Not Applicable	f	-	-	-	-	b, d
Conservation	NW2.1 Reclaim Brownfields	Not Applicable	-	-	-	-	a, c, d	b
	NW2.2 Manage Stormwater	Not Applicable	-	a, b	a	-	a	-
	NW2.3 Reduce Pesticide & Fertilizer Impacts	Not Applicable	f	-	a, c	-	a	b, d
	NW2.4 Protect Surface & Groundwater Quality	Applicable	-	-	d	-	a	a
Ecology	NW3.1 Enhance Functional Habitats	Not Applicable	-	-	-	-	-	a, d
	NW3.2 Enhance Wetland & Surface Water Functions	Not Applicable	-	-	c, d	-	-	a
	NW3.3 Maintain Floodplain Functions	Not Applicable	f	a, b	c	-	-	a
	NW3.4 Control Invasive Species	Not Applicable	-	-	-	-	-	b, d
	NW3.5 Protect Soil Health	Applicable	f	-	-	-	a	b, d

Tabella 1-6, Corrispondenza Envision/DNSH per la categoria Natural World

Sono stati trascurati gli indicatori che non hanno una rilevanza a livello di processo o che non possono essere valorizzati da una analisi LCA. Vediamo in dettaglio quelli rimanenti.

- **NW2.4 Protect Surface & Groundwater Quality:** gli interventi di valorizzazione della risorsa idrica (superficiale e di falda) riducono i rifiuti e favoriscono il riciclo, una analisi LCA è in grado di misurarne i benefici.
- **NW3.5 Protect Soil Health:** come nel caso precedente.

Il DNSH interseca entrambi gli indicatori di Envision applicabili.

1.6.5.5 Categoria Climate and Resilience

La tabella seguente correla i crediti Envision con i criteri DNSH secondo la codifica della guida ICMQ [2022] per la categoria Climate and Resilience e precisa quali possono essere presi in considerazione per focalizzare/contestualizzare una analisi LCA dedicata.

	Credit Assessment Through Process LCA	Climate Change mitigation OBJ 1	Climate Change adaptation OBJ 2	Sustainable use of water and marine resources OBJ 3	Circular economy transition OBJ 4	Pollution prevention OBJ 5	Biodiversity and ecosystem protection OBJ 6
Emissions	CR1.1 Reduce Net Embodied Carbon	Applicable	d	-	-	c, d	-
	CR1.2 Reduce Greenhouse Gas Emissions	Applicable	e, f	-	-	-	-
	CR1.3 Reduce Air Pollutant Emissions	Applicable	-	-	-	-	a, b
Resilience	CR2.1 Avoid Unsuitable Development	Not Applicable	-	a, b	c	-	-
	CR2.2 Assess Climate Change Vulnerability	Not Applicable	-	a, b	-	-	-
	CR2.3 Evaluate Risk and Resilience	Not Applicable	-	a, b	c	-	b
	CR2.4 Establish Resilience Goals and Strategies	Not Applicable	-	-	-	-	-
	CR2.5 Maximize Resilience	Not Applicable	-	-	-	-	-
	CR2.6 Improve Infrastructure Integration	Not Applicable	-	-	-	-	-

Tabella 1-7, Corrispondenza Envision/DNSH per la categoria Climate and Resilience

Sono stati trascurati gli indicatori che non hanno una rilevanza a livello di processo o che non possono essere valorizzati da una analisi LCA. Vediamo in dettaglio quelli rimanenti.

- **CR1.1 Reduce Net Embodied Carbon:** La riduzione di accumuli emissivi ‘nascosti’ si ottiene grazie alla analisi del ciclo completo del valore di un processo e la LCA ne dà conto.
- **CR1.2 Reduce Greenhouse Gas Emissions:** il KPI della categoria climate change è proprio la quantità di CO₂eq emessa.
- **CR1.3 Reduce Air Pollutant Emissions:** come nel caso precedente per le categorie di impatto del framework dell’Environmental Footprint collegate alla qualità dell’aria.

Il DNSH interseca tutti e tre gli indicatori di Envision applicabili.

1.6.6 Scegliere le fasi del ciclo di vita e i materiali rilevanti

Abbiamo detto che, a seconda del tipo di infrastruttura, la rilevanza delle diverse fasi del ciclo di vita varia con i materiali e con i processi coinvolti. Diversi studi, ad esempio quelli di Liljenström (2021), applicati ai sistemi di trasporto ci danno un esempio di come un approccio di rete consenta la individuazione delle fasi e degli ambiti sui quali concentrare in successione delle analisi più mirate. La figura, relativa al sistema di mobilità svedese con dati relativi all’anno 2015, in effetti ci evidenzia dove può essere opportuno focalizzare un approccio LCA ‘orientato al processo’.

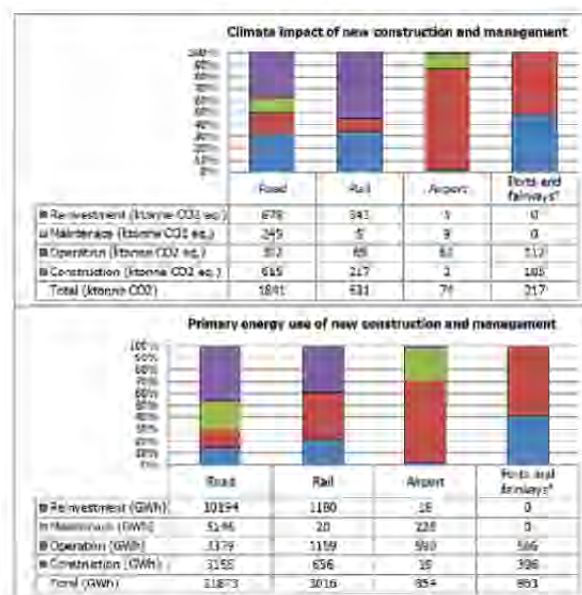


Figura 1-13, Annual climate impact (ktone CO₂ equivalents) and primary energy use (GWh) of new construction and management (operation, maintenance, reinvestment) of the infrastructure stock. * Note that the activity construction of ports and fairways also includes material and energy use for maintenance and reinvestment (Liljenström, 2021)

In figura sono rappresentati i contributi delle attività di costruzione e gestione del parco infrastrutture esistenti in termini di consumo energetico e di emissione di gas GHG per l'anno di riferimento (2015). Per le infrastrutture stradali, la gestione delle infrastrutture di trasporto rappresenta circa il 67% dell'impatto climatico e l'86% del consumo energetico. La gestione dell'infrastruttura è significativa anche per l'infrastruttura ferroviaria, che rappresenta circa il 65% dell'impatto climatico e il 78% del consumo energetico.

Tenendo conto del fatto che ci si sta riferendo ad un contesto specifico, quello svedese, tuttavia, questi dati ci dicono molto sulla rilevanza 'relativa' delle fasi all'interno del ciclo di vita dell'infrastruttura: la fase di costruzione è fondamentale per strade, ferrovie e porti, mentre la gestione delle infrastrutture (combinazione di funzionamento e di manutenzione) vede contributi diversi per energia e impatto (dovuti principalmente al consumo energetico). Particolare attenzione dovrebbe essere prestata alla fase di reinvestimento (ricostruzione), dove considerato che la durata della vita utile e il capex dell'infrastruttura possano essere così rilevanti da rendere non perseguibile la demolizione, il reinvestimento (nel senso di ricostruzione e adeguamento dell'infrastruttura) rappresenta una via obbligata. È interessante notare che, poiché il reinvestimento coinvolge anche le infrastrutture esistenti, gli importi che lo riguardano possono risultare più ingenti della costruzione della nuova infrastruttura pianificata.

Quindi, quando si scelgono i confini di un'analisi focalizzata sul processo LCA, una volta effettuato l'inquadramento complessivo, a seconda del materiale o dei processi da analizzare (ad esempio, per esigenze di approvvigionamento), potrebbe valere la pena restringere le fasi a quelle significative (ad esempio, cradle to gate o to site) invece di estendere l'analisi all'intera durata della vita utile.

Sulla base di questa impostazione, una volta focalizzato il processo costruttivo che si desidera analizzare, gli indicatori di Envision possono costituire una guida determinante per la individuazione della unità funzionale e la definizione dei confini/limiti dell'analisi.

1.6.7 Approfondire le performance ambientali di un processo costruttivo

Come primo obiettivo, una valutazione del ciclo di vita orientata al processo può essere utilizzata per affinare le prestazioni di sostenibilità di una specifica modalità di costruzione. Come abbiamo appena visto, lo scopo, l'obiettivo e l'unità funzionale così come il dettaglio dei materiali, la scelta fra dati di inventario standardizzato e dati sito specifici discende dalla finalità dell'approfondimento. Ciò è definito dall'ambito e dall'obiettivo dell'analisi. L'ambito e l'obiettivo dell'analisi possono essere dettati da un'esigenza di progettazione o da un'esigenza di approvvigionamento; possono essere scelti per confrontare diversi approcci tecnologici e per migliorare la sostenibilità di una fase di costruzione tradizionale (baseline) rispetto ad un processo innovativo da sperimentare o semplicemente da valutare comparativamente.

Le fasi dell'analisi possono essere definite in base alla tabella (tratta dai citati standard ISO) e muovendosi da A1 a A5, quando lo schema cradle to gate (o -to site) è più pertinente o fra le fasi mentre nelle B1 e B2 dove il funzionamento e la manutenzione diventano più rilevanti. Ad esempio, un manufatto in calcestruzzo può essere analizzato all'interno di un range da A1 ad A5 (per la rilevanza della fase di produzione del materiale rispetto alle altre) o anche oltre, se la performance dei componenti è orientata a fornire una prestazione specifica nel lungo termine, come avviene molto spesso, invece, per i conglomerati bituminosi che sono tipicamente ristrutturati/ricostruiti pesantemente durante le fasi di manutenzione della vita di una strada.

Table 1. Life cycle stages in an LCA according to the European Committee for standardization [7].

Product	Construction process	Use	End of life	Benefits and loads beyond the system boundary
A1: Raw material supply	A4: Transport	B1: Use	C1: De-construction/demolition	D: Reuse-Recovery-Recycling-potential
A2: Transport	A5: Construction-installation process	B2: Maintenance	C2: Transport	
A3: Manufacturing		B3: Repair	C3: Waste processing	
		B4: Replacement	C4: Disposal	
		B5: Refurbishment		
		B6: Operational energy use		
		B7: Operational water use		

Tabella 1-8, Fasi del ciclo di vita secondo lo standard EU.

Anche in questo caso, a seconda della natura dell'unità funzionale, vengono definiti i flussi di energia e di materia, i processi fondamentali e le produzioni di inquinamento, emissioni e rifiuti. Scegliendo una unità funzionale adeguata, possono essere effettuate delle analisi di sensibilità al variare di configurazioni di attrezzature, trasporto, flussi di energia, raccolta dei rifiuti e alternative di trattamento, e altro ancora. Una rappresentazione dell'impatto a punteggio singolo consentirà di mettere a confronto le diverse prestazioni risultanti e il relativo processo decisionale di supporto.

In altre parole, questa prima modalità di analisi mira ad affinare gli aspetti di sostenibilità di una specifica tecnologia, concentrandosi sui flussi di consumo, trasporto, energia e rifiuti attraverso lo sfruttamento degli output di impatto a punteggio singolo.

1.6.8 Confrontare performance di processi alternativi

Abbiamo visto che con una analisi a livello di network o di progetto, la sfida nella definizione dell'inventario dei dati, che è una parte essenziale della metodologia LCA, è relativa ad attività che si materializzeranno chiaramente soltanto in un tempo successivo. Di conseguenza, è necessario formulare diverse ipotesi sulla futura gestione dell'infrastruttura e sulle operazioni di esercizio. D'altra parte, nelle prime fasi di progettazione, anche la fase di costruzione è situata

nel futuro ed è associata a notevoli incertezze (in termini di modalità effettive con cui verrà affrontata). Saxe et al. (2020) introducono due categorie per codificare tali variabilità nei dati: (1) la dipendenza dalle realtà spaziotemporali alla base della costruzione fisica, guidate dalla geografia, come le condizioni fisiche e logistiche della realizzazione e la disponibilità dei materiali, e (2) la natura prototipica dei progetti infrastrutturali. In particolare, quest'ultimo aspetto pone l'accento sul fatto che i progetti infrastrutturali sono unici e raramente ripetuti e, per questo motivo, un progetto di costruzione è solo vagamente predittivo di altri progetti. I principali tipi di incertezza che emergono sono l'incertezza parametrica e la variabilità spaziale e temporale. Considerando che per i grandi progetti infrastrutturali l'incertezza influisce "per definizione" sull'LCA a livello di rete e di progetto, è a livello di processo che si può fare di più per migliorare la conoscenza specifica di sito dei dati materiali e tecnologici. Quindi, il secondo obiettivo di un'analisi LCA incentrata sul processo è quello di approfondire la conoscenza e aumentare l'efficacia delle decisioni di approvvigionamento e progettazione di dettaglio relative a quei materiali (o processi che coinvolgono materiali) che possono rappresentare degli hot-spot per la loro capacità di impatto.

Possono essere effettuate delle analisi di sensibilità incentrate sul processo per confrontare le performance ecologiche di diversi materiali (a partire dalle loro specifiche dichiarazioni ambientali di prodotto) e modellando il processo con dati relativi ad attrezzature e logistica specifiche del sito. Ciò non può essere fatto a livello di "intero progetto", ma diventa possibile quando la durata e i confini dell'unità funzionale sono ristretti al contesto del processo di costruzione. È quindi possibile confrontare materiali simili con diverse prestazioni di sostenibilità delle loro catene di approvvigionamento e creare relazioni tra LCA e modelli di Life Cycle Costing (LCCA) per supportare delle decisioni strategiche sulle modalità di approvvigionamento. Allo stesso modo, è possibile confrontare diversi processi tecnologici che forniscono lo stesso risultato costruttivo ma coinvolgono materiali diversi. Ancora una volta, la combinazione di LCA e LCCA consente di prendere decisioni più informate.

1.7 LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA) NELLE FASI PRELIMINARI DI PROGETTAZIONE: VANTAGGI E LIMITAZIONI

L'applicazione della LCA nelle fasi preliminari di progettazione può supportare il progettista nella scelta delle alternative progettuali e nel dimensionamento dei componenti dell'infrastruttura, fornendo informazioni oggettive di natura energetico ambientale al fine di supportare le successive fasi di progettazione esecutiva e realizzazione. In particolare, consente di imputare ad elementi e componenti che caratterizzano l'infrastruttura i corrispondenti impatti ambientali di ciclo di vita, fornendo un prezioso contributo al processo decisionale.

È importante, infatti, sottolineare che le decisioni prese durante queste prime fasi possono determinare in modo sostanziale l'impatto ambientale dell'infrastruttura.

L'adozione dei metodi LCA nel corso delle fasi preliminari di progettazione può incontrare una serie di limitazioni e difficoltà dovute essenzialmente al fatto che essa richiede informazioni dettagliate sulle scelte costruttive e materiche che tendono a essere definite in fase esecutiva.

Le criticità riscontrabili sono riassunte di seguito:

- La disponibilità di dati nelle fasi preliminari di progettazione è limitata ed è necessario fare delle stime o delle assunzioni (ad esempio la distanza di trasporto, il consumo specifico di materiale, l'efficienza dei processi, l'origine delle materie prime, emissioni specifiche);
- Mancanza di dati specifici sul ciclo di vita dell'infrastruttura: potrebbe essere difficile reperire dati completi sull'intero ciclo di vita dell'infrastruttura e dei suoi componenti. La mancanza di informazioni dettagliate su aspetti come l'estrazione delle materie prime, la produzione dei materiali, la distribuzione, l'utilizzo e lo smaltimento, può portare a una valutazione parziale degli impatti ambientali e a una possibile sottovalutazione di determinati aspetti rilevanti;
- L'analisi LCA, se si decide di definire un'unità funzionale, può risultare complessa e richiedere dati relativi al modello di esercizio dell'infrastruttura (ad esempio numero passeggeri ora per il servizio ferroviario) che potrebbero non essere disponibili o stabiliti definitivamente.

Affinché la LCA sia un efficace strumento decisionale per il settore delle infrastrutture i progettisti devono quindi essere in grado di meglio comprendere quali decisioni sulle scelte progettuali e sui materiali determinano in modo più significativo l'impatto ambientale di una costruzione e quali decisioni sono meno rilevanti. Questa conoscenza può essere parte di un processo integrato di feedback sull'impatto ambientale, con i progettisti che si concentrano sulle decisioni di grande impatto durante le prime fasi di progettazione e rinviando le decisioni con impatto meno rilevante alle fasi di progettazione successive.

In quest'ottica, è necessario individuare quei parametri che in questa fase devono essere considerati al fine di migliorare le prestazioni ambientali. Alcuni aspetti progettuali, come ad esempio l'uso del suolo e la geometria e morfologia dell'infrastruttura, sono di fondamentale importanza nelle valutazioni preliminari di sostenibilità, mentre altri aspetti, come ad esempio l'impatto di materiali da costruzione specifici, sono influenzati principalmente dalle decisioni prese in fase di progettazione esecutiva e sono quindi di minore rilevanza.

Per la fase preliminare di progettazione, è fondamentale dunque proporre un approccio comune e condiviso che permetta di definire le modalità di applicazione della valutazione LCA e quali livelli di semplificazione ritenere accettabili, sia dal punto di vista della quantità e qualità delle informazioni

considerate (definizione delle quantità di materiali, del tipo di materiali, dei consumi di energia) e sia dal punto di vista della qualità dei dati ambientali (secondari da banca dati o primari da EPD). In ottica di LCA nelle fasi preliminari di progettazione, è stato avviato un progetto LICCER (“Life Cycle Considerations in EIA of Road Infrastructure”), all’interno del programma ERA-NET ROAD, finanziato congiuntamente da Germania, Danimarca, Irlanda, Paesi Bassi, Norvegia, Svezia e Regno Unito, con l’obiettivo di sviluppare un modello di valutazione LCA da utilizzare nelle prime fasi del processo di pianificazione delle infrastrutture, in particolare per scelte come la localizzazione e il percorso di una infrastruttura. Il modello si concentra sulle categorie di impatto relative all’uso dell’energia e al contributo ai cambiamenti climatici.

Il modello LICCER quantifica autonomamente il consumo di materiale, carburante ed elettricità in tutte le fasi del ciclo di vita in base a dati di input dell’utente (caratteristiche geometriche dell’infrastruttura, dati relativi al traffico e periodo di analisi) e a una serie di dati predefiniti inclusi nel modello (come, ad esempio, distanza di trasporto dei materiali da costruzione e il consumo di carburante per il traffico). Le categorie di impatto ambientale incluse nel modello sono la domanda cumulativa di energia (Mj/anno) e le emissioni di carbonio (kg di CO₂eq/anno) [2012 – *“Overview of road infrastructure planning process and the use of Environmental Assessments in the Netherlands and Sweden”* Authors: Ingeborg Kluts and Sofiia Miliutenko].

Uno studio applicato ad un progetto svedese di ricostruzione stradale ha dimostrato come il modello LICCER, progettato per confrontare l’impatto climatico del ciclo di vita e l’uso di energia di una infrastruttura stradale, soddisfi i requisiti di una analisi LCA relativi alla disponibilità dei dati e all’utilità per le fasi di progettazione preliminare. Tuttavia, il modello potrebbe essere migliorato includendo ulteriori dati predefiniti specifici per nazione e scenari di traffico più dettagliati a seconda delle caratteristiche geometriche dell’infrastruttura [2020 – *“Life cycle assessment as decision-support in choice of road corridor: case study and stakeholder perspectives”* Authors: Carolina Liljenstrom, Sofiia Miliutenko, Reyn O’Born, Helge Brattebø, Harpa Birgisdottir, Susanna Toller, Kristina Lundberg, and Josè Potting].

Lo stesso caso studio svedese precedentemente menzionato è stato utilizzato per dimostrare un approccio basato sul GIS per l’utilizzo di dati geologici spaziali in tre dimensioni (lunghezza, larghezza e profondità) per migliorare le stime sui lavori in terra durante le prime fasi di pianificazione delle infrastrutture stradali. Lo studio, effettuato attraverso diverse analisi comparative, ha evidenziato come maggiori informazioni sull’altezza del terrapieno e sullo spessore effettivo del suolo migliorerebbero ulteriormente il modello. Pertanto, fornendo una migliore qualità dei dati, il GIS in combinazione con la LCA può consentire una pianificazione preliminare di un’infrastruttura più sostenibile [2017 – *“Life cycle assessment in road infrastructure planning using spatial geological data”* Authors: Caroline Sharmilee Josefina Karlsson, Sofiia Miliutenko, Anna Björklund, Ulla Mörtberg, Bo Olofsson, Susanna Toller].

Sulla base delle considerazioni sopra esposte, un modello LCA da utilizzare in fase preliminare dovrebbe soddisfare i seguenti requisiti:

- Semplicità e facilità d'uso: prevedere una quantità limitata di dati di input e fornire risultati chiari e coerenti con il contesto e con la specifica fase decisionale;
- Dati di input semplificati: permettere l'utilizzo di dati semplificati e stime approssimative per compensare la mancanza di dati dettagliati e consentire l'utilizzo di valori di riferimento o dati di settore quando non sono disponibili informazioni specifiche;
- Sarebbe più opportuno e vantaggioso dal punto di vista pratico definire un'unità dichiarata, che, rispetto alla definizione di un'unità funzionale, richiede meno dati specifici e consente un confronto generale tra le alternative di progetto;
- È essenziale, in questa fase, focalizzare maggiormente l'attenzione su di un set limitato di categorie di impatto e, più nello specifico, sulle categorie relative alla componente di carbonio, al consumo operativo di energia, all'uso delle risorse naturali e alla produzione di rifiuti. Queste categorie devono essere considerate come punti di riferimento fondamentali per gli step successivi di progettazione, poiché hanno un impatto significativo sulla sostenibilità ambientale dell'infrastruttura;
- Deve consentire l'analisi di sensibilità e la valutazione di diversi scenari per comprendere l'incertezza e l'effetto delle variazioni dei dati di input. Deve permettere di esplorare diversi scenari di progettazione (anche a livello di singoli tipologici di progettazione) e valutare il loro impatto sugli indicatori LCA;
- Deve essere progettato in modo tale da poter essere aggiornato e migliorato man mano che si dispongono di dati più precisi e specifici durante lo sviluppo del progetto. Deve essere un punto di partenza che possa essere affinato e integrato con dati più accurati nelle fasi successive del processo di progettazione.

Sebbene sia imprescindibile, nella fase preliminare di progettazione, porre particolare enfasi sul contributo degli impatti ambientali, sarebbe opportuno valutare, in modo completo ed integrato, attraverso l'inclusione di indicatori o metriche specifiche, anche i contributi derivanti dagli impatti sociali ed economici, consentendo una valutazione completa e integrata dell'infrastruttura in termini di sostenibilità complessiva.

In sintesi, quindi, anticipare l'analisi LCA nella progettazione di un'infrastruttura può portare benefici significativi, come l'identificazione tempestiva di opportunità di miglioramento ambientale, l'integrazione di pratiche sostenibili nel design, la scelta delle soluzioni più efficienti e

una comunicazione efficace dei vantaggi ambientali. Questo approccio favorisce una pianificazione sostenibile, riduce i costi e migliora la trasparenza nel processo decisionale.

1.8 LIFE CYCLE ASSESSMENT E GREEN PROCUREMENT

1.8.1 La revisione in corso della Construction Products Regulation della Unione Europea

Il regolamento attuale sui prodotti da costruzione (regolamento (UE) n. 305/2011, Construction Products Regulation, CPR) si applica integralmente dal 1° luglio 2013. Il suo obiettivo è garantire il corretto funzionamento del mercato interno dei prodotti da costruzione, grazie a norme armonizzate che ne regolano la commercializzazione nell'Unione Europea. Il CPR, che definisce una tassonomia tecnica comune per valutare le prestazioni dei prodotti da costruzione, consente agli Stati membri di definire i requisiti normativi per la regolamentazione dei lavori di costruzione. Il 30 marzo 2022 la Commissione ha presentato una proposta di revisione del CPR; la proposta fa parte di un pacchetto con diverse altre proposte settoriali volte a rendere i prodotti sostenibili la norma nell'UE e a promuovere modelli di business circolari. Gli obiettivi dichiarati della proposta sono quelli di migliorare il funzionamento del mercato interno dei prodotti da costruzione, affrontare le sfide di trasformazione della filiera (ancora in corso) a livello nazionale, semplificare il quadro giuridico e sostenere la transizione verde e la digitalizzazione nel settore. Il regolamento si prevede entrerà in vigore tra il 2023 e il 2024.

Una componente innovativa ed essenziale del nuovo modello regolatorio è quella relativa ai requisiti di adempimento ambientale per i produttori. Nel nuovo modello normativo proposto, essi avrebbero l'obbligo di valutare le caratteristiche ambientali (ad esempio, gli effetti dei cambiamenti climatici) dei prodotti da costruzione, in linea con le specifiche tecniche armonizzate o con gli atti delegati adottati dalla Commissione ai sensi del regolamento. Dovrebbero, in sostanza:

- progettare e fabbricare i prodotti e il loro imballaggio in modo tale che la loro sostenibilità ambientale complessiva, compresa quella emissiva ai fini di contenimento dell'effetto serra, raggiunga il livello più avanzato;
- dare la preferenza ai materiali riciclabili e ai materiali ottenuti dal riciclaggio;
- rispettare gli obblighi di contenuto minimo di materiale riciclato e altri valori limite relativi agli aspetti ambientali, inclusa la sostenibilità climatica, contenuti nelle specifiche tecniche armonizzate;
- progettare i prodotti in modo tale che possano essere facilmente riparati, rinnovati e aggiornati;
- mettere a disposizione istruzioni per l'uso e informazioni su come rigenerare o riciclare i prodotti e qualsiasi informazione aggiuntiva necessaria per il riutilizzo, la rigenerazione o il riciclaggio.

La Commissione avrebbe il potere di specificare tali obblighi mediante atti delegati per particolari famiglie e categorie di prodotti. In alternativa, la Commissione potrebbe emettere richieste di normazione per l'elaborazione di regolamenti armonizzati che forniscano la presunzione di conformità a tali obblighi per una specifica famiglia o categoria di prodotti. Tali obblighi non si applicherebbero prima dell'entrata in vigore di tale atto delegato o norma armonizzata. Considerato che la norma finale potrà subire delle modifiche, è comunque evidente l'intento di introdurre una metrica della sostenibilità nel sistema di produttivo (in stabilimento e in cantiere) del mondo delle costruzioni.

1.8.2 Investire nella sostenibilità

La modalità con cui l'Unione Europea, ma anche i mercati d'Oltreoceano, guardano alla trasformazione della filiera delle costruzioni si fonda sullo strumento delle dichiarazioni ambientali di prodotto, attraverso le quali (con maggiore o minore determinazione, secondo la tipologia di norma vigente e l'approccio culturale e legale del Paese emittente) si intende fornire una valutazione condivisa della sostenibilità (in particolare dei pilastri ambientale e sociale). Si tratta di un approccio che ha avuto successo nel mondo dell'edilizia dove la gamma dei prodotti è più variegata e dove i prodotti 'di fabbrica' hanno una incidenza maggiore. Certamente, il mondo delle infrastrutture ha un grado di complessità in più: i prodotti più rilevanti dal punto di vista dell'impatto, subiscono ancora molte e ulteriori lavorazioni in sito che ne modificano significativamente la performance ambientale, introducendo degli elementi di variabilità che differiscono da sito a sito e da una tipologia di opera all'altra.

È per questo che la LCA può permettere una integrazione 'trasparente' delle EPD (e dell'environmental labelling, in generale), rendendole delle vere e proprie EPD (o environmental label) di progetto mediante una valutazione integrata di processo aggiuntiva e calibrata sul sito.

Ma cosa succede una volta che la misura della performance ambientale è stata fatta? Cosa ce ne facciamo della quantificazione dei GHG emessi o della valutazione delle sostanze/incidenze emesse per le altre categorie di impatto? Una volta che abbiamo dimostrato la migliore performance di una particolare soluzione costruttiva (e dei relativi investimenti in termini di ricerca e innovazione), come possiamo vederla riconosciuta? Come traduciamo queste informazioni in elementi che possono supportare la decisione di un ufficio acquisti o di un cliente?

1.8.2.1 Prima proposta

Nelle pagine precedenti è stata illustrata una possibile applicazione incrociata dei protocolli di sostenibilità e della LCA. La stazione appaltante può richiedere una valutazione di sostenibilità di questo genere (indicatori di sostenibilità combinati con analisi LCA di supporto) sui processi critici dell'infrastruttura da realizzare, definire una scala di valutazione conseguente

e confrontare le proposte degli appaltatori fra loro o rispetto ad una baseline. In questo modo potrebbero essere premiate produzioni o soluzioni tecniche che riducono gli impatti, oppure metodologie di 'posa e messa in opera' che, facendo leva sulla localizzazione, ottimizzano le performance ambientali.

1.8.2.2 Seconda proposta

Considerando più in dettaglio un'esperienza dell'Ente Stradale Norvegese (e facente parte di una strategia sviluppata con l'ente EPD-Norway che regola la certificazione degli EPD di prodotto e di processo in Norvegia), è possibile fare un ulteriore passo avanti. In questo caso, il committente stima una baseline di riferimento (rispetto ad una ipotesi di vita utile e di durata dei diversi cicli, di costruzione e manutenzione) del contenuto emissivo della pavimentazione stradale oggetto della gara attraverso una analisi LCA/EPD di processo. Agli appaltatori viene richiesto, in fase di gara, di migliorare la prestazione di questa baseline, dimostrando le efficienze ottenute con il proprio processo proposto attraverso un calcolo di LCA dedicato.

Per ogni kg di CO₂eq ottenuto in riduzione rispetto alla baseline, la stazione appaltante deduce dal prezzo finale offerto 0.5€/kg di CO₂eq (circa pari al valore attuale della carbon tax media su territorio europeo e americano); naturalmente, 'ricarica' il prezzo offerto per ogni kg di CO₂eq emessa in più rispetto alla baseline. La valutazione rispetto alla baseline è comprensiva di ipotesi specifiche rispetto a tutte le fasi del ciclo di vita e rispetto alla performance funzionale, in modo che una offerta al 'ribasso' su una specifica fase venga valutata nell'ottica della durata complessiva della vita utile e della sua effettiva rispondenza alle esigenze 'core' dell'infrastruttura. Offerenti tecnicamente più 'sostenibili' vedono il loro prezzo offerto equivalente diminuire e possono aggiudicarsi la gara 'per merito ambientale' ricondotto ad una valutazione economica equivalente.

Questa proposta ha il pregio di ingaggiare sia il committente sia il fornitore in una dimostrazione quantitativa delle richieste, da un lato, e delle offerte, dall'altro. Il tutto con termini di riferimento coerenti con i requisiti di progetto, misurabili, calcolabili e riproducibili in cantiere.

1.8.2.3 LCA e finanza green

Il punto di riferimento per la misura o il calcolo, vista la fase attuale di consapevolezza in merito ai temi della sostenibilità, deve essere chiaro e univoco. Ad esempio, la focalizzazione sui GHG (prevalentemente CO₂, CH₄, NO_x) rappresenta un primo passo utile, anche solo per il motivo che esiste un trading attorno a queste emissioni e che cominciano a definirsi dei valori economici di riferimento per la stima del loro impatto socio ambientale (sono considerazioni

che stanno alla base della valorizzazione delle carbon tax dei paesi che le hanno applicate). Il settore delle costruzioni, ed in particolare i produttori dei materiali più significativi dal punto di vista della loro rilevanza quantitativa e di impatto in stabilimento o in cantiere, possono trovare nell’LCA di processo lo strumento ideale per dialogare su base trasparente e quantitativa con i loro clienti. Allo stesso modo, i committenti possono stimolare la filiera green, e rendere le loro opere più facilmente finanziabili da finanza ‘verde’ con lo stesso strumento dell’LCA.

1.9 PROCESSI DIGITALI A SUPPORTO DI ANALISI LCA

1.9.1 Introduzione di BIM e digitalizzazione per la sostenibilità

Come già discusso ampiamente nei paragrafi precedenti di questo position paper, il mondo delle costruzioni, ed in particolare le infrastrutture, possono svolgere un ruolo significativo nel sostenere la sostenibilità ambientale. I mezzi per arrivare a questo obiettivo sono molteplici, ed un ruolo fondamentale è svolto da metodi e processi digitali. In particolare, le integrazioni tecnologiche digitali possono essere considerate un elemento chiave per affrontare alcune delle sfide principali che il settore si trova a dover fronteggiare.

La metodologia BIM si annovera tra le metodologie moderne di gestione degli asset infrastrutturali, in linea con le indicazioni della ISO 55000:2014. In effetti, con riferimento al rapporto analitico dell’Osservatorio europeo sul settore delle costruzioni (aprile 2021), è evidente l’importanza dell’analisi e delle informazioni digitali attraverso l’implementazione del Building Information Modelling (BIM).

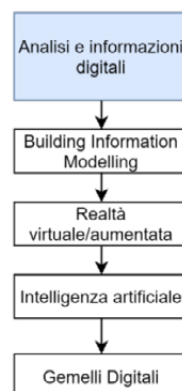


Figura 1-14, ECSO Report analitico aprile 2021 - Stato della digitalizzazione nel settore delle costruzioni

L'approccio alla metodologia BIM consente un'efficace gestione dei dati digitali ed una completa organizzazione delle informazioni (si veda la serie UNI EN ISO 19650), per tutte le opere di ingegneria civile, ma diventa indispensabile per opere infrastrutturali dove i dati, o più in generale le informazioni, sono molteplici e molto complesse.

A correlare processi e metodi digitali con gli aspetti inerenti alla sostenibilità ambientale intervengono numerosi riferimenti normativi cogenti o volontari, come ad esempio le diverse sezioni del recente D.M. 23 giugno 2022 (Criteri Ambientali Minimi) che riportano le valutazioni di LCA come strumento fondamentale per il raggiungimento dei requisiti green sia per consentire una efficace rappresentazione in termini di risultati (ad esempio la valutazione di anidride carbonica equivalente e altri impatti ambientali in accordo alla ISO 21929-1:2011) e sia la predisposizione del metodo al 'dialogo' con altri strumenti e processi digitali.

1.9.2 Metodologia BIM e Life Cycle Assessment

Le valutazioni di ciclo di vita possono attualmente beneficiare di integrazioni digitali sempre più performanti che derivano da esigenze quali individuazione di criteri quantificabili derivanti dai più diffusi rating system di sostenibilità a livello internazionale, interoperabilità del flusso informativo tra differenti soluzioni software. In aggiunta vanno ormai sempre più diffondendosi i formati aperti, l'aggregazione multidisciplinare degli stessi modelli informativi BIM e la validazione dei dati e dei requisiti informativi e correlazione di informazioni quantitative con risorse contenute in database materici. Sono numerosi gli strumenti che consentono l'integrazione della metodologia BIM dalla fase preliminare a quella realizzativa, e che accrescono il contributo informativo alfanumerico con dati ambientali sia primari (provenienti da misurazioni o rilevamenti diretti), sia secondari (presenti in letteratura o in database).

Un primo approccio digitale consiste nel dialogo diretto con i software di BIM authoring che consentono il trasferimento di informazioni quantitative dei componenti del modello virtualizzati e di informazioni generiche dell'infrastruttura considerata quali la geolocalizzazione, l'estensione, la vita utile prevista, la destinazione d'uso, ecc... Il dialogo tra diverse soluzioni software avviene attraverso formati aperti quali l'IFC (Industry Foundation Classes secondo UNI EN ISO 16739:2020) che appaiono maggiormente performanti a garanzia della aggregazione multidisciplinare dei modelli informativi BIM, dell'interoperabilità dei flussi informativi di dati e della possibilità di effettuare controlli e verifiche automatizzabili per la gestione di differenti livelli di complessità dei calcoli e valutazioni di scenari comparativi efficientati (affinamento progettuale e confronto con baseline). Il recupero immediato dei dati relativi a quantità, materiali e in generale proprietà tecnico-prestazionali costituisce una semplificazione notevole della fase di input propedeutica a calcoli di tipo LCA.

L'ottenimento di tali informazioni a partire dagli attributi degli oggetti BIM facilita le operazioni di alimentazione del Life Cycle Inventory.

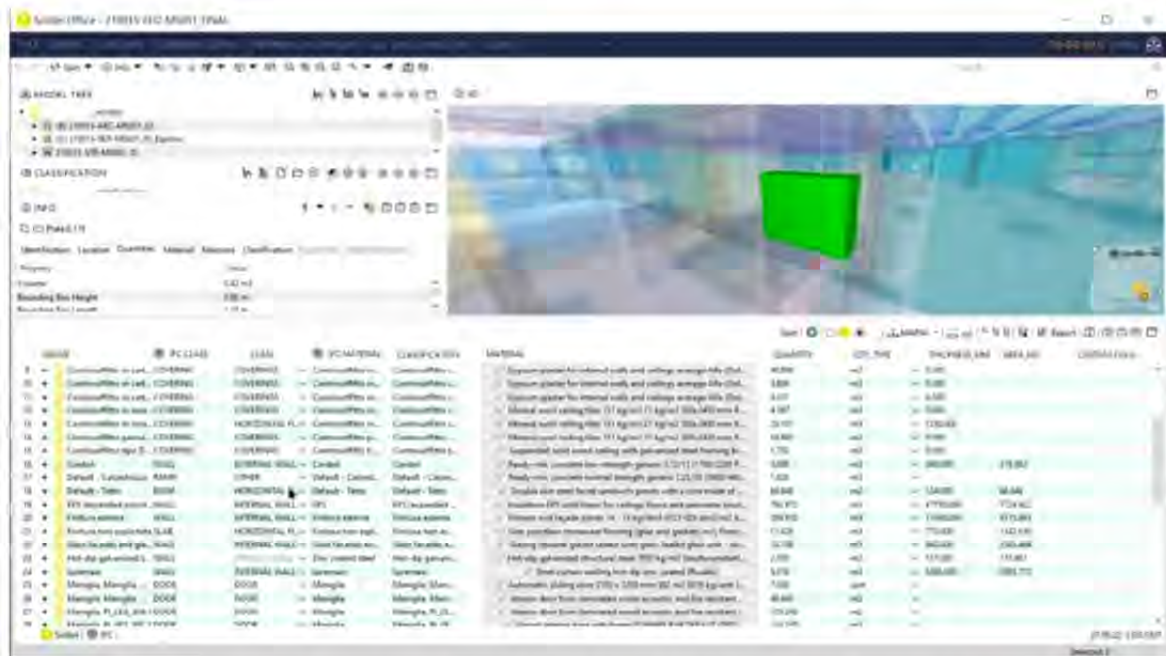


Figura 1-15, Esempio di Information Take-Off da modelli informativi aggregati propedeutico a valutazioni LCA (Progetto 7DeGreen)

L'adozione di metodi e processi BIM, consente di predisporre operazioni di controllo e verifica dei dati mediante quanto previsto dai livelli di coordinamento e verifica dei modelli informativi in accordo alla UNI 11337-5:2017.

I dati nello specifico possono essere strutturati mediante report tabellari, al fine di individuarne il raggiungimento del livello di fabbisogno informativo o la presenza di attributi necessari alla costituzione dei dati di input per i calcoli degli impatti ambientali lungo l'intero ciclo di vita. In generale, inoltre, gli oggetti BIM possono essere correlati a risorse materiche sia generiche che specifiche del comparto manifatturiero, e presenti all'interno di database di prodotti e/o materiali, oppure associati a Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (Environmental Product Declaration - EPD) che certificano digitalmente le categorie di impatto ambientale dei componenti edili in fasi prestabilite della loro Life Cycle Assessment.

Parte di questi possibili scenari digitali sarà oggetto di approfondimenti nel paragrafo successivo con particolare attenzione alle modalità digitali di riproduzione delle certificazioni ambientali di tipo III e alla loro fruizione nell'ambito dei processi BIM-oriented.

Occorre altresì denotare alcuni evidenti vantaggi derivanti dalla corretta applicazione di processi digitali nell'ambito di valutazioni di ciclo di vita per asset infrastrutturali:

- la possibilità di incrementare il contributo informativo dei modelli BIM;
- l'integrazione di dati primari e/o secondari di sostenibilità ambientale relativi a prodotti e materiali realmente utilizzati;
- la possibilità di correlare misurazioni in tempo reale;
- la generazione di report riepilogativi dei dati di input per Life Cycle Inventory;
- il raggiungimento di livelli di approfondimento informativo maggiori con possibilità di evidenziare scenari comparativi e valutare affinamenti progettuali;
- la possibilità di evidenziare graficamente gli oggetti in base a criteri di filtro sia tecnico-prestazionali che di sostenibilità.

1.9.3 Digitalizzazione delle Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (Environmental Product Declaration)

1.9.3.1 Eco Platform e Eco Portal

Il recente panorama normativo sia cogente che tecnico-volontario premia l'adozione di materiali o prodotti certificati su cui vengono effettuate valutazioni degli impatti ambientali durante il loro ciclo di vita in accordo al set di regole descritto all'interno dello standard UNI EN 15804:2021 che si correla direttamente, riportando i requisiti su territorio europeo, con la UNI ISO 14025. Con questa premessa già da diversi anni, sin da quando si è sentita l'esigenza di valutare gli impatti ambientali di un edificio, di un'infrastruttura o di un'opera in genere, si è lavorato per venire incontro alle esigenze del mercato al fine di fornire ai progettisti non solo le caratteristiche fisico-meccaniche dei prodotti, ma anche quelle ambientali. La metodologia BIM è particolarmente utile per rendere possibile un trasferimento delle informazioni facilmente fruibile, immediato e tenuto sotto controllo in tempo reale.

I risultati di una analisi LCA devono poter essere immediatamente disponibili in un formato "machine readable" in modo da poter essere letti istantaneamente dai software LCA e il formato "pdf" non si presta a questo fine. Con questo scopo, l'Associazione internazionale InData Network ha sviluppato il formato cosiddetto 'ILCD+EPD' che integra le informazioni richieste dalla Comunità Europea relativamente all'analisi LCA e quelle fornite da una Dichiarazione Ambientale di Prodotto EPD. Sulla base di tali informazioni ciascun Program Operator digitalizza, mediante software dedicati, le informazioni ambientali contenute in una EPD specifica di prodotto.

In Italia le EPD sono rese disponibili dal Program Operator EPDIItaly, membro dell'Organizzazione internazionale ECO Platform che convoglia all'interno del proprio portale (ECO Portal)

un ricco dataset di Dichiarazioni Ambientali provenienti da diversi Paesi e rese disponibili in formato digitale.

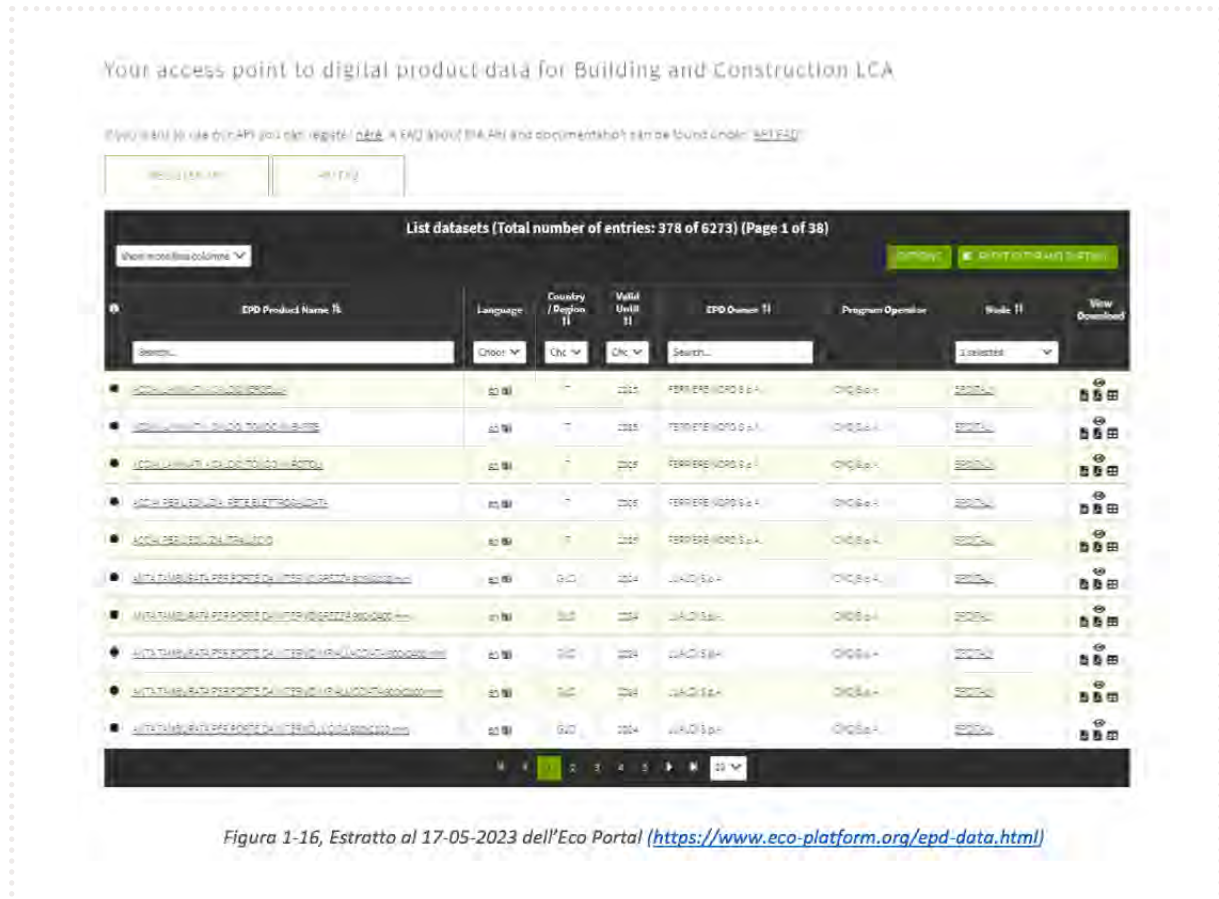


Figura 1-16, Estratto al 17-05-2023 dell'Eco Portal (<https://www.eco-platform.org/epd-data.html>)

1.9.3.2 Il Formato ILCD+EPD

La caratteristica delle informazioni ILCD+EPD è quella di permetterne l'esportazione in un formato "xml" o "csv" contenenti una serie di dati (più di cento) che sono immediatamente disponibili ai progettisti.

In particolare, vengono evidenziati:

- il nome dell'organizzazione;
- chi ha eseguito lo studio LCA;
- le caratteristiche del prodotto;
- il ciclo di vita studiato;
- gli impatti ambientali del prodotto;
- alcune informazioni ambientali aggiuntive, ad esempio il contenuto di riciclato.

Quest'ultimo elemento è particolarmente importante da mettere in evidenza grazie e soprattutto al lavoro di sensibilizzazione che da diversi anni gli Enti competenti Italiani stanno portando avanti. In particolare, il Decreto sui criteri ambientali minimi relativo all'affidamento di servizi di progettazione e affidamento di lavori per interventi edilizi (approvato con DM 23 giugno 2022 n. 256, G.U. n. 183 del 6 agosto 2022 - in vigore dal 4 dicembre 2022), ha come principale requisito per i prodotti da costruzione la dimostrazione di valori specifici di contenuti di riciclato, certificati da Organismo di Terza parte indipendente accreditato (ad esempio, mediante l'utilizzo di una EPD).

I valori degli impatti ambientali, compreso il valore del contenuto di riciclato, sono digitalizzati da EPDIItaly in maniera gratuita e sono visibili sia sul sito internet del Program Operator sia su quello di Eco Platform (all'interno dell'Eco Portal). L'Eco Portal consente di connettere istantaneamente i database dei principali Program Operator Europei e i principali database nazionali. L'Eco Portal è collegato alla pagina web del Program Operator che ha perfezionato la digitalizzazione. Di conseguenza, la visibilità per i produttori e per i loro prodotti digitalizzati è internazionale. Al momento su Eco Portal vi sono più di 6.000 prodotti digitalizzati dei quali ben 378 provengono dal database italiano di EPDIItaly.

1.9.3.3 Modelli di dati per l'uso delle Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD) in accordo alla UNI EN ISO 22057:2022

Il connubio tra dati ambientali e caratteristiche fisico-meccaniche dei prodotti è perfettamente integrato nella metodologia BIM e quindi il modello BIM viene a costituire una fonte di contributi informativi tecnico- prestazionali, economici e ambientali, che possono essere alimentati ed integrati nel tempo, nel rispetto dei riferimenti normativi esistenti e relativi alla integrazione digitale con **Dizionari di Dati** (a mezzo di **Schede Digitali**) per materiali o prodotti da costruzione. Nel corso del 2020 sono stati pubblicati i primi importanti riferimenti normativi in tema di digitalizzazione della filiera delle costruzioni, a cura del CEN Technical Committee 442 (Building Information Modelling):

UNI EN ISO 23386:2020 "Building information modelling e altri processi digitali utilizzati nelle costruzioni - Metodologia per descrivere, creare e mantenere proprietà nei dizionari di dati interconnessi" incentrata su logiche e requisiti per la creazione di Data Dictionaries tra loro correlati e su conseguenti procedure specifiche di Data Governance.

UNI EN ISO 23387:2020 "Building information modelling (BIM) - Modelli di dati per oggetti da costruzione utilizzati nel ciclo di vita dei beni edilizi - Concetti e principi" che ha fornito lo schema informatico di riferimento per la creazione di contenuti digitali relativi agli oggetti da costruzioni, intesi principalmente come prodotti, materiali o entità virtuali tipicamente riconducibili ai software di BIM authoring (zone, spazi, livelli...).

I dizionari, intesi nel modo appena descritto, puntano a diventare la base dati digitale per il settore delle costruzioni, che mette a disposizione un repository centralizzato di informazioni contestualizzabile a livello di singola Organizzazione, ma anche estendibile a livello nazionale e/o internazionale con la possibilità di riportare, mediante formati digitali machine-readable, le caratteristiche (tecnico-prestazionali, economiche, energetiche, ambientali...) di qualsiasi materiale/componente/prodotto in accordo al Regolamento Europeo per i Prodotti da Costruzione (Regolamenti UE 305/2011) e tutti i relativi standard armonizzati.

Le schede digitali, i cosiddetti Data Template, sono una strutturazione di dati che descrive le caratteristiche (proprietà) dei componenti edilizi digitalizzati, in accordo a fonti consistenti di dati quali appunto gli standard di normazione tecnica riconosciuti a livello internazionale. Essi costituiscono il tramite tra il comparto manifatturiero e gli stakeholder delle costruzioni e della progettazione, rendendo possibile:

- la digitalizzazione dei cataloghi di materiali e prodotti;
- l'integrazione di dati reali all'interno degli Asset Information Model;
- impostazione e rispondenza a requisiti informativi dell'Ente Appaltante in accordo al concetto di Livello di fabbisogno informativo;
- la gestione dei dati ambientali propedeutici a valutazioni di sostenibilità quali la Life Cycle Assessment.

Quest'ultimo è alla base di numerosi flussi informativi interoperabili e costituisce il tramite verso l'adozione in forma digitale delle EPD. È stato, infine, recentemente pubblicato anche lo standard **UNI EN ISO 22057:2022** "Modelli di dati per l'uso delle dichiarazioni ambientali di prodotto (EPD) per i prodotti da costruzione nel Building Information Modelling (BIM)" che si prefigge di adottare la struttura dati delle schede digitali per riprodurre le informazioni contenute nelle EPD in linguaggio interpretabile dalle macchine e correlabile a strumenti di modellazione informativa o condivisione dei dati. Questo standard riepiloga efficientemente proprietà e gruppi di proprietà con le quali riprodurre digitalmente le informazioni contenute nelle EPD in base alle fasi del ciclo di vita considerate, le relazioni o le dipendenze tra caratteristiche differenti, la tipologia di dato richiesto, l'obbligatorietà dello stesso e le unità di misura per la quantificazione.

La norma UNI EN ISO 22057:2022 propone inoltre la correlazione dei dati strutturati in Data Template al formato **ILCD+EPD (International Life Cycle Data system)**, precedentemente descritto.

1.10 BIBLIOGRAFIA

- [1] Adham, Khairul, and Chamhuri Siwar. 2012. "Empirical Investigation of Government Green Procurement (GGP) Practices in Malaysia." <https://papers.ssrn.com/abstract=2073517>. Baumann, H. and Tillman, A-M., 2004. *The Hitch Hiker's Guide to LCA. An orientation in life cycle assessment methodology and application.* Lund, Sweden: Studentlitteratur.
- [2] Bonviu, Florin. 2014. "The European Economy: From a Linear to a Circular Economy." *Romanian J. Eur. Aff.* 14: 78. https://heinonline.org/hol-cgi-bin/get_pdf.cgi?handle=hein.journals/rojaeuf14§ion=31.
- [3] Barbera, Filippo, Nicola Negri, and Angelo Salento. 2018. "From Individual Choice to Collective Voice. Foundational Economy, Local Commons and Citizenship." *Rassegna Italiana Di Sociologia* 59 (2): 371–98. <https://www.rivisteweb.it/doi/10.1423/90584>.
- [4] Bizjak, Karmen Fifer, Friderik Knez, Stanislav Lenart, and Katja Slanc. 2017. "Life-Cycle Assessment and Repair of the Railway Transition Zones of an Existing Bridge Using Geocomposite Materials." *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance* 13 (3): 331–44. <https://doi.org/10.1080/15732479.2016.1158288>.
- [5] Božiček, David, Roman Kunič, and Mitja Košir. 2021. "Interpreting Environmental Impacts in Building Design: Application of a Comparative Assertion Method in the Context of the EPD Scheme for Building Products." *Journal of Cleaner Production* 279 (January): 123399. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123399>.
- [6] Brammer, Stephen, and Helen Walker. 2011. "Sustainable Procurement in the Public Sector: An International Comparative Study." *International Journal of Operations & Production Management* 31 (4): 452–76. <https://doi.org/10.1108/01443571111119551>.
- [7] Bratt, Cecilia, Sophie Hallstedt, K-H Robèrt, Göran Broman, and Jonas Oldmark. 2013. "Assessment of Criteria Development for Public Procurement from a Strategic Sustainability Perspective." *Journal of Cleaner Production* 52 (August): 309–16. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.007>.
- [8] BRE Group. BREEAM Infrastructure. Available online: <https://bregroup.com/products/cee-qual/> - accessed on November 2023
- [9] Butt, Ali Azhar, Susanna Toller, and Björn Birgisson. 2015. "Life Cycle Assessment for the Green Procurement of Roads: A Way Forward." *Journal of Cleaner Production* 90 (March): 163–70. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.068>.

[10] Carter, Kate, and Chris Fortune. 2007. "Sustainable Development Policy Perceptions and Practice in the UK Social Housing Sector." *Construction Management and Economics* 25 (4): 399–408. <https://doi.org/10.1080/01446190600922578>.

[11] CEN, EN 15978:2011; Sustainability of Construction Works—Assessment of Environmental Performance of Buildings—Calculation Method. CEN: Brussels, Belgium, 2011.

[12] Chester, Mikhail V., and Alex Cano. 2016. "Time-Based Life-Cycle Assessment for Environmental Policymaking: Greenhouse Gas Reduction Goals and Public Transit." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 43 (March): 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.12.003>.

[13] Chester, Mikhail V., and Arpad Horvath. 2009. "Environmental Assessment of Passenger Transportation Should Include Infrastructure and Supply Chains." *Environmental Research Letters: ERL [Web Site]* 4 (2): 024008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/2/024008>.

[14] Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the committee of the regions - The European Green Deal. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF.

[15] Curran, Mary Ann. 2018. "Michael Z. Hauschild, Ralph K. Rosenbaum, and Stig Irvin Olsen (eds): Life Cycle Assessment—Theory and Practice." *The International Journal of Life Cycle Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1461-9>.

[16] Dalhammar, Carl. 2015. "The Application of 'life Cycle Thinking' in European Environmental Law: Theory and Practice." *Journal for European Environmental & Planning Law* 12 (2): 97–127. https://brill.com/view/journals/jeep/12/2/article-p97_2.xml.

[17] Damiani, Mattia, Nicola Ferrara, and Fulvio Ardente. 2022. *Understanding Product Environmental Footprint and Organisation Environmental Footprint Methods*. Publications Office of the European Union.

[18] De Wolf Marc André, Pant Rana, Chomkhamsri Kirana, Sala Serenella, and Pennington David. 2012. *The International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook : Towards More Sustainable Production and Consumption for a Resource-Efficient Europe*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2788/85727>.

[19] EPRS | European Parliamentary Research Service - Author: Guillaume Ragonnaud - Members' Research Service - PE 739.243 – December 2022.

[20] EU - 2013/179/EU: Commission Recommendation of 9 April 2013 on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations Text with EEA relevance.

[21] European Environment Agency, Green Infrastructure and territorial cohesion. (2011). Technical Report No 18/2011. See also http://ec.europa.eu/environment/nature/ecosystems/docs/Green_Infrastructure.pdf

[22] EU - COM(2012) 710 final, Proposal for a Decision of the European Parliament and of the Council on a General Union Environment Action Programme to 2020 'Living well, within the limits of our planet'.

[23] EU - COM(2003)302 – Communication Integrated Product Policy - Building on Environmental Life-Cycle Thinking

[24] EU - COM(2019)640 – Communication The European Green Deal

[25] EU - COM(2021)802 final – Directive, Energy performance of buildings (recast) Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52021PC0802>.

[26] EU - COM(2014)398 – Communication - Towards a circular economy: A zero waste programme for Europe Available online: <https://www.eumonitor.eu/9353000/1/j9vvik7m1c3gyxp/vjl4tamjogxb>

[27] EU - COM(2015)614 – Communication Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy Available online: <https://www.eumonitor.eu/9353000/1/j9vvik7m1c3gyxp/vjzpj6v9jiu8>

[28] European Commission Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability. 2010. "ILCD Handbook - General Guide for LCA - DETAILED GUIDANCE." file:///C:/Users/susani/Downloads/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAILED-GUIDANCE- 12March2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf.

[29] EU – Green Procurement Toolkit. 2022. https://green-business.ec.europa.eu/green-public-procurement/gpp-training-toolkit_en.

[30] Farahani, Abolfazl, Holger Wallbaum, and Jan-Olof Dalenbäck. 2019. "The Importance of Life- Cycle Based Planning in Maintenance and Energy Renovation of Multifamily Buildings." *Sustainable Cities and Society* 44 (January): 715–25. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.033>.

[31] Faith-Ell, Charlotta, Berit Balfors, and Lennart Folkesson. 2006. "The Application of Environmental Requirements in Swedish Road Maintenance Contracts." *Journal of Cleaner Production* 14 (2): 163–71. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.11.004>.

[32] Fenner, R. A., and T. Ryce. 2008. "A Comparative Analysis of Two Building Rating Systems Part 1: Evaluation." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability* 161 (1): 55–63. <https://doi.org/10.1680/ensu.2008.161.1.55>.

[33] Finnveden, Göran, Michael Z. Hauschild, Tomas Ekvall, Jeroen Guinée, Reinout Heijungs, Stefanie Hellweg, Annette Koehler, David Pennington, and Sangwon Suh. 2009. "Recent Developments in Life Cycle Assessment." *Journal of Environmental Management* 91 (1): 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018>.

[34] Forsberg, Anna, and Fredrik von Malmborg. 2004. "Tools for Environmental Assessment of the Built Environment." *Building and Environment* 39 (2): 223–28. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2003.09.004>.

[35] Fowler, K. M., and E. M. Rauch. 2006. "Sustainable Building Rating Systems Summary." <https://www.osti.gov/servlets/purl/926974>.

[36] Fregonara, Elena. 2020. "A Life Cycle Perspective for Infrastructure Management." *Aestimum*, 5–25. <https://doi.org/10.13128/aestim-8449>.

[37] Fuchs, G., I. Keuning, B. R. Mante, and J. D. Bakker. 2014. "A Business Case of the Estimated Profit of Life Cycle Management Principles." In *Life-Cycle of Structural Systems: Design, Assessment, Maintenance and Management*, edited by H. Furuta, D. Frangopol, and M. Akiyama. CRC Press.

[38] Gantner, J., W. Fawcett, and I. Ellingham. 2018. "Probabilistic Approaches to the Measurement of Embodied Carbon in Buildings." In *Embodied Carbon in Buildings: Measurement, Management, and Mitigation*, edited by Francesco Pomponi, Catherine De Wolf, and Alice Moncaster, 23–50. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72796-7_2.

[39] Gowri, K. 2004. "Green Building Rating Systems: An Overview." *ASHRAE Journal* 46 (11): 56–60. <https://search.proquest.com/openview/68a8bf3ff41f47ca52b63da2c59854cf/1?pq-origsite=gscholar&cbl=41118>.

[40] Griffiths, Kerry, Carol Boyle, and Theunis F. P. Henning. 2018. "Beyond the Certification Badge—How Infrastructure Sustainability Rating Tools Impact on Individual, Organizational, and Industry Practice." *Sustainability: Science Practice and Policy* 10 (4): 1038. <https://doi.org/10.3390/su10041038>.

[41] Guinée, Jeroen. 2016. “Life Cycle Sustainability Assessment: What Is It and What Are Its Challenges?” *Taking Stock of Industrial Ecology*, 45–68. <https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/27948/1002051.pdf?sequence=1#page=65> .

[42] Guinée, Jeroen B., Reinout Heijungs, Gjalt Huppes, Alessandra Zamagni, Paolo Maso-
ni, Roberto Buonamici, Tomas Ekvall, and Tomas Rydberg. 2011. “Life Cycle Assessment:
Past, Present, and Future.” *Environmental Science & Technology* 45 (1): 90–96. <https://doi.org/10.1021/es101316v>. [43] Guinée, Jeroen B., Stefano Cucurachi, Patrik J. G. Henriksson,
and Reinout Heijungs. 2018. “Digesting the Alphabet Soup of LCA.” *International Journal of
Life Cycle Assessment* 23 (7): 1507– 11. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1478-0>.

[44] Günther, Edeltraud, and Lilly Scheibe. 2006. “The Hurdle Analysis. A Self-Evaluation Tool
for Municipalities to Identify, Analyse and Overcome Hurdles to Green Procurement.” *Corpora-
te Social Responsibility and Environmental Management* 13 (2): 61–77. [https://doi.org/10.1002/
csr.92](https://doi.org/10.1002/csr.92).

[45] Hanson, Christopher S., and Robert B. Noland. 2015. “Greenhouse Gas Emissions from
Road Construction: An Assessment of Alternative Staging Approaches.” *Transportation Re-
search Part D: Transport and Environment* 40 (October): 97–103. [https://doi.org/10.1016/j.
trd.2015.08.002](https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.08.002).

[46] Hauschild, Michael Z., Ralph K. Rosenbaum, and Stig Irving Olsen. 2017. *Life Cycle As-
sessment: Theory and Practice*. Springer International Publishing. [https://play.google.com/
store/books/details?id=8URxAQAACAAJ](https://play.google.com/store/books/details?id=8URxAQAACAAJ).

[47] Hauschild, M.Z., and Huijbregts, M.A.J. (2015). In *LCA Compendium – the Complete World
of Life Cycle Assessment*. *Life Cycle Impact Assessment*, W. Klöpffer and M.A. Curran, eds.
(Springer), pp. 1–16.

[48] Höjer, Mattias, Sofia Ahlroth, Karl-Henrik Dreborg, Tomas Ekvall, Göran Finnveden, Olof
Hjelm, Elisabeth Hochschorner, Måns Nilsson, and Viveka Palm. 2008. “Scenarios in Selected
Tools for Environmental Systems Analysis.” *Journal of Cleaner Production* 16 (18): 1958–70.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.01.008>.

[49] Huang, Beijia, Xiangyu Wang, Harnwei Kua, Yong Geng, Raimund Bleischwitz, and Jin-
gzheng Ren. 2018. “Construction and Demolition Waste Management in China through the
3R Principle.” *Resources, Conservation and Recycling* 129 (February): 36–44. [https://doi.or-
g/10.1016/j.resconrec.2017.09.029](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.029).

[50] Huang, Beijia, Xiaofeng Gao, Xiaozhen Xu, Jialing Song, Yong Geng, Joseph Sarkis, Tomer Fishman, Harnwei Kua, and Jun Nakatani. 2020. “A Life Cycle Thinking Framework to Mitigate the Environmental Impact of Building Materials.” *One Earth* 3 (5): 564–73. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.10.010>.

[51] Huijbregts, Mark A. J., Zoran J. N. Steinmann, Pieter M. F. Elshout, Gea Stam, Francesca Verones, Marisa Vieira, Michiel Zijp, Anne Hollander, and Rosalie van Zelm. 2017. “ReCiPe2016: A Harmonised Life Cycle Impact Assessment Method at Midpoint and Endpoint Level.” *The International Journal of Life Cycle Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>.

[52] Huijbregts, Mark A. J. 1998. “Application of Uncertainty and Variability in LCA.” *International Journal of Life Cycle Assessment* 3 (5): 273–80. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02979835>.

[53] Huhtala, A. 2015. “Circular Economy: A Commentary from the Perspectives of the Natural and Social Sciences.” https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/EASAC_Circular_Economy_Web.pdf.

[54] Iddon, Christopher R., and Steven K. Firth. 2013. “Embodied and Operational Energy for New- Build Housing: A Case Study of Construction Methods in the UK.” *Energy and Buildings* 67: 479–88. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.041>.

[55] Iles, Darryl, and Paul Ryall. 2016. “HOW CAN THE UNITED KINGDOM CONSTRUCTION INDUSTRY IMPLEMENT SUSTAINABLE PROCUREMENT STRATEGIES?” In *Proceedings of the 32nd Annual ARCOM Conference*, edited by P W Chan and C J Neilson, 1121–30. UK, Association of Researchers in Construction Management.

[56] Igos, Elorri, Enrico Benetto, Rodolphe Meyer, Paul Baustert, and Benoit Othoniel. 2019. “How to Treat Uncertainties in Life Cycle Assessment Studies?” *International Journal of Life Cycle Assessment* 24 (4): 794–807. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1477-1>.

[57] International Energy Agency, 2018. CO2 Emissions from Fuel Combustion 2018 Highlights [Excel file]. Available through: <https://webstore.iea.org/statistics-data>

[58] Inyim P, Pereyra J, Bienvenu M, Mostafavi A. Environmental assessment of pavement infrastructure: A systematic review. *J Environ Manage*. 2016 Jul 1;176:128-38. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.03.042. Epub 2016 Apr 2. PMID: 27045541.

[59] ISO 14006:2020 Environmental management systems — Guidelines for incorporating eco-design. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

[60] ISO 14024:2018 Environmental labels and declarations — Type I environmental labelling — Principles and procedures. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization. [61] ISO 14025:2006 Environmental labels and declarations — Type III environmental declarations — Principles and procedures. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization. [62] ISO 14026:2017 Environmental labels and declarations — Principles, requirements and guidelines for communication of footprint information. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

[63] ISO 14040:2006, Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

[64] ISO 14042:2000, Environmental management — Life cycle assessment — Life cycle impact assessment. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

[65] ISO/TS 14029:2022, Environmental statements and programmes for products — Mutual recognition of environmental product declarations (EPDs) and footprint communication programmes. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

[66] ISO 14044:2006, Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

[67] ISO 14045:2012 Environmental management — Eco-efficiency assessment of product systems — Principles, requirements and guidelines. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

[68] ISO 14046:2014, Environmental management — Water footprint — Principles, requirements and guidelines. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

[69] ISO/TR 14047:2012, Environmental management — Life cycle assessment — Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to impact assessment situations. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

[70] ISO 55000:2014, Asset management — Overview, principles and terminology. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

[71] ISO 14064-3:2019 Greenhouse gases — Part 3: Specification with guidance for the verification and validation of greenhouse gas statements. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

[72] ISO 14067:2018 Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

[73] ISO/DIS 14068 Greenhouse gas management and climate change management and related activities — Carbon neutrality. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

[74] ISO/TS 14072:2014 Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines for organizational life cycle assessment. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.

[75] Jiang, R. and Wu, P., 2019. Estimation of environmental impacts of roads through life cycle assessment: A critical review and future directions. *Transportation Research Part D – Transport and Environment*, 77, pp. 148–163. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.10.010>.

[76] Jonsson, Daniel K. 2007. “Indirect Energy Associated with Swedish Road Transport.” *European Journal of Transport and Infrastructure Research* 7 (3): 183–200. <https://doi.org/10.18757/ejtir.2007.7.3.3388>.

[77] Junnila, Seppo. 2004. “THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF AN OFFICE BUILDING THROUGHOUT ITS LIFE CYCLE.” <https://www.researchgate.net/publication/27516079>.

[78] Keijzer, E. E., G. A. Leegwater, S. E. de Vos-Effting, and M. S. de Wit. 2015. “Carbon Footprint Comparison of Innovative Techniques in the Construction and Maintenance of Road Infrastructure in The Netherlands.” *Environmental Science & Policy* 54: 218–25. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.06.010>.

[79] Khasreen, Mohamad Monkiz, Phillip F. G. Banfill, and Gillian F. Menzies. 2009. “Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review.” *Sustainability: Science Practice and Policy* 1 (3): 674–701. <https://doi.org/10.3390/su1030674>.

[80] Kluts, Ingeborg, and Sofiiia Miliutenko. 2012. “Overview of Road Infrastructure Planning Process and the Use of Environmental Assessments in the Netherlands and Sweden.” ISSN 1652-5442 TRITA-INFRA-FMS 2012:6. <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:553113/FULLTEXT01.pdf>.

- [81] Lacy, Peter, and Jakob Rutqvist. 2015. *Waste to Wealth: The Circular Economy Advantage*. Palgrave Macmillan UK. <https://play.google.com/store/books/details?id=L9slrgEACAAJ>.
- [82] Liljenstroem, Carolina. 2021. "Life Cycle Assessment of Transport Systems and Transport Infrastructure - Investigating Methodological Approaches and Quantifying Impacts at Project and Network Levels." KTH Royal Institute of Technology School of Architecture and the Built Environment.
- [83] Liljenström, Carolina, Sofiia Miliutenko, Helge Brattebø, and José Potting. 2013. "LIC-CER Model Case Study Report. Application of the LICCER-Model to a Swedish Road Section between Yxtatorpet and Malmköping. Report 5.1." Report Nr 5.1. KTH Royal Institute of Technology. <https://www.researchgate.net/publication/280558025>.
- [84] Liljenström, Carolina, Susanna Toller, Jonas Åkerman, and Anna Björklund. 2019. "Annual Climate Impact and Primary Energy Use of Swedish Transport Infrastructure." <https://journals.open.tudelft.nl/ejtir/article/view/4378/4274>.
- [85] Lloyd, Shannon M., and Robert Ries. 2008. "Characterizing, Propagating, and Analyzing Uncertainty in Life-Cycle Assessment: A Survey of Quantitative Approaches." *Journal of Industrial Ecology* 11 (1): 161–79. <https://doi.org/10.1162/jiec.2007.1136>.
- [86] Maitre-Ekern, Eléonore, Carl Dalhammar, and Hans Christian Bugge. 2018. *Preventing Environmental Damage from Products: An Analysis of the Policy and Regulatory Framework in Europe*. Cambridge University Press. <https://play.google.com/store/books/details?id=A1F-SDwAAQBAJ>. De Wolf C, Yang F, Cox D, Charlson A, Hattan A S and Ochsendorf J 2016 Material quantities and embodied carbon dioxide in structures *Proc. Inst. Civ. Eng.* 169 150–61
- [87] Masson-Delmotte, Valérie, Panmao Zhai, Hans-Otto Pörtner, Debra Roberts, Jim Skea, and Priyadarshi R. Shukla. 2018. "Global Warming of 1.5°C - An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty." Intergovernmental panel on climate change - WMO - UNEP.
- [88] Mendoza Beltram, Francesco Pomponi, J. B. Guinée, and R. Heijungs. 2018. *Uncertainty Analysis in Embodied Carbon Assessments: What Are the Implications of Its Omission?* In *Embodied Carbon in Buildings*. Edited by Francesco Pomponi Catherine De Wolf Alice Moncaster. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-72796-7>.

[89] Meneghini, Luca. 2022. “A CRITICAL ANALYSIS OF THE EU GREEN TAXONOMY: IS IT FIT FOR PURPOSE?” *Dirittodelrisparmio*, no. 2. <https://www.dirittodelrisparmio.it/2022/06/06/a-critical-analysis-of-the-eu-green-taxonomy-is-it-fit-for-purpose/>.

[90] Miliutenko, Sofiiia. 2016. “Consideration of Life Cycle Energy Use and Greenhouse Gas Emissions for Improved Road Infrastructure Planning.” KTH Royal Institute of Technology School of Architecture and the Built Environment. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:915227/FULLTEXT01.pdf>

[91] Montalbán, Laura, Pablo Ballesteros-Pérez, Amalia Sanz, and Eugenio Pellicer. 2017. Montalbán, Laura, Pablo Ballesteros-Pérez, Amalia Sanz, and Eugenio Pellicer. 2017. “CONTRATACIÓN PÚBLICA SOSTENIBLE: BARRERAS Y LIMITACIONES.” In 21th International Congress on Project Management and Engineering. <http://dspace.aepro.com/xmlui/handle/123456789/355>.

[92] Nazir, Novizar. 2017. “Understanding Life Cycle Thinking and Its Practical Application to Agri- Food System.” *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology* 7 (5): 1861–70. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.7.5.3578>.

[93] Nellemann, Christian. 2010. “Dead Planet, Living Planet. A UNEP Rapid Response Assessment.” <https://www.researchgate.net/publication/304215826>.

[94] Olugbenga, Olubanjo, Nikolaos Kalyviotis, and Shoshanna Saxe. 2019. “Embodied Emissions in Rail Infrastructure: A Critical Literature Review.” *Environmental Research Letters: ERL [Web Site]* 14 (12): 123002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab442f>.

[95] Palumbo, Elisabetta, Bernardette Soust-Verdaguer, Carmen Llatas, and Marzia Traverso. 2020. “How to Obtain Accurate Environmental Impacts at Early Design Stages in BIM When Using Environmental Product Declaration. A Method to Support Decision-Making.” *Sustainability: Science Practice and Policy* 12 (17): 6927. <https://doi.org/10.3390/su12176927>.

[96] Passer, Alexander, Sébastien Lasvaux, Karen Allacker, Dieter De Lathauwer, Carolin Spirinckx, Bastian Wittstock, Daniel Kellenberger, Florian Gschösser, Johannes Wall, and Holger Wallbaum. 2015. “Environmental Product Declarations Entering the Building Sector: Critical Reflections Based on 5 to 10 Years Experience in Different European Countries.” *International Journal of Life Cycle Assessment* 20 (9): 1199–1212. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0926-3>.

[97] Park, Won-Jun, Rakhyun Kim, Seungjun Roh, and Hoki Ban. 2020. “Analysis of Major Environmental Impact Categories of Road Construction Materials.” *Sustainability: Science Practice and Policy* 12 (17): 6951. <https://doi.org/10.3390/su12176951>.

- [98] Parra, C., V. González-Prida, E. Candón, la Fuente A., P. Martínez-Galán, and A. Crespo. 2020. "Integration of Asset Management Standard ISO55000 with a Maintenance Management Model." In 14th WCEAM Proceedings (WCEAM: World Congress on Engineering Asset Management). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64228-0_17.
- [99] Paulsen, Jacob. 2001. "Life Cycle Assessment for Building Products-The Significance of the Usage Phase." KTH, Building Sciences and Engineering, Stockholm, Sweden.
- [100] Pettinaroli, A., Susani, S., Castellanza, R., Collina, E., Pierani, M., Paoli, R., Romagnoli, F. 2023. "A Sustainability-Based Approach for Geotechnical Infrastructure." *Environmental and Climate Technologies* 27 (1): 738–52. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2023-0054>.
- [101] PRé Consultants 2016. SimaPro Database – Manual Methods Library.
- [102] Rahman, Md Habibur, Hoong Chor Chin, and Md Mazharul Haque. 2014. "Environmental Sustainability of Urban Road Transport: An Integrated Analysis for Life Cycle Emission Impact." *International Journal of Environmental and Sustainable Development* 13 (2): 126–41. <https://doi.org/10.1504/IJESD.2014.060191>.
- [103] Raynsford, Nick. 1999. "The UK's Approach to Sustainable Development in Construction." *Building Research and Information* 27 (6): 419–23. <https://doi.org/10.1080/096132199369273>.
- [104] Rangelov, Milena, Heather Dylla, and Nadarajah Sivanewaran. 2021. "Using Environmental Product Declarations for Green Public Procurement and Life Cycle Assessment of Concrete Pavements." In 12th International Conference on Concrete Pavements. <https://doi.org/10.33593/8ziapl8i>.
- [105] Rangelov, Milena, Heather Dylla, Amlan Mukherjee, and Nadarajah Sivanewaran. 2020. "Use of Environmental Product Declarations (EPDs) of Pavement Materials in the United States of America (U.S.A.) to Ensure Environmental Impact Reductions." *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124619>.
- [106] Rieckhof, Ramona. 2017. "The Life Cycle Metaphor: Its Emergence, Understanding, and Conceptualisation in Business Research." *Uwf UmweltWirtschaftsForum* 25 (1): 91–107. <https://doi.org/10.1007/s00550-017-0455-6>.
- [107] Santero, Nicholas. 2010. "Life Cycle Assessment of Pavements: A Critical Review of Existing Literature and Research." <https://escholarship.org/uc/item/8632v9cc>.

[108] Saxe, Shoshanna, Gursans Guven, Lucas Pereira, Alessandro Arrigoni, Tamar Opher, Adrien Roy, Aldrick Arceo, et al. 2020. “Taxonomy of Uncertainty in Environmental Life Cycle Assessment of Infrastructure Projects.” *Environmental Research Letters: ERL [Web Site]* 15 (8): 083003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab85f8>.

[109] Saxe, Shoshanna, and Dena Kasraian. 2020. “Rethinking Environmental LCA Life Stages for Transport Infrastructure to Facilitate Holistic Assessment.” *Journal of Industrial Ecology* 24 (5): 1031–46. <https://doi.org/10.1111/jiec.13010>.

[110] Simonen, Kathrina. 2014. *Life Cycle Assessment*. Routledge. <https://play.google.com/store/books/details?id=zwlgAwAAQBAJ>.

[111] Sourani, A. n.d. “Realising Sustainable Construction through Procurement Strategies.” Accessed April 17, 2023. https://repository.lboro.ac.uk/articles/Realising_sustainable_construction_through_procurement_strategies_/9456806/files/17080043.pdf.

[112] Sourani, Amr, and Muhammad Sohail. 2011. “Barriers to Addressing Sustainable Construction in Public Procurement Strategies.” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability* 164 (4): 229–37. <https://doi.org/10.1680/ensu.2011.164.4.229>.

[113] Sourani, Amr, and Muhammad Sohail. 2013. “Enabling Sustainable Construction in UK Public Procurement.” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Management, Procurement and Law* 166 (6): 297–312. <https://doi.org/10.1680/mpal.12.00022>.

[114] Soust-Verdaguer, B.; Palumbo, E.; Llatas, C.; Velasco Acevedo, Á.; Fernández Galvéz, M.D.; Hoxha, E.; Passer, A. The Use of Environmental Product Declarations of Construction Products as a Data Source to Conduct a Building Life-Cycle Assessment in Spain. *Sustainability* 2023, 15, 1284. <https://doi.org/10.3390/su15021284>

[115] Stripple Håkan, Fridell Erik, and Hulda Winnes. 2016. “Port Infrastructures in a System Perspective: A Part of the Project Environmental Calculations for Transport Infrastructure.” *IVL Rapport B*, no. 128. <https://trid.trb.org/view/1506472>.

[116] Susani, S., *Advances in assessing the sustainability of ground improvement methods*, Ph.D. Thesis, 2023, Università degli Studi Milano Bicocca.

[117] Susani, S., Pettinaroli, A., Castellanza, R., Collina, E., Pierani, M., Paoli, R., Romagnoli, F. 2023. “The Impact of a Permeation Grouting Technique Quantitatively Assessed through a Process-Focused Life Cycle Assessment.” *Environmental and Climate Technologies* 27 (1): 797–812. <https://doi.org/10.2478/rtuect-2023-0058>.

[118] Susani, S., Pettinaroli, A., Castellanza, R., Collina, E., Pierani, M., Paoli, R., Romagnoli, F. An LCA-based methodological approach to assess the sustainability of geotechnical construction processes. 2023. paper in submission.

[119] Testa, Francesco, Paolo Grappio, Natalia Marzia Gusmerotti, and Marco Frey. 2016. "Examining Green Public Procurement Using Content Analysis: Existing Difficulties for Procurers and Useful Recommendations." *Environment, Development and Sustainability* 18: 197–219. <https://doi.org/10.1007/s10668-015-9634-1>.

[120] Toller, S., and M. Larsson. 2017. "Implementation of Life Cycle Thinking in Planning and Procurement at the Swedish Transport Administration." In *Pavement Life-Cycle Assessment*, edited by Imad L. Al-Qadi, Hasan Ozer, John Harvey. Taylor and Francis.

[121] U.S. Green Building Council. LEED v4 for Building Design and Construction; U.S. Green Building Council: Washington, DC, USA, 2019.

[122] Walker, Helen, and Stephen Brammer. 2009. "Sustainable Procurement in the United Kingdom Public Sector." *Supply Chain Management: An International Journal* 14 (2): 128–37. <https://doi.org/10.1108/13598540910941993>.

[123] Weissman, Janelle and Barraket, Jo. 2009. "Social Procurement and Its Implications for Social Enterprise: A Literature Review." https://eprints.qut.edu.au/29060/1/Barraket_and_Weissmann_2009_Working_Paper_No_48_Final.pdf.

[124] What is Life Cycle Thinking? [https://www.lifecycleinitiative.org/activities/what-is-life-cycle-thinking/#:~:text=Life%20Cycle%20Thinking%20\(LCT\)%20is,over%20its%20entire%20life%20cycle](https://www.lifecycleinitiative.org/activities/what-is-life-cycle-thinking/#:~:text=Life%20Cycle%20Thinking%20(LCT)%20is,over%20its%20entire%20life%20cycle)

[125] Williams, Eric D., Christopher L. Weber, and Troy R. Hawkins. 2009. "Hybrid Framework for Managing Uncertainty in Life Cycle Inventories." *Journal of Industrial Ecology* 13 (6): 928–44. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2009.00170.x>.

[126] Zampori, L., and R. Pant. 2019. *Suggestions for Updating the Product Environmental Footprint (PEF) Method*. European Commission, Joint Research Centre, Publication Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/424613>.

IL TUO PARTNER PER LA TRASFORMAZIONE DIGITALE



since 1990

HARPACEAS

Your digital partner

Vuoi saperne di più?



Scansiona il QR code,
entra nel mondo
HARPACEAS

Viale Richard 3A
20143 Milano
02891741 - harpaceas.it



SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE



SICUREZZA



PRODUTTIVITÀ





Ingegneria per l'ambiente

Ricerca, Sperimentazione, Sostenibilità



L'Istituto Iride è tra i leader italiani per l'assistenza qualificata a enti e imprese in tutti i settori della **consulenza ambientale e della sostenibilità**.



Permitting, progettazione, realizzazione, monitoraggio sono gli ambiti di azione di Iride. Con un valore aggiunto: la ricerca.



Un punto di riferimento per il settore delle infrastrutture: **oltre 500 commesse svolte e numerosi progetti di ingegneria tra i più importanti in Italia.**

Da oltre 20 anni al servizio della progettazione di infrastrutture sostenibili



WWW.ISTITUTO-IRIDE.COM



Parte seconda

**La metodologia
Life Cycle Assessment
applicata ai
conglomerati cementizi
per le infrastrutture**

2. La metodologia Life Cycle Assessment applicata ai conglomerati cementizi per le infrastrutture

2.1 INTRODUZIONE

Questa sezione del paper ha lo scopo di descrivere e analizzare l'applicazione della metodologia Life Cycle Assessment (LCA) alla fase di realizzazione delle infrastrutture, con un'attenzione particolare rivolta alla caratterizzazione del conglomerato cementizio che costituisce uno degli elementi principali di un'opera di ingegneria civile e che risulta responsabile a livello globale di una quota parte non trascurabile di emissioni climalteranti.

Nello specifico, l'obiettivo principale è quello di analizzare e studiare da un punto di vista generale gli impatti ambientali legati inizialmente alla sola fase di produzione di calcestruzzo ad uso infrastrutturale e di individuare, laddove possibile e a seconda dei casi, i margini di riduzione degli impatti ottenibili mediante l'utilizzo di calcestruzzo a bassa emissione ad integrazione dell'ottimizzazione progettuale.

2.2 IL CALCESTRUZZO

Il calcestruzzo, costituito principalmente da cemento, aggregati e acqua, è un materiale da costruzione estremamente versatile e resistente, fatto che lo rende uno dei principali materiali da costruzione nelle opere di ingegneria civile.

A livello globale l'industria del cemento contribuisce in modo significativo alle emissioni totali di CO₂, rappresentando circa l'8% del totale.

Questo notevole contributo è il risultato sia dei volumi considerevoli utilizzati, sia del fatto che il processo di produzione, oltre a richiedere una quantità elevata di energia, comporta anche l'emissione diretta di anidride carbonica. Vista la rilevanza dei materiali da costruzione in termini di impatto ambientale, per poter ridurre le emissioni di CO₂ e ottimizzare gli impatti ambientali, risulta quindi fondamentale disporre di uno strumento oggettivo per poter quantificare gli impatti e contestualmente fornire uno strumento di valutazione tecnico progettuale che possa guidare le scelte progettuali e di procurement nel percorso di riduzione delle emissioni.

La valutazione degli impatti associati al cemento e al calcestruzzo non è fine a sé ma permette di considerare questi prodotti come input per definire gli impatti complessivi di un'opera infrastrutturale, per la cui valutazione, oltre ai misurabili impatti di cemento e successivamente del calcestruzzo, vengono presi in considerazione anche altri aspetti progettuali che contribuiscono all'insieme delle valutazioni (durata dell'opera, sezione, ecc...).

2.2.1 Life Cycle Assessment e calcestruzzi

La metodologia LCA applicata al mondo delle costruzioni e delle infrastrutture permette appunto di quantificare gli impatti di un prodotto o processo e in questo studio verrà utilizzata per valutare e analizzare gli impatti dei conglomerati cementizi. Le informazioni ambientali dei cementi e dei calcestruzzi sono ricavate dalle certificazioni ambientali di prodotto (EPD) e confrontati con cementi e calcestruzzi presenti nella banca dati ecoinvent 3.6 i cui impatti vengono calcolati tramite il software SimaPro 9.5.0.0. La LCA è un approccio quantitativo che segue un metodo sistematico, normato da standard ISO internazionali, per studiare singolarmente e comparare gli impatti di prodotti e sistemi durante tutto il loro ciclo di vita (Life Cycle). È infatti fondamentale avere uno strumento quantitativo di valutazione della sostenibilità al fine di garantire una comprensione obiettiva e accurata, basata su dati oggettivi. Basandosi sulle attuali normative ISO standard di riferimento, uno studio LCA è composto dalle fasi sottoelencate che saranno approfondite singolarmente nei paragrafi successivi.

1. Definizione dell'obiettivo e campo di applicazione: fase preliminare in cui si definiscono le finalità dello studio, l'unità funzionale, i confini del sistema studiato e le assunzioni;
2. Analisi di inventario: quantificazione dei flussi in entrata e in uscita per tutti i processi analizzati;
3. Valutazione degli impatti: aggregazione dei risultati dell'inventario, con modelli scientifici, in un certo numero di potenziali impatti ambientali;
4. Interpretazione: analisi dei risultati ottenuti al fine di ricavare delle conclusioni.

I quattro step di un'analisi di ciclo di vita sono correlati tra loro rendendo tutto il processo iterativo (Fig. 1). Ogni fase, infatti, si basa sui risultati ottenuti nella fase precedente, favorendo in questo modo la completezza e la coerenza dello studio e, qualora dovesse esserci la necessità di integrare ulteriori informazioni in uno step precedente o di rivedere le impostazioni iniziali, ogni modifica viene riportata anche ai livelli successivi dell'analisi.

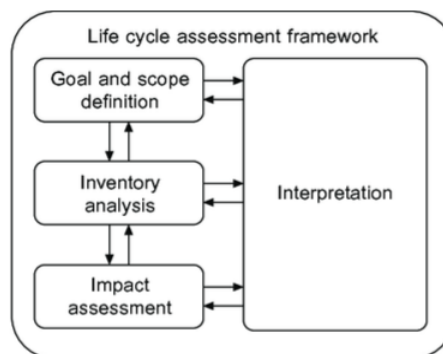


Figura 2-1, Fasi della LCA secondo le norme ISO 14040/14044.

2.2.2 Riferimenti normativi

- **UNI EN ISO 14025:2010** Etichette e dichiarazioni ambientali – Dichiarazioni ambientali di tipo III – Principi e procedure;
- **UNI EN ISO 14067:2018** Gas ad effetto serra – Impronta climatica dei prodotti (Carbon footprint dei prodotti) – Requisiti e linee guida per la qualificazione;
- **UNI EN ISO 14040:2021** Gestione ambientale – Valutazione del ciclo di vita – Principi e quadro di riferimento;
- **UNI EN ISO 14044:2021** Gestione ambientale – Valutazioni del ciclo di vita – Requisiti e linee guida; • **UNI EN 15804:2021** Sostenibilità delle costruzioni- Dichiarazioni ambientali di prodotto – Regole quadro di sviluppo per categoria di prodotto;
- **UNI EN 16908:2022** Cemento e calce da costruzione – Dichiarazioni ambientali di prodotto – Regole di categoria di prodotto complementari alla EN 15804;
- **UNI EN 16757:2023** Sostenibilità delle opere civili – Dichiarazioni ambientali di prodotto – Regole per le Categorie di Prodotto per calcestruzzo ed elementi in calcestruzzo.

2.3 GLOSSARIO

Ciclo di vita	Fasi consecutive e interconnesse di un sistema di prodotto, dall’acquisizione delle materie prime o dalla generazione da risorse naturali allo smaltimento finale (UNI EN ISO 14025 – par. 3.1)
Aspetto ambientale	Elemento delle attività, prodotti o servizi di un’organizzazione che può interagire con l’ambiente (UNI EN ISO 14025 – par. 3.17)
Impatto ambientale	Qualunque modificazione dell’ambiente, negativa o benefica, causata totalmente o parzialmente dagli aspetti ambientali di un’organizzazione (UNI EN ISO 14025 – par. 3.18)
Sistema prodotto	Insieme di processi unitari con flussi elementari e di prodotto, che svolgono una o più funzioni definite, e che modellano il ciclo di vita di un prodotto (UNI EN ISO 14044, par. 3.27)
Flusso di prodotto	Prodotti in entrata o in uscita da un altro sistema di prodotti (UNI EN ISO 14044, par. 3.28)
Processo unitario	L’elemento più piccolo considerato nell’analisi dell’inventario del ciclo di vita per il quale sono quantificati i dati in ingresso e in uscita (UNI EN ISO 14040:2006 – par. 3.34)

Flusso elementare	Materia o energia che entra nel sistema oggetto di studio e che è stata estratta dall'ambiente senza preventiva trasformazione umana, o materia o energia che esce dal sistema oggetto di studio che viene rilasciata nell'ambiente senza successiva trasformazione umana (UNI EN ISO 14044, par. 3.12)
Flusso di energia	Flusso in ingresso o in uscita da un processo unitario o da un sistema di prodotto, espresso in unità di energia (UNI EN ISO 14040:2006 – par. 3.13)
Product Category Rule (PCR)	Regole di categoria di prodotto, ovvero serie di regole, requisiti e linee guida specifici per lo sviluppo di dichiarazioni ambientali di tipo III per una o più categorie di prodotto (UNI EN ISO 14025:2010 – par. 3.5)
Dichiarazione ambientale di tipo III	Dichiarazione ambientale in grado di fornire informazioni ambientali quantificate espresse attraverso indicatori predefiniti e, quando pertinente, attraverso informazioni ambientali aggiuntive (UNI EN ISO 14025:2010 – par. 3.2)
Unità funzionale	Prestazione quantificata di un sistema di prodotto da usare come unità di riferimento (UNI EN ISO 14025, par. 3.14).
Unità dichiarata	Quantità di prodotto da costruzione utilizzata quale unità di riferimento in una EPD per l'elaborazione di una dichiarazione ambientale basata su uno o più moduli informativi (UNI EN 15804:2021 – par. 3.9)
Categoria di impatto	Classe che rappresenta questioni ambientali di interesse a cui possono essere assegnati i risultati dell'analisi dell'inventario del ciclo di vita (UNI EN ISO 14044, par. 3.39)
Risultato dell'analisi dell'inventario del ciclo di vita	Risultato di un'analisi dell'inventario del ciclo di vita che cataloga i flussi che attraversano il confine del sistema e fornisce il punto di partenza per la valutazione dell'impatto del ciclo di vita (UNI EN ISO 14044, par. 3.24)
Classificazione	Assegnazione dei risultati dell'inventario alle categorie di impatto selezionate (UNI EN ISO 14044:2006 – par. 4.4.2.1)
Fattore caratterizzazione	Fattore derivato da un modello di caratterizzazione che viene applicato per convertire un risultato dell'analisi dell'inventario del ciclo di vita assegnato nell'unità di misura dell'indicatore della categoria d'impatto (UNI EN ISO 14044, par. 3.37)

Life Cycle Assessment (LCA)	Valutazione del ciclo di vita, ovvero la compilazione e valutazione attraverso tutto il ciclo di vita degli elementi in ingresso e in uscita, nonché i potenziali impatti ambientali di un sistema prodotto (UNI EN ISO 14040:2010 – par. 3.1)
Dati specifici primari	Dati misurati o raccolti direttamente presso il sito (o i siti) in cui si realizzano una o più attività o processi nel confine del sistema dello studio LCA, sotto il controllo diretto del proprietario dell'EPD (EPDItaly)
Dati specifici primari	Dati misurati o raccolti direttamente presso il sito (o i siti) in cui si realizzano una o più attività o processi nel confine del sistema dello studio LCA, sotto il controllo diretto del proprietario dell'EPD (EPDItaly)
Dati specifici secondari	Dati relativi a un prodotto, gruppo di prodotti o servizio, di un fornitore, impiegati per la realizzazione del prodotto o servizio oggetto dello studio LCA, sotto il controllo diretto di uno specifico fornitore (EPDItaly)
Dati Generici	Dati che non sono specifici per il sito o l'impresa (prEN 15941 – Data quality)

Tabella 2-1, Elenco delle definizioni utili

2.4 DEFINIZIONE DELL'OBIETTIVO E DEL CAMPO DI APPLICAZIONE

Nel seguito si riporta l'analisi LCA che ha come oggetto la valutazione degli impatti ambientali dei diversi calcestruzzi nel mercato italiano, attraverso un'analisi "from cradle to gate".

2.4.1 Unità dichiarata

L'unità dichiarata presa in esame, rispetto alla quale sono calcolati tutti i dati quantitativi in entrata e in uscita raccolti nello studio, è la produzione di 1 m³ di calcestruzzo.

2.4.2 Confini del sistema

I confini del sistema determinano le unità di processo che devono essere incluse nell'analisi LCA. La norma EN 15804:2012+A2:2019/AC:2021 impone di considerare, oltre alla produzione, anche le fasi di trasporto, uso e fine vita per la redazione di una EPD di materiali da costruzione, come per esempio il calcestruzzo. Questo documento però, non vuole sostituirsi ad una dichiarazione ambientale di prodotto, bensì vuole fornire una modalità applicativa della metodologia LCA ad un prodotto da costruzione. A causa delle limitate informazioni a disposi-

zione relative alle fasi di manutenzione e fine vita, pur essendo la durabilità uno dei suoi punti di forza, gli unici moduli per i quali nel presente studio viene quantificato l'impatto ambientale del calcestruzzo sono i seguenti:

- A1: Approvvigionamento delle materie prime per la produzione di calcestruzzo;
- A2: Trasporto delle materie prime per la fabbricazione del calcestruzzo;
- A3: Lavorazione delle materie prime per ottenere il calcestruzzo.

2.4.3 Qualità dei dati

Nello studio sono stati utilizzati dati generici provenienti dalle EPD di produttori di calcestruzzo. I dati per modellizzare i calcestruzzi di confronto sono dati secondari ricavati dal database LCA ecoinvent v3.6. Tale versione consente di scegliere tra sei diverse tipologie del database:

1. Ecoinvent – allocation at point of substitution – system;
2. Ecoinvent – allocation at point of substitution – unit;
3. Ecoinvent – allocation, cut-off by classification – system;
4. Ecoinvent – allocation, cut-off by classification – unit;
5. Ecoinvent – consequential – system;
6. Ecoinvent – consequential – unit.

Non esiste a priori una scelta migliore delle altre ma dipende dal tipo di analisi che si vuole effettuare. In questo caso specifico, tutti i dati provengono dalla banca dati “ecoinvent – allocation, cut-off by classification – unit” per i seguenti motivi:

- Il database “allocation” si basa su un approccio attributivo e viene scelto, rispetto al database “consequential” quando si desidera conoscere l'impatto ambientale di un prodotto e i suoi hotspot nel suo ciclo di vita, o quando si desidera confrontare gli impatti di due prodotti con la stessa unità funzionale/dichiarata. Questo tipo di approccio analizza una situazione media in cui non cambia la situazione economica e possono essere utilizzati dati medi come quelli disponibili nei database.

- La scelta tra lo scenario “at point of substitution” e lo scenario “cut-off” potrebbe avere implicazioni nelle analisi di ciclo di vita che comprendono la fase di fine vita. Nel primo scenario per ogni prodotto vengono presi in carico gli impatti ambientali derivanti dallo smaltimento o dal recupero di massa o di energia nel medesimo sistema prodotto. Nel secondo scenario gli oneri ambientali derivanti dai trattamenti a fine vita utile del prodotto, in questa fase inteso come rifiuto, sono presi in carico dal sistema prodotto successivo, nel quale il rifiuto “entrerà” come materia prima. Poiché in questo caso studio non si analizza il fine vita, è stato selezionato lo scenario “cut-off” per semplificare il database e ridurre le dimensioni per risparmiare risorse computazionali.

- La tipologia “system” mostra ogni prodotto contenuto nel database come una “scatola nera”, senza specificare i sottoprodotti di cui è composto. Questo fa sì che il software sia

più veloce nel calcolare gli impatti ambientali del prodotto ma, d'altro canto, non consente all'operatore di avere la visione completa del prodotto che si sta analizzando e di modificarne i sottoprodotti in caso di necessità. Per tali ragioni viene utilizzata la tipologia "unit".

2.4.3.1 Rappresentatività temporale dei dati

I dati primari sono tutti relativi a EPD redatte nel 2022. I dati secondari del databaseecoinvent sono aggiornati al 2019.

2.4.3.2 Rappresentatività geografica dei dati

I dati primari riportano le specifiche di produttori italiani. I dati secondari del databaseecoinvent rispecchiano il contesto europeo e globale.

2.4.4 Metodo per la valutazione dell'impatto

Essendo i conglomerati cementizi dei prodotti da costruzione, le analisi di ciclo di vita in riferimento a questi materiali devono esprimere i risultati ambientali secondo le categorie di impatto obbligatorie definite dalla PCR (Product Category Rules) per i prodotti da costruzione, redatta secondo le indicazioni della norma UNI EN 15804, denominata EN 15804:2012+A2:2019/AC:2021 a seguito dell'ultimo aggiornamento.

2.5 INVENTARIO (LIFE CYCLE INVENTORY, LCI)

L'analisi dell'inventario è la fase più delicata di uno studio LCA. Consiste nella raccolta di dati per la quantificazione dei flussi in entrata e in uscita dal sistema durante il ciclo di vita in relazione all'unità funzionale. Gli input comprendono l'uso di risorse naturali, materiali ed energia; gli output, invece, comprendono le emissioni in aria, acqua e suolo associate al sistema e i rifiuti generati. Ultimata l'elaborazione, dalla somma di input e output di ogni processo unitario si ottiene l'"inventario", ovvero il catalogo di tutti i flussi di massa ed energia entranti e uscenti dal sistema (Fig. 2).

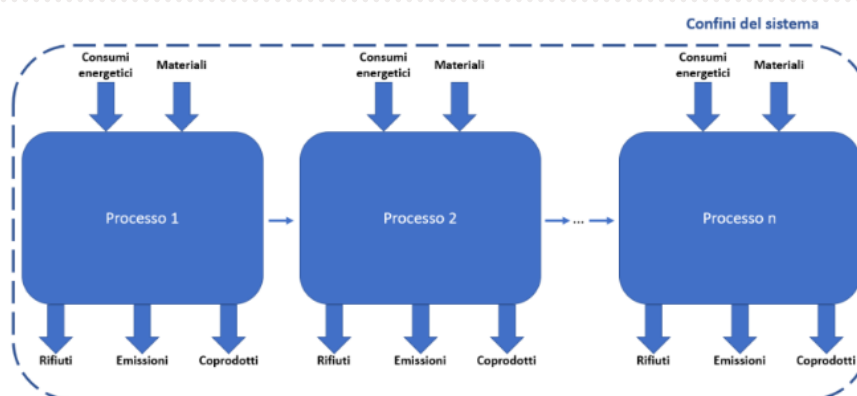


Figura 2-2, Rappresentazione schematica di input e output di ogni sotto processo.

La collezione delle EPD ha costituito la raccolta dei dati primari. Gli impatti ambientali dei dati secondari, invece, vengono automaticamente conteggiati selezionando il calcestruzzo ecoin-vent che si vuole modellare, il quale contiene già tutte le informazioni della sua catena produt-tiva dalla fase di estrazione delle materie prime fino alla produzione del calcestruzzo.

rck	Stringa del calcestruzzo ecoin-vent	GWP/m ³ (kg CO ₂ eq)
20	Concrete, 20MPa {RoW} concrete production 20MPa Cut-off, U	1,90E+02
20	Concrete, 20MPa {RoW} concrete production, 20MPa, ready-mix, with cement, alternative constituents 21-35% Cut-off, U	2,37E+02
20	Concrete, 20MPa {RoW} concrete production, 20MPa, ready-mix, with cement, limestone 21-35% Cut-off, U	3,44E+02
20	Concrete, 20MPa {RoW} concrete production, 20MPa, ready-mix, with cement, pozzolana and fly ash 36-55% Cut-off, U	2,08E+02
20	Concrete, 20MPa {RoW} concrete production, 20MPa, ready-mix, with Portland cement Cut-off, U	3,18E+02
20	Concrete, 20MPa {RoW} concrete production, 20MPa, self-construction, with cement, alternative constituents 45% Cut-off, U	2,54E+02
20	Concrete, 20MPa {RoW} concrete production, 20MPa, self-construction, with cement, limestone 21-35% Cut-off, U	3,34E+02
20	Concrete, 20MPa {RoW} concrete production, 20MPa, self-construction, with Portland cement Cut-off, U	3,84E+02
20	Concrete, 20MPa {RoW} concrete production, 20MPa, self, construction, with cement, pozzolana and fly ash 36-55% Cut-off, U	2,41E+02
30	Concrete, 25-30MPa {RoW} concrete production 25-30MPa Cut-off, U	2,93E+02
25	Concrete, 25MPa {RoW} concrete production 25MPa Cut-off, U	1,99E+02
25	Concrete, 25MPa {RoW} concrete production, 25MPa, ready-mix, with cement blast furnace slag 35-70% Cut-off, U	1,71E+02
25	Concrete, 25MPa {RoW} concrete production, 25MPa, ready-mix, with cement blast furnace slag 6-34% Cut-off, U	1,99E+02
25	Concrete, 25MPa {RoW} concrete production, 25MPa, ready-mix, with cement limestone 6-10% Cut-off, U	2,63E+02
32	Concrete, 30-32MPa {RoW} concrete production 30-32MPa Cut-off, U	2,86E+02
30	Concrete, 30MPa {RoW} concrete production 30MPa Cut-off, U	2,68E+02
30	Concrete, 30MPa {RoW} concrete production, 30MPa, ready-mix, with cement blast furnace slag 35-70% Cut-off, U	1,85E+02
30	Concrete, 30MPa {RoW} concrete production, 30MPa, ready-mix, with cement blast furnace slag 6-34% Cut-off, U	2,33E+02
30	Concrete, 30MPa {RoW} concrete production, 30MPa, ready-mix, with cement limestone 6-10% Cut-off, U	2,95E+02
35	Concrete, 35MPa {North America without Quebec} concrete production 35MPa Cut-off, U	3,14E+02
35	Concrete, 35MPa {RoW} concrete production 35MPa Cut-off, U	2,48E+02
35	Concrete, 35MPa {RoW} concrete production, 35MPa, ready-mix, with cement blast furnace slag 35-70% Cut-off, U	2,02E+02
35	Concrete, 35MPa {RoW} concrete production, 35MPa, ready-mix, with cement blast furnace slag 6-34% Cut-off, U	2,55E+02
35	Concrete, 35MPa {RoW} concrete production, 35MPa, ready-mix, with cement limestone 6-10% Cut-off, U	3,26E+02

rck	Stringa del calcestruzzo ecoinvent	GWP/m ³ (kg CO ₂ eq)
40	Concrete, 40MPa {RoW} concrete production 40MPa Cut-off, U	2,62E+02
40	Concrete, 40MPa {RoW} concrete production, 40MPa, ready-mix, with cement blast furnace slag 35-70% Cut-off, U	2,20E+02
40	Concrete, 40MPa {RoW} concrete production, 40MPa, ready-mix, with cement blast furnace slag 6-34% Cut-off, U	2,85E+02
40	Concrete, 40MPa {RoW} concrete production, 40MPa, ready-mix, with cement limestone 6-10% Cut-off, U	3,75E+02
40	Concrete, 40MPa {RoW} concrete production, 40MPa, ready-mix, with cement, alternative constituents 21-35% Cut-off, U	2,80E+02
40	Concrete, 40MPa {RoW} concrete production, 40MPa, ready-mix, with cement, limestone 21-35% Cut-off, U	3,44E+02
40	Concrete, 40MPa {RoW} concrete production, 40MPa, ready-mix, with cement, pozzolana and fly ash 36-55% Cut-off, U	2,52E+02
40	Concrete, 40MPa {RoW} concrete production, 40MPa, ready-mix, with Portland cement Cut-off, U	3,94E+02
45	Concrete, 45MPa {RoW} concrete production 45MPa Cut-off, U	3,24E+02
50	Concrete, 50MPa {North America without Quebec} concrete production 50MPa Cut-off, U	3,45E+02
50	Concrete, 50MPa {RoW} concrete production 50MPa Cut-off, U	3,71E+02

Tabella 2-2, Processi ecoinvent distinti per rck utilizzati come confronto con i dati primari.

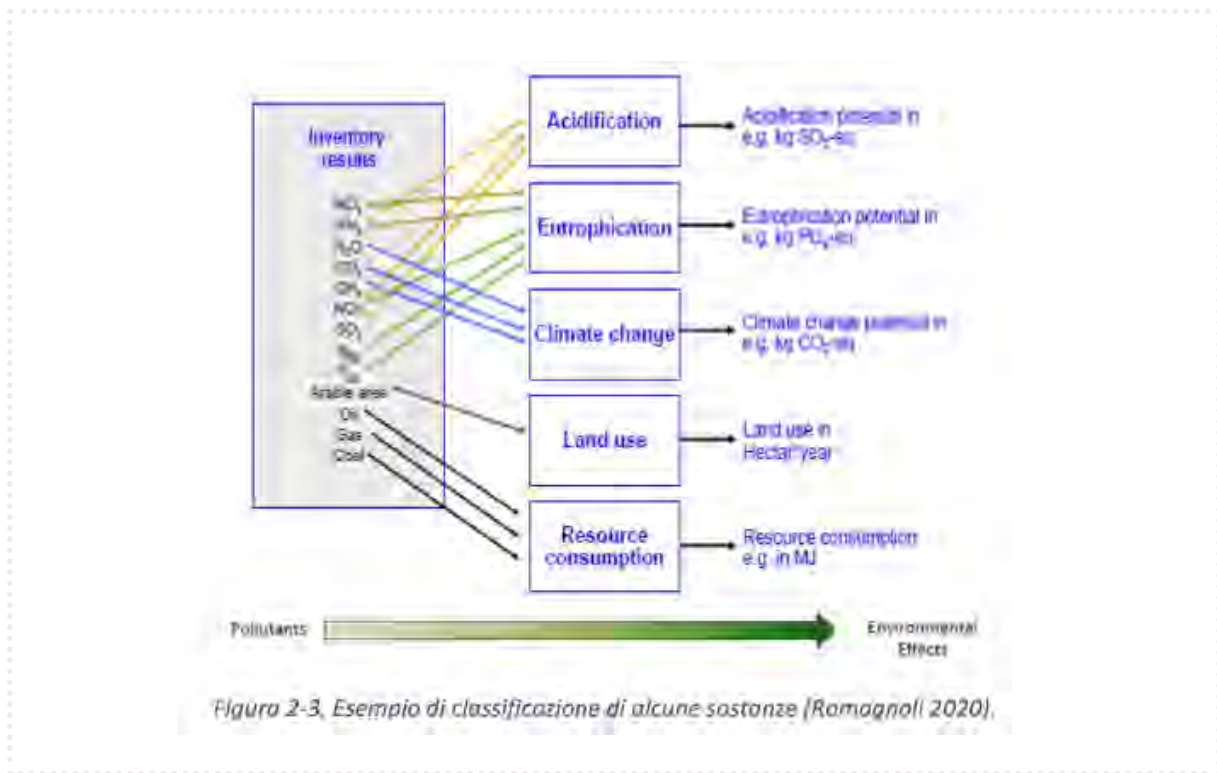
2.6 VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI (LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT, LCIA)

La valutazione degli impatti è la fase in cui gli input e gli output, riportati nell'inventario, sono tradotti in potenziali impatti ambientali. L'ambiente è un sistema complesso di fattori fisici, chimici e biologici, di elementi viventi e non viventi e di relazioni in cui sono immersi tutti gli organismi che abitano il pianeta, dove ogni variazione di una di queste componenti si ripercuote su tutto il resto del sistema. Pertanto, per studiare una realtà così complessa, la metodologia LCA prevede la compartimentazione dell'intero sistema ambiente in un numero limitato di categorie di impatto.

Ogni categoria di impatto è determinata da una diversa unità di misura che permette di quantificare l'impatto a seguito delle operazioni di classificazione e caratterizzazione.

2.6.1 Classificazione

La classificazione (Fig. 3) è una fase qualitativa nella quale le emissioni dei flussi elementari modellati, raccolte nell'inventario, sono associate alle categorie di impatto in funzione dei potenziali effetti ambientali. Risponde alla domanda "a che cosa contribuisce questa emissione?"



2.6.2 Caratterizzazione

La caratterizzazione (Fig. 4) consente di quantificare il contributo dei diversi flussi elementari all'interno di una categoria di impatto. Risponde alla domanda "quanto questa emissione contribuisce all'impatto rispetto alle altre?".

La valutazione degli impatti ambientali è stata realizzata considerando l'impatto sul cambiamento climatico (Global Warming Potential - GWP). In particolare, l'impatto viene espresso sotto forma di chilogrammi di CO₂ equivalenti (kg CO₂eq) emessi.

I chilogrammi di CO₂eq sono calcolati moltiplicando le emissioni di ciascun gas a effetto serra per il suo fattore di equivalenza. I fattori di equivalenza dei gas a effetto serra, sviluppati dal Gruppo intergovernativo sui cambiamenti climatici (IPCC), esprimono il contributo di un dato gas serra al riscaldamento globale rispetto all'anidride carbonica, il cui fattore di equivalenza per definizione è pari a 1.

Il calcolo della valutazione del ciclo di vita è stato eseguito applicando il metodo "EN 15804+A2 Method" il cui indicatore di impatto per la quantificazione delle emissioni climalteranti è basata sul modello IPCC sviluppato nel 2013.

Secondo la versione più aggiornata della norma “Sostenibilità delle costruzioni - Dichiarazioni ambientali di prodotto - Regole quadro di sviluppo per categoria di prodotto”, versione EN 15804:2012+A2:2019/AC:2021, le categorie di impatto, con relativi indicatori e unità di misura, per le quali esprimere gli impatti ambientali di un prodotto da costruzione sono riassunte nella tabella seguente.

Categoria di impatto	Indicatore	Unità di misura
Cambiamento climatico – totale	Potenziale di riscaldamento globale (GWP-totale)	kg CO ₂ eq.
Cambiamento climatico – fossile	Potenziale di riscaldamento globale dei combustibili fossili (GWP-fossile)	kg CO ₂ eq.
Cambiamento climatico – biogenico	Potenziale di riscaldamento globale biogenico (GWP-biogenico)	kg CO ₂ eq.
Cambiamento climatico – uso del suolo e variazione d’uso del suolo	Potenziale di riscaldamento globale, uso del suolo e variazione d’uso del suolo (GWP-luluc)	kg CO ₂ eq.
Riduzione dello strato di ozono	Potenziale di riduzione dello strato di ozono stratosferico (ODP)	kg CFC 11 eq.
Acidificazione	Potenziale di acidificazione, eccedenza accumulata (AP)	mol H ⁺ eq.
Eutrofizzazione dell’acqua marina	Potenziale di eutrofizzazione, frazione di nutrienti che raggiungono il compartimento finale dell’acqua dolce (EP-acqua dolce)	kg P eq.
Eutrofizzazione dell’acqua marina	Potenziale di eutrofizzazione, frazione di nutrienti che raggiungono il compartimento finale dell’acqua marina (EP-marina)	kg N eq.
Eutrofizzazione terrestre	Potenziale di eutrofizzazione, eccedenza accumulata (EP-terrestre)	mol N eq.
Formazione di ozono fotochimico	Potenziale di formazione di ozono troposferico (POCP)	kg NMVOC eq.
Esaurimento delle risorse abiotiche – minerali e metalli	Potenziale di esaurimento abiotico delle risorse non fossili (ADP-minerale e metalli)	kg Sb eq.
Esaurimento delle risorse abiotiche – combustibili fossili	Potenziale di esaurimento abiotico delle risorse fossili (ADP-fossili)	MJ, potere calorifico netto
Consumo d’acqua	Potenziale di deprivazione dell’acqua (utente), consumo idrico ponderato in base alla deprivazione (WDP)	M ³ world eq. deprived

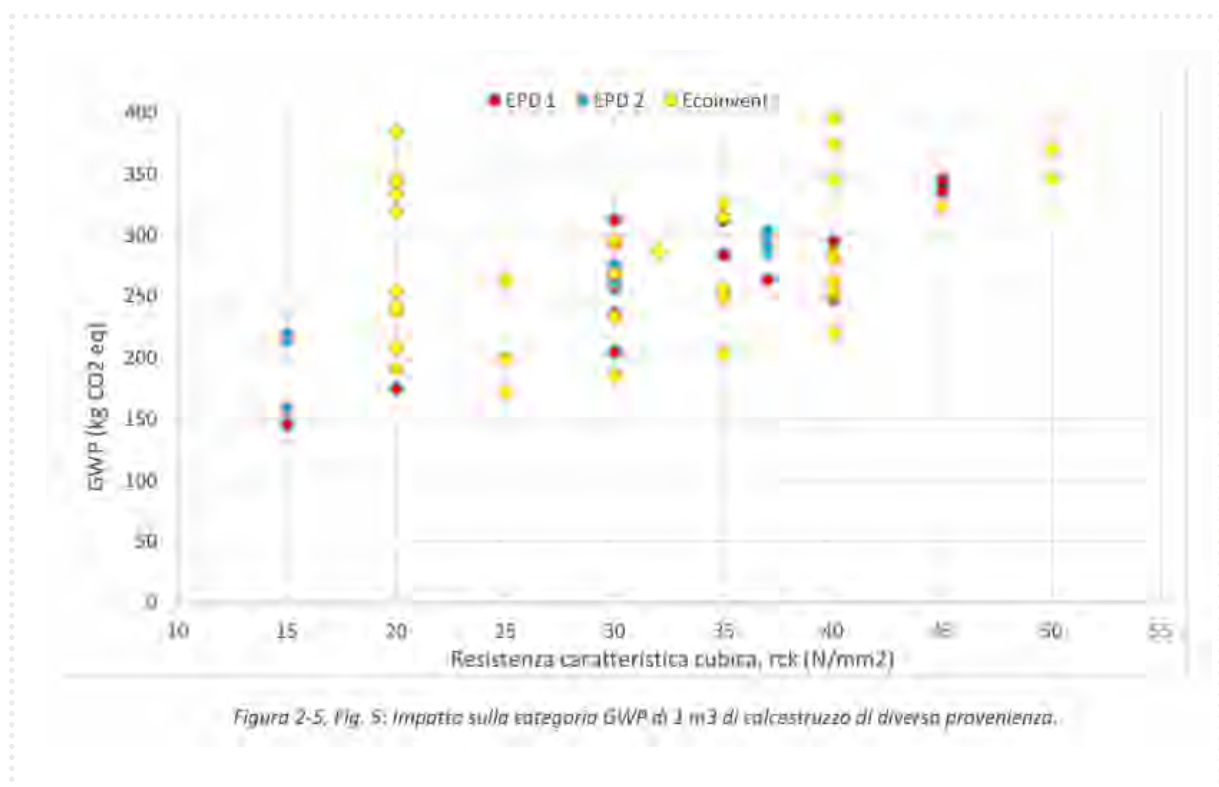
Tabella 2-3, Tab.: KPI per le categorie di impatto della EN 15804..

In questo paper si considera, per semplicità, in una prima fase iniziale di studio la sola categoria GWP-tot, Global Warming Potential total (potenziale di riscaldamento globale), da qui in avanti indicata semplicemente come “GWP”, tenuto conto degli obiettivi comunitari “net zero”, indirizzati a ridurre urgentemente le emissioni di gas climalteranti.

2.7 RISULTATI DELLA LIFE CYCLE ASSESSMENT E INTERPRETAZIONE

Per poter effettuare l’LCA relativa alla produzione di calcestruzzo è necessario che il progettista indichi le caratteristiche prestazionali a breve e medio termine che dovranno essere garantite, nonché in funzione dell’ambiente in cui verrà impiegato il calcestruzzo, le classi di esposizione e le classi di lavorabilità del conglomerato. Esiste un’estrema variabilità nella composizione del calcestruzzo che deriva in parte dall’impianto di produzione del calcestruzzo, ma principalmente dalla tipologia del cemento e della specifica composizione.

La grande variabilità che si può avere nella composizione e nel mix design del calcestruzzo si traduce anche in una significativa variabilità nel valore del GWP a parità di classe prestazionale, come si può vedere dalla figura 5, dove vengono riportati i valori di GWP ricavati utilizzando il database ecoinvent e le EPD disponibili redatte sulla base della EN 15804+A2.



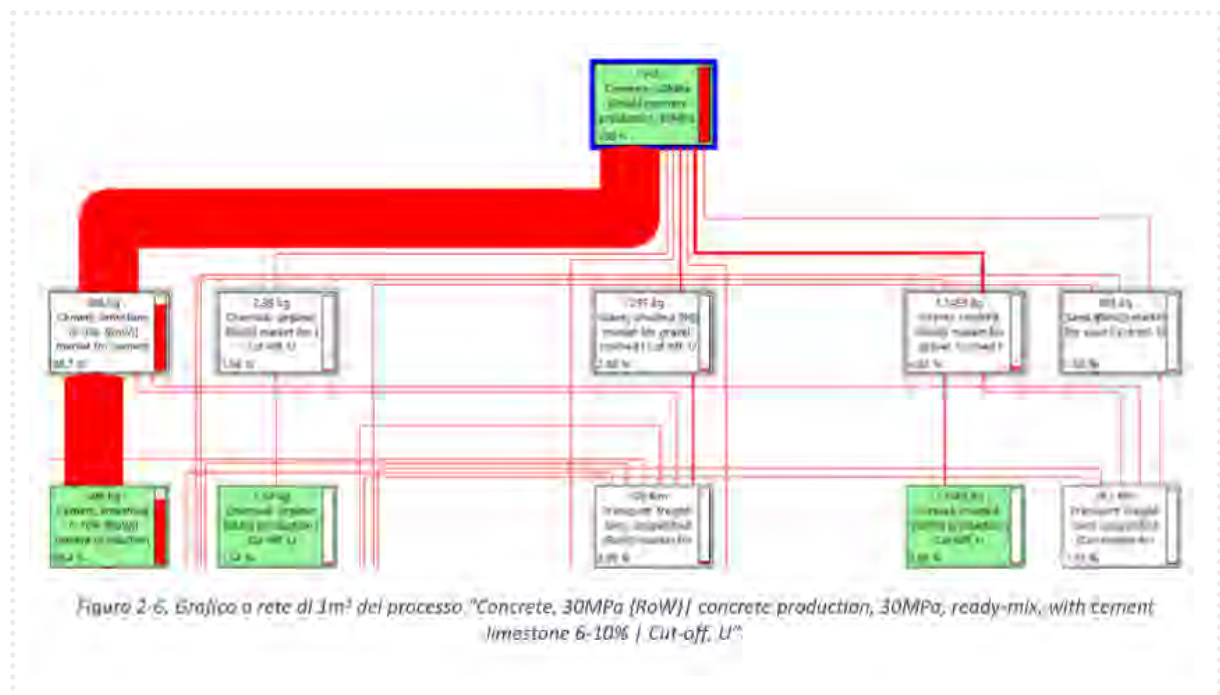
Il grafico evidenzia una proporzionalità tra rck e GWP ma per ogni classe di resistenza si nota anche una variabilità non indifferente sia tra i calcestruzzi di diversi produttori (EPD 1 e EPD 2) sia tra calcestruzzi di uno stesso produttore, ma realizzati in diversi impianti produttivi. La variabilità infine aumenta ulteriormente nel caso dei calcestruzzi ecoinvent.

Un così ampio intervallo di emissioni di CO₂eq a parità di classi prestazionali è da attribuire a tutte le variabili che diversificano la produzione di calcestruzzo; ne vengono di seguito riportati alcuni esempi a titolo indicativo e non esaustivo:

- Modalità di approvvigionamento delle materie prime;
- Lontananza dalle fonti di approvvigionamento;
- Contesto geografico produttivo;
- Quantità di materiali utilizzati;
- Ciclo produttivo del cemento;
- Combustibili utilizzati;
- Mix design del calcestruzzo.

Le EPD mostrano i risultati ambientali ma non forniscono dettagli disaggregati, per esempio su quali siano le materie prime più impattanti. Avendo però la possibilità di studiare i diversi calcestruzzi ecoinvent, si osserva che, indipendentemente dalla classe di resistenza, circa il 90% delle emissioni di calcestruzzo dipende dalla produzione di cemento.

Le figure seguenti (Fig. 6 e 7) sono una rappresentazione grafica chiamata “a rete” che mostra da quali sottoprocessi ecoinvent è determinato l’impatto ambientale in termini di GWP del calcestruzzo ecoinvent rck 30 più impattante (with cement limestone 6-10%) e meno impattante (with cement e blast furnace slag 35-70%). Lo spessore della freccia è proporzionale all’impatto percentuale del sotto processo.



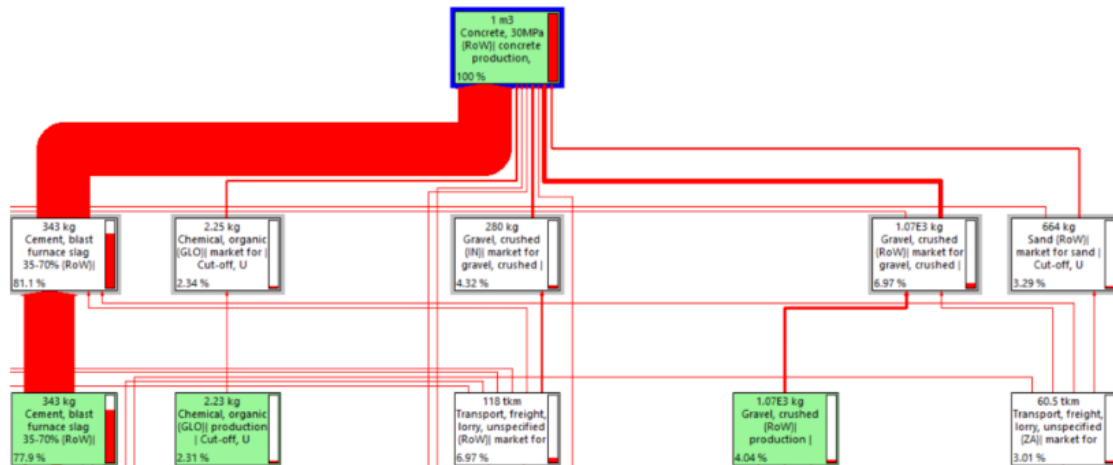


Figura 2-7, Grafico a rete di 1m³ del processo "Concrete, 30MPa (RoW) | concrete production, 30MPa, ready-mix, with cement blast furnace slag 35-70% | Cut-off, U".

Per avere evidenza di quanto possa variare il GWP di un calcestruzzo modificandone la ricetta e la composizione, sono stati analizzati i valori di CO₂eq normalizzati e associati a vari calcestruzzi provenienti dalla stessa unità produttiva, quindi a parità di impianto e cementeria. I valori delle emissioni sono stati normalizzati rispetto alle emissioni di un calcestruzzo a base di CEM I della medesima unità produttiva. Vengono analizzate varie classi di calcestruzzo e, partendo da un calcestruzzo realizzato con CEM I, a cui viene associato il valore 100, vengono calcolate le percentuali di riduzione della CO₂eq al variare del mix design. La tabella 3 riporta le informazioni su approvvigionamenti e i consumi dell'unità produttiva. La tabella 4 e la figura 8 danno evidenza delle differenze di emissioni climalteranti in funzione della classe di resistenza esprimendo le composizioni dei calcestruzzi al variare della stessa.

Informazione	Unità di misura	Valore
DISTANZA MEDIA AGGREGATI	km	33
DISTANZA MEDIA CEMENTO	km	99
DISTANZA MEDIA ADDITIVO	km	173
CONSUMI ELETTRICI	kW/m ³	3,8
RIFIUTI PERICOLOSI	kg/m ³	0,008
RIFIUTI NON PERICOLOSI SMALTITI	kg/m ³	1,18
RIFIUTI NON PERICOLOSI RECUPERATI	kg/m ³	34,03

Tabella 2-4, Composizioni dei calcestruzzi al variare della classe di resistenza (sopra) ed emissioni climalteranti in funzione della classe di resistenza (sotto).

Caratteristiche secondo UNI 11104	X0	XC1-XC2	XC1-XC2	XC3-XA1	XC4-XA2	XA3
Rck	20	30	35	37	40	45
DOSAGGIO MIN CEM	-	300	300	320	340	360
R a/c minimo	-	0,60	0,60	0,55	0,50	0,45
DOSAGGIO MEDIO ACQUA	180	180	180	180	180	180
DOSAGGIO MEDIO CEM	225	300	330	350	380	420
ADDITIVO 1% CLASSE S4	2,25	3,0	3,3	3,5	3,8	4,2
GWP (A1-A3) CEM I	100	100	100	100	100	100
GWP (A1-A3) CEM II 42,5 R II A-LL	86,4	86,2	87,3	86,8	86,1	87,3
Δ CO₂ CEM II vs CEM I	-13,6	-13,8	-12,7	-13,2	-13,9	-12,7
Dosaggio CEM	255 kg/mc	330 kg/mc	360 kg/mc	380 kg/mc	410 kg/mc	450 kg/mc
GWP (A1-A3) CEM II B-LL 32,5 R	92,7	85,9	88,9	86,8	84,7	84,3
Δ CO₂ CEM II 32,5 R II B-LL vs CEM I	-7,3	-14,1	-11,1	-13,2	-15,3	-15,7
Dosaggio CEM - PFA	180 kg/mc CEM + 45 kg/mc PFA	272 kg/mc CEM + 65 kg/mc PFA	292 kg/mc CEM + 95 kg/mc PFA	306 kg/mc CEM + 100 kg/mc PFA	336 kg/mc CEM + 110 kg/mc PFA	372 kg/mc CEM + 120 kg/mc PFA
GWP (A1-A3) CEM II A-LL 42,5 R + PFA	72,7	80,0	78,4	75,9	78,3	78,2
Δ CO₂ CEM II A-LL 42,5 R vs CEM I	-27,3	-20,0	-21,6	-24,1	-21,7	-21,8
Dosaggio CEM - SILICAFUME	185 kg/mc CEM + 20 kg/mc SF	260 kg/mc CEM + 20 kg/mc SF	290 kg/mc CEM + 20 kg/mc SF	310 kg/mc CEM + 20 kg/mc SF	340 kg/mc CEM + 20 kg/mc SF	380 kg/mc CEM + 20 kg/mc SF
GWP (A1-A3) CEM II A-LL 42,5 R + SILICAFUME	75,0	76,6	78,1	76,8	79,2	80,0
Δ CO₂ CEM II A-LL 42,5 R vs CEM I	-25,0	-23,4	-21,9	-23,2	-20,8	-20,0
GWP (A1-A3) CEM IV A-V 42,5 R	73,6	73,1	73,7	74,4	73,6	73,9
Δ CO₂ CEM IV A-V 42,5 R vs CEM I	-26,4	-26,9	-26,3	-25,6	-26,4	-26,1
GWP (A1-A3) CEM III-A 42,5 N	68,2	67,2	67,3	67,6	66,7	67,1
Δ CO₂ CEM III-A 42,5 N vs CEM I	-31,8	-32,8	-32,7	-32,4	-33,3	-32,9

Tabella 2-5, Composizioni dei calcestruzzi al variare della classe di resistenza (sopra) ed emissioni climalteranti in funzione della classe di resistenza (sotto).

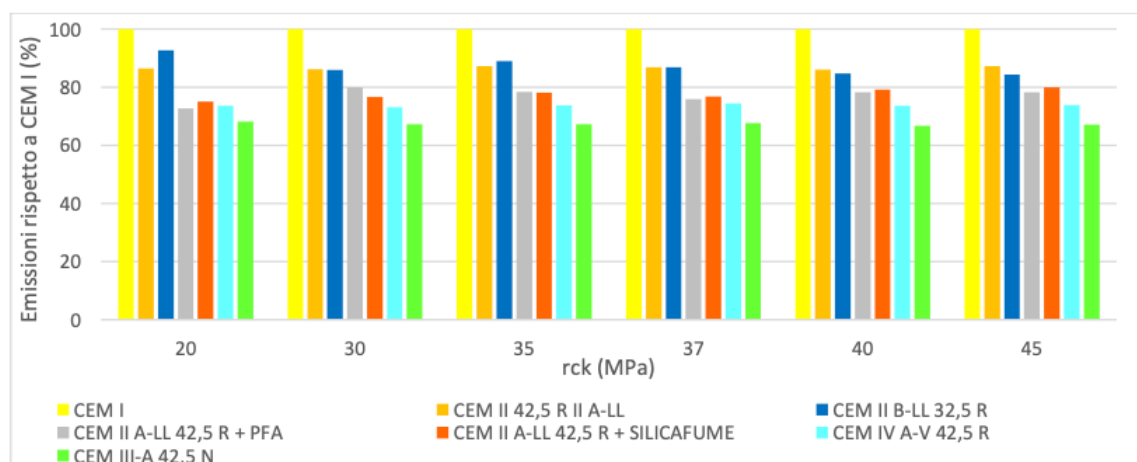


Figura 2-8, Fig. 8: Emissioni climalteranti in funzione della classe di resistenza

I risultati riportati in tabella e nei grafici evidenziano la variazione del GWP al variare del mix design a parità di classe prestazionale e di unità produttiva. Si osserva come, partendo da un calcestruzzo a base di CEM I, si possano ottenere riduzioni del GWP intorno al 10-15% utilizzando un CEM tipo II, percentuale che aumenta fino a riduzioni fino al 20-30% con mix addizionati di silicafume o passando a cementi di tipo III e IV.

2.8 CLASSIFICAZIONE DEL CALCESTRUZZO – STATO DELL’ARTE IN EUROPA

Come illustrato nei paragrafi precedenti, esiste un’enorme variabilità nei valori di emissione dei calcestruzzi, dovuta a molteplici fattori, fra cui la loro composizione e, pur avendo a disposizione i dati ambientali e le EPD di un dato calcestruzzo, non è immediato valutarne la prestazione ambientale.

Per aiutare e guidare le valutazioni dell’utilizzatore finale del calcestruzzo, sia esso il committente, il progettista o l’esecutore dell’opera, l’impostazione adottata in alcuni paesi europei è stata individuare una classificazione ambientale dei calcestruzzi in funzione della loro classe di resistenza. Pur variando da paese a paese, le classi ambientali sono state individuate e definite dalle associazioni di categoria e sono rappresentative della produzione di calcestruzzo dei rispettivi paesi.

Di seguito si riportano gli esempi di classificazioni di calcestruzzo utilizzate da alcuni paesi europei in funzione delle emissioni di CO₂eq al variare della classe di resistenza. Le nazioni prese come esempio sono Francia, Norvegia, Germania, Belgio.



Tabell 1 Lavkarbonbetongklasser med grenseverdier for klimagassutslipp (begrenset til modul A1-A3 i NS-EN 15804:2012+A2:2019 /7/). Valg av klasse skal skje under de forutsetningene som er gitt i kapittel A2.

Fasthetsklasse ¹⁾ og lavkarbonklasse	B20	B25	B30	B35	B45	B55	B65
Maksimalt tillatt klimagassutslipp [kg CO ₂ -ekv. pr m ³ betong]							
Bransjereferanse	240	260	280	330	360	370	380
Lavkarbon B	190	210	230	280	290	300	310
Lavkarbon A	170	180	200	210	220	230	240
Lavkarbon Pluss ²⁾			150	160	170	180	190
Lavkarbon Ekstrem ²⁾			110	120	130	140	150

1) Se kapittel A2 om sammenhengen mellom fasthetsklasser, bestandighetsklasser og karbonklasser
 2) Mulig nivå for enkelte prosjekt, men med flere begrensninger i standardverket, og begrenset tilgjengelighet. Gjennomførbarhet må avklares i hvert enkelt prosjekt.

Figura 2-10, Norvegia, classificazione di calcestruzzo in funzione delle emissioni di CO₂eq al variare della classe di resistenza.

Germany						
CO2-\Strength-Classes	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C45/55	C50/60
Maximum Greenhouse Gas Emissions per reduction level [net kg CO ₂ eq. / m ³]*)						
Reference values	213	237	261	286	312	325
Level 1 (↓ ≥ 30%)	149	166	183	200	218	228
Level 2 (↓ ≥ 40%)	128	142	157	172	187	195
Level 3 (↓ ≥ 50%)	107	119	131	143	156	163
Level 4 (↓ ≥ 60%)	85	95	104	114	125	130
*) As the GCCA tool uses Ecoinvent background data sets for aggregates and transports, which are more conservative than the corresponding data sets for Germany in the GaBi database, the reference values of the average OPC/CEM I concrete in the above table can be increased by 14 kg CO ₂ eq / m ³ in the calculation of the global warming potential if standard values (default values) for aggregates and transport are calculated with the GCCA-Tool. This also applies to other software tools that use the same Ecoinvent background data sets as the GCCA tool. If, in deviation, the standard values for the parameters aggregate and transport are not used for the calculation, but rather individual values, the above table applies.						
A background report to the reference values can be found here: https://www.csc-zertifizierung.de/downloads/						

Figura 2-11, Germania, classificazione di calcestruzzo in funzione delle emissioni di CO₂eq al variare della classe di resistenza.

Belgium							
CO2-Classes	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50
Maximum Greenhouse Gas Emissions per reduction level [net kg CO ₂ eq. / m ³]							
Reference values	228	244	269	294	319	344	361
Level 1 (I ≥ 30%)	160	171	188	206	226	241	253
Level 2 (I ≥ 40%)	137	146	161	176	194	206	217
Level 3 (I ≥ 50%)	114	122	135	147	162	172	181
Level 4 (I ≥ 60%)	91	98	108	118	129	138	144

REFERENCE CONCRETE COMPOSITIONS*							
Kg/m ³	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50
	(E0)	(E0)	(E1)	(EE2)	(EE3)	(EE4)	(EE4)
CEM I	250	270	300	330	360	390	410
Limestone	975	1010	1025	1030	1025	1020	1020
Sand	900	860	820	810	800	795	790
Superplasticizer	0	0	0,5	1,5	2,0	2,5	3,0
Water	195	190	190	180	175	170	165

(*) cement content based on average values of external samples for Benor-certification in Belgium (year 2020)

Figura 2-12, Belgio, classificazione di calcestruzzo in funzione delle emissioni di CO₂eq al variare della classe di resistenza.

2.9 CONCLUSIONI

Come illustrato nel documento, la variabilità nella composizione dei calcestruzzi disponibili sul mercato si traduce di fatto in una significativa variabilità delle emissioni di CO₂eq associate ai calcestruzzi stessi. Per poter superare la variabilità dovuta ai cicli di produzione dei calcestruzzi e dei vari impianti e per poter effettuare una valutazione delle emissioni di CO₂eq effettivamente associate ad un calcestruzzo è necessario affidarsi agli impatti ambientali valutati e dichiarati dallo specifico produttore tramite l'EPD. Analogamente, per poter ottimizzare l'impatto associato al calcestruzzo, il riferimento più efficace sarà il produttore di calcestruzzo che, a parità di prestazioni tecniche, è in grado di ridurre il valore di GWP variando le miscele e la composizione del calcestruzzo.

Come evidenziato nei paragrafi precedenti, al variare del mix del calcestruzzo si possono ottenere significative riduzioni delle emissioni di CO₂eq con percentuali che arrivano anche al 20-30% rispetto ad un calcestruzzo a base di CEM I. Non avendo dei termini di riferimento validi per il mercato italiano del calcestruzzo, risulta difficile una valutazione in termini assoluti della prestazione ambientale di un singolo calcestruzzo, anche avendo a disposizione i dati ambientali e le EPD. Come evidenziato in precedenza, si potranno fare valutazioni in merito al margine di riduzione delle emissioni confrontando due calcestruzzi di pari classe prestazionale, ma per indirizzare o agevolare le scelte di committenti, progettisti e utilizzatori di calcestruzzo, analogamente ad altri paesi europei, sarebbe estremamente efficace la definizione di una classificazione ambientale dei calcestruzzi valida anche per l'Italia.

Maggiori benefici si possono ottenere da scelte progettuali che tengano in considerazione non solo gli impatti del materiale, ma le quantità utilizzate (materiali più impattanti ma in minori quantità, o viceversa) e le prestazioni, sia come resistenza meccaniche che aggiuntive (permeabilità/impermeabilità, massa volumica, durabilità, resistenza a flessione, resistenza a gelo/ disgelo, ...) anche in termini di eliminazione di materiale e trattamenti aggiuntivi, anche nel corso dell'intera vita utile dell'opera.

Va riconosciuto infine che un'eventuale classificazione ambientale sarà, per esigenze di semplicità ed utilizzo, riferita solo alle prestazioni meccaniche a compressione (come quelle già richiamate per alcuni Paesi); gli impatti relativi alle prestazioni aggiuntive sopra esposte andranno valutati separatamente.

A valle di quanto fin qui emerso dalla disamina del calcestruzzo come fondamentale materiale costruttivo, si evidenzia la necessità di sviluppare in fase di progettazione la cosiddetta "EPD di progetto" che definisca le prestazioni ambientali attese del calcestruzzo.

Sulla base di tale documento il committente potrà orientarsi nel mercato alla ricerca del miglior fornitore che combini le caratteristiche ambientali e meccaniche richieste del calcestruzzo.

L'EPD di progetto potrebbe essere il risultato di una analisi LCA che integri sia dati secondari da database sia dati primari provenienti da produttori distribuiti nel territorio interessato dal progetto e associazioni di categoria.

2.10 BIBLIOGRAFIA

[1] Associazione Italiana Tecnica Economica Cemento “AITEC” (2022): “Dichiarazione Ambientale – Cementi grigi medi Italia”.

[2] Beton Lana GmbH/S.r.l. (2022): “Dichiarazione Ambientale di prodotto - Miscele di calcestruzzo riciclato”.

[3] Calcestruzzi S.p.A. - HeidelbergCement Group (2022): “Dichiarazione Ambientale di Prodotto”.

[4] Concrete Sustainability Council 18.03.2022.

[5] Feiz, R.; Ammenberg, J.; Baas, L.; Eklund, M.; Helgstrand, A.; Marshall, R. Improving the CO₂ performance of cement, part I: Utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry. *J. Clean. Prod.* 2015, 98, 272–281.

[6] García-Gusano, D.; Garraín, D.; Herrera, I.; Cabal, H.; Lechón, Y. Life cycle assessment of the Spanish cement industry: Implementation of environmental-friendly solutions. *Clean Technol. Environ. Policy* 2015, 17, 59–73.

[7] Lavkarbonbetong iht. NB publ. nr. 37:2015.

[8] Life Cycle Assessment of Completely Recyclable Concrete Mieke De Schepper, Philip Van den Heede, Isabel Van Driessche and Nele De Belie.

[9] Romagnoli, F.: LCA modelling on bioenergy systems: overview and practical exercises using SIMAPRO software.

[10] Stafford, F.N.; Dias, A.C.; Arroja, L.; Labrincha, J.A.; Hotza, D. Life cycle assessment of the production of Portland cement: A Southern Europe case study. *J. Clean. Prod.* 2016, 126, 159–165. [11] Supino, S.; Malandrino, O.; Testa, M.; Sica, D. Sustainability in the EU cement industry: The Italia and German experiences. *J. Clean Prod.* 2016. Documentazione tecnica e certificazioni ambientali di prodotto.



**THINK SMART,
BUILD SAFE**





Parte terza

**La metodologia
Life Cycle Assessment
applicata alle armature
per i conglomerati
cementizi**

3. La metodologia Life Cycle Assessment applicata alle armature per i conglomerati cementizi

3.1 PREMESSA

Questa sezione ha lo scopo di descrivere e analizzare l'applicazione della metodologia LCA alla fase di realizzazione delle infrastrutture ed in particolare alla caratterizzazione delle armature per il cemento armato.

Il cemento armato costituisce uno degli elementi principali nella realizzazione delle opere di ingegneria civile e risulta responsabile a livello globale di una quota parte non trascurabile di emissioni climalteranti legate al settore delle costruzioni.

Nello specifico, l'obiettivo principale è quello di analizzare e studiare dal punto di vista generale gli impatti ambientali associati ad un'opera in calcestruzzo armato e caratterizzare e confrontare il contributo dell'armatura costituita da:

- *acciaio da altoforno*;
- *acciaio da forno elettrico* con quantitativo di riciclato maggiore del 75%, ovvero la percentuale minima prevista dal CAM per l'edilizia (DM 23.06.2022) che, pur non direttamente applicabile alle infrastrutture, è stato utilizzato come riferimento;
- *macro fibre sintetiche* in sostituzione parziale dell'acciaio;
- *armature in materiali compositi* ovvero barre in fibra di vetro rinforzata.

Si precisa che il presente studio ha lo scopo di confrontare gli elementi di rinforzo solo dal punto di vista degli impatti ambientali, con particolare attenzione al contributo sul Climate Change, senza analizzare, per quanto riguarda fibre e materiali compositi, gli aspetti legati alle norme di progettazione e alle certificazioni necessarie all'utilizzo ai sensi delle NTC 2018.

Nei prossimi paragrafi verrà descritta e illustrata la metodologia per effettuare un'analisi di ciclo di vita applicata alle armature e successivamente verrà commentato un caso studio.

3.1.1 Life Cycle Assessment e armature per il calcestruzzo

La metodologia Life Cycle Assessment applicata al mondo delle costruzioni e delle infrastrutture permette di quantificare gli impatti ambientali di un prodotto o di un processo.

In questo studio verrà utilizzata come strumento per confrontare e valutare diverse soluzioni disponibili per la realizzazione di un'opera in calcestruzzo armato.

Le informazioni relative alle performance ambientali di calcestruzzi e armature sono state dedotte dalle certificazioni ambientali di prodotto (EPD) fornite direttamente dai produttori e, in al-

cune circostanze, confrontate con calcestruzzi e armature presenti nella banca datiecoinvent 3.6, i cui impatti vengono calcolati tramite il software SimaPro 9.5.0.0.

La Life Cycle Assessment (LCA) si basa su un approccio quantitativo che segue un metodo sistematico, normato da standard ISO internazionali, per studiare e comparare gli impatti di prodotti e sistemi durante tutto il loro ciclo di vita (Life Cycle).

Basandosi sulle attuali normative ISO standard di riferimento, uno studio LCA è composto dalle fasi sottoelencate che saranno approfondite singolarmente nei paragrafi successivi.

1. **Definizione dell'obiettivo e campo di applicazione:** fase preliminare in cui si definiscono le finalità dello studio, l'unità funzionale o dichiarata, i confini del sistema studiato e le assunzioni;
2. **Analisi di inventario:** quantificazione dei flussi in entrata e in uscita per tutti i processi analizzati;
3. **Valutazione degli impatti:** aggregazione dei risultati dell'inventario, con modelli scientifici, in un certo numero di potenziali impatti ambientali;
4. **Interpretazione:** analisi dei risultati ottenuti.

I quattro step di un'analisi di ciclo di vita sono correlati tra loro rendendo tutto il processo iterativo (Fig. 1). Ogni fase, infatti, si basa sui risultati ottenuti nella fase precedente, favorendo in questo modo la completezza e la coerenza dello studio e, qualora dovesse esserci la necessità di integrare ulteriori informazioni in uno step precedente o di rivedere le impostazioni iniziali, ogni modifica viene riportata anche ai livelli successivi dell'analisi.

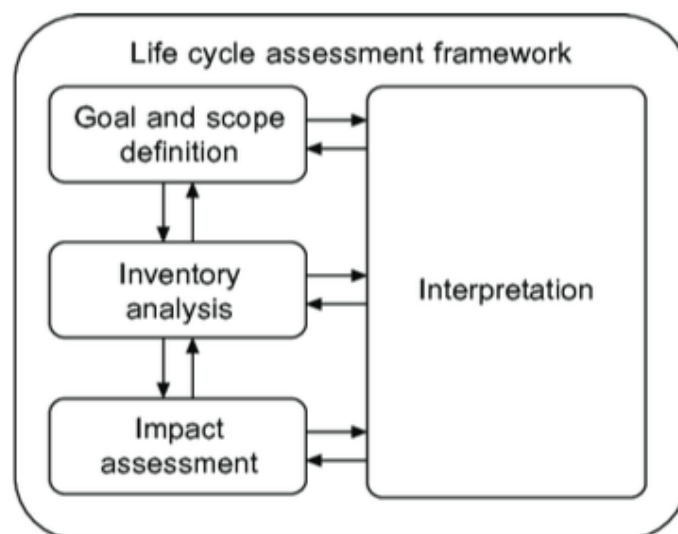


Figura 3-1, Fasi della LCA secondo le norme ISO 14040/14044.

3.1.2 Riferimenti normativi

Per la corretta redazione del documento sono considerate le seguenti norme:

- **UNI EN ISO 14025 (2010)**: requisiti e le linee guida per le etichettature ambientali di tipo III;
- **UNI EN ISO 14040 (2006)**: descrizione generale dei concetti di LCA;
- **UNI EN ISO 14044 (2006)**: ingloba le precedenti ISO 14041, 14042 e 14043. Definisce le linee guida e fornisce informazioni pratiche utili all'operatore LCA;
- **UNI EN 15804**: Regola quadro di sviluppo per la categoria di prodotto "prodotto da costruzione" e successivo aggiornamento EN 15804:2012+A2:2019/AC:2021;
- **prEN 15941 (2022)**: Sostenibilità dei lavori di costruzione - Qualità dei dati per la valutazione ambientale dei prodotti e dei lavori di costruzione - Selezione e utilizzo dei dati;
- **UNI EN 14889-2:2006**: Fibre polimeriche - Definizioni, specificazioni e conformità
- **UNI EN 14651**: Metodo di prova per calcestruzzo con fibre metalliche - Misurazione della resistenza a trazione per flessione [limite di proporzionalità (LOP), resistenza residua].

3.1.3 GLOSSARIO

Ciclo di vita	Fasi consecutive e interconnesse di un sistema di prodotto, dall'acquisizione delle materie prime o dalla generazione da risorse naturali allo smaltimento finale (UNI EN ISO 14025 – par. 3.1)
Aspetto ambientale	Elemento delle attività, prodotti o servizi di un'organizzazione che può interagire con l'ambiente (UNI EN ISO 14025 – par. 3.17)
Impatto ambientale	Qualunque modificazione dell'ambiente, negativa o benefica, causata totalmente o parzialmente dagli aspetti ambientali di un'organizzazione (UNI EN ISO 14025 – par. 3.18)
Sistema prodotto	Insieme di processi unitari con flussi elementari e di prodotto, che svolgono una o più funzioni definite, e che modellano il ciclo di vita di un prodotto (UNI EN ISO 14044, par. 3.27)
Flusso di prodotto	Prodotti in entrata o in uscita da un altro sistema di prodotti (UNI EN ISO 14044, par. 3.28)

Processo unitario	L'elemento più piccolo considerato nell'analisi dell'inventario del ciclo di vita per il quale sono quantificati i dati in ingresso e in uscita (UNI EN ISO 14040:2006 – par. 3.34)
Flusso elementare	Materia o energia che entra nel sistema oggetto di studio e che è stata estratta dall'ambiente senza preventiva trasformazione umana, o materia o energia che esce dal sistema oggetto di studio che viene rilasciata nell'ambiente senza successiva trasformazione umana (UNI EN ISO 14044, par. 3.12)
Flusso di energia	Flusso in ingresso o in uscita da un processo unitario o da un sistema di prodotto, espresso in unità di energia (UNI EN ISO 14040:2006- par. 3.13)
Product Category Rule (PCR)	Regole di categoria di prodotto, ovvero serie di regole, requisiti e linee guida specifici per lo sviluppo di dichiarazione ambientali di tipo III per una o più categorie di prodotto (UNI EN ISO 14025:2010 – par. 3.5)
Dichiarazione ambientale di tipo III	Dichiarazione ambientale in grado di fornire informazioni ambientali quantificate espresse attraverso indicatori predefiniti e, quando pertinente, attraverso informazioni ambientali aggiuntive (UNI EN ISO 14025:2010 – par. 3.2)
Unità funzionale	Prestazione quantificata di un sistema di prodotto da usare come unità di riferimento (UNI EN ISO 14025, par 3.14).
Unità dichiarata	Quantità di prodotto da costruzione utilizzata quale unità di riferimento in una EPD per l'elaborazione di una dichiarazione ambientale basata su uno o più moduli informativi (UNI EN 15804:2021 – par. 3.9)
Categoria di impatto	Classe che rappresenta questioni ambientali di interesse a cui possono essere assegnati i risultati dell'analisi dell'inventario del ciclo di vita (UNI EN ISO 14044, par. 3.39)
Risultato dell'analisi dell'inventario del ciclo di vita	Risultato di un'analisi dell'inventario del ciclo di vita che cataloga i flussi che attraversano il confine del sistema e fornisce il punto di partenza per la valutazione dell'impatto del ciclo di vita (UNI EN ISO 14044, par. 3.24)

Classificazione	Assegnazione dei risultati dell'inventario alle categorie di impatto selezionate (UNI EN ISO 14044:2006 – par. 4.4.2.1)
Indicatore categoria d'impatto	Rappresentazione quantificabile di una categoria di impatto (UNI EN ISO EN ISO 14044:2006 – par. 4.4.2.1)
Caratterizzazione	Calcolo dei risultati di indicatore di categoria (UNI EN ISO 14044:2006 – par. 4.4.2.1)
Fattore di Caratterizzazione	Fattore derivato da un modello di caratterizzazione che viene applicato per convertire un risultato dell'analisi dell'inventario del ciclo di vita assegnato nell'unità di misura dell'indicatore della categoria d'impatto (UNI EN ISO 14044, par. 3.37)
Life Cycle Assessment (LCA)	Valutazione del ciclo di vita, ovvero la compilazione e valutazione attraverso tutto il ciclo di vita degli elementi in ingresso e in uscita, nonché i potenziali impatti ambientali di un sistema prodotto (UNI EN ISO 14040:2010 – par. 3.1)
Dati specifici primari	Dati misurati o raccolti direttamente presso il sito (o i siti) in cui si realizzano una o più attività o processi nel confine del sistema dello studio LCA, sotto il controllo diretto del proprietario dell'EPD (EPDItaly)
Dati specifici primari	Dati misurati o raccolti direttamente presso il sito (o i siti) in cui si realizzano una o più attività o processi nel confine del sistema dello studio LCA, sotto il controllo diretto del proprietario dell'EPD (EPDItaly)
Dati specifici secondari	Dati relativi a un prodotto, gruppo di prodotti o servizio, di un fornitore, impiegati per la realizzazione del prodotto o servizio oggetto dello studio LCA, sotto il controllo diretto di uno specifico fornitore (EPDItaly)
Dati Generici	Dati che non sono specifici per il sito o l'impresa (prEN 15941 – Data quality)

Tabella 3-1, Elenco delle definizioni utili

3.2 DEFINIZIONE DELL'OBIETTIVO E CAMPO DI APPLICAZIONE

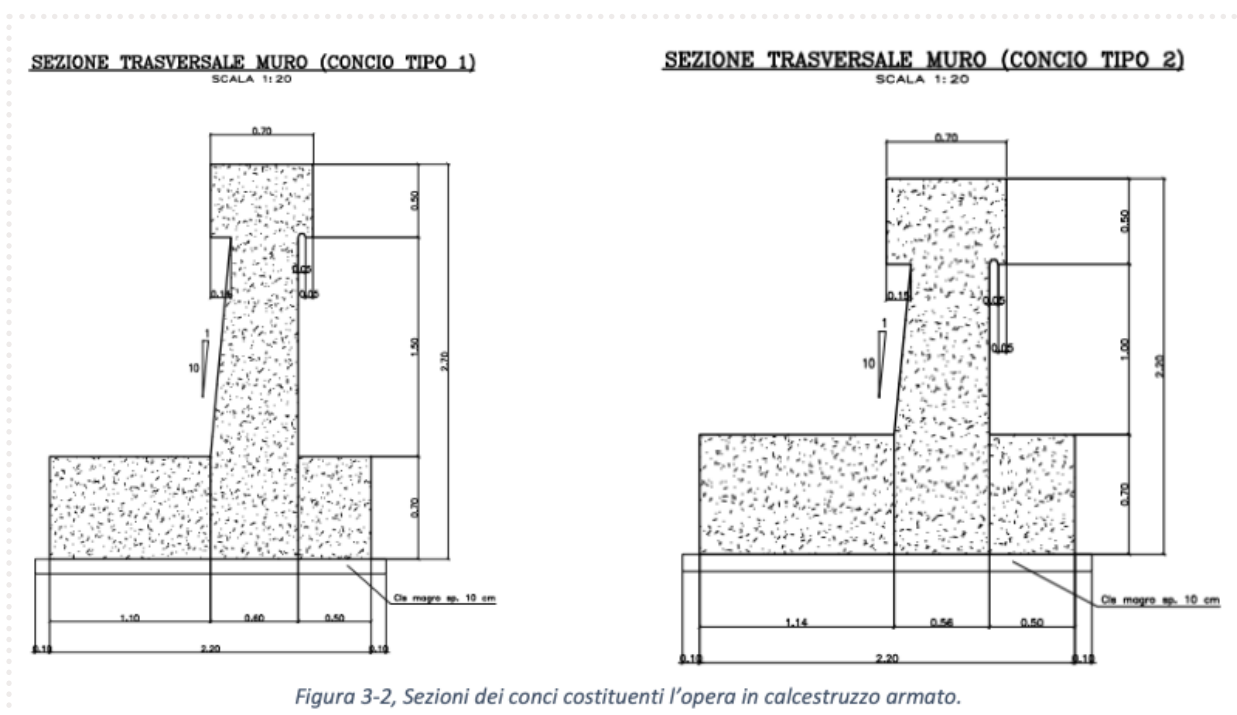
Nel seguito si riporta l'analisi LCA che ha come oggetto la valutazione e il confronto degli impatti ambientali di parti d'opera in calcestruzzo armato al variare delle caratteristiche dell'armatura.

3.2.1 Unità dichiarata

L'unità dichiarata presa in esame, rispetto alla quale sono calcolati tutti i dati quantitativi in entrata e in uscita raccolti nello studio, è la produzione delle componenti per realizzare un muro di sostegno in calcestruzzo armato. Si riportano di seguito in modo schematico i processi e i materiali che devono essere considerati nella modellazione LCA di un'opera in calcestruzzo armato:

- caratteristiche geometriche dell'opera, da cui sarà possibile ricavare i quantitativi di calcestruzzo e di materiali costituenti le armature;
- processo di produzione delle armature. Nel caso di armature in acciaio, occorre distinguere se l'acciaio proviene da ciclo di scrap tramite forno elettrico o da ciclo integrale tramite altoforno e stabilire la quota parte di acciaio riciclato nelle barre di armatura. Tipicamente se provenienti da forno elettrico la percentuale sarà superiore al 75%, se proveniente da ciclo integrale le percentuali di acciaio riciclato saranno sensibilmente inferiori;
- caratteristiche delle armature in materiali compositi GFRP e caratteristiche delle fibre sintetiche.

Il muro di sostegno in calcestruzzo oggetto di studio, tipicamente utilizzato in campo autostradale, è composto da due diverse tipologie di concio le cui dimensioni sono riassunte di seguito (Fig. 2). Il calcestruzzo utilizzato è prodotto in Italia e ha un rck di 30 MPa. Le informazioni ambientali di quest'ultimo sono ricavate da EPD. I due conci, indicati con "concio tipo 1" e "concio tipo 2" hanno una lunghezza rispettivamente di 18,03m e 24,96m e che insieme costituiscono la lunghezza totale del muro.



3.2.2 Confini del sistema

I confini del sistema determinano le unità di processo che devono essere incluse nell'analisi di ciclo di vita. Sebbene la LCA dovrebbe idealmente considerare l'intero ciclo di vita di un prodotto, processo o servizio, in questa sede non disponendo di tutte le informazioni qualitative e quantitative necessarie per modellare l'intero sistema, l'analisi sarà limitata all'equivalente fase "product stage" di una EPD elaborata rispettando la PCR dei prodotti da costruzione, composta dai seguenti moduli:

- A1: Approvvigionamento delle materie prime per la produzione dell'armatura e del calcestruzzo;
- A2: Trasporto delle materie prime per la fabbricazione dell'armatura e del calcestruzzo;
- A3: Lavorazione delle materie prime per ottenere l'armatura e il calcestruzzo.

3.2.3 Qualità dei dati

Nello studio sono stati utilizzati dati generici provenienti dalle EPD o dai risultati di analisi di Life Cycle Assessment di produttori di armatura e di produttori di calcestruzzo. I dati per modellizzare i processi e i consumi energetici sono dati secondari ricavati dal database LCA ecoinvent v3.6. Tale versione consente di scegliere tra sei diverse tipologie del database:

1. *Ecoinvent – allocation at point of substitution – system;*
2. *Ecoinvent – allocation at point of substitution – unit;*
3. *Ecoinvent – allocation, cut-off by classification – system;*
4. *Ecoinvent – allocation, cut-off by classification – unit;*
5. *Ecoinvent – consequential – system;*
6. *Ecoinvent – consequential – unit.*

Non esiste a priori una scelta migliore delle altre ma dipende dal tipo di analisi che si vuole effettuare. In questo caso specifico, tutti i dati provengono dalla banca dati "Ecoinvent – allocation, cut-off by classification – unit" per i seguenti motivi:

- Il database "allocation" si basa su un approccio attributivo e viene scelto, rispetto al database "consequential" quando si desidera conoscere l'impatto ambientale di un prodotto e i suoi hotspot nel suo ciclo di vita, o quando si desidera confrontare gli impatti di due prodotti con la stessa unità funzionale/dichiarata. Questo tipo di approccio analizza una situazione media in cui non cambia la situazione economica e possono essere utilizzati dati medi come quelli disponibili nei database.

• La scelta tra lo scenario “at point of substitution” e lo scenario “cut-off” potrebbe avere implicazioni nelle analisi di ciclo di vita che comprendono la fase di fine vita. Nel primo scenario per ogni prodotto vengono presi in carico gli impatti ambientali derivanti dallo smaltimento o dal recupero di massa o di energia nel medesimo sistema prodotto. Nel secondo scenario gli oneri ambientali derivanti dai trattamenti a fine vita utile del prodotto, in questa fase inteso come rifiuto, sono presi in carico dal sistema prodotto successivo, nel quale il rifiuto “entrerà” come materia prima. Poiché in questo caso studio non si analizza il fine vita, è stato selezionato lo scenario “cut-off” per semplificare il database e ridurre le dimensioni per risparmiare risorse computazionali.

• La tipologia “system” mostra ogni prodotto contenuto nel database come una “scatola nera”, senza specificare i sottoprodotti di cui è composto. Questo fa sì che il software sia più veloce nel calcolare gli impatti ambientali del prodotto ma, d’altro canto, non consente all’operatore di avere la visione completa del prodotto che si sta analizzando e di modificarne i sottoprodotti in caso di necessità. Per tali ragioni viene utilizzata la tipologia “unit”.

La qualità dei dati può essere complessivamente valutata in relazione ai seguenti aspetti (ISO14044:2006):

- **Rappresentatività temporale (TiC):** età del dato e il minimo arco temporale in cui i dati devono essere raccolti;
- **Rappresentatività geografica (GeC):** area geografica in cui i dati sono stati raccolti per soddisfare l’obiettivo dello studio;
- **Rappresentatività tecnologica (TeC):** grado con cui il dataset riflette il processo tecnologico;
- **Precisione (P):** misura della variabilità dei valori per ciascun dato espresso;
- **Completezza (C):** percentuale dei flussi misurati o stimati;
- **Rappresentatività (R):** valutazione qualitativa del grado con cui il dataset riflette la vera popolazione di interesse riguardante la tecnologia;
- **Consistenza:** valutazione qualitativa del grado con cui l’applicazione è consistente con il quadro di modellazione raccomandato e dei metodi specificati;
- **Riproducibilità:** valutazione qualitativa del grado con cui le informazioni relative alla metodologia e i valori dei dati permetterebbero ad un soggetto terzo di riprodurre i risultati contenuti nello studio;
- **Fonte dei dati;**
- **Incerteza delle informazioni** (es. dati, modelli e assunzioni).

3.2.4 Rappresentatività temporale dei dati

I dati generici sono tutti relativi a EPD o note tecniche redatte tra il 2020 e il 2022. I dati secondari del database ecoinvent sono aggiornati al 2019.

3.2.5 Rappresentatività geografica dei dati

I dati generici riportano le specifiche di produttori italiani. I dati secondari del database ecoinvent rispecchiano il contesto europeo e globale.

3.2.6 Metodo per la valutazione dell'impatto

Le analisi di ciclo di vita eseguite in questo documento esprimono i risultati ambientali secondo le categorie di impatto obbligatorie definite dalla PCR (Product Category Rules) per i prodotti da costruzione redatta secondo le indicazioni della norma EN 15804:2012+A2:2019/AC:2021.

3.3 INVENTARIO (LIFE CYCLE INVENTORY, LCI)

L'analisi dell'inventario è la fase più delicata di uno studio LCA. Consiste nella raccolta di dati per la quantificazione dei flussi in entrata e in uscita dal sistema durante il ciclo di vita in relazione all'unità dichiarata. Gli input comprendono l'uso di risorse naturali, materiali ed energia; gli output, invece, comprendono le emissioni in aria, acqua e suolo associate al sistema e i rifiuti generati. Ultimata l'elaborazione, dalla somma di input e output di ogni processo unitario si ottiene l'"inventario", ovvero il catalogo di tutti i flussi di massa ed energia entranti e uscenti dal sistema (Fig. 3).

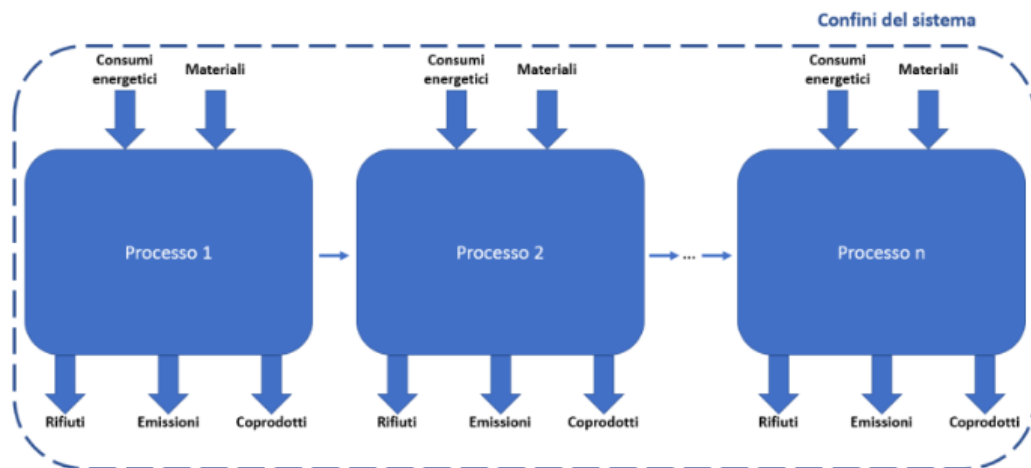


Figura 3-3, Rappresentazione schematica di input e output di ogni sotto processo.

La collezione delle EPD ha costituito la raccolta dei dati cosiddetti generici. Dal sito di EPDItaly (www.epditaly.it) e di Environdec (www.environdec.com) si possono trovare numerose certificazioni ambientali di prodotto. Per questo caso studio sono state utilizzate le EPD condivise dalle imprese coinvolte nel gruppo di lavoro AIS. Gli impatti ambientali dei dati secondari, invece, vengono automaticamente conteggiati selezionando il processo ecoinvent che si vuole modellare, il quale contiene già tutte le informazioni della sua catena produttiva dalla fase di estrazione delle materie prime fino alla produzione dello stesso. In particolare, si è fatto ricorso al database *LCA ecoinvent v3.6, allocation, cut-off by classification*.

La tabella 2 riassume i processi considerati durante l'analisi. Nel caso di processi provenienti da database ecoinvent la descrizione riporta la stringa completa del processo.

Processo	Provenienza	Descrizione
Gasolio usato come combustibile impiegato dalla betoniera per trasportare andata e ritorno e stendere il calcestruzzo	Database ecoinvent	Diesel, burned in building machine {GLO} market for Cut-off, U
Aria compressa rientrante nei consumi energetici previsti per l'installazione in cantiere del calcestruzzo	Database ecoinvent	Compressed air, 1000 kPa gauge {RoW} market for compressed air, 1000 kPa gauge Cut-off, U
Acciaio medio usato per confrontare le armature in acciaio	Database ecoinvent	Steel, low-alloyed, hot rolled {RER} production
Acciaio per armatura	EPD	Acciai da ciclo integrato o da forno elettrico
Macro fibra sintetica	EPD	Materiale per armatura
Barre in vetroresina	Nota tecnica	Materiale per armatura
Calcestruzzo	EPD	Calcestruzzo italiano, rck 30 MPa

Tabella 3-2, Processi ecoinvent utilizzati.

3.4 VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI (LIFE CYCLE IMPACT ASSESSMENT, LCIA)

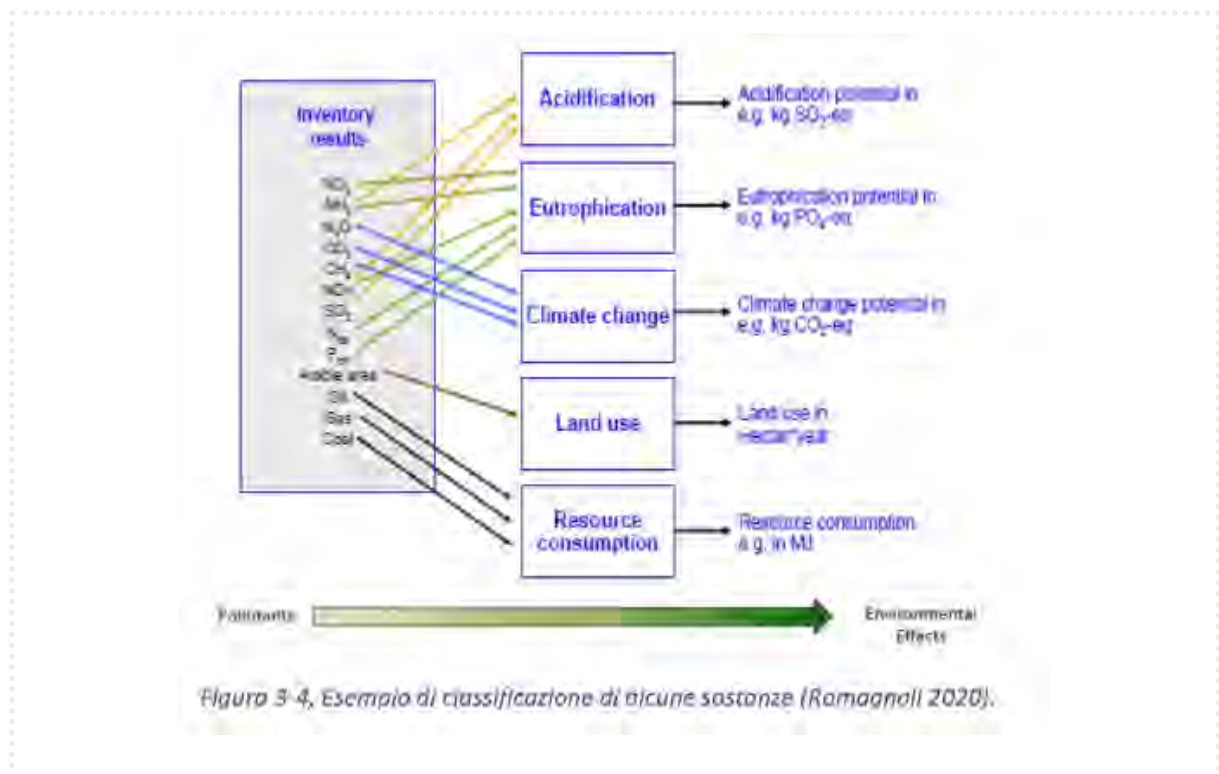
La valutazione degli impatti è la fase in cui gli input e gli output, riportati nell'inventario, sono tradotti in potenziali impatti ambientali. Per ridurre tali impatti, in particolare quelli più rilevanti, sarebbe necessario individuare da quali flussi elementari e da quali unità di processo derivino tutti i potenziali impatti e quantificarli.

Tuttavia, l'ambiente è un sistema complesso di fattori fisici, chimici e biologici, di elementi viventi e non viventi e di relazioni in cui sono immersi tutti gli organismi che abitano il pianeta,

dove ogni variazione di una di queste componenti si ripercuote su tutto il resto del sistema. Pertanto, per studiare una realtà così complessa, la metodologia LCA prevede la compartimentazione dell'intero sistema ambiente in un numero limitato di categorie di impatto. Ogni categoria è determinata da una diversa unità di misura che permette di quantificare l'impatto ambientale a seguito di operazioni di classificazione e di caratterizzazione.

3.4.1 Classificazione

La classificazione (Fig. 4) è una fase qualitativa nella quale le emissioni dei flussi elementari modellati, raccolte nell'inventario, sono associate alle categorie di impatto in funzione dei potenziali effetti ambientali. Risponde alla domanda "a che cosa contribuisce questa emissione?"



3.4.2 Caratterizzazione

La caratterizzazione (Fig. 5) consente di quantificare il contributo dei diversi flussi elementari all'interno di una categoria di impatto. Risponde alla domanda "quanto questa emissione contribuisce all'impatto rispetto alle altre?". Tutte le emissioni associate alla stessa categoria di impatto sono convertite nella stessa unità di misura a seguito dell'applicazione di coefficienti di caratterizzazione che esprimono i risultati come "equivalenti" rispetto all'unità di misura di riferimento.



Figura 3-5, Esempio della procedura di caratterizzazione applicata a tre categorie di impatto (Ramagnoli 2020).

Secondo la versione più aggiornata della norma “Sostenibilità delle costruzioni - Dichiarazioni ambientali di prodotto - Regole quadro di sviluppo per categoria di prodotto”, versione EN 15804:2012+A2:2019/AC:2021, le categorie di impatto, con relativi indicatori e unità di misura, per le quali esprimere gli impatti ambientali di un prodotto da costruzione sono riassunte nella tabella seguente (Tab. 3).

Categoria di impatto	Indicatore	Unità di misura
Cambiamento climatico – totale	Potenziale di riscaldamento globale (GWP-totale)	kg CO ₂ eq.
Cambiamento climatico – fossile	Potenziale di riscaldamento globale dei combustibili fossili (GWP-fossile)	kg CO ₂ eq.
Cambiamento climatico – biogenico	Potenziale di riscaldamento globale biogenico (GWP-biogenico)	kg CO ₂ eq.
Cambiamento climatico – uso del suolo e variazione d’uso del suolo	Potenziale di riscaldamento globale, uso del suolo e variazione d’uso del suolo (GWP-luluc)	kg CO ₂ eq.
Riduzione dello strato di ozono	Potenziale di riduzione dello strato di ozono stratosferico (ODP)	kg CFC 11 eq.
Acidificazione	Potenziale di acidificazione, eccedenza accumulata (AP)	mol H ⁺ eq.
Eutrofizzazione dell’acqua marina	Potenziale di eutrofizzazione, frazione di nutrienti che raggiungono il compartimento finale dell’acqua dolce (EP-acqua dolce)	kg P eq.
Eutrofizzazione dell’acqua marina	Potenziale di eutrofizzazione, frazione di nutrienti che raggiungono il compartimento finale dell’acqua marina (EP-marina)	kg N eq.
Eutrofizzazione terrestre	Potenziale di eutrofizzazione, eccedenza accumulata (EP-terrestre)	mol N eq.
Formazione di ozono fotochimico	Potenziale di formazione di ozono troposferico (POCP)	kg NMVOC eq.
Esaurimento delle risorse abiotiche – minerali e metalli	Potenziale di esaurimento abiotico delle risorse non fossili (ADP-minerale e metalli)	kg Sb eq.
Esaurimento delle risorse abiotiche – combustibili fossili	Potenziale di esaurimento abiotico delle risorse fossili (ADP-fossili)	MJ, potere calorifico netto
Consumo d’acqua	Potenziale di deprivazione dell’acqua (utente), consumo idrico ponderato in base alla deprivazione (WDP)	m ³ world eq. deprived

Tabella 3-3, Categorie di impatto

3.5 DESCRIZIONE DELL'OPERA OGGETTO DI STUDIO

Prendendo come riferimento le informazioni geometriche riportate, vengono di macro-soluzioni metodologiche che saranno confrontate nel corso del documento.

3.5.1 Soluzione tradizionale: muro con armatura in acciaio

La soluzione tradizionale di riferimento è un'armatura in acciaio. Le masse di acciaio per metro lineare di opera sono riassunte in tabella 4.

∅	kg/m	L tot	kg
12	0,888	11261	99,98
16	1,578	4091	64,564
massa tot per metro lineare			164,544
∅	kg/m	L tot	kg
12	0,888	10332	91,726
16	1,578	3817	60,247
massa tot per metro lineare			151,973

Tabella 3-4, Masse di acciaio per metro lineare di opera concio 1 (sopra) e concio 2 (sotto).

Successivamente, la soluzione tradizionale di calcestruzzo armato è stata modificata nelle due configurazioni seguenti, mantenendo inalterate le caratteristiche prestazionali.

3.5.2 Muro rinforzato con macro fibre sintetiche a parziale sostituzione dell'armatura in acciaio

La soluzione tradizionale del muro in cemento armato è stata riprogettata in modo da sostituire parte dell'armatura in acciaio con macro fibre sintetiche. Il dimensionamento degli elementi di rinforzo è stato eseguito secondo le informative attualmente disponibili.

In sintesi, in questa configurazione progettuale, si prevede una sostituzione parziale dell'armatura strutturale e una sostituzione totale dell'armatura minima geometrica.

Vengono mantenute solo le barre nel paramento interno per resistere alle spinte del terreno. Sebbene il calcestruzzo con fibre possa sopportare tutte le sollecitazioni, le norme di progettazione consigliano di sostenere il momento di fessurazione della sezione.

Pertanto, viene mantenuta una minima armatura nei paramenti soggetti a trazione.

L'armatura trasversale longitudinale (verticale) è progettata per resistere ai momenti flettenti e agli sforzi di taglio attivi. Sebbene il calcestruzzo rinforzato con fibre sia in grado di resistere a tutti gli sforzi, viene fornito un minimo armamento meccanico complementare. Questo armamento è raccomandato dalle norme per eguagliare la capacità di momento di fessurazione del calcestruzzo. L'armatura longitudinale viene disposta per agevolare il montaggio, anche se nel calcolo strutturale non viene considerata per resistere alle trazioni causate dalla ritrazione e dalle variazioni termiche.

Viene proposto un dosaggio di 6 kg/m³ di macro fibra strutturale. Questo dosaggio indicativamente non richiede a priori cambiamenti nella composizione del calcestruzzo permettendo per lo specifico caso di studio di mantenere inalterata la modellazione ambientale del calcestruzzo. I risparmi di acciaio proposti superano l'80%.

Viene di seguito riportata una tabella (Tab. 5) che indica la quantità di fibra utilizzata rispetto alla massa iniziale di acciaio per metro lineare per le due tipologie di concio.

Pos	d	nb	A	B	C	L	Ltot	kg/m	kg
2	16	2	60	210	60	330	660	1,57	10,4
3	16	2	30	260	55	345	690	1,57	10,8
8	12	4	100				400	0,88	3,5
9	12	4	100				400	0,88	3,5
Totale macro fibra proposto									28,3
Totale acciaio originale									164,5
Δ%									-17,5%

Pos	d	nb	A	B	C	L	Ltot	kg/m	kg
11	16	2	60	210	60	330	660	1,57	10,4
12	16	2	50	211	30	291	582	1,57	9,1
18	12	4	100				400	0,88	3,5
17	12	4	100				400	0,88	3,5
Totale macro fibra proposto									26,6
Totale acciaio originale									152
Δ%									-17,5%

Tabella 3-5, Quantità di fibra utilizzata rispetto alla massa iniziale di acciaio per il concio di tipo 1 (sopra) e di tipo 2 (sotto).

3.5.3 Muro con sostituzione delle armature in acciaio con barre in vetroresina

In questo caso studio le barre in vetroresina sono utilizzate in sostituzione totale dell'acciaio. La tabella seguente (Tab. 6) riporta i quantitativi di barre in vetroresina impiegati nelle due tipologie di concio per garantire le medesime caratteristiche prestazionali rispetto all'armatura di acciaio.

Le barre in vetroresina sono realizzate tramite un processo continuo di pultrusione; l'elemento di rinforzo è costituito da fibra di vetro unito a resina vinilestere oppure acrilica.

Anche in questo caso di studio il dimensionamento è stato effettuato secondo le indicazioni normative disponibili e permette di ottenere le stesse prestazioni strutturali del muro nella configurazione originaria.

φ (mm)	L tot (cm)	Vetroresina		Acciaio		Δ%
		Peso (kg/m)	kg	Peso (kg/m)	kg	
12	11261	0,226	25,45	0,888	100,00	-75%
16	4091	0,402	16,45	1,578	64,56	-75%
Totale proposto			41,90		164,55	-75%

φ (mm)	L tot (cm)	Vetroresina		Acciaio		Δ%
		Peso (kg/m)	kg	Peso (kg/m)	kg	
12	10332	0,226	23,35	0,888	91,75	-75%
16	3817	0,402	15,34	1,578	60,23	-75%
Totale proposto			38,69		151,98	-75%

Tabella 3-6, Quantitativi di barre in vetroresina concio 1 (sopra) e concio 2 (sotto).

3.6 RISULTATI DELLA LIFE CYCLE ASSESSMENT E INTERPRETAZIONE

Il processo di interpretazione dei risultati è finalizzato ad analizzare criticamente quanto emerso dall'analisi ambientale condotta sull'infrastruttura, identificando le fasi e i processi più significativi dal punto di vista ambientale, al fine di determinare quali siano le azioni di miglioramento ambientale che possono essere messe in atto, in quali fasi del ciclo di vita e con quali benefici complessivi.

3.6.1 Confronto tra EPD di diversi produttori di acciaio

Vengono mostrati i risultati (Tab. 7) di cinque EPD di acciaio riportando database e software utilizzati per la redazione della certificazione ambientale di prodotto. Sono state prese in considerazione soltanto le EPD di acciai hot-rolled afferenti alla EN 15804+A2 in maniera tale che gli impatti ambientali siano espressi secondo le stesse categorie. Le EPD sono state confrontate con un acciaio hot-rolled medio europeo preso dal database Ecoinvent di SimaPro. I risultati espressi comprendono i moduli A1, A2 e A3.

Software		SimaPro 9.0	SimaPro 9.1	GaBi 2021	SimaPro 9.4.0.2	SimaPro 9.1.1.1	SimaPro 9.5.0.0
Database		Ecoinvent 3.5	Ecoinvent 3.6	GABI v.10	Ecoinvent 3.8	Ecoinvent 3.6	Ecoinvent 3.6
Tecnologia produttiva acciaio		Forno elettrico	Forno elettrico	Altoforno	Forno elettrico	Forno elettrico	Media acciaio da altoforno e da forno elettrico
Impact category	Unit	EPD 1	EPD 2	EPD 3	EPD 4	EPD 5	Ecoinvent
GWP-tot	kg CO ₂ eq	6,87E-01	6,90E-01	2,17E+00	5,87E-01	7,51E-01	1,83E+00
GWP-fos	kg CO ₂ eq	6,78E-01	6,81E-01	2,16E+00	5,87E-01	7,51E-01	1,82E+00
GWP-bio	kg CO ₂ eq	8,57E-03	8,53E-03	3,91E-03	4,71E-04	4,21E-04	1,39E-02
GWP-luc	kg CO ₂ eq	2,28E-04	2,28E-04	7,19E-04	1,38E-04	1,24E-04	1,15E-03
ODP	kg CO ₂ eq	9,88E-08	1,05E-07	5,91E-14	8,90E-08	1,04E-07	1,09E-07
AP	mol H+ eq	3,26E-03	3,23E-03	4,53E-03	2,36E-03	2,65E-03	8,87E-03
EP-fw	kg P eq	1,51E-04	1,50E-04	7,17E-07	9,63E-06	1,57E-05	1,23E-03
EP-mar	kg N eq	6,90E-04	6,83E-04	9,44E-04	6,25E-04	6,02E-04	2,00E-03
EP-ter	mol N eq	7,51E-03	7,43E-03	1,03E-02	6,94E-03	6,66E-03	1,95E-02
POCP	kg NMVOC eq	2,18E-03	2,17E-03	3,31E-03	1,89E-03	1,90E-03	8,56E-03
ADPE	kg Sb eq	3,17E-06	3,16E-06	1,87E-06	1,39E-07	2,73E-07	2,10E-05
ADPF	MJ	1,03E+01	1,03E+01	1,75E+01	9,48E+00	1,10E+01	2,08E+01
WDP	m3	1,69E-01	1,67E-01	6,46E-02	1,86E-01	2,79E+00	5,89E-01

GWP-tot: Global Warming Potential total; **GWP-fos**: Global Warming Potential fossil fuels; **GWP-bio**: Global Warming Potential biogenic; **GWP-luc**: Global Warming Potential land use and land use change; **ODP**: Depletion Potential of the stratospheric Ozone layer; **AP**: Acidification Potential; **EP-fw**: Eutrophication Potential, freshwater; **EP-mar**: Eutrophication Potential, marine; **EP-ter**: Eutrophication Potential, terrestrial; **POCP**: Formation potential of tropospheric ozone; **ADPE**: Abiotic Depletion Potential for non-fossil resources; **ADPF**: Abiotic Depletion Potential for fossil resources; **WDP**: Water Deprivation Potential.

Tabella 3-7, Impatti ambientali di 1 kg di acciaio.

Per ogni categoria di impatto, eccezion fatta per WDP, i valori maggiori, che si traducono in maggiori impatti ambientali, sono relativi all'acciaio medio europeo e all'EPD realizzata con software GABI. Entrambi descrivono in parte o completamente acciaio da altoforno;

Volendo eseguire un approfondimento sulla composizione dell'acciaio Ecoinvent, viene di seguito proposto un confronto tra acciai hot-rolled provenienti da database ecoinvent derivanti da altoforno e da forno elettrico. Si noti come la media dei valori nelle diverse categorie di impatto non equivale agli impatti ambientali dell'acciaio ecoinvent ritrovabile in tabella 7.

Questo perché, per fornire uno scenario medio globale di produzione di acciaio, il database ecoinvent considera quantità diverse di acciaio da altoforno e forno elettrico.

Inoltre, l'acciaio medio incorpora acciai prodotti in diverse parti del mondo.

La tabella seguente (Tab. 8), invece, è relativa soltanto ad acciai che rappresentano la media europea.

Impact category	Unit	forno elettrico	altoforno
GWP-tot, Climate change	kg CO ₂ eq	6,10E-01	2,47E+00
GWP-fos, Climate change - Fossil	kg CO ₂ eq	6,00E-01	2,45E+00
GWP-bio, Climate change - Biogenic	kg CO ₂ eq	9,64E-03	1,56E-02
GWP-luc, Land use and LU change	kg CO ₂ eq	6,69E-04	8,53E-04
ODP, Ozone depletion	kg CFC11 eq	6,72E-08	1,23E-07
AP, Acidification	mol H ⁺ eq	2,81E-03	1,17E-02
EP-fw*, Eutrophication, freshwater	kg P eq	3,69E-04	1,78E-03
EP-mar, Eutrophication, marine	kg N eq	6,36E-04	2,47E-03
EP-ter, Eutrophication, terrestrial	mol N eq	6,46E-03	2,59E-02
POCP, Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	2,42E-03	1,19E-02
ADPE, Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	1,31E-06	3,48E-05
ADPF, Resource use, fossils	MJ	1,05E+01	2,55E+01
WDP, Water use	m ³ depriv.	5,55E-01	7,20E-01

Tabella 3-8, Confronto impatti ambientali 1 kg acciaio ecoinvent.

3.6.2 Confronto tra opere in calcestruzzo armato

Per modellare il muro di sostegno vengono considerati gli input di massa ed energetici necessari per la produzione di calcestruzzo da abbinare agli impatti derivanti dalla produzione di acciaio che funge da armatura. Il calcestruzzo modellizzato ha un rck pari a 30 MPa e proviene da una EPD redatta secondo la EN 15804+A2.

Vengono di seguito riportati (Tab. 9) gli impatti ambientali di sei ipotetici muri di sostegno in calcestruzzo armato assemblati come sopra descritto. Le quantità di armatura e di calcestruzzo utilizzate sono la somma del concio tipo 1 e del concio tipo 2.

L'unico elemento variabile tra questi è il tipo di acciaio usato come armatura.

Impact category	Unit	Muro con acciaio da EPD 1	Muro con acciaio da EPD 2	Muro con acciaio da EPD 3	Muro con acciaio da EPD 4	Muro con acciaio da EPD 5	Muro con acciaio Ecoinvent
GWP-tot	kg CO ₂ eq	3,38E+04	3,38E+04	4,38E+04	3,31E+04	3,42E+04	4,15E+04
GWP-fos	kg CO ₂ eq	3,37E+04	3,38E+04	4,38E+04	3,31E+04	3,42E+04	4,14E+04
GWP-bio	kg CO ₂ eq	6,46E+01	6,43E+01	3,31E+01	9,84E+00	9,50E+00	1,01E+02
GWP-luc	kg CO ₂ eq	5,50E+00	5,50E+00	8,82E+00	4,89E+00	4,80E+00	1,18E+01
ODP	kg CFC11 eq	1,99E-03	2,03E-03	1,32E-03	1,92E-03	2,02E-03	2,06E-03
AP	mol H ⁺ eq	9,17E+01	9,15E+01	1,00E+02	8,56E+01	8,75E+01	1,30E+02
EP-fw	kg P eq	5,60E+00	5,59E+00	4,58E+00	4,64E+00	4,68E+00	1,29E+01
EP-mar	kg N eq	4,78E+00	4,73E+00	6,49E+00	4,34E+00	4,18E+00	1,36E+01
EP-ter	mol N eq	5,09E+01	5,03E+01	6,97E+01	4,70E+01	4,51E+01	1,32E+02
POCP	kg NMVOC eq	7,18E+01	7,17E+01	7,95E+01	6,98E+01	6,99E+01	1,15E+02
ADPE	kg Sb eq	3,79E-02	3,79E-02	2,91E-02	1,74E-02	1,83E-02	1,59E-01
ADPF	MJ	1,94E+05	1,94E+05	2,43E+05	1,88E+05	1,99E+05	2,65E+05
WDP	m3	1,64E+04	1,64E+04	1,57E+04	1,65E+04	3,42E+04	1,93E+04

GWP-tot: Global Warming Potential total; **GWP-fos:** Global Warming Potential fossil fuels; **GWP-bio:** Global Warming Potential biogenic; **GWP-luc:** Global Warming Potential land use and land use change; **ODP:** Depletion Potential of the stratospheric Ozone layer; **AP:** Acidification Potential; **EP-fw:** Eutrophication Potential, freshwater; **EP-mar:** Eutrophication Potential, marine; **EP-ter:** Eutrophication Potential, terrestrial; **POCP:** Formation potential of tropospheric ozone; **ADPE:** Abiotic Depletion Potential for non-fossil resources; **ADPF:** Abiotic Depletion Potential for fossil resources; **WDP:** Water Deprivation Potential.

Tabella 3-9, Impatti ambientali di un'opera di calcestruzzo con armatura in acciaio.

Come si può osservare dalla tabella dei risultati, e come era atteso, gli impatti associati al muro, modellato nella sua configurazione completa, variando unicamente la tipologia dell'acciaio dell'armatura, presentano lo stesso andamento di valori minimi e massimi della tabella precedente, relativa alla sola armatura in acciaio.

Diminuisce invece lo scostamento percentuale fra i valori minimi e massimi, in quanto le variazioni sono attenuate dalla presenza del calcestruzzo e dei relativi impatti.

A fronte della significativa variabilità degli impatti modellati, la categoria che descrive l'impatto al cambiamento climatico (GWP) presenta la minor variazione percentuale.

Il contributo dell'acciaio sugli impatti ambientali e con particolare attenzione al GWP per questi livelli di incidenza di armatura in un'opera in cemento armato si attesta intorno a percentuali del 12-15%, ad eccezione dell'acciaio proveniente da altoforno che contribuisce in modo più rilevante all'impatto complessivo. Si veda a tal proposito la tabella seguente (Tab. 10), che riporta l'impatto percentuale dell'acciaio sul GWP rispetto al valore del GWP dell'intero muro di sostegno.

Impact category	acciaio da EPD 1	acciaio da EPD 2	acciaio da EPD 3	acciaio da EPD 4	acciaio da EPD 5	Acciaio ecoinvent forno elettrico	Acciaio ecoinvent altoforno	acciaio Ecoinvent media ponderata
GWP-tot	14%	14%	33%	12%	15%	12%	36%	30%

Tabella 3-10, Impatto percentuale dell'acciaio sul GWP rispetto al valore del GWP dell'intero muro di sostegno.

Vengono successivamente considerate le due soluzioni con barre di rinforzo in vetroresina in sostituzione totale dell'acciaio e con macro fibre sintetiche in sostituzione parziale dell'armatura in acciaio. La frazione di acciaio rimanente è stata modellata con una delle EPD a disposizione. Gli impatti dei due materiali ricavati da risultati LCIA ed EPD fornite dai produttori sono riassunti in tabella 11. Sono espresse solo le categorie di impatto comuni per le quali sono espresse i risultati ambientali dei due materiali. I confini del sistema considerati sono l'equivalente dei moduli A1, A2, A3 di una EPD.

Categoria di impatto	Unità di misura	Macro fibre sintetiche	Barre di rinforzo in vetroresina
GWP-tot	kg CO ₂ eq	2,15E+00	3,52E+00
ODP	kg CFC11 eq	4,10E-09	5,33E-07
AP	mol H ⁺ eq	6,13E-03	2,44E-02
EP-fw	kg P eq	5,64E-05	9,88E-04
POCP	kg NMVOC eq	6,29E-03	1,83E-02
ADPF	MJ	7,37E+01	6,66E+01

GWP-tot: Global Warming Potential total; **ODP:** Depletion Potential of the stratospheric Ozone layer; **AP:** Acidification Potential; **EP-fw:** Eutrophication Potential, freshwater; **POCP:** Formation potential of tropospheric ozone; **ADPF:** Abiotic Depletion Potential for fossil resources.

Tabella 3-11, Confronto degli impatti ambientali delle due soluzioni alternative di armatura.

In tabella 12 vengono espressi i risultati ambientali dell'opera in calcestruzzo con i diversi tipi di armature. Le quantità di barre in vetroresina e macro fibre sintetiche utilizzate sono tali da garantire le medesime prestazioni dell'armatura in acciaio, come indicato in precedenza e riportato nel dettaglio in allegato.

Categorie [unità di misura]	Muro con acciaio da EPD 1	Muro con acciaio da EPD 2	Muro con acciaio da EPD 3	Muro con acciaio da EPD 4	Muro con acciaio da EPD 5	Muro con acciaio Ecoinvent	Muro con macro fibre sintetiche, sostituzione parziale	Muro con barre di rinforzo in vetroresina
GWP-tot [kg CO ₂ eq]	3,38E+04	3,38E+04	4,38E+04	3,31E+04	3,42E+04	4,15E+04	3,27E+04	3,64E+04
ODP [kg CFC11 eq]	1,99E-03	2,03E-03	1,32E-03	1,92E-03	2,02E-03	2,06E-03	1,69E-03	2,49E-03
AP [mol H ⁺ eq]	9,17E+01	9,15E+01	1,00E+02	8,56E+01	8,75E+01	1,30E+02	8,91E+01	1,24E+02
EP-fw [kg P eq]	5,60E+00	5,59E+00	4,58E+00	4,64E+00	4,68E+00	1,29E+01	4,69E+00	6,33E+00
POCP [kg NMVOC eq]	7,18E+01	7,17E+01	7,95E+01	6,98E+01	6,99E+01	1,15E+02	7,96E+01	1,05E+02
ADPF [MJ]	1,94E+05	1,94E+05	2,43E+05	1,88E+05	1,99E+05	2,65E+05	2,02E+05	2,55E+05

GWP-tot: Global Warming Potential total; **ODP:** Depletion Potential of the stratospheric Ozone layer; **AP:** Acidification Potential; **EP-fw:** Eutrophication Potential, freshwater; **POCP:** Formation potential of tropospheric ozone; **ADPF:** Abiotic Depletion Potential for fossil resources.

Tabella 3-12, Impatti ambientali di un'opera di calcestruzzo armato.

Come si può osservare dai risultati riportati in tabella, concentrandoci solo sul GWP, i valori maggiori sono associati al muro realizzato con acciaio da altoforno, mentre le soluzioni progettuali che prevedono l'utilizzo di acciaio da ciclo di scrap e la soluzione che prevede la parziale sostituzione dell'armatura con macro fibre sintetiche o l'utilizzo di barre in vetroresina, presentano valori confrontabili.

3.7 CONCLUSIONI

Come meglio descritto nei paragrafi precedenti, sono stati analizzati gli impatti associati ai materiali necessari alla realizzazione di un muro in calcestruzzo armato, confrontando diverse tipologie di armature e di rinforzi e lasciando invariato l'elemento in calcestruzzo.

Concentrandosi solo sulla categoria "Global Warming Potential (GWP)", i risultati ottenuti permettono di distinguere opere con armature a bassa emissione e opere con armature a maggiori emissioni. Le prime presentano un'armatura realizzata con acciaio da forno elettrico, fibre sintetiche o vetroresina.

Le seconde sono costituite da un'armatura di acciaio da altoforno. Infatti, escludendo le simulazioni fatte con acciaio da altoforno e da ecoinvent, che presentano i valori maggiori per questa categoria di impatto, si osserva come non ci siano variazioni significative in termini di emissioni fra le armature in acciaio da forno elettrico, le armature in vetroresina o le macro fibre sintetiche in sostituzione di parte dell'armatura in acciaio, che differiscono infatti di pochi punti percentuali.

Risulta quindi evidente come la scelta dell'armatura di rinforzo non possa essere unicamente basata sul valore del GWP, in quanto considerando le armature a "bassa emissione", le differenze non risultano significative, ma sarà necessario valutare più fattori, quali ad esempio l'ambiente in cui viene realizzata l'opera o le strategie di manutenzione o la vita utile dell'opera, ferme restando le prescrizioni riportate nelle normative vigenti e nei capitolati delle stazioni appaltanti.

Per quanto riguarda le armature in acciaio, ad esempio, un vantaggio di tipo ambientale è la riciclabilità al 100% una volta giunta a fine vita l'opera, in quanto previa demolizione si configurano come rottame ferroso e quindi materia prima principale del ciclo produttivo del forno ad arco elettrico; in tal senso l'acciaio va a costituirsi come emblema di circolarità.

Sotto altri aspetti le armature in barre di vetroresina possono offrire vantaggi rispetto a sistemi analoghi tradizionali di rinforzo, in particolare in ambienti aggressivi per le comuni armature in acciaio come gli ambienti salini, o in caso di utilizzo di cloruri antigelo, o in presenza di campi elettromagnetici. Non sono soggette a corrosione e presentano un'alta resistenza chimica, oltre ad avere maggiore leggerezza (-75% del peso rispetto all'acciaio), che può essere un vantaggio in fase di cantierizzazione. Inoltre, le barre in GFRP richiedono un minor copriferro e possono essere utilizzate senza aggiunta di additivi nel calcestruzzo o con i nuovi calcestruzzi green e possono essere utilizzate in opere con vita utile prevista di 100 anni.

Per quanto riguarda infine le fibre sintetiche, oltre al ciclo di produzione che si configura come un processo "a scarto zero" per il riutilizzo degli scarti prodotti durante la lavorazione stessa, la modalità di applicazione delle fibre risulta essere molto meno dispendiosa se paragonata a quella dei tradizionali rinforzi metallici, che richiedono dei tempi di installazione molto più lunghi.

L'eliminazione del trasporto e dell'applicazione delle reti metalliche favorisce un ulteriore risparmio di materiale da costruzione e la conseguente riduzione di emissioni di CO₂ equivalente. In aggiunta alle considerazioni sopra riportate, bisogna considerare che, per quanto riguarda la produzione dell'acciaio per le armature, il mercato italiano è basato principalmente sull'acciaio secondario e attualmente in grado di sopperire alle richieste di acciaio per armature tramite la produzione da forno elettrico (EAF). Come visto nei paragrafi precedenti, questi prodotti sono caratterizzati da bassi valori di emissioni climalteranti e confrontabili con le armature realizzate in materiali compositi. Diversa è invece la situazione europea e globale dove le percentuali di acciaio provenienti da ciclo del rottame sono molto inferiori rispetto all'Italia e provengono da acciaio primario o di altoforno, con valori di GWP molto maggiori.

Per il contesto nazionale, evitando approvvigionamenti da ciclo integrale o da mercati esteri, a maggior ragione il semplice confronto del GWP in fase di scelta della tipologia di armature o definizione di scelte costruttive non è esaustivo, ma risulta indispensabile procedere con valu-

tazioni multicriterio che prendano in considerazione più fattori, quali ad esempio l'aggressività o l'esposizione dell'ambiente in cui sarà realizzata l'opera, il rischio di corrosione, la protezione passiva delle armature, la vita utile dell'opera, gli interventi di manutenzione e gli scenari di fine vita. Altri parametri da prendere in considerazione possono essere la logistica del cantiere e le distanze di approvvigionamento, nonché i tempi di realizzazione, su cui la tipologia di armatura adottata può influire in modo importante.

Un ulteriore aspetto da tenere in considerazione nella scelta delle metodologie costruttive saranno inoltre gli aspetti legati all'accettazione dei materiali da capitolato e le relative certificazioni.

3.8 ADDENDUM NORMATIVO PER MATERIALI COMPOSITI

Le norme e le linee guida di progettazione pertinenti per il CALCESTRUZZI FIBRORINFORZATO con macro fibre sintetiche, compresa l'Italia, in Europa includono:

- *Eurocodice 2: - Parte 1-1*. Sebbene la versione attuale non includa disposizioni specifiche per il calcestruzzo fibrorinforzato (FRC), sono in corso sforzi per sviluppare un allegato per la prossima revisione.
- *Fib Model Code 2010: Model Code for Concrete Structures*. Include disposizioni per la progettazione di elementi in calcestruzzo fibrorinforzato, comprese le fibre sintetiche macro.
- *Codici Edilizi Nazionali*: Le disposizioni specifiche relative al calcestruzzo fibrorinforzato sono reperibili nella NTC Parte Seconda (Seconda Parte) - "Strutture in cemento armato, precompresso e acciaio".

Alcune altre linee guida tecniche e normative fornite da organismi internazionali come la fib (Federazione Internazionale per il Calcestruzzo Strutturale) e l'ACI (American Concrete Institute) sono anche risorse preziose e complementari da consultare per raccomandazioni dettagliate e linee guida di progettazione per il calcestruzzo rinforzato con fibre (FRC) con fibre macro sintetiche. ACI 544.1R-96: Report on Fiber-Reinforced Concrete.

- *ACI 544.3R-08*: Guide for Specifying, Proportioning, and Production of Fiber-Reinforced Concrete.
- *ACI 544.4R-18*: Design Guide for Fiber-Reinforced Concrete.
- *FIB Bulletin 56*: Design of FRC Structures.
- *Technical Report 71 (TR71)*: Guide to the Specification and Testing of Fibre-Reinforced Concrete.

Le macro fibre sintetiche costituiscono un rinforzo tridimensionale all'interno della matrice e forniscono un contributo strutturale al calcestruzzo, in accordo a quanto riportato nella norma europea EN 14889-2:2006, "Fibre per calcestruzzo. Fibre polimeriche. Definizioni, specifiche e conformità", che le definisce "ad uso strutturale".

Le vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni prescrivono che tutti i materiali e i prodotti da costruzione, quando impiegati per uso strutturale, debbano essere identificati e in possesso di specifica qualificazione all'uso previsto e debbano altresì essere oggetto di controlli in fase di accettazione da parte del direttore dei lavori (DL). A tal fine, le citate Norme prevedono che i calcestruzzi fibrorinforzati per uso strutturale debbano essere in possesso di un "Certificato di Valutazione Tecnica" rilasciato dal Presidente del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, sulla base di linee guida approvate dallo stesso Presidente.

Quando il loro utilizzo è finalizzato a migliorare le prestazioni portanti del calcestruzzo, le macro fibre sintetiche sono testate in accordo alla norma europea UNI EN 14651, che fornisce il metodo di prova per misurare la classe di tenacità dei FRC e quindi la prestazione residua che conferisce al calcestruzzo dopo la sua fessurazione.

Oggi esistono due associazioni, MSFA (Macro Synthetic Fibers Association) in Europa e FRCA (Fiber Reinforced Concrete Association) in America, all'interno delle quali aziende leader nel settore dei materiali da costruzione lavorano insieme ai progettisti e alle più riconosciute università per promuovere nel mercato gli innumerevoli vantaggi di questa tecnologia innovativa.

Le norme e le linee guida di progettazione pertinenti per il per il CALCESTRUZZO ARMATO CON BARRE IN GFRP includono:

- *Eurocodice 2: - Annex JA – Embedded FRP Reinforcement.* L'attuale documento include un'intera appendice relativa al dimensionamento di sezioni in cemento armato rinforzate con barre in GFRP.
- *Fib Model Code 2010: Model Code for Concrete Structures.* Include disposizioni per la progettazione di elementi in calcestruzzo armato, rinforzato con barre GFRP.
- *Codici Edilizi Nazionali:* le disposizioni specifiche relative al cemento armato rinforzato con barre in GFRP sono reperibili nei riferimenti che le NTC fanno a documenti di comprovata validità fra cui le linee guida emesse dal CNR. In particolare, il documento CNR-DT 203-2006, ora in fase di revisione, Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione e il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Armato con barre di Materiale Composito Fibrorinforzato.

A livello europeo vi sono poi altri documenti oggi disponibili redatti da altri organismi a livello nazionale che forniscono indicazioni preziose su come progettare elementi in cemento armato rinforzato con tondini in GFRP. Fra questi va sicuramente menzionata la recente pubblicazione del genio civile francese AFGC dal titolo "Recommendations for the use of FRP (Fiber Reinforced Polymer) rebars for reinforced concrete structures" di gennaio 2023. Tale documento ha visto il contributo di un folto gruppo di lavoro non solo francese ma aperto a tutti gli esperti del settore e produttori a livello internazionale di barre in GFRP.

L'organismo internazionale FIB (Federazione Internazionale per il Calcestruzzo Strutturale) e l'ACI (American Concrete Institute) sono altresì associazioni molto importanti che nel corso degli anni hanno redatto e stanno lavorando su documenti di progettazione di riferimento nel settore. In particolare, si ricordano:

- *ACI CODE 440.11-22* Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Bars – Code and Commentary
- *ACI SPEC 440.5-22* Construction with Glass Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars – Specification
- *AASHTO LRFD* Bridge Design Guide Specifications for GFRP-Reinforced Concrete, Second Edition, 2018
- *FIB Bulletin 40*: FRP reinforcement in RC structures ISBN 978-2-88394-080-2, September 2007. Attualmente in revisione.
- *Technical Report 63 (TR63)*: Design Guidance for the Use of Fibre Reinforced Polymer Composites in Reinforced Concrete Structures.

Così come per le macro-fibre, le vigenti NTC, al capitolo 11 prescrivono che tutti i materiali e i prodotti da costruzione, quando impiegati per uso strutturale, debbano essere identificati e in possesso di specifica qualificazione all'uso previsto e debbano altresì essere oggetto di controlli in fase di accettazione da parte del direttore dei lavori (DL).

A tal fine, le citate Norme prevedono che le armature in GFRP per uso strutturale debbano essere in possesso o della marcatura CE attraverso ETA oppure di un "Certificato di Valutazione Tecnica" rilasciato dal Presidente del CSLLPP, sulla base di linee guida approvate dallo stesso Presidente.

Ad oggi per rispondere quindi ai requisiti richiesti dalle norme nazionali sono disponibili l'EAD 17-26-0023-03.01 "Carbon, glass, basalt and aramid FRP (Fibre Reinforced Polymer) bars as reinforcement of structural elements" che permette di conseguire la certificazione ETA e, non appena l'EAD verrà pubblicata sulla gazzetta europea OJEU, ottenere la marcatura CE del prodotto, e la "Linea Guida per l'Identificazione, la Qualificazione e l'Accettazione di Barre e Staffe in Composito Fibrorinforzato per uso strutturale" pubblicate con decreto del presidente del CSLLPP in data 16-02-22 che permette di conseguire il CVT per uso nazionale

Una ulteriore precisazione può essere fatta per le barre in GFRP per le quali valgono dei riferimenti bibliografici specifici.

3.9 BIBLIOGRAFIA

- [1] Buzzi Unical (2018): “Dossier di prequalifica”.
- [2] www.ecoinvent.org.
- [3] CHANH, N.: “STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE”.
- [4] Decreto CSSLPP 21 luglio 2022, n. 258 (linee guida FRC)
- [5] Federacciai (2019): “Rapporto di sostenibilità”
- [6] Frazão, C., Barros, J., Bogas, J.A., García-Cortés, V., Valente, T. (2022): “Technical and environmental potentialities of recycled steel fiber reinforced concrete for structural applications”.
- [7] Goedkoop, M., Oele, M., Leijting, J., Poensioen, T., Meijer, E. (2016): “Introduction to LCA with SimaPro”.
- [8] Hauschild, M., Rosenbaum, R., Olsen, S (2018): “Life Cycle Assessment. Theory and Practice”.
- [9] Liew, K.M., Akbar, A. (2020): “The recent progress of recycled steel fiber reinforced concrete”.
- [10] “LOW CARBON - ROADMAP PATHWAYS TO A CO2-NEUTRAL EUROPEAN STEEL INDUSTRY (2019)”.
- [11] Qin, X., Kaewunruen, S. (2022): “Environment-friendly recycled steel fibre reinforced concrete”.
- [12] Romagnoli, F.: “LCA modelling on bioenergy systems: overview and practical exercises using SIMAPRO software”.
- [13] “Steel, the Backbone of Sustainability in Europe”.
- [14] Supino, S., Malandrino, O., Testa, M., Sica, D. (2023): “Sustainability in the EU cement industry: the Italian and German experiences”.
- [15] Tuladhar, R., Yin, S. (2022): “Use of Recycled Plastics in Eco-efficient Concrete”.
- [16] Wang, G.C. (2022): “Electric Arc Furnace – slag use in asphalt paving”.

[17] 9.1 Dichiarazioni ambientali di prodotto e note tecniche

[18] AlfaAcciai (2021): “ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION - HOT-ROLLED REINFORCING STEEL FOR CONCRETE IN BARS AND COILS”. – Pubblicata in EPDIItaly (www.epditaly.it)

[19] Calcestruzzi S.p.A. - HeidelbergCement Group (2022): “Dichiarazione Ambientale di Prodotto”.

[20] Feralpi siderurgia S.p.A. (2022): “ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION - HOT-DRAWN REINFORCING STEEL FOR CONCRETE IN BARS AND COILS”. – Pubblicata in EPDIItaly (www.epditaly.it)

[21] FERRIERE NORD S.p.A. (2022): “ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION - ACCIAI LAMINATI A CALDO TONDO IN ROTOLI, TONDO IN BARRE”. – Pubblicata in EPDIItaly (www.epditaly.it)

[22] FERRIERE NORD S.p.A. (2022): “ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION - ACCIAI LAMINATI A CALDO VERGELLA”. – Pubblicata in EPDIItaly (www.epditaly.it)

[23] Mapei (2022): “ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION - MAPEFIBRE ST40 PLUS”.

[24] Mapei (2023): “Sostituzione parziale dell’armatura del muro in calcestruzzo fibrorinforzato con macro fibra sintetica”.

[25] Sireg (2020): “RISULTATI LIFE CYCLE ASSESSMENT BARRE DI RINFORZO IN VETRO-RESINA”.

[26] Voestalpine AG (2021): “ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION - Hot-rolled steel strip voestalpine Stahl GmbH”.



Parte quarta

**La metodologia della
Life Cycle Assessment
applicata ai
conglomerati bituminosi
per le infrastrutture**

4. La metodologia Life Cycle Assessment applicata ai conglomerati bituminosi per le infrastrutture

4.1 INTRODUZIONE

Questa sezione si pone come obiettivo la caratterizzazione del processo di valutazione dell'impatto ambientale delle pavimentazioni stradali e nello specifico degli strati più superficiali generalmente realizzati in conglomerato bituminoso.

Per un materiale così diverso a seconda del mix design, delle modalità produttive o del sito di produzione rispetto ad uno specifico luogo di approvvigionamento di alcune materie prime, il gruppo ha ritenuto prioritario focalizzare i lavori su un manuale di facile lettura, volto a fornire i parametri necessari per una corretta caratterizzazione LCA.

In assenza di una Product Category Rules (PCR) nazionale, l'LCA di una pavimentazione o della singola miscela potrebbe portare a dati discordanti a seconda delle ipotesi di partenza e dell'inventario utilizzato. Servirebbe una visione d'insieme sul prodotto e sulla sovrastruttura per capire cosa ha veramente un peso sull'ambiente, senza trascurare anche gli aspetti di durata, le esigenze funzionali e tutti gli aspetti manutentivi e il trattamento dei materiali a fine vita utile.

Senza scendere nelle trattazioni tecniche, vengono qui discusse le principali differenze in termini di impatto ambientale tra diversi prodotti e tecnologie analizzando il problema non solo dal punto di vista della singola miscela ma anche a livello di sovrastruttura stradale (strati di conglomerato bituminoso appartenenti a miscele diverse).

Lo studio è focalizzato sulle fasi iniziali del ciclo di vita, con i moduli A1-A5, ma si presentano interessanti spunti di approfondimento per i restanti aspetti fino al raggiungimento della fine vita utile per la sovrastruttura.

Si presenta inoltre, in parallelo alla descrizione del prodotto, una discussione di metodologie, schematizzazioni e tool di calcolo dell'impatto ambientale per evidenziare limiti e semplificazioni che molti strumenti richiedono.

Ai fini di un possibile sviluppo di uno studio LCA, di una PCR e di una conseguente Dichiarazione Ambientale di Prodotto (EPD), con riferimento alle regole del Program Operator EPDItaly, il conglomerato bituminoso può identificarsi come prodotto da costruzione ed è comunemente individuato all'interno degli studi LCA con il codice 3794 "Bituminous mixtures based on natural and artificial stone materials and bitumen, natural asphalt or related substances as a binder" estrapolato dalla classificazione internazionale *Central Product Classification (CPC) Version 2.1* delle Nazioni Unite.

Il presente studio ha lo scopo di analizzare il conglomerato bituminoso dal punto di vista degli impatti ambientali senza valutare gli aspetti tecnici per i quali si rimanda alle norme di progettazione specifiche e alle indicazioni fornite dai Capitolati Tecnici di riferimento.

4.2 GLOSSARIO

PCR	Product Category Rule: Regole di categoria di prodotto, ovvero serie di regole, requisiti e linee guida specifici per lo sviluppo di dichiarazione ambientali di tipo III per una o più categorie di prodotto (UNI EN ISO 14025:2010 – par. 3.5)
LCA	Life Cycle Assessment: Valutazione del ciclo di vita, ovvero la compilazione e valutazione attraverso tutto il ciclo di vita degli elementi in ingresso e in uscita, nonché i potenziali impatti ambientali di un sistema prodotto (UNI EN ISO 14040:2010 – par. 3.1)
EPD	Environmental Product Declaration: dichiarazione ambientale in grado di fornire informazioni ambientali quantificate espresse attraverso indicatori predefiniti (UNI EN ISO 14025:2010)
A1	Modulo relativo all'estrazione e lavorazione delle materie prime, lavorazione delle materie seconde in ingresso (UNI EN 15804)
A2	Modulo relativo al trasporto al sito di produzione (UNI EN 15804)
A3	Modulo relativo alla produzione (UNI EN 15804)
A4	Modulo relativo al trasporto in cantiere (UNI EN 15804)
A5	Modulo relativo alla messa in opera (UNI EN 15804)
HMA	Hot Mix Asphalt
WMA	Warm Mix Asphalt
CMA	Cold Mix Asphalt
CBC	Granulato di Conglomerato Bituminoso

4.3 CONGLOMERATO BITUMINOSO: DESCRIZIONE DEL PRODOTTO

Il materiale in analisi è un prodotto da costruzione che appartiene alla famiglia delle miscele bituminose da utilizzare nella realizzazione di strade, aeroporti, ferrovie (subballast) ed altre aree soggette a traffico. Il prodotto è qualificato e idoneo all'impiego ai sensi del Regolamento prodotti da costruzione (CPR 305/11).

Il conglomerato bituminoso (CB) è, per definizione, una “Miscela omogenea tipicamente composta da aggregati fini e grossi, filler e legante bituminoso che è utilizzata nella costruzione di una pavimentazione” [1]. Tale materiale presenta delle caratteristiche differenti per corrispondere alle specifiche esigenze, in base al posizionamento nella sezione della sovrastruttura.

I materiali costituenti del conglomerato bituminoso sono:

- aggregati (naturali, industriali e riciclati);
- legante bituminoso (bitume tal quale, bitume modificato con polimeri, emulsione bituminosa);
- granulato di conglomerato bituminoso (GCB);
- additivi funzionali.

I materiali costituenti devono essere qualificati con specifiche tecniche armonizzate (norme armonizzate o approvazioni tecniche europee) o, in assenza di tali specifiche, devono essere qualificati attraverso attività di ricerca e sperimentazione in scala reale. La tabella 1 riporta l'elenco dei materiali costituenti del conglomerato bituminoso con indicazione del tipo e delle norme di riferimento per la loro qualificazione.

MATERIALE COSTITUENTE	TIPO	NORMA DI QUALIFICAZIONE
Aggregato	Naturale (primo impiego)	UNI EN 13043
	Industriale	UNI EN 13043
Granulato di conglomerato bituminoso	Materiale riciclato proveniente dal trattamento del conglomerato bituminoso fresato	UNI EN 13108-8 D.Lgs.152/2006 UNI/TS 11688/2017
Legante bituminoso	Bitume tal quale	UNI EN 12591
	Bitume modificato con polimeri	UNI EN 14023
	Emulsione bituminosa	UNI EN 13808
Additivi funzionali	Antighiaccio, antikerose, antirumore/antivibrazione, attivante d'adesione, flussante, rigenerante, termoregolatore, schiumogeno, incremento strutturale, stabilizzante, colorante, antiossidante	UNI 11837

Tabella 4-1, Materiali costituenti del conglomerato bituminoso.

Il tipo di materiale costituente ed il relativo dosaggio sono definiti mediante progettazione in laboratorio della miscela (mix design) sottoposta a procedimento di validazione con verifica di conformità dei requisiti. Si prevede l'impiego tra gli aggregati non solo di materiale naturale ma anche di aggregati industriali, ovvero sottoprodotti o materiali ottenuti da operazioni di recupero e trattamento dei rifiuti provenienti da altre filiere produttive (e.g. aggregati da industria siderurgica) o aggregati di riciclo (granulato di conglomerato bituminoso derivante dalla demolizione delle vecchie pavimentazioni o dal recupero di produzioni non conformi).

4.3.1 Classificazione

In generale il conglomerato bituminoso può essere classificato in base ai seguenti criteri:

- *strati di impiego nella sezione della pavimentazione* (base, collegamento o binder, risagomatura, superficiale di usura);
- *norme di prodotto EN 13108*;
- *temperatura di produzione* (Hot Mix Asphalt (HMA) – Warm Mix Asphalt (WMA) – Cold Mix Asphalt (CMA));
- *contenuto di vuoti residui* (e.g. conglomerati ad elevato tenore di vuoti come i drenanti).

4.4 PRODUZIONE

La produzione di miscele bituminose avviene in appositi impianti realizzati con strutture metalliche e suddivisi in sezioni dedicate per le funzioni di processo: alimentatori e dosatori degli aggregati, alimentatori e dosatori degli additivi, linee di alimentazione e dosaggio del granulato di conglomerato bituminoso, forno essiccatore e gruppo di depolverazione, gruppo di riclassificazione e dosaggio, miscelatore (non presente negli impianti di tipo continuo), sili di stoccaggio del prodotto finito, serbatoi di deposito dei leganti bituminosi, cabina di controllo per la conduzione automatizzata del processo.

In generale i materiali costituenti sono inseriti nell'impianto con apposite linee di alimentazione e miscelati in un miscelatore chiuso (impianti discontinui) o in camera di miscelazione aperta (tamburo - impianti continui). Nella produzione a caldo (HMA) e a temperature ridotte (WMA) gli aggregati sono essiccati e riscaldati, mentre nella produzione a freddo (CMA) gli aggregati sono impiegati a temperatura ambiente.

I leganti utilizzati sono opportunamente riscaldati in base al tipo e all'impiego.

I prodotti finali sono depositati in appositi sili coibentati o sono scaricati direttamente nei cassoni degli autocarri adibiti al trasporto presso il cantiere di stesa (consegna del prodotto).

Nel caso delle miscele prodotte a caldo (HMA) il materiale deve essere consegnato e steso entro determinate temperature in base alla tipologia (e.g. conglomerato con bitume tal quale o con bitume modificato – conglomerato con o senza additivi funzionali termoregolatori). Nel caso di miscele prodotte a freddo (CMA) il materiale deve essere steso nei tempi previsti dal tipo di legante utilizzato (e.g. emulsione bituminosa sovrastabilizzata a lenta rottura).

4.5 IL QUADRO NORMATIVO

La redazione di una valutazione di impatto ambientale per i conglomerati bituminosi (CB) richiede sicuramente una conoscenza accurata del prodotto oggetto di studio ma anche l'utilizzo di regole di categoria di prodotto (Product Category Rules - PCR) a cui i diversi produttori devono attenersi nel condurre l'analisi del ciclo di vita (LCA). Solo con una valutazione scientifica e rigorosa e l'asseverazione del metodo da parte di un ente terzo è possibile arrivare ad una certificazione ambientale di prodotto (Environmental Product Declaration - EPD).

Nonostante la redazione di EPD sia molto comune nel settore delle costruzioni, come ad esempio nel caso dei calcestruzzi o degli acciai, per i conglomerati bituminosi manca alla data odierna una PCR di settore.

Le EPD ad oggi pubblicate per i conglomerati bituminosi si attengono alla PCR per prodotti da costruzione [22]; se da un lato questo permette di avere EPD certificate e condivise sulle piattaforme dei maggiori program operator, dall'altro rende complicato avere una valutazione univoca e i risultati di prodotti diversi spesso non sono confrontabili. Il processo produttivo, le modalità di trasporto ma soprattutto i moduli relativi alle fasi di utilizzo richiedono una specializzazione per tale prodotto che la norma più generale non prevede.

Se si guarda ad esempio alle PCR disponibili per conglomerati bituminosi da cui le EPD sopra citate fanno riferimento, sia a livello europeo che internazionale [3; 4] si nota come la metodologia proposta sia destinata ai soli conglomerati bituminosi prodotti e stesi con metodi "tradizionali". Risultano quindi esclusi tutti i materiali con legante bituminoso il cui processo produttivo prevede la miscelazione in sito, come nel caso dei riciclaggi a freddo, i trattamenti superficiali e tutti quei prodotti autocostipanti che non prevedono le operazioni di stesa e rullaggio tradizionali (conglomerato bituminoso in sacchi – tappa buche).

Inoltre, la PCR per i materiali da costruzione manca di alcune considerazioni necessarie per caratterizzare i CB durante i moduli B1-B7 relativi alle fasi di utilizzo. In assenza di considerazioni specifiche per lo scenario italiano, si osserva la diffusione di EPD relative alla sola fase di produzione (moduli A1-A3) secondo la EN 15804 fino all'aggiornamento EN 15804:2012+A2:2019+AC del 2021 che quindi perdono di vista il comportamento a lungo termine e soprattutto il fine vita e i benefici oltre i confini del sistema.

Per chiarire meglio tale punto si può prendere a riferimento una miscela tradizionale, paragonata con un CB realizzato con aggregati di riciclo; il “risparmio” da un punto di vista ambientale correlato all’utilizzo dell’aggregato da riciclo in miscela può essere correttamente valutato solo se si estende l’LCA all’intero ciclo di vita. Il conglomerato bituminoso è infatti totalmente reimpiegabile come GCB nelle nuove produzioni secondo prescrizioni e quantità regolate dai capitolati; l’aggiunta di materiale di riciclo può modificare questo approccio variando sensibilmente le valutazioni.

Per tali motivi, sottolineando l’importanza di una PCR italiana per i conglomerati bituminosi che possa costituire la regola da seguire in tutte le LCA di tali prodotti, si presenta di seguito una sintesi dei principali fattori da tenere in conto per i conglomerati bituminosi per i moduli che caratterizzano le prime fasi del ciclo di vita, seguiti da alcune considerazioni sulle prestazioni e su approcci a livello di sovrastruttura.

Si conclude inoltre con una raccolta dei principali riferimenti per la caratterizzazione di impatto ambientale dei materiali costituenti il conglomerato bituminoso.

4.6 ANALISI DELLE DIFFERENZE IN TERMINI DI IMPATTO AMBIENTALE

Il conglomerato bituminoso è per sua natura un materiale complesso, costituito da molteplici ingredienti che si combinano attraverso processi e con miscele finali aventi prestazioni molto diverse. Per questo la caratterizzazione di impatto ambientale risulta essere molto complessa; se però si introducono semplificazioni riducendo la complessità dello studio si rischia di avere valutazioni molto simili di prodotti fortemente diversi.

Obiettivo di questo paragrafo è analizzare da un punto di vista teorico quelle che sono le principali differenze in termini di impatto ambientale per una miscela di conglomerato bituminoso. Seguiranno quindi considerazioni tecniche sui limiti che i software di analisi LCA introducono rispetto al quadro complesso di fattori e variabili di seguito riportati.

I principali fattori che devono essere considerati per una corretta LCA di un conglomerato bituminoso sono:

- o Composizione
- o Movimentazione delle quantità o Processi di produzione
- o Trasporto
- o Posa

Si riporta di seguito una breve descrizione di tutte le voci sopra citate, mentre informazioni concernenti gli interventi manutentivi e la connessa durabilità della pavimentazione, nonché il fine vita, verranno dettagliate nel capitolo seguente.

4.6.1 Composizione- A1

La scelta dei materiali costituenti rappresenta il punto di partenza per la composizione di una miscela di conglomerato bituminoso. È possibile distinguere tali materiali in:

- Aggregati naturali
- Aggregati riciclati
- Aggregati industriali o artificiali
- Leganti bituminosi (tal quali o modificati)
- Additivi

Per aggregati riciclati si intende il materiale proveniente dal recupero, smaltimento e trattamento di rifiuti. Rientrano in tale gruppo anche i granulati tipo C&D che trovano applicazione negli strati più profondi di fondazione.

Nella categoria degli aggregati industriali o artificiali si considerano invece le risultanze di alcuni processi di recupero industriali. Per questi materiali ha un peso significativo, nella valutazione di impatto ambientale, non solo la distanza ma anche la massa volumica dell'aggregato che risulta essere molto elevata e quindi impattante nelle quantità da movimentare, considerando i limiti di carico dei mezzi di trasporto. Lavorare con miscele composte da questi aggregati rende però più semplice il calcolo LCA poiché l'ambito industriale ha un maggior controllo sulle fasi produttive e anche gli aggregati artificiali sono spesso accompagnati da EPD, semplificando di molto le operazioni di elaborazione dati e fornendo direttamente dei numeri da inserire come input nella caratterizzazione di impatto ambientale della miscela. Purtroppo, in taluni casi l'uso dell'EPD potrebbe risultare controproducente quando per gli altri materiali si utilizzano input derivanti da database che normalmente considerano processi medi non specifici. A causa di ciò, un prodotto i cui impatti ambientali sono certificati tramite EPD, potrebbe erroneamente passare per "più impattante". Infatti, per gli aggregati naturali, in assenza di EPD, si utilizzano i dati provenienti da database certificati o fonti bibliografiche, come descritto nei successivi paragrafi. Questo penalizza molto le differenze effettive; se si guarda alla sola fase produttiva dell'aggregato, i flussi in uscita dei processi di frantumazione, selezione granulometrica e movimentazione variano sensibilmente a seconda della natura mineralogica (roccia o detrito), della produzione (granulato da cava o sottoprodotto) e delle caratteristiche dell'aggregato (materiale più o meno duro oppure resistente all'abrasione).

Particolare attenzione merita anche la valutazione del granulato di conglomerato bituminoso, ad oggi comunemente impiegato nei CB, affinché vengano conteggiati in modo corretto gli impatti attribuibili alle fasi di selezione e frantumazione di tale materia prima seconda.

Si rimanda al paragrafo relativo alle fasi di fine vita per ulteriori considerazioni.

4.6.2 Movimentazione delle quantità – A2

Nel calcolo LCA riveste un ruolo fondamentale la provenienza delle materie prime, in quanto l'impatto delle distanze effettive tra il sito di produzione e l'impianto, che incide direttamente nel modulo A2 di approvvigionamento (UNI EN 15804), è sicuramente uno dei fattori primari da considerare. Nonostante questa premessa, nella scelta dei componenti del conglomerato bituminoso non si può escludere un materiale perché proveniente da un unico sito molto distante dall'impianto di produzione, in quanto entrano in gioco altri fattori come, ad esempio, le prestazioni finali del prodotto. Queste valutazioni sulla movimentazione si riferiscono generalmente ai soli aggregati, che per le percentuali impiegate nella produzione dell'unità funzionale di conglomerato bituminoso, hanno un peso molto rilevante. L'aggregato, infatti, rappresenta da solo circa il 95% in peso della miscela. D'altro canto, l'aggiunta di un additivo (0,2-0,6% sulla miscela), pur avendo alle spalle un processo produttivo industriale con flussi totalmente diversi, contribuisce con una percentuale molto ridotta.

4.6.3 Processi di produzione – A3

Per i conglomerati bituminosi la scelta del processo produttivo, con diverse temperature di riscaldamento dei componenti e successiva miscelazione, modifica l'impatto ambientale. Questo però non giustifica l'impiego in ogni caso di tecnologie warm o cold.

4.6.4 Trasporto e posa – A4 e A5

Nelle fasi di trasporto tutte le miscele si comportano allo stesso modo, almeno che non siano additivate per trasporti per lunghe distanze, dove la lavorabilità è garantita anche sino a 6 ore. Possono fare la differenza i combustibili impiegati nell'alimentazione delle macchine, nonché la categoria (EURO) di mezzo utilizzato. Le distanze possono giocare un ruolo importante nei risultati finali di una LCA, a seconda della loro grandezza. Per quanto riguarda la posa in opera, vanno considerati gli impatti relativi all'utilizzo dei macchinari necessari alla realizzazione della pavimentazione (i.e. compattatore). Questi differiscono in base alla tipologia di miscela da stendere, se a caldo o a freddo, con conseguente variazione dei consumi. Per esempio, per una miscela a freddo vengono spesso utilizzati due diversi compattatori e, talvolta, il cosiddetto "treno di riciclaggio" quando la miscelazione del nuovo conglomerato è svolta direttamente in situ.

4.6.5 Circolarità della miscela

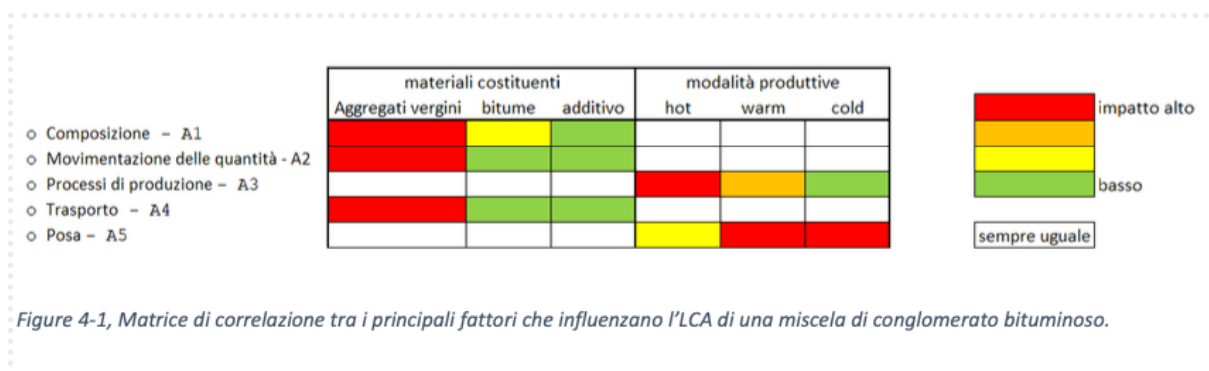
Come previsto dalle norme di riferimento, per i conglomerati lo studio LCA deve estendersi fino alle fasi finali del ciclo di vita. Nelle valutazioni di impatto ambientale risulta quindi fondamentale tenere in considerazione i materiali che costituiscono la miscela bituminosa e quindi il riutilizzo a

fine vita utile. Una volta che la pavimentazione viene dismessa, è possibile riciclarla per ottenere il GCB (in gergo fresato) che andrà a sostituire parte del materiale vergine della nuova miscela da produrre, riducendo notevolmente gli impatti. Ai fini del calcolo dell’LCA, in questi casi, è fondamentale evitare che avvenga un doppio conteggio legato alla produzione di fresato nel modulo di produzione della nuova miscela (A3) con granulato d’asfalto; è infatti suggerito di conteggiare solo il contributo energetico legato al riscaldamento del GCB per la miscelazione con gli inerti vergini [5], mentre si assegna ai moduli B e C del precedente ciclo di vita l’effettiva rendicontazione delle operazioni di demolizione e fresatura.

Non da ultimo occorre valutare il modulo D che tiene conto dell’impatto dei processi di riciclo dallo stato End of Waste (EoW) ed i benefici (“impatto evitato”) della sostituzione dei materiali primari.

4.6.6 Conclusioni

Quanto precedentemente esposto si può riassumere nella seguente matrice (figura 1):



La schematizzazione sopra riportata omette, tra i materiali costituenti, l’aggregato riciclato poiché l’impatto è fortemente variabile a seconda della tipologia e non è possibile fare una generalizzazione. Si precisa inoltre che l’impatto per il modulo A1 è commisurato sulle % di presenza nella miscela.

Trattandosi di una schematizzazione inoltre, la modalità produttiva cold si riferisce ad un riciclaggio a freddo che avviene in impianto. Questo perché, se realizzato in sito, le emissioni ed i costi energetici di trasporto sono notevolmente ridotti, poiché l’80-90% del materiale, e cioè il fresato, è già nel cantiere. L’acqua per l’impasto inoltre può essere presa nelle vicinanze del sito di stesa. L’unica spesa è da attribuire al trasporto del filler di aggiunta (4-5% sul peso totale della miscela), al cemento (2% in peso sulla miscela) e al legante (4-4.5%, emulsione bituminosa). Si tratta quindi di considerazioni specifiche per le miscele ed associate alle prime fasi del ciclo di vita; si rimanda ai successivi paragrafi per una trattazione più ampia dell’impatto ambientale per quanto riguarda la pavimentazione stradale nel suo insieme.

4.7 LCA DI UNA PAVIMENTAZIONE FLESSIBILE

Se fino ad ora è stato trattato il tema dell’impatto ambientale delle miscele bituminose, con considerazioni sui parametri che maggiormente concorrono ad incrementare i benefici ambientali di tale prodotto, studiando le combinazioni e gli aspetti più rilevanti, non possono essere omesse delle considerazioni per l’intera pavimentazione. In questo paragrafo viene presentato il tema per quanto riguarda le pavimentazioni flessibili, realizzate in conglomerato bituminoso. Se infatti l’LCA è utilizzata come strumento di comparazione tra diverse soluzioni progettuali, agli aspetti tipici delle miscele si aggiungono ulteriori parametri da valutare. Ci si trova infatti spesso davanti a sovrastrutture molto diverse sia nella scelta delle singole miscele componenti gli strati ma anche con diversi spessori o diverse fasi costruttive. Quando si parla di analisi LCA per un pacchetto di pavimentazione, occorre considerare quindi tutte le variabili in gioco ed il metodo di calcolo deve prevedere una “taratura” dell’analisi che possa assicurare un facile confronto tra i risultati.

L’unità funzionale smette di essere la tonnellata di miscela; a livello di progetto, l’LCA può strutturare confronti utilizzando come riferimento un m² di pavimentazione, comprensiva degli strati oggetto dell’analisi, o l’esatto volume di CB da produrre, a parità di vita utile [6].

Resta valido quanto sopra riportato per le miscele, evidenziando che il conteggio dell’impatto ambientale relativo ai moduli A4 e A5 viene effettivamente calcolato non più su parametri medi ma sul caso specifico analizzato.

Senza entrare nel merito dei singoli fattori, si riporta di seguito una lista dei parametri aggiuntivi che concorrono nella stima di una LCA di una pavimentazione in conglomerato bituminoso:

Processi manutentivi VS durabilità (esigenza strutturale, funzionale o di vita utile)

La strategia manutentiva, direttamente connessa alle caratteristiche dei materiali scelti ed in particolar modo alla durabilità, influenza notevolmente gli impatti del ciclo di vita della pavimentazione. Basti pensare, infatti che nell’arco della vita utile di una pavimentazione, tradizionalmente gli interventi manutentivi relativi alla sostituzione dello strato di usura o di binder si ripetono con cadenza quinquennale (il primo) o decennale (il secondo) e che ad ognuno di questi interventi corrisponde sempre la produzione della miscela (A1-A3) e successiva messa in opera, con le conseguenti emissioni in atmosfera. Per questo è consigliabile optare per delle tecnologie innovative più performanti nella scelta dei materiali componenti una pavimentazione stradale così da permettere la riduzione degli interventi manutentivi.

Durabilità

Il conglomerato bituminoso risulta un materiale complesso anche nella valutazione delle sue prestazioni. Definendo come durabilità la capacità di una struttura di sopravvivere e di fornire

le prestazioni richieste per tutta la sua vita, appare evidente come l'opportuna scelta degli elementi costituenti una miscela influenzi tale capacità e quindi i successivi interventi di manutenzione con importanti ripercussioni sugli impatti ambientali relativi ai moduli C e conseguente riciclo.

Si riportano di seguito (tabella 2) i principali elementi, sia intrinseci alla miscela che dovuti all'ambiente esterno, che influenzano in modo più rilevante la durabilità di un conglomerato bituminoso.

Elemento	Proprietà
Aggregati	Porosità
	Mineralogia, forma e tessitura superficiale degli aggregati
	Rivestimenti superficiali degli inerti e la presenza di polvere
	Area superficiale e proprietà di assorbimento
	Grado di esposizione agli agenti atmosferici e contenuto di umidità
	Valore di abrasione degli aggregati e loro pH
	Additivi e la storia dell'esposizione degli aggregati utilizzati
Bitume	Composizione e provenienza del bitume
	Parametri di esposizione agli agenti atmosferici
	Tempo di polimerizzazione ed effetti dell'ossidazione
	Utilizzo di additivi
	Polarità elettrica (anionic & cationic)
Mix design	Tipologia (caldo & freddo)
	Incorporazione di additivi
	Per il filler: tipologia (e.g., calcareo o siliceo), granulometria, e % di presenza
Influenze esterne	pH dell'acqua
	Effetti della temperatura
	Progettazione e lavorazione
	Drenaggio
	Traffico
	Spargimento di sale durante le operazioni di manutenzione invernale
	Umidità relativa
Precipitazioni annuali, luce, calore e radiazioni	

Tabella 4-2, Principali elementi che influenzano in modo più rilevante la durabilità di un conglomerato bituminoso.

In letteratura si riscontrano inoltre alcuni tentativi di correlazione tra la durabilità di una pavimentazione, gli aspetti economici e gli impatti ambientali.

Ne è un esempio l'indice EAR [77], primo tentativo di correlare gli impatti ambientali e le prestazioni delle miscele bituminose all'interno di un unico indice. Si trovano inoltre molti esempi di modelli e progetti sviluppati come supporto alle autorità stradali nelle fasi di gara per guidare sia la scelta dei materiali che i processi costruttivi. Rientrano in questo gruppo il progetto EDGAR [8] finanziato dalla comunità europea che combina aspetti ambientali con fattori socio-economici, ed i modelli LICCER e EFFEKT [99,10], sviluppati con l'obiettivo di supportare le autorità stradali nella scelta della migliore tecnologia e strategia disponibile con il minor impatto sia sociale che ambientale.

4.7.1 Fase di uso (B)

La fase di uso è quella che, a livello di progetto, impatta maggiormente nel ciclo di vita di una pavimentazione [11]. Comprende tutte le emissioni dovute all'utilizzo della stessa (i.e. emissioni dovute all'interazione veicolo/pneumatico o all'effetto albedo o alle isole di calore), nonché tutti gli interventi necessari a garantire le prestazioni funzionali e meccaniche della pavimentazione (manutenzione ordinaria e straordinaria).

Queste ultime sono legate ad interventi minori, quali la sigillatura delle fessure o i trattamenti per garantire la porosità dello strato di usura, ma anche gli interventi maggiori, come la sostituzione degli strati che compongono la pavimentazione. In quest'ultimo caso, risulta necessario considerare tutti gli impatti legati alla produzione delle nuove miscele e alla posa in opera delle stesse.

Come evidenziato in [12], emergono dei gaps o delle incoerenze tra i vari studi. Si suggerisce di tenere in considerazione l'albedo, l'illuminazione, la resistenza al rotolamento, e alla fase di costruzione e successiva manutenzione anche il rallentamento nel traffico dovuto al cantiere.

4.7.2 Fine vita (C)

Il fine vita della pavimentazione o di una delle sue componenti corrisponde alla demolizione e al conseguente trasporto. Il materiale può quindi essere lasciato a discarica, trasformandosi in semplice rifiuto, o essere riciclato ed in seguito riutilizzato.

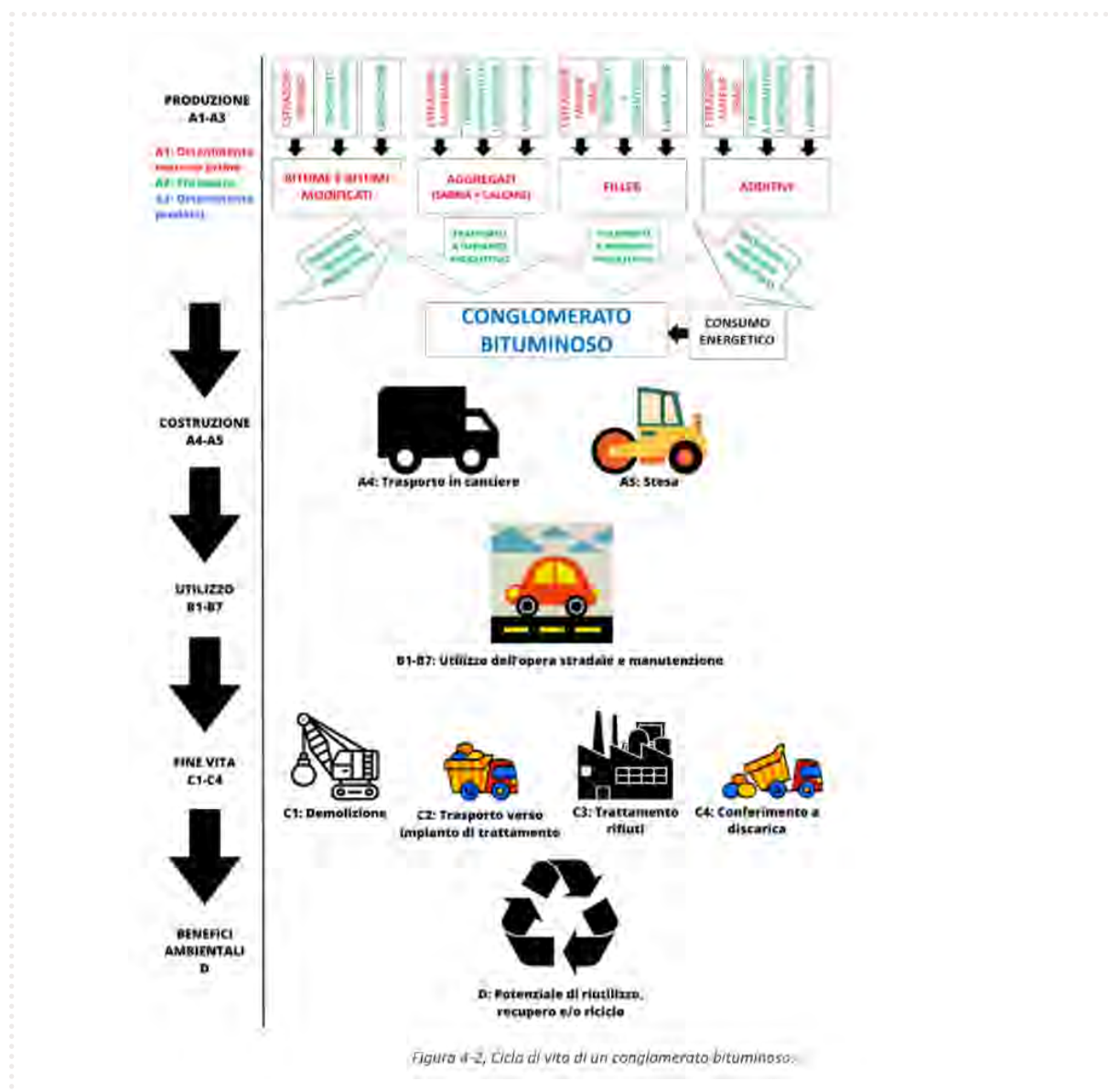
Se questa seconda ipotesi accade, il fresato così ottenuto entrerà nel nuovo ciclo di vita, andando a sostituire parte dell'aggregato vergine della miscela da produrre. Ai fini dell'LCA, alla fase C del ciclo di vita vengono imputati i consumi energetici necessari al processo di demolizione, movimentazione e produzione del fresato.

4.7.3 Benefici oltre i confini del sistema (D)

Ultima fase del ciclo di vita è la D, recentemente introdotta dalla normativa [13] per contabilizzare i potenziali impatti e i carichi derivanti dal riutilizzo dei prodotti, dal riciclaggio e dal recupero di energia dai materiali di scarto risultanti dalla costruzione, utilizzo e fine vita.

I risultati che includono il modulo D sono spesso indicati come un approccio “Cradle-to-Cradle”, ovvero “dalla culla alla culla” (metodo indicato come auspicabile dalle direttive europee).

Si riporta di seguito (figura 2) uno schema di flusso che riassume le fasi del ciclo di vita presentate per il conglomerato bituminoso.



4.8 ANALISI DEI DATI DI FLUSSO

Se da un punto di vista teorico l’LCA di un conglomerato bituminoso richiede la conoscenza dettagliata e puntuale dei molteplici aspetti progettuali che stanno dietro la scelta di un mix design, la produzione, la posa in opera ed infine la rimozione, nel campo applicativo di uno studio LCA si perdono molte variabili.

In assenza di EPD condivise per moltissimi costituenti, in base alle sole ipotesi progettuali messe in campo già per il solo modulo A1 possono presentarsi scenari molto diversi.

Per analizzare meglio il problema si riporta di seguito l’analisi dei dati di input ad oggi disponibili sul database “ecoinvent” comunemente utilizzato per gli studi LCA, confrontandoli con le principali referenze bibliografiche o raccolte dati, per caratterizzare sin dal principio le differenze che le sole ipotesi di calcolo possono apportare alla valutazione finale di impatto ambientale.

I riferimenti presi per questa analisi dei dati di flusso, scelti tra le referenze da bibliografia, utilizzati per la compilazione del modulo A1 relativo all’approvvigionamento delle materie prime costituenti il conglomerato bituminoso con maggior impatto, ovvero bitume e aggregati, sono di seguito riportati:

- Eurobitume versione 3.1 (04/2020) [1414];
- Ecoinvent versione 3.6 - allocation, cut-off by classification – unit [1515];
- Moins et al. (2021) [55];
- EAPA’s Guidance Document for Preparing Product Category Rules (PCR) [16];
- Module d’information environnementale de la production de granulats à partir de roches massives [17];
- DICHIARAZIONE AMBIENTALE DI PRODOTTO Inerti tondi e frantumati prodotti da Vezzola SpA nel sito di Montichiari (BS) - Pubblicata in EPDIItaly (www.epditaly.it) [18].

Per ognuna di queste si presenta a seguire un confronto tra i dati ricavati da quanto sopra citato e il database del software SimaPro utilizzando le categorie di impatto richieste dalla EN 15804:2012+A2:2019/AC:2021.

In assenza di un’analisi di impatto ambientale per il legante bituminoso, il principale riferimento da bibliografia può essere il report Eurobitume [1414]. Pur rappresentando una modellizzazione con software SimaPro e database ecoinvent, si riscontrano importanti differenze nella caratterizzazione di questo materiale confrontandolo con il bitume presente nel database ecoinvent riassunte in tabella 3.

ecoinvent	REPORT EUROBITUME
Riferimento normativo: EN 15804+A2	Riferimento normativo: EN 15804
Database ecoinvent 3.6, 2019	Database ecoinvent 3.5, 2018
SimaPro 9.5.0.0	SimaPro 9.0
Considera lo smaltimento in impianto di incenerimento	Non considera scenari di smaltimento
Gas naturale come unica fonte di energia	Diverse fonti di energia: elettricità, gas...
	Esclusione volontaria di alcune voci (pagina 10)

Tabella 4-3, Bitumi modello, principali differenze.

Per maggior chiarezza si riportano in tab. 4 e fig. 3 i risultati caratterizzati per 1000kg di bitume.

4.8.1.1 Bitume ECOINVENT

Processo Bitumen adhesive compound, hot {RER} production | Cut-off, U

Categorie impatto	di	Unità di misura	Estrazione	Riscaldamento - gas naturale	Trattamento rifiuti
GWP-tot		kg CO ₂ eq	3,63E+02	6,16E+01	2,38E+01
GWP-fos		kg CO ₂ eq	3,62E+02	6,15E+01	2,38E+01
GWP-bio		kg CO ₂ eq	1,15E+00	2,24E-02	4,35E-03
GWP-luc		kg CO ₂ eq	9,24E-03	1,18E-03	1,87E-04
ODP		kg CFC11 eq	7,55E-04	9,11E-06	1,01E-07
AP		mol H ⁺ eq	4,88E+00	5,14E-02	7,89E-03
EP-fw		kg P eq	7,29E-03	4,79E-04	7,39E-05
EP-mar		kg N eq	5,09E-01	1,51E-02	2,30E-03
EP-ter		mol N eq	5,59E+00	1,64E-01	2,10E-02
POCP		kg NMVOC eq	2,52E+00	5,55E-02	5,28E-03
ADPE		kg Sb eq	3,50E-05	1,14E-06	9,38E-07
ADPF		MJ	4,59E+04	9,93E+02	3,80E+00
WDP		m ³ depriv.	-1,67E+01	1,28E+00	1,91E-01

GWP-tot: Global Warming Potential total; **GWP-fos:** Global Warming Potential fossil fuels; **GWP-bio:** Global Warming Potential biogenic; **GWP-luc:** Global Warming Potential land use and land use change; **ODP:** Depletion Potential of the stratospheric Ozone layer; **AP:** Acidification Potential; **EP-fw:** Eutrophication Potential, freshwater; **EP-mar:** Eutrophication Potential, marine; **EP-ter:** Eutrophication Potential, terrestrial; **POCP:** Formation potential of tropospheric ozone; **ADPE:** Abiotic Depletion Potential for non-fossil resources; **ADPF:** Abiotic Depletion Potential for fossil resources; **WDP:** Water Deprivation Potential.

Tabella 4-4, Impatti ambientali component del bitume ecoinvent

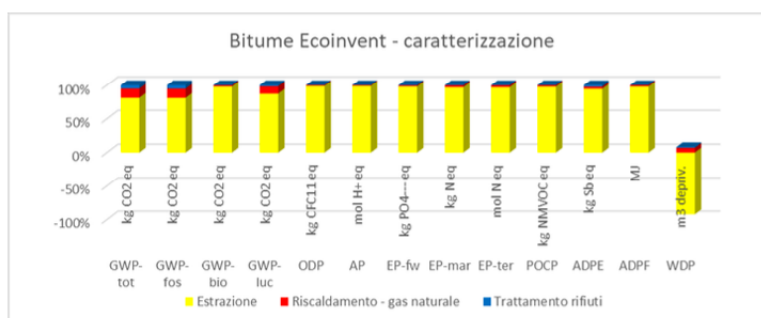


Figura 4-3, Risultati caratterizzati di 1000 kg di bitume (ecoinvent).

4.8.1.2 Bitume da REPORT EUROBITUME

L'impatto del bitume analizzato in [14], per le stesse categorie d'impatto del bitume ecoinvent, è stato ricavato dalle informazioni presenti nel report, suddiviso in 4 sottoprocessi caratterizzanti. I dati di impatto ambientale sono stati inseriti in SimaPro; si riportano in tabella 5 e figura 4 i risultati caratterizzati.

Impact category	Unit	Estrazione greggio	Trasporto greggio	Raffinazione	Immagazzinamento
GWP-tot	kg CO ₂ eq	1,06E+02	2,22E+01	1,90E+01	6,73E+00
GWP-fos	kg CO ₂ eq	1,06E+02	2,22E+01	1,90E+01	6,73E+00
GWP-bio	kg CO ₂ eq	3,51E-03	1,53E-03	2,11E-04	1,02E-04
GWP-luc	kg CO ₂ eq	6,79E-05	2,52E-05	3,47E-06	1,71E-06
ODP	kg CFC11 eq	2,48E-07	5,84E-08	8,01E-09	4,19E-09
AP	mol H ⁺ eq	7,92E-01	9,10E-01	7,34E-02	3,51E-02
EP-fw	kg P eq	1,76E-03	3,09E-05	3,94E-06	6,33E-06
EP-mar	kg N eq	1,14E-01	2,36E-01	7,53E-03	3,21E-03
EP-ter	mol N eq	1,24E+00	2,58E+00	8,24E-02	3,52E-02
POCP	kg NMVOC eq	6,73E-01	6,66E-01	2,55E-02	1,10E-02
ADPE	kg Sb eq	3,72E-07	4,79E-08	6,54E-09	3,86E-09
ADPF	MJ	4,46E+04	3,98E+02	5,63E+01	2,78E+01
WDP	m ³ depriv.	-2,40E-01	-6,70E-01	-9,24E-02	-4,15E-02

GWP-tot: Global Warming Potential total; **GWP-fos:** Global Warming Potential fossil fuels; **GWP-bio:** Global Warming Potential biogenic; **GWP-lu:** Global Warming Potential land use and land use change; **ODP:** Depletion Potential of the stratospheric Ozone layer; **AP:** Acidification Potential; **EP-fw:** Eutrophication Potential, freshwater; **EP-mar:** Eutrophication Potential, marine; **EP-ter:** Eutrophication Potential, terrestrial; **POCP:** Formatic potential of tropospheric ozone; **ADPE:** Abiotic Depletion Potential for non-fossil resources; **ADPF:** Abiotic Depletion Potential for fossil resource **WDP:** Water Deprivation Potential.

Tabella 4-5, Risultati caratterizzati bitume report Eurobitume, 1000 kg di bitume.

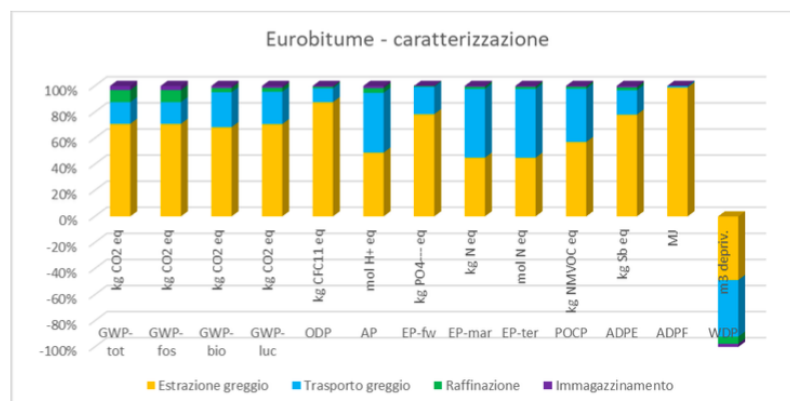


Figura 4-4, Risultati caratterizzati bitume report Eurobitume.

Confronto

Pur non potendo procedere ad una comparazione diretta delle due modellazioni del bitume a causa di una diversa presentazione delle fasi, è interessante evidenziare come la categoria "Potenziale di deprivazione di acqua (WDP)" presenti per entrambe un punteggio negativo e

dunque un impatto ambientale positivo. Il report Eurobitume, infatti, specifica che durante la fase di estrazione viene prodotta acqua come sottoprodotto. Questa sarà trattata e reimpressa in ambiente. Avendo quindi non una privazione, bensì un’aggiunta di acqua al sistema, il valore della categoria WDP è negativo.

Se si considera invece l’intero prodotto “bitume” senza suddividerlo nei sottoprocessi, i due bitumi caratterizzati riportano i seguenti risultati riassunti in tabella 6. La figura 5, invece, evidenzia il rapporto che c’è tra l’impatto dei due bitumi. Per esempio, immaginando di produrre la stessa quantità dei due bitumi, per la categoria GWP-tot, circa il 20% dell’impatto è da attribuire al bitume “eurobitume”, che impatta in un rapporto di circa 20:80 rispetto al bitume “ecoinvent”.

Impact category	Unit	Eurobitume	Bitume ecoinvent
GWP-tot	kg CO ₂ eq	1,54E+02	4,49E+02
GWP-fos	kg CO ₂ eq	1,54E+02	4,48E+02
GWP-bio	kg CO ₂ eq	5,35E-03	1,18E+00
GWP-luc	kg CO ₂ eq	9,83E-05	1,06E-02
ODP	kg CFC11 eq	3,19E-07	7,64E-04
AP	mol H ⁺ eq	1,81E+00	4,94E+00
EP-fw	kg P eq	1,80E-03	7,84E-03
EP-mar	kg N eq	3,60E-01	5,27E-01
EP-ter	mol N eq	3,94E+00	5,77E+00
POCP	kg NMVOC eq	1,37E+00	4,08E+00
ADPE	kg Sb eq	4,31E-07	3,71E-05
ADPF	MJ	4,51E+04	4,69E+04
WDP	m ³ depriv.	-1,04E+00	-1,53E+01

GWP-tot: Global Warming Potential total; **GWP-fos:** Global Warming Potential fossil fuels; **GWP-bio:** Global Warming Potential biogenic; **GWP-luc:** Global Warming Potential land use and land use change; **ODP:** Depletion Potential of the stratospheric Ozone layer; **AP:** Acidification Potential; **EP-fw:** Eutrophication Potential, freshwater; **EP-mar:** Eutrophication Potential, marine; **EP-ter:** Eutrophication Potential, terrestrial; **POCP:** Formation potential of tropospheric ozone; **ADPE:** Abiotic Depletion Potential for non-fossil resources; **ADPF:** Abiotic Depletion Potential for fossil resources; **WDP:** Water Deprivation Potential.

Tabella 4-6, Confronto di 1000 kg di bitumi – caratterizzazione.

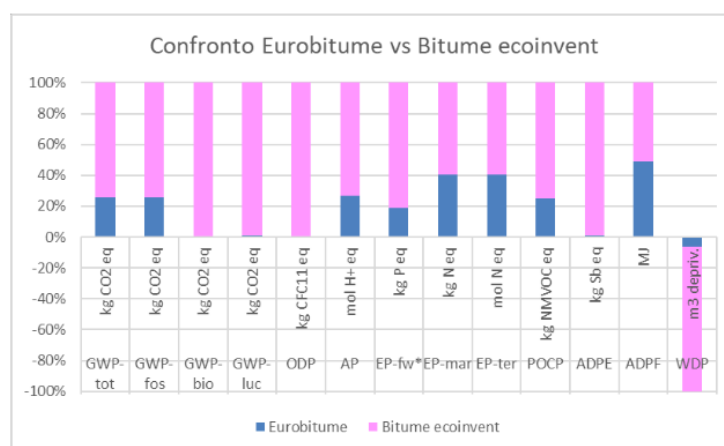


Figura 4-5, Confronto tra i risultati caratterizzati.

È lecito aspettarsi impatti ambientali diversi a causa di tutte le differenze fino a qui evidenziate, a seguito delle quali non è possibile classificare in termini assoluti un bitume più impattante dell'altro.

4.8.2 Aggregati

Lo studio degli aggregati ha preso come riferimento i dati presenti nel database ecoinvent confrontati con gli "aggregati benchmark" ricavati dalla referenza [1717]. La tabella 7 e la figura 6 riassumono le differenze tra gli aggregati oggetto di studio.

Module d'information environnementale ... [1717]	DATABASE ECOINVENT
Norma 15804	Norma 15804+A2
Database ecoinvent 3.1, 2014	Database ecoinvent 3.6, 2019
Non specificato	SimaPro 9.5.0.0
Informazioni su rocce metamorfiche	Assenza di info relative alle rocce metamorfiche

Tabella 7: Differenze tra gli aggregati modello.

Si riporta inoltre la parametrizzazione dei dati riportati in [17] per le diverse tipologie di rocce considerate.

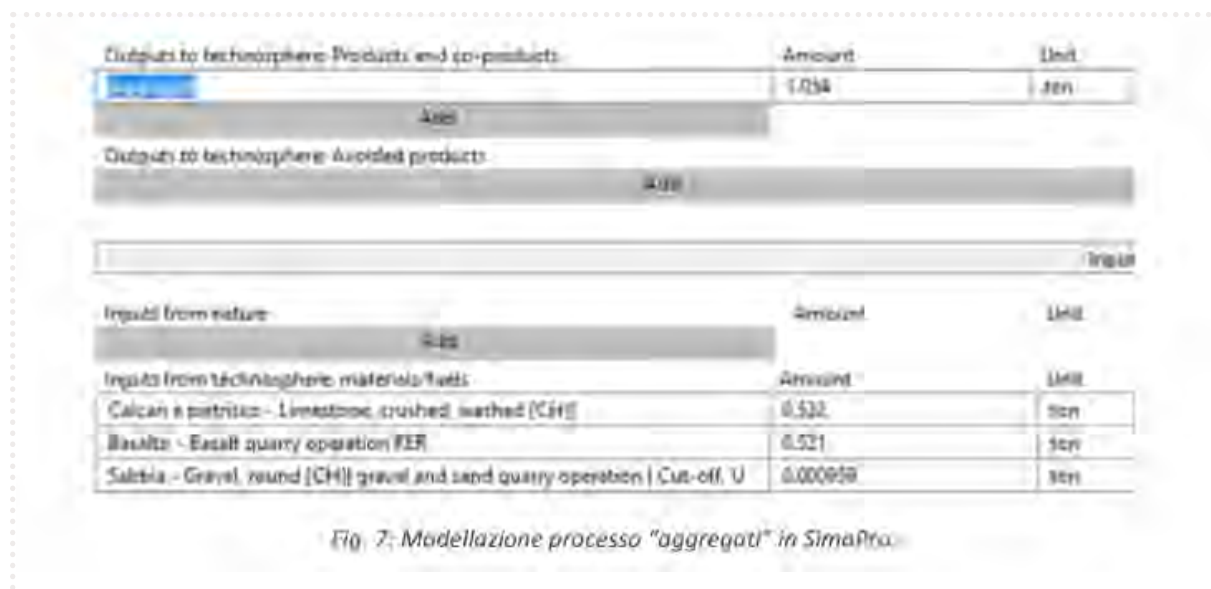
Diagramme	Unité	Quantité
Roches calcaires	t	2.17E-01
Roches éruptives	t	6.21E-01
Roches métamorphiques	t	3.15E-01
Sables	t	9.68E-04

Fig. 6: Composizione degli aggregati. Massa aggregati = massa sables + éruptives + métamorphiques + calcaires = 1,054 tonnellate.

Per quanto riguarda il database ecoinvent invece, data la presenza di molteplici voci corrispondenti agli aggregati costituenti il conglomerato bituminoso, sono stati selezionati i seguenti processi:

- Sabbia = Gravel, round {CH} gravel and sand quarry operation | Cut-off, U
- Calcare = Limestone, crushed, washed {CH} production | Cut-off, U
- Basalt {RER} quarry operation | Cut-off, U

Data la diversa “nomenclatura” delle classi di aggregati, per poterli confrontare sono state eseguite le seguenti associazioni mostrate nella tabella 8 ed è stato ricreato in ecoinvent un processo che assembla gli input come riportato in figura 7.

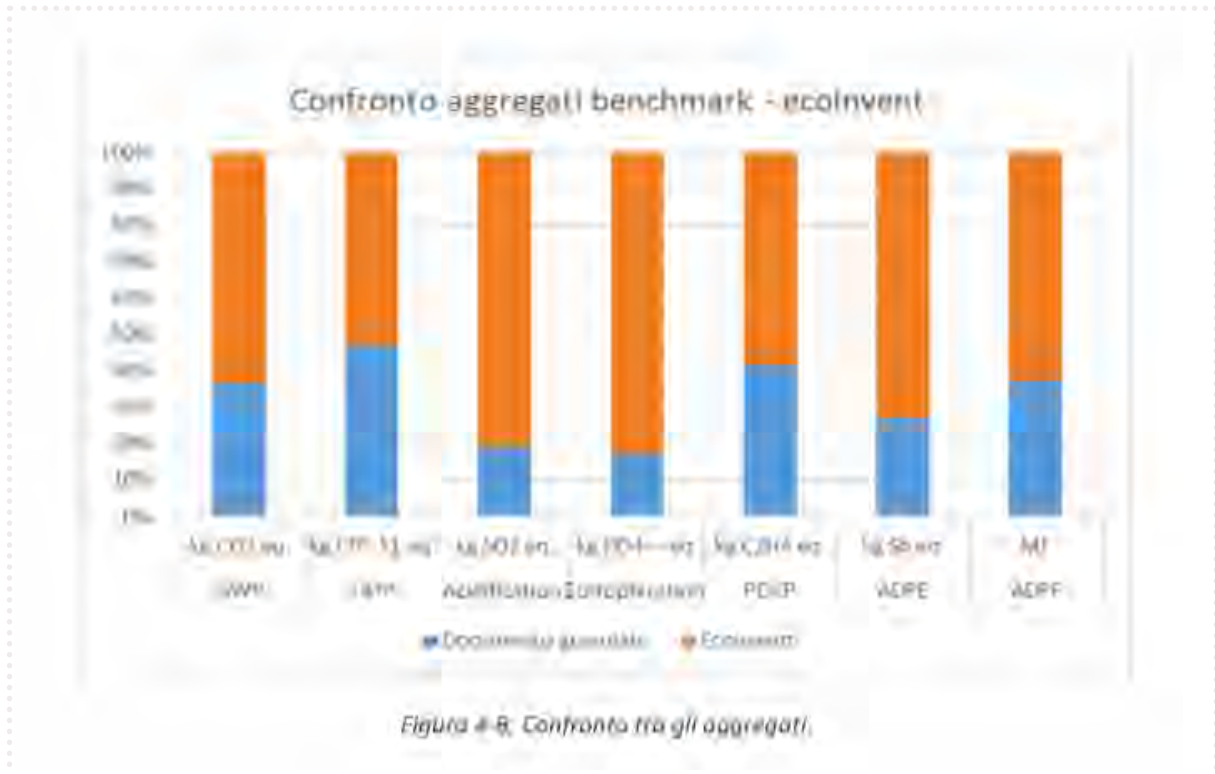


Poiché la referenza [17] non riporta l’inventario dei flussi in entrata o in uscita del sistema ma soltanto i risultati ambientali caratterizzati accorpati, il confronto tra i due dati viene effettuato considerando dal modulo A1 al modulo A3, ovvero dall’estrazione mineraria alla lavorazione e conseguente produzione dei singoli aggregati. Inoltre, per effettuare il confronto con la referenza da bibliografia, sono stati utilizzati gli indicatori delle categorie di impatto descritti dalla normativa EN 15804 relativa all’anno 2014, data di pubblicazione del report.

Come riportato in tabella 9 e in figura 8 appare evidente che esiste una notevole variazione tra i dati disponibili.

Categoria di impatto	Unità di misura	Documento granulats	Ecoinvent	Δ %
Global warming (GWP100a)	kg CO ₂ eq	2,60E+00	4,53E+00	+74%
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	5,83E-07	6,65E-07	+14%
Acidification (fate not incl.)	kg SO ₂ eq	1,47E-02	6,14E-02	+317%
Eutrophication	kg PO ₄ --- eq	3,08E-03	1,50E-02	+386%
Photochemical oxidation	kg C ₂ H ₄ eq	7,05E-04	9,81E-04	+39%
Abiotic depletion	kg Sb eq	1,11E-05	2,98E-05	+169%
Abiotic depletion, fossil fuels	MJ	3,38E+01	5,72E+01	+69%

Tabella 4-9, Risultati caratterizzati ecoinvent – granulats secondo gli indicatori afferenti alla 15804, anno 2014, 1 tonnellata.



Si può concludere che anche per gli aggregati le differenze alla base dei due studi LCA non consentono la determinazione univoca di quale delle due tipologie di aggregati sia più o meno impattante.

4.8.3 Additivi

Diverso è il caso degli additivi, per i quali non è presente una normativa di riferimento e neanche una PCR di settore. Trattandosi di un componente della miscela con una ridottissima presenza percentuale nella composizione ma con impatti importanti sulle caratteristiche fisico-meccaniche del prodotto finito (prestazioni, durabilità, albedo, lavorabilità, riutilizzo di GCB, etc.), la modellazione di questo componente può essere fatta utilizzando come riferimento il database di ecoinvent, nel caso in cui manchi l'EPD del fornitore.

4.9 LIMITI DI METODOLOGIA E DI DATABASE E SEMPLIFICAZIONI DA ADOTTARE

Nonostante i grandi vantaggi in termini di quantificazione dell'impatto di un prodotto o di un processo, a conclusione di questo studio del conglomerato bituminoso, si riportano alcuni punti critici relativi all'analisi LCA, che sono emersi durante i lavori. Questi punti riassunti di seguito hanno sicuramente un carattere generico ma trovano perfetta corrispondenza quando lo studio di impatto ambientale viene calato su un materiale così particolare, come il CB.

- La metodologia richiede semplificazioni e generalizzazioni nella modellizzazione dei sistemi e ciò impedisce il calcolo degli impatti effettivi. È più preciso, infatti, dichiarare che l’LCA calcola i “potenziali” impatti ambientali;
- È difficile e costoso in termini di tempo reperire i dati primari. Tuttavia, all’utilizzo di dati provenienti direttamente dagli stakeholders coinvolti corrisponde una maggiore precisione e robustezza dello studio;
- C’è una forte componente di soggettività durante la fase di Goal & Scope Definition: dalla definizione dei confini del sistema e scelta del metodo di calcolo dell’impact assessment, all’unità funzionale (o dichiarata). Questo porta a degli studi difficilmente comparabili;
- I modelli LCA si basano sulle prestazioni medie dei processi, senza considerare gli eventi problematici e rari;
- Soffermandosi soltanto sulla componente ambientale, lo studio LCA non consente una valutazione integrata della sostenibilità ed il calcolo delle prestazioni economiche e sociali, che invece rappresentano gli altri due pilastri su cui si fonda la sostenibilità. Sarebbe quindi auspicabile svolgere un Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA), considerando tutte le tre dimensioni.

4.10 CONCLUSIONI

Il processo di valutazione dell’impatto ambientale delle pavimentazioni stradali e nello specifico degli strati realizzati in conglomerato bituminoso, obiettivo di questa sezione, ha portato in evidenza quelli che sono i processi ed i parametri necessari per una corretta caratterizzazione LCA.

La visione d’insieme della pavimentazione ha evidenziato gli aspetti più rilevanti che devono essere correttamente considerati e caratterizzati per quanto riguarda l’impatto ambientale, considerando congiuntamente la sicurezza, la durata, le esigenze funzionali e tutti gli aspetti manutentivi, e il riutilizzo dei materiali a fine vita utile.

Oltre a ribadire l’importanza di una PCR di settore per questo materiale, da pubblicare ad esempio su EPDIItaly, il gruppo di lavoro vuole sottolineare l’importanza dei processi di digitalizzazione nella caratterizzazione LCA. Si evidenzia che l’evoluzione naturale per le pavimentazioni sostenibili è lo sviluppo e l’utilizzo in fase di progettazione di processi in ambito BIM oriented.

Partendo dal concetto di base che il progetto di una pavimentazione oltre al calcolo strutturale deve integrare anche gli aspetti ambientali (LCA) ed economici (LCC) per l'intero ciclo di vita utile, una prima indicazione preliminare di sostenibilità può essere effettuata attraverso il calcolo della CO₂eq e dei consumi energetici.

Auspiciando di avere al più presto a disposizione EPD e dati primari per tutti i materiali costituenti i conglomerati bituminosi, le valutazioni LCA saranno estese a tutti gli indicatori di impatto ambientale ottenendo risultati più precisi, accurati e rappresentativi.

4.11 BIBLIOGRAFIA

[1] UNI EN 13108-1 Miscele bituminose – specifiche del materiale.

[2] EPDItaly: PCR per i prodotti da costruzione: ICMQ-001/15 rev 3 (conforme alla EN 15804+A2).

[3] Product Category rules (PCR) for asphalt mixtures, National Asphalt Pavement Association, Version 2.0 effective Date: April 2022 Validity Period: Through March 2027.

[4] PCR – Part B for Asphalt, epd-norge.com PRODUCT CATEGORY RULES EN 15804 NPCR 025 version 1.0 Issue date: 07.04.2017 Valid to: 07.04.2022

[5] Moins, B., Hernando, D., Buyle, M., France, C., & Audenaert, A. (2021). Quantifying the environmental and economic impact of adding RAP and rejuvenators in asphalt pavements using LCA and LCCA.

[6] Carrión, A.J.d.B.; Buttitta, G.; Neves, L.; Lo Presti, D. Sustainability Assessment for Road Pavements: PavementLCM Framework Deliverable D2.1b; 2021 - <https://www.pavementlcm.eu/download/sustainability-assessment-for-road-pavements-pavementlcm-framework-d2-1b/>.

[7] Chiola, D.; Cirimele, V.; Tozzo, C. An Index for Assessing the Environmental Impact of Pavement Maintenance Operations on the Motorway Network: The Environmental Asphalt Rating. *Constr. Mater.* 2023, 3, 62–80. <https://doi.org/10.3390/constrmater3010005>.

[8] CEDR Call 2013: Energy Efficiency EDGAR. Evaluation and Decision Process for Greener Asphalt Roads. Final Report. 2016. Available online: https://www.cedr.eu/download/other_public_files/research_programme/call_2013/energy_efficiency/edgar/D4-6-Final-report_vFinal-revised.pdf (accessed on 19 October 2022).

- [9] Straume, A. 2011: Dokumentasjon av modul for beregning av energiforbruk og klimagassutslipp i EFFEKT. SINTEF Notat, Prosjektnr. 60R085, 2011-09-14 (in Norwegian).
- [10] Brattebø, H.; O’Born, R.; Miliutenko, S.; Birgisdottir, H.; Lundberg, K.; Toller, S.; Potting, J. LICCER Model Technical Report. Account of Technical Backgrounds of the LICCER Model. Report nr. 4.2. (Final Report). December 2013. Available online: https://www.cedr.eu/download/other_public_files/research_programme/eranet_road/call_2011/energy/liccer/05_liccer_d4.2_technical-report.pdf (accessed on 19 October 2022).
- [11] Santero, N. J., Masanet, E., & Horvath, A. (2011). Life-cycle assessment of pavements Part II: Filling the research gaps. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9-10), 810-818.
- [12] Santero, N. J., Masanet, E., & Horvath, A. (2011). Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9-10), 801-809.
- [13] EN 15804:2012 ; Sustainability of Construction Works—Assessment of Environmental Performance of Buildings—Calculation Method. Comite Europeen de Normalisation: Bruxelles, Belgium , 2012.
- [14] Eurobitume versione 3.1 (04/2020).
- [15] Ecoinvent versione 3.6 - allocation, cut-off by classification – unit (<https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/data-releases/ecoinvent-3-6/>).
- [16] EAPA’s Guidance Document for Preparing Product Category Rules (PCR).
- [17] Module d’information environnementale de la production de granulats à partir de roches massives.
- [18] DICHIARAZIONE AMBIENTALE DI PRODOTTO Inerti tondi e frantumati prodotti da Vezzola SpA nel sito di Montichiari (BS) - Pubblicata in EPDItaly (www.epditaly.it).

I gruppi di lavoro costituiscono il laboratorio dell'Associazione, dove le posizioni e le esperienze dei diversi protagonisti della filiera trovano il loro punto di incontro per condividere proposte in grado di contribuire ad orientare il mercato e i decisori verso una sostenibilità concreta e misurabile delle nostre infrastrutture.

Fanno parte del Gruppo di Lavoro:

COORDINAMENTO GENERALE

Stefani Susani | **AUTOSTRADe PER L'ITALIA**

AMBIENTE

Davide Giraldi

ASTEPON

Giorgio Mannelli

BUZZI UNICEM

Roberto Bogliolo

CALCESTRUZZI

Giovanni Pinto

DI.MA

Gianluca Gamba

ENEL GREEN POWER

Bruno Barreca

Giorgia Sutera

ETS

Mario Calicchio

Federico Foria

EXENET

Emanuela Marchi

Andrea Saralvo

FERALPI GROUP

Carolina Busseni

FIBRENET

Martina Bianco

FIBRENET

Cecilia Zampa

FS

Filippo Carmona

Marco Montesi

FS ITALIANE/STRADEANAS

Valeria Cardacu

Francesca Vecchi

FS/RFI

Valerio Cesi

Jacopo Massimo Ciocci

Gian Marco Duranti

Giusi Ferrera

Tommaso Gallo

Silvia Merigliano

GHELLA

Alessandra Tana

Valeria Indelicato

Francesca Paracini

HARPACEAS

Ada Frascarino

Ugo Piccinno

ICMQ

Carmela Mansi

Manuel Mari

Ugo Pannuti

IMPRESA PIZZAROTTI & C.

Caterina Teresa Barberio

Stefano Catana

Alessandro Zurlo

ISTITUTO IRIDE

Mauro Di Prete
Federica Sordello

ITERCHIMICA

Chiara Gelpi
Loretta Venturini

LOMBARDI INGEGNERIA

Torabian Isfahani Forood
Mattia Biasioli
Carlo Beltrami

MAPEI

Laura Carettoni
Matteo Draconte
Diego Pala
Corrado Presutti Villa

NET ENGINEERING

Fatemeh Mazaheri
Andrea Pilli

PINI GROUP

Chiara Castellano

POLICREO

Giovanni Brianti

POLITECNICA

Lorenzo Faeti

POLITECNICA

Marcello Mancone
Lavinia Pistonesi

PRO ITER

Filippo Badalacco
Massimiliano Donelli

SAC-SOC. AEROPORTI CATANIA

Giancarlo Guarrera

SATEX

Roberto Muselli

SIREG

Gabriele Balconi
Edoardo Intra

SNAM RETE GAS

Stefania Casolaro

SYSTRA

Davide Clauser
Daniele Maturi

TECNE AUTOSTRADE

Francesca Magnelli
Matteo Pierani
Cristina Tozzo

TELT

Manuela Rocca

UNICAL

Andrea Bolondi
Marco Borroni

WEBUILD

Margherita Santamicone

Soci Individuali

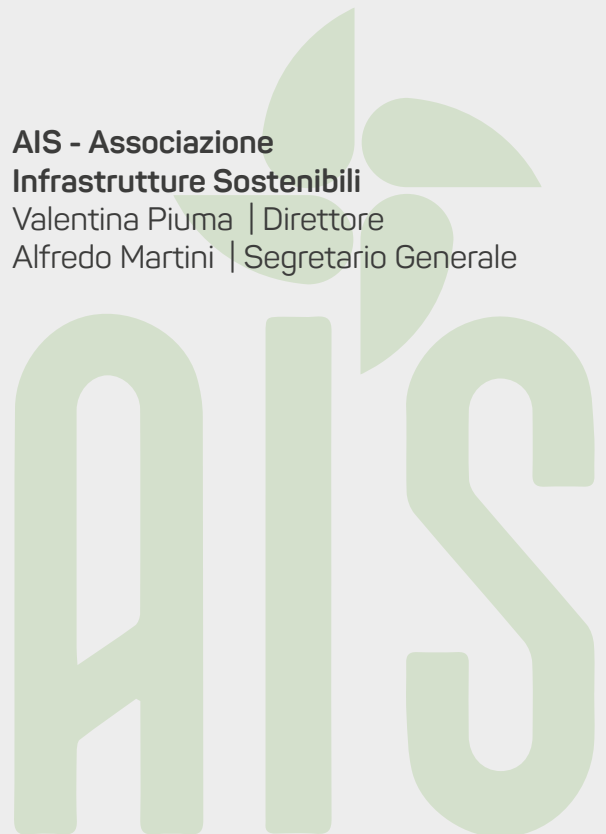
Gabriella Buttitta
Alberto Lezziero

SITEB

Marco Capsoni
Stefano Ravaioli

**AIS - Associazione
Infrastrutture Sostenibili**

Valentina Piuma | Direttore
Alfredo Martini | Segretario Generale





*infrastrutturesostenibili.org
info@infrastrutturesostenibili.org*

SEGRETERIA OPERATIVA

c/o FAST - Piazzale Morandi 2 - 20121 - Milano
TEL. +39. 379. 21 99 693

SEDE LEGALE

Via Numa Pompilio 2 - 20123 - Milano