



FERROVIE A BASSA IMPRONTA DI CARBONIO IN ITALIA

UN VIAGGIO POSSIBILE?

REPORT TECNICO

A cura di
Fondazione Ecosistemi

besa
Buy European
and Sustainable Act

Indice

1. Obiettivo del report.....	3
2. Revisione della letteratura	3
2.1 Analisi sistematica e bibliometrica della letteratura.....	3
2.1.1 <i>Economia circolare e settore ferroviario: obiettivo e metodologia</i>	<i>3</i>
2.1.2 <i>Economia circolare e settore ferroviario: risultati.....</i>	<i>3</i>
2.1.2.1 <i>Analisi delle caratteristiche bibliometriche degli articoli.....</i>	<i>4</i>
2.1.2.2 <i>Analisi delle parole chiave</i>	<i>8</i>
2.1.3 <i>Mitigazione del clima e settore ferroviario: obiettivo e metodologia</i>	<i>12</i>
2.1.4 <i>Mitigazione del clima e settore ferroviario: risultati.....</i>	<i>12</i>
2.1.4.1 <i>Analisi delle caratteristiche bibliometriche degli articoli.....</i>	<i>12</i>
2.1.4.2 <i>Analisi delle parole chiave</i>	<i>15</i>
3. Analisi comparativa	17
3.1 Analisi del contesto europeo: acciaio, calcestruzzo e cemento nelle infrastrutture ferroviarie	18
3.2 Best practices nel settore ferroviario a livello europeo	21
3.2.1 <i>Best practices relative alla riduzione della CO₂ incorporata nei materiali</i>	<i>21</i>
3.2.2 <i>Best practices relative all'applicazione di principi di circolarità alla gestione dei materiali</i>	<i>23</i>
3.3 Analisi del contesto italiano: acciaio, calcestruzzo e cemento nelle infrastrutture ferroviarie	25
3.3.1 <i>Analisi del contesto italiano</i>	<i>25</i>
3.3.2 <i>Il caso di studio del Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane</i>	<i>30</i>
3.3.3 <i>Stima comparativa degli impatti emissivi di cemento e acciaio: scenari di best e worst practice</i>	<i>34</i>
3.3.4 <i>Gruppo di lavoro 3 prodotti intermedi del tavolo Ecodesign per l'acciaio</i>	<i>35</i>

1. Obiettivo del report

Questo report vuole stimolare un dibattito nazionale sul potenziale di decarbonizzazione dell'infrastruttura ferroviaria attraverso la leva degli appalti pubblici, offrendo al contempo un utile contributo di dati e analisi per la comunità scientifica e gli esperti impegnati nella ricerca su questo tema.

L'analisi si inserisce nel contesto della riforma della Direttiva Appalti della Commissione Europea e del Net-Zero Industry Act. Il documento intende offrire spunti concreti per l'introduzione di soglie emissive negli appalti strategici dell'Unione Europea, partendo dall'analisi della domanda e dell'offerta di acciaio e cemento per il settore ferroviario in Italia. Il caso italiano è di particolare interesse per l'UE, essendo l'unico Paese ad aver adottato da dieci anni un approccio obbligatorio e trasversale agli appalti pubblici (attraverso i Criteri Ambientali Minimi - CAM).

Infine, questo studio vuole supportare il tavolo tecnico del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) impegnato nella definizione del "CAM Infrastrutture", colmando l'attuale vuoto normativo di specifiche ambientali per gli appalti di questo settore.

La prima parte del documento, "Revisione della letteratura", restituisce i risultati della raccolta e dell'analisi sistematica della letteratura esistente sul carbonio incorporato nei materiali ferroviari, attraverso revisione della letteratura annotata, che costituisce la base conoscitiva su cui si fonda l'analisi successiva.

La seconda parte, "Analisi comparativa", si concentra sulla valutazione del Global Warming Potential dei materiali attualmente impiegati nelle ferrovie italiane, mettendoli a confronto con i migliori valori GWP disponibili in Europa.

2. Revisione della letteratura

2.1 Analisi sistematica e bibliometrica della letteratura

Il presente paragrafo illustra i risultati di due analisi condotte sulla letteratura scientifica, sviluppate attraverso un approccio che combina la revisione sistematica della letteratura e l'analisi bibliometrica applicando i protocolli descritti dagli autori Donthu et al. (2021), Pickering and Byrne (2014) e Pickering et al. (2015).

La prima analisi è incentrata sul rapporto tra economia circolare e settore ferroviario, esplorando come i principi della circolarità siano stati applicati e studiati in questo contesto. La seconda analisi affronta invece la connessione tra mitigazione del cambiamento climatico e settore ferroviario, con l'obiettivo di mappare lo stato dell'arte della ricerca scientifica. Per ciascuna delle due analisi verranno dapprima presentati gli obiettivi e il protocollo metodologico adottato, seguiti dalla discussione dei risultati emersi, sia in termini bibliometrici che di contenuto scientifico.

2.1.1 Economia circolare e settore ferroviario: obiettivo e metodologia

L'obiettivo della seguente analisi è quello di comprendere lo stato dell'arte della letteratura esistente riguardo all'economia circolare ed i principi di circolarità applicati al settore ferroviario.

I dati sono stati raccolti all'interno del database Scopus (utilizzato nella ricerca accademica e particolarmente incentrato sui contenuti delle scienze sociali) ed è stata utilizzata la seguente query di ricerca:

(TITLE-ABS-KEY ("circular economy") OR TITLE-ABS-KEY (circularity) AND TITLE-ABS-KEY (railroad) OR TITLE-ABS-KEY ("railroad transportation") OR TITLE-ABS-KEY (railway*) OR TITLE-ABS-KEY ("railway transportation")) AND PUBYEAR > 2020 AND PUBYEAR < 2027*

Sono state incluse le ricerche pubblicate a partire dal 2020 (entrata in vigore della Tassonomia Europea), in lingua inglese e pubblicate su giornali e nei proceeding delle conferenze. Sono, invece, state escluse le seguenti subject area: Physics and Astronomy, Mathematics, Chemistry, Chemical Engineering, Biochemistry, Genetics and Molecular Biology Pharmacology, Toxicology and Pharmaceutics, Medicine, Immunology and Microbiology. Al termine di questo processo è stato collezionato un campione di 71 record che sono stati analizzati mediante l'utilizzo dei software Biblioshiny (per analizzare le caratteristiche bibliometriche degli articoli) e Vosviewer (per l'applicazione delle tecniche di science mapping).

2.1.2 Economia circolare e settore ferroviario: risultati

La presente sezione illustra i risultati dell'analisi condotta sulla letteratura selezionata, seguendo un percorso strutturato in due fasi complementari. In primo luogo, vengono presentate le caratteristiche bibliometriche del corpus di articoli analizzati, con l'obiettivo di fornire una panoramica quantitativa della produzione scientifica sul tema. Successivamente viene effettuata un'analisi delle parole chiave degli articoli, mediante l'applicazione di una tecnica di science mapping nota come co-occurrence analysis. Questo approccio consente di mappare le relazioni semantiche tra i concetti più ricorrenti nella letteratura, identificando i cluster tematici principali, le aree di ricerca consolidate e i filoni emergenti, restituendo così una visione strutturata dell'evoluzione del dibattito scientifico sul carbonio incorporato nei materiali ferroviari.

2.1.2.1 Analisi delle caratteristiche bibliometriche degli articoli

Il presente paragrafo riporta i risultati bibliometrici degli studi inclusi nella ricerca ed in particolare: tipologia delle fonti, suddivisione degli articoli tra le subject area, numero di pubblicazioni per anno, autori più influenti, affiliazioni, giornali più influenti ed evoluzione temporale, tipologia di finanziamenti, paesi più produttivi e documenti con il maggior numero di citazioni.

Come si evince dalla figura 1, il 63% del corpus è composto da articoli scientifici seguito poi da articoli presentati alle conferenze - proceeding (20%).

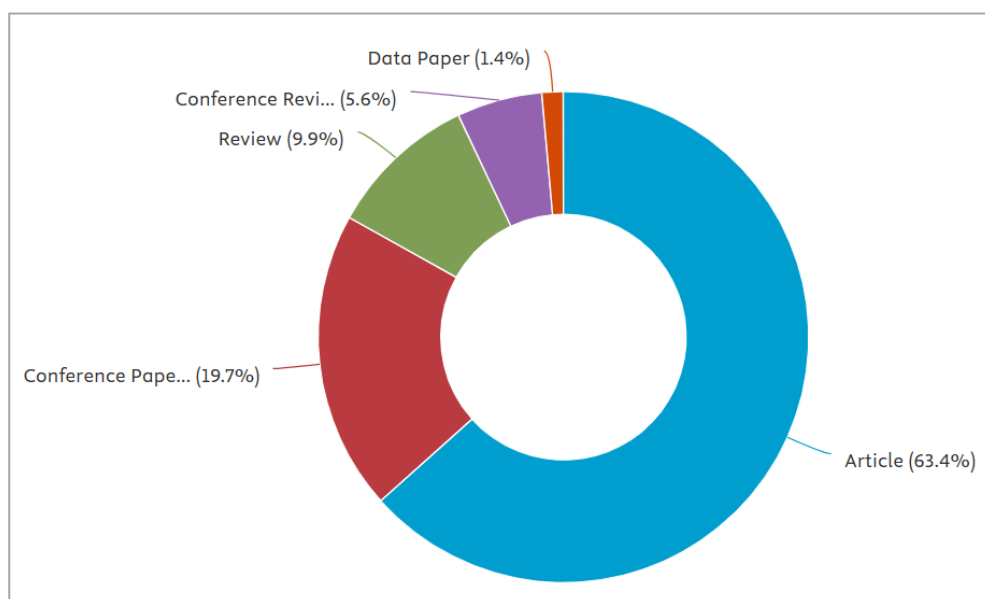


Figura 1. Tipologia di fonti

La maggioranza degli articoli afferiscono alle subject area di engineering (23%) ed environmental science (22%) – figura 2.

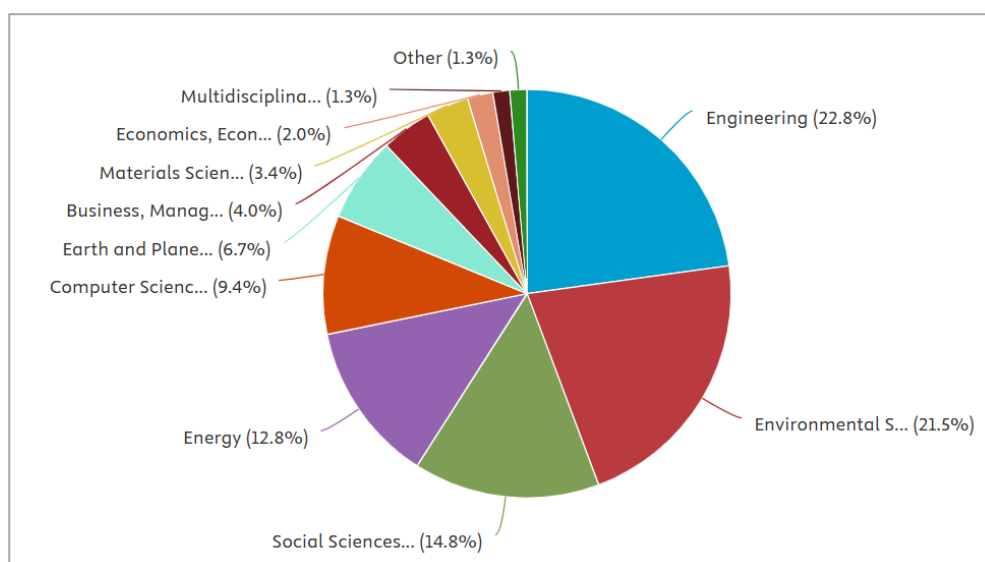


Figura 2. Suddivisione tra le subject area

Dalla figura 3 emerge che vi è stato un aumento dell'interesse della comunità scientifica a partire dal 2020 con un incremento continuo degli articoli pubblicati in ciascun anno e con un picco nel 2025. Nel 2026 vengono registrati ancora pochi articoli perché l'analisi è stata svolta ad inizio anno.

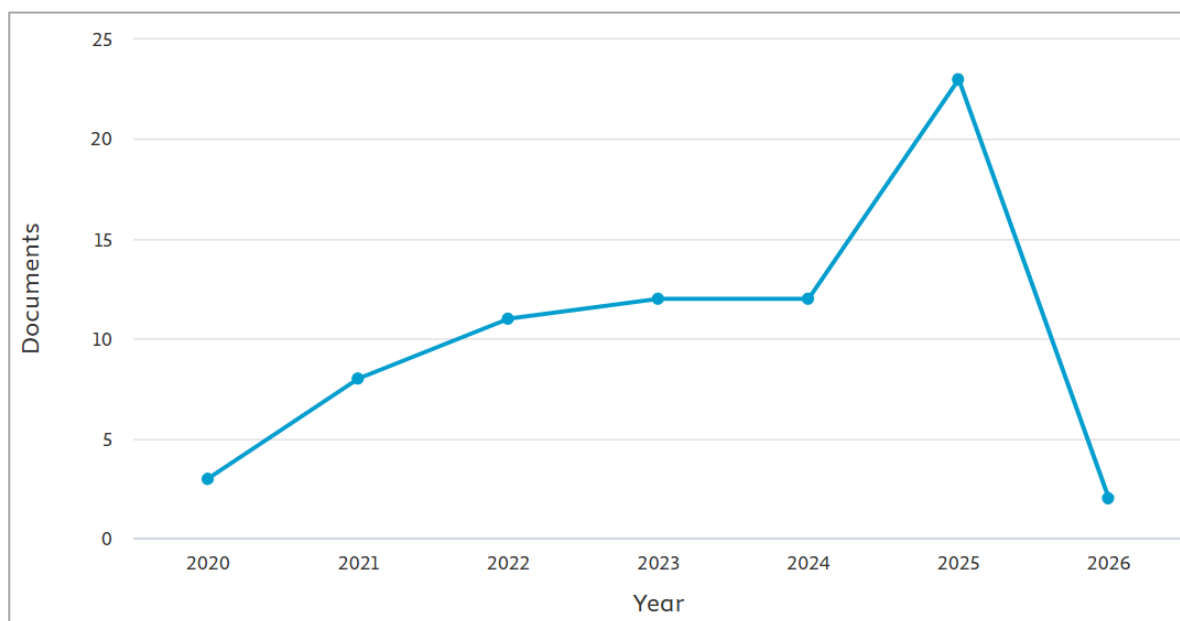


Figura 3. Numero di pubblicazioni per anno (a partire dal 2020)

Gli autori più influenti sono evidenziati all'interno della figura 4 mentre la figura 5 fornisce un quadro delle università maggiormente impegnate nella ricerca su questo fenomeno ed in particolare emergono "University of Technology Sidney" (Australia) e "Univeriteit Twente" (Paesi Bassi).

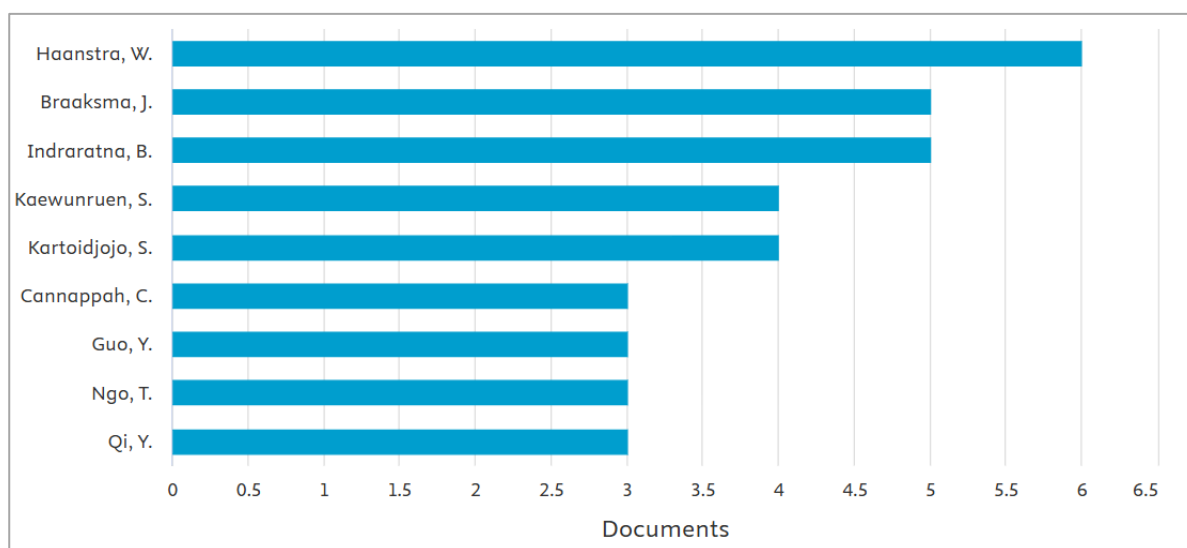


Figura 4. Autori più influenti

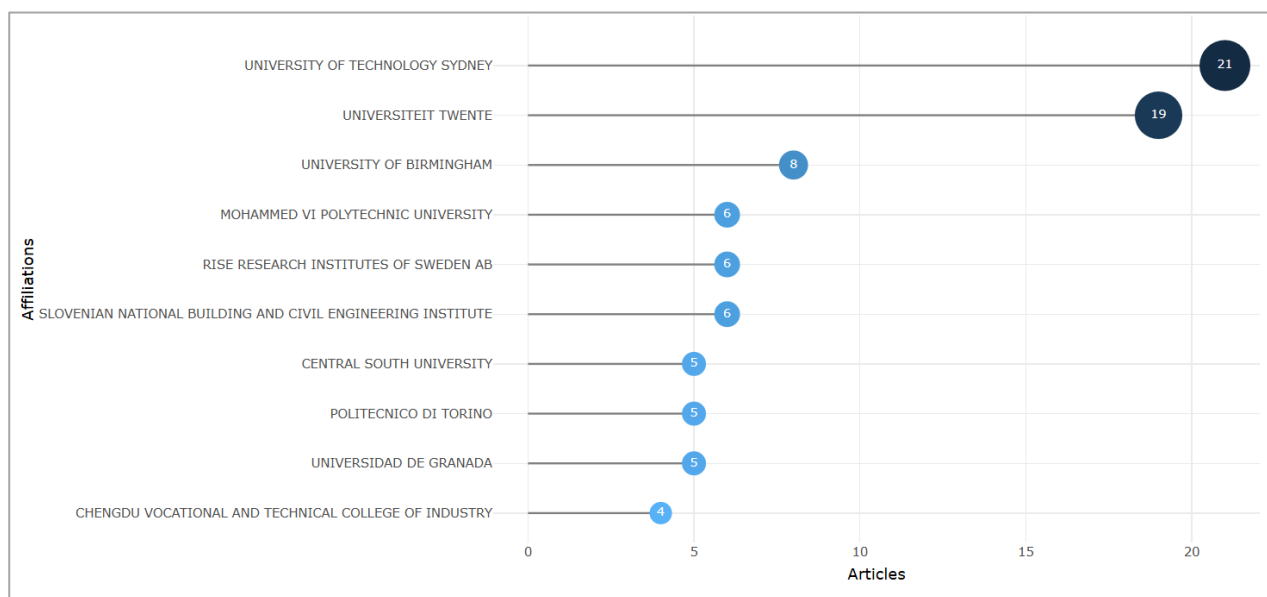


Figura 5. Affiliazioni

I giornali più influenti in termini di pubblicazioni di articoli scientifici e proceeding risultano essere “Sustainability Switzerland” e “Procedia CIRP”. Nella figura 5 viene mostrato l’andamento temporale delle pubblicazioni sui primi 5 giornali più produttivi.

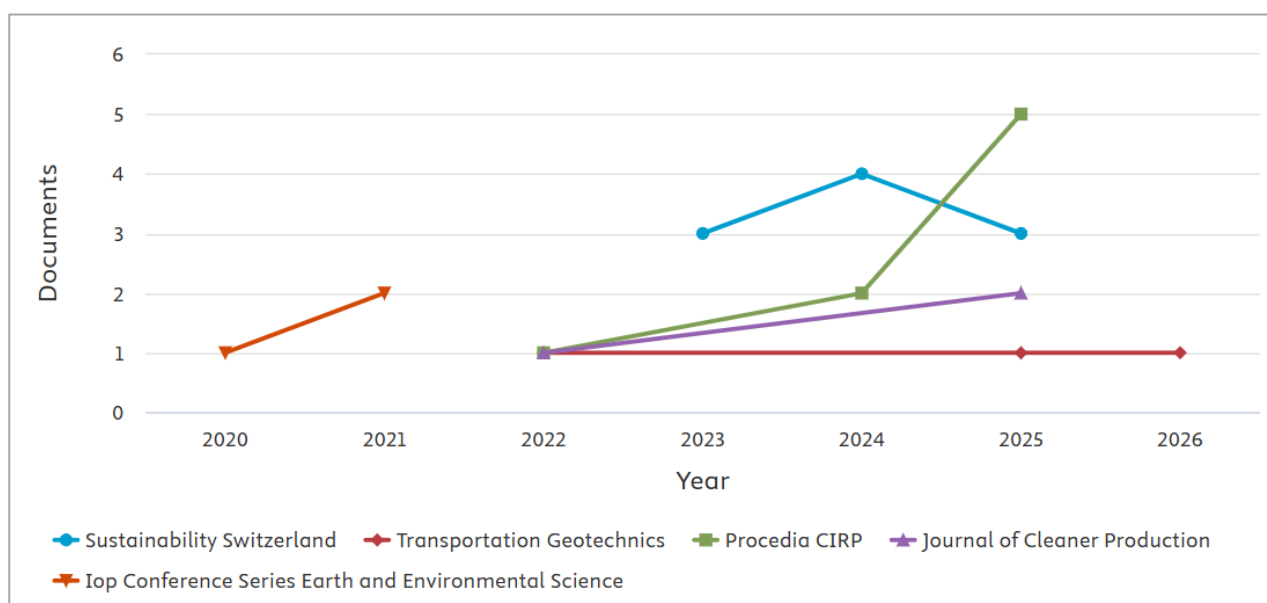


Figura 6. Giornali più influenti ed evoluzione temporale

Rispetto alla distribuzione geografica emerge che i Paesi particolarmente impegnati nell’analizzare l’economia circolare in rapporto al settore ferroviario sono Inghilterra, Cina, Paesi Bassi, Australia ed Italia (figura 7 e figura 8).

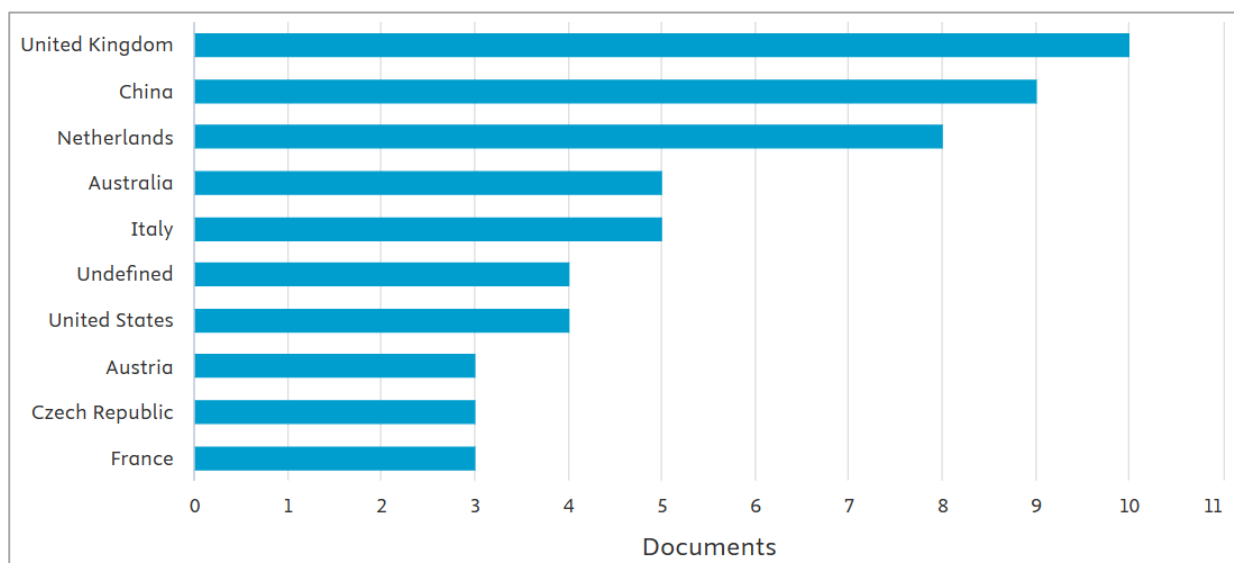


Figura 7. Documenti per Paese (Paesi con il maggior numero di ricerche)

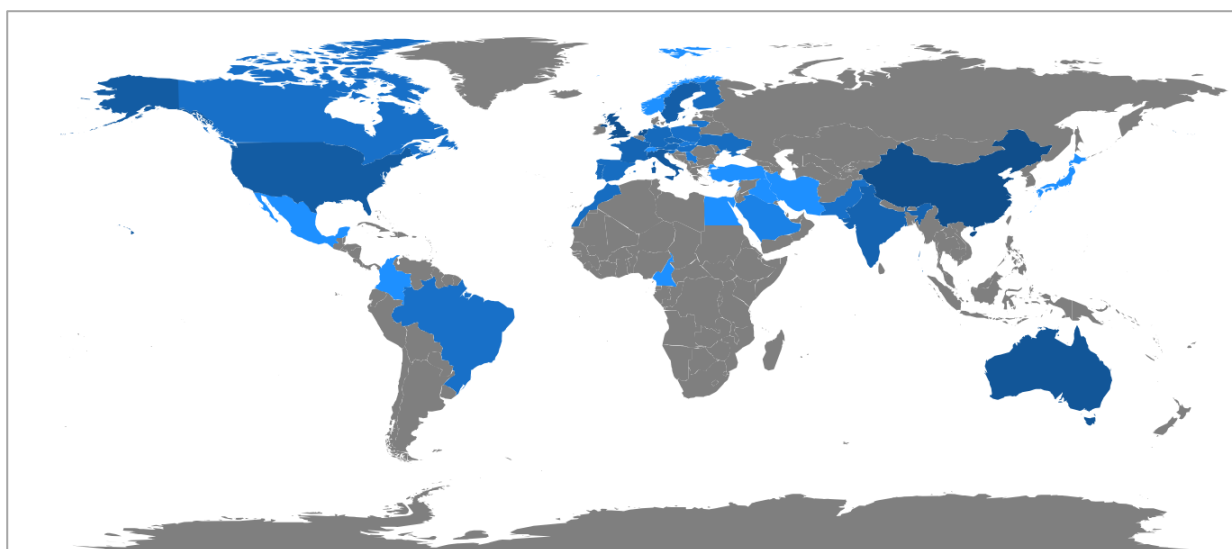


Figura 8. Produzione scientifica per Paese (mappa)

Infine, la figura 9 e la tabella 1 riportano i documenti che hanno il maggior numero di citazioni e che quindi sono particolarmente influenti in questo campo di ricerca.

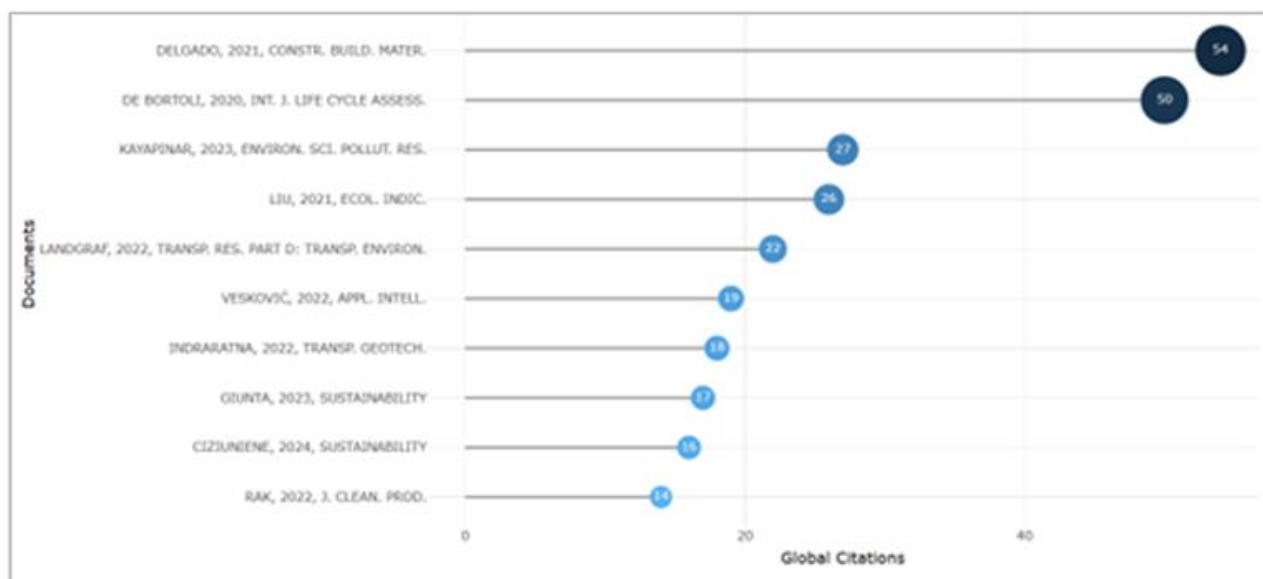


Figura 9. Documenti con il maggior numero di citazioni

Tabella 1. Documenti con il maggior numero di citazioni

Authors	Title	Year	Source title	Cited by
Delgado, B.G.; Viana da Fonseca, A.; Fortunato, E.; Paixão, A.; Alves, R.	Geomechanical assessment of an inert steel slag aggregate as an alternative ballast material for heavy haul rail tracks	2021	Construction and Building Materials	54
de Bortoli, A.; Bouhaya, L.; Feraille, A.	A life cycle model for high-speed rail infrastructure: environmental inventories and assessment of the Tours-Bordeaux railway in France	2020	International Journal of Life Cycle Assessment	50
Kayapınar, S.K.	A novel two-phase group decision-making model for circular supplier selection under picture fuzzy environment	2023	Environmental Science and Pollution Research	27
Liu, Y.; Li, H.; An, H.; Santagata, R.; Liu, X.; Ulgiati, S.	Environmental and economic sustainability of key sectors in China's steel industry chain: An application of the Emergy Accounting approach	2021	Ecological Indicators	26

Landgraf, M.; Zeiner, M.; Knabl, D.; Corman, F.	Environmental impacts and associated costs of railway turnouts based on Austrian data	2022	Transportation Research Part D: Transport and Environment	22
Vesković, S.; Stević, Ž.; Nunić, Z.; Milinković, S.; Mladenović, D.	A novel integrated large-scale group MCDM model under fuzzy environment for selection of reach stacker in a container terminal	2022	Applied Intelligence	19
Indraratna, B.; Mehmood, F.; Mishra, S.; Ngo, T.; Rujikiatkamjorn, C.	The role of recycled rubber inclusions on increased confinement in track substructure	2022	Transportation Geotechnics	18
Giunta, M.	Trends and Challenges in Railway Sustainability: The State of the Art regarding Measures, Strategies, and Assessment Tools	2023	Sustainability (Switzerland)	17
Ciziuniene, K.; Matijošius, J.; Sokolovskij, E.; Balevičiūtė, J.	Assessment of Implementing Green Logistics Principles in Railway Transport: The Case of Lithuania	2024	Sustainability (Switzerland)	16
Rak, A.; Kłosok-Bazan, I.; Zimoch, I.; Machnik-Słomka, J.	Analysis of railway ballast contamination in terms of its potential reuse	2022	Journal of Cleaner Production	14

2.1.1.2 Analisi delle parole chiave

Nel presente paragrafo sono riportati i risultati delle analisi svolte sulle parole chiave riportate dagli autori all'interno degli articoli scientifici. La co-occurrence analysis (analisi di co-occorrenza) è una tecnica bibliometrica di science mapping che studia come spesso due parole compaiono insieme in uno stesso documento.

L'obiettivo dell'indagine è di identificare i temi principali della letteratura, le relazioni concettuali tra i termini, le aree di ricerca emergenti, la struttura concettuale di un campo (cluster tematici). Una volta estratte le parole chiave il software Vosviewer include nella mappa solo le parole che compaiono almeno 2 volte in tutto il dataset. Procede poi costruendo una matrice di co-occorrenza: ogni cella indica quante volte la parola A compare

insieme alla parola B. Le parole con co-occorrenze più forti risultano più vicine nella mappa. Ed infine, il software esegue un algoritmo di clustering per raggruppare i termini. All'interno della mappa che viene prodotta da Vosviewer i nodi rappresentano le parole, la distanza indica quanto spesso compaiono insieme, il colore evidenzia l'appartenenza a ciascun cluster tematico, la dimensione del nodo indica la frequenza della parola nel dataset ed infine le connessioni (edges) riguardano l'intensità della co-occorrenza.

Nella corrente analisi alcune parole chiave sono apparse come nodi isolati, indicando concetti che ricorrono nella letteratura ma che non sono ancora integrati nei principali cluster tematici. La mappa completa è rappresentata all'interno della figura 10. Mentre la tabella 2 riassume la composizione dei cluster e la forza dei link e delle co-occorrenze. I cluster 1, 3 e 4 costituiscono il core scientifico del campo. I cluster 2 e 5 riflettono dimensioni regolative, comunicative e sistemiche. I cluster 6 e 7 evidenziano temi isolati o emergenti, giustificando la presenza di nodi senza collegamenti.

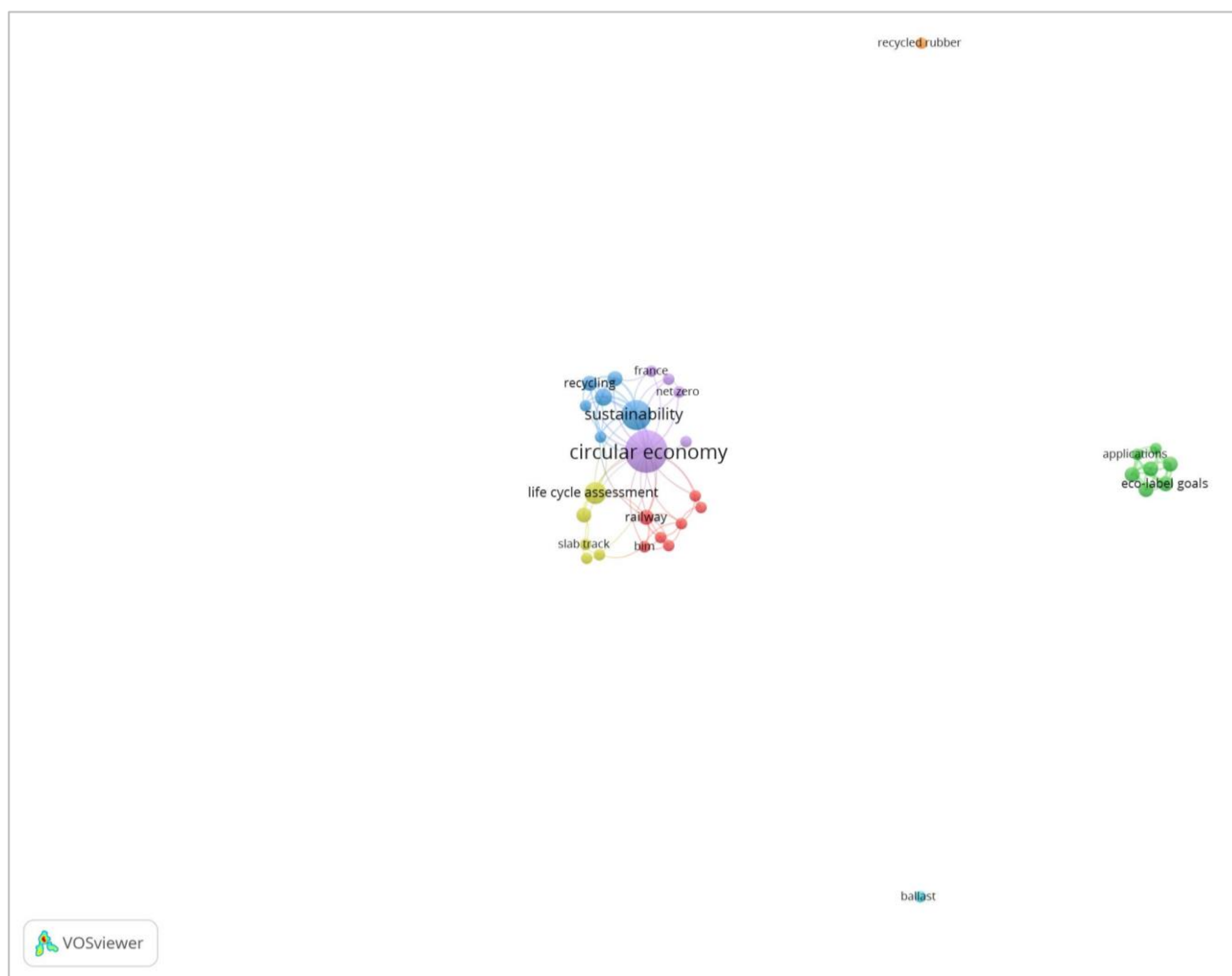


Figura 10. Network visualization – Vosviewer

Tabella 2. Composizione dei cluster

Parole chiave	Cluster	Weight <Total strength>	link Weight<Occurrences>
Bim	1	6	2
circularity	1	5	2
climate change	1	7	2
construction materials	1	4	2
infrastructure	1	3	2
railway	1	9	3
resilience	1	5	2
applications	2	12	2
design for sustainability	2	12	2
eco-label goals	2	16	3
eco-label requirements	2	16	3
environmental label	2	16	3
european railway sector	2	16	3
sustainability communication	2	16	3
monitoring	3	10	2
railway transport	3	12	4
recycling	3	10	3
reuse	3	12	3
strategy	3	7	2
sustainability	3	23	11
environmental impacts	4	2	2
life cycle assessment	4	7	6
railway infrastructure	4	4	3
railway track	4	4	2

slab track	4	4	2
circular economy	5	34	21
france	5	4	2
net zero	5	4	2
transportation	5	5	2
waste	5	1	2
ballast	6	0	2
recycled rubber	7	0	2

Cluster 1 - Circularity, climate change and resilient railway infrastructure

Parole chiave principali: bim, circularity, climate change, construction materials, infrastructure, railway, resilience.

Questo cluster rappresenta un filone integrato e interdisciplinare, in cui la sostenibilità delle infrastrutture ferroviarie è affrontata in relazione a cambiamento climatico, resilienza dei sistemi, circolarità dei materiali, digitalizzazione tramite BIM.

La presenza di railway come nodo ad alta centralità (link strength e citazioni elevate) indica che il settore ferroviario costituisce l'ambito applicativo principale di queste riflessioni. Il BIM (Building Information Modeling) emerge come strumento abilitante a supporto di progettazione sostenibile e resiliente. Cluster core con forte connessione tra temi ambientali, tecnologici e infrastrutturali.

Cluster 2 - Eco-labels, sustainability communication and regulatory frameworks

Parole chiave principali: applications, design for sustainability, eco-label goals, eco-label requirements, environmental label, european railway sector, sustainability communication.

Questo cluster riflette la dimensione normativa, comunicativa e certificativa della sostenibilità, con un focus specifico sul contesto europeo. Le eco-label fungono da strumenti di policy, supportano la comunicazione della sostenibilità, collegano requisiti ambientali e applicazioni pratiche nel settore ferroviario. La coesione interna del cluster suggerisce un filone coerente ma relativamente recente, con basse citazioni medie, indicativo di un'area in fase di sviluppo o istituzionalizzazione. Cluster applicativo-regolativo orientato alla governance della sostenibilità.

Cluster 3 – Sustainability strategies, recycling and reuse in railway transport

Parole chiave principali: monitoring, railway transport, recycling, reuse, strategy, sustainability

Questo cluster è centrato su strategie operative di sostenibilità, con enfasi su pratiche di riciclo e riuso, monitoraggio delle performance, integrazione della sostenibilità nei sistemi di trasporto ferroviario. Il termine sustainability mostra il più alto numero di occorrenze, una forte total link strength, indicando che questo cluster svolge un ruolo di ponte concettuale tra filoni più tecnici e più strategici. Cluster trasversale che connette principi generali e implementazione pratica.

Cluster 4 – Environmental impact assessment and railway track systems

Parole chiave principali: environmental impacts, life cycle assessment, railway infrastructure, railway track, slab track.

Questo cluster rappresenta il filone metodologico e tecnico della letteratura, focalizzato sulla valutazione degli impatti ambientali, applicazione della LCA, analisi di specifiche componenti infrastrutturali (binari, slab track). Le alte citazioni medie della life cycle assessment indicano un'area scientificamente matura e consolidata, spesso utilizzata come riferimento metodologico anche dagli altri cluster. Cluster metodologico con elevata robustezza scientifica.

Cluster 5 – Circular economy, transport systems and decarbonisation goals

Parole chiave principali: circular economy, france, net zero, transportation, waste

Questo cluster ha una natura macro-sistemica e policy-oriented, collegando economia circolare, obiettivi di decarbonizzazione (net zero), sistemi di trasporto, gestione dei rifiuti, casi nazionali (es. Francia). Il termine circular economy funge da hub concettuale, con il maggior numero di occorrenze e link, indicando che questo cluster rappresenta la cornice teorica generale entro cui si collocano gli altri filoni. Cluster quadro - framework-level.

Cluster 6 – Ballast (isolated technical concept)

Parola chiave: ballast

Questo cluster contiene una sola parola chiave, priva di collegamenti con gli altri nodi selezionati. Ciò indica che ballast compare almeno due volte nel corpus, ma non co-occorre con altre parole che superano la soglia. Tema altamente specifico/tecnico e settoriale, trattato in modo isolato, senza integrazione esplicita nei discorsi su sostenibilità o circolarità.

Cluster 7 – Recycled rubber (emerging niche topic)

Parola chiave: recycled rubber

Anche questo cluster è composto da un solo nodo isolato. Tuttavia, a differenza del ballast, recycled rubber suggerisce un tema emergente (molto recente-letteratura giovane) potenzialmente collegabile a economia circolare e materiali sostenibili ma ancora non integrato concettualmente nel corpus analizzato. Niche topic emergente con potenziale di sviluppo futuro. (Recycled rubber è intrinsecamente un concetto di economia circolare, anche se nel corpus non è ancora trattato come tale).

2.1.3 Mitigazione del clima e settore ferroviario: obiettivo e metodologia

L'obiettivo della seguente indagine bibliometrica e sistematica della letteratura è quello di comprendere lo stato dell'arte della letteratura esistente riguardo concetto di mitigazione climatica all'interno del settore ferroviario.

I dati sono stati raccolti all'interno del database Scopus (utilizzato nella ricerca accademica e particolarmente incentrato sui contenuti delle scienze sociali) ed è stata utilizzata la seguente query di ricerca:

```
(TITLE-ABS-KEY ( "climate mitigation" ) AND TITLE-ABS-KEY ( railroad* ) OR TITLE-ABS-KEY ( railway* ) OR TITLE-ABS-KEY ( "railroad transportation" ) OR TITLE-ABS-KEY ( "railway transportation" ) )
```

Non è stato impostato nessun arco temporale specifico, e sono state incluse ricerche in lingua inglese e provenienti da giornali e proceeding (conferenze). Al termine di questo processo è stato collezionato un campione di 13 record che sono stati analizzati mediante l'utilizzo dei software Biblioshiny (per analizzare le caratteristiche bibliometriche degli articoli) e Vosviewer (per l'applicazione delle tecniche di science mapping).

2.1.4 Mitigazione del clima e settore ferroviario: risultati

La presente sezione illustra i risultati dell'analisi condotta sulla letteratura selezionata suddivisi tra caratteristiche bibliometriche del corpus di articoli analizzati e analisi delle parole chiave degli articoli, mediante l'applicazione di una tecnica di science mapping nota come co-occurrence analysis.

2.1.4.1 Analisi delle caratteristiche bibliometriche degli articoli

La maggioranza dei record inclusi all'interno dell'analisi (85%) è composta da articoli scientifici (Figura 11). Mentre la subject area con un numero più alto di documenti è Environmental Science – 27% (Figura 12).

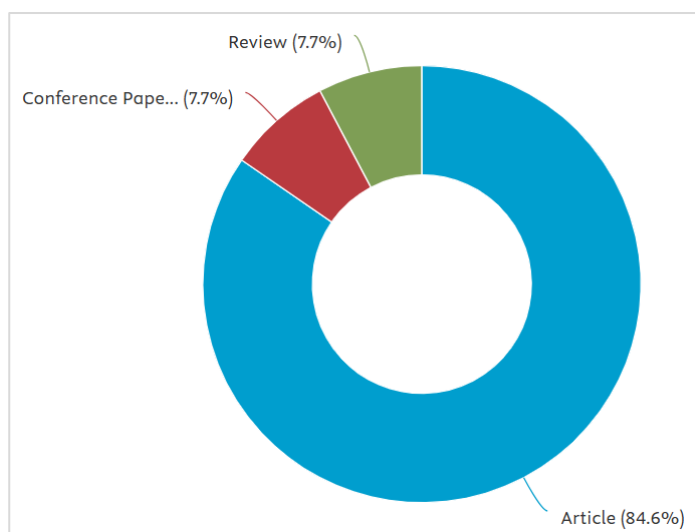
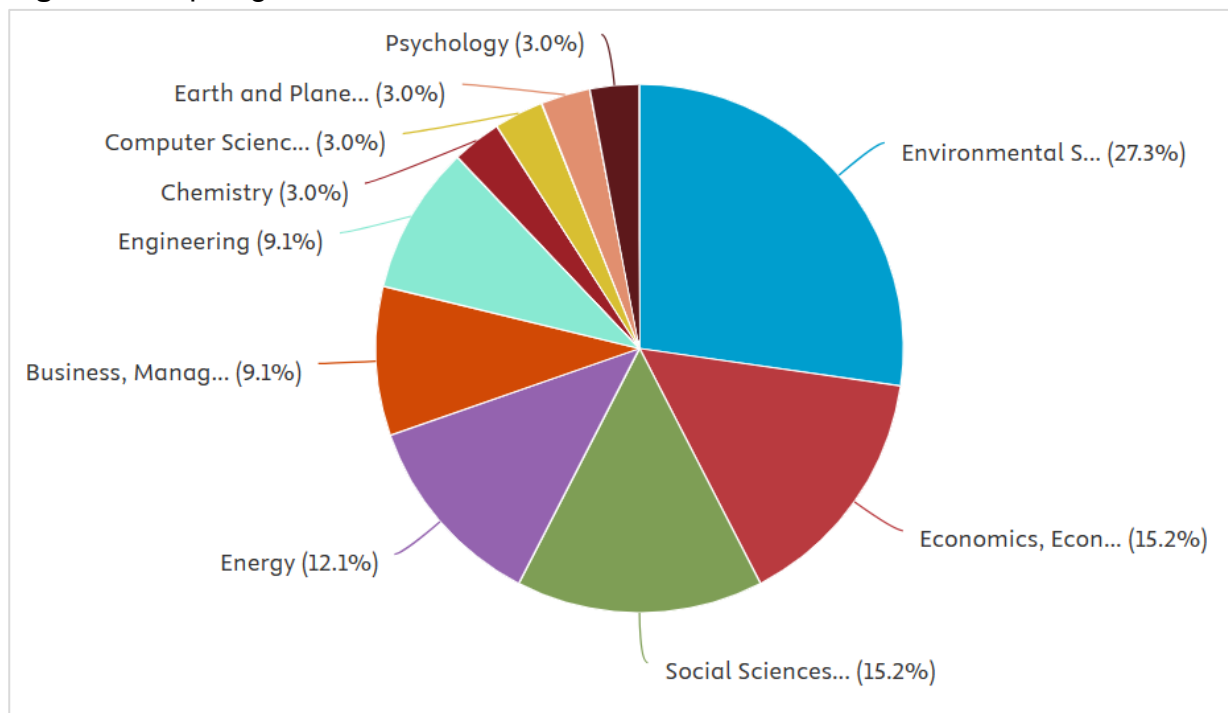
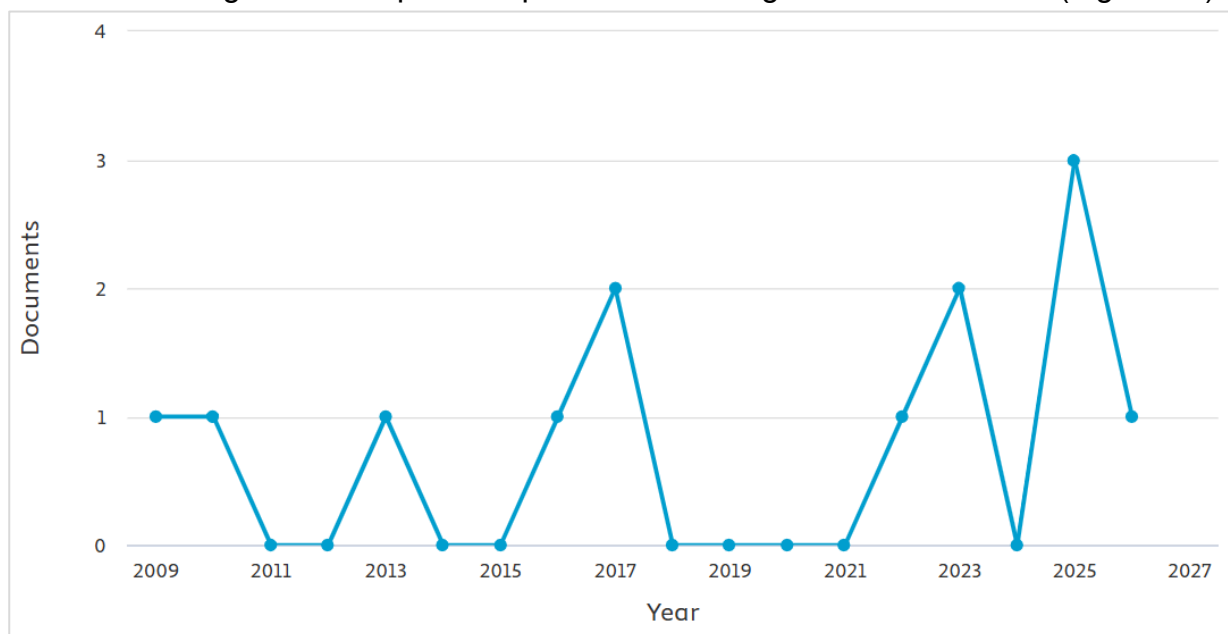


Figura 11. Tipologia di fonti**Figura 12.** Suddivisione tra le subject area

L'anno in cui si registra una prima pubblicazione legata all'analisi del fenomeno di interesse è il 2009 e si registrano dei picchi di pubblicazione negli anni 2023 3 2025 (Figura 13).

**Figura 13.** Numero di pubblicazioni per anno

In base al campione estratto, le università maggiormente produttive rispetto a studi sul tema di riferimento risultano essere Newcastle University (Inghilterra – 6 record) e Universidad de Valladolid (Spagna – 4 record) – Figura 14.

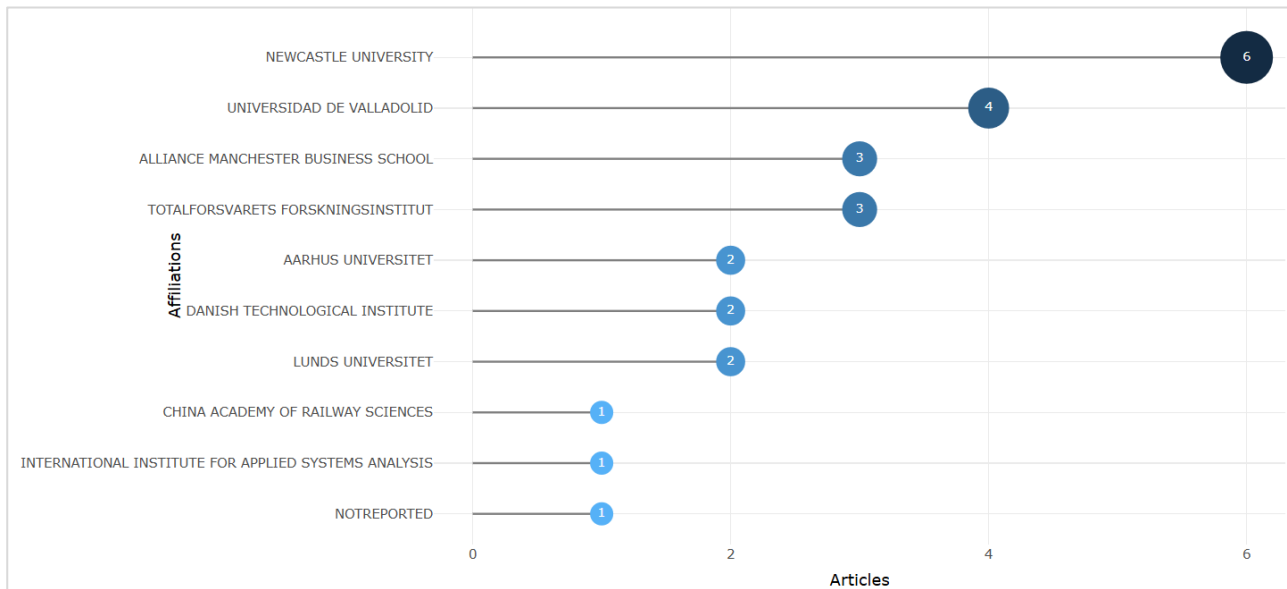


Figura 14. Affiliazioni

Come mostrato nella Figura 15, non è possibile identificare giornali particolarmente orientati al tema, poiché le pubblicazioni del campione risultano distribuite tra fonti eterogenee. Mentre i Paesi che sembrano essere più interessati alla trattazione del fenomeno sono Inghilterra e Italia (Figure 16 e 17).

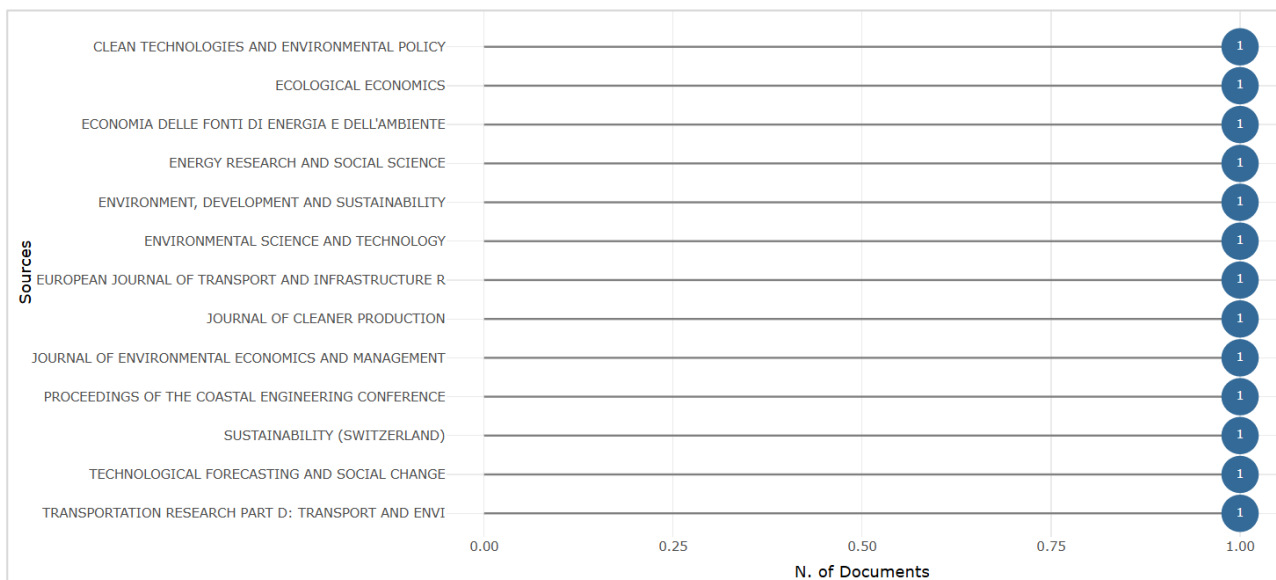


Figura 15. Giornali su cui sono state pubblicate le ricerche

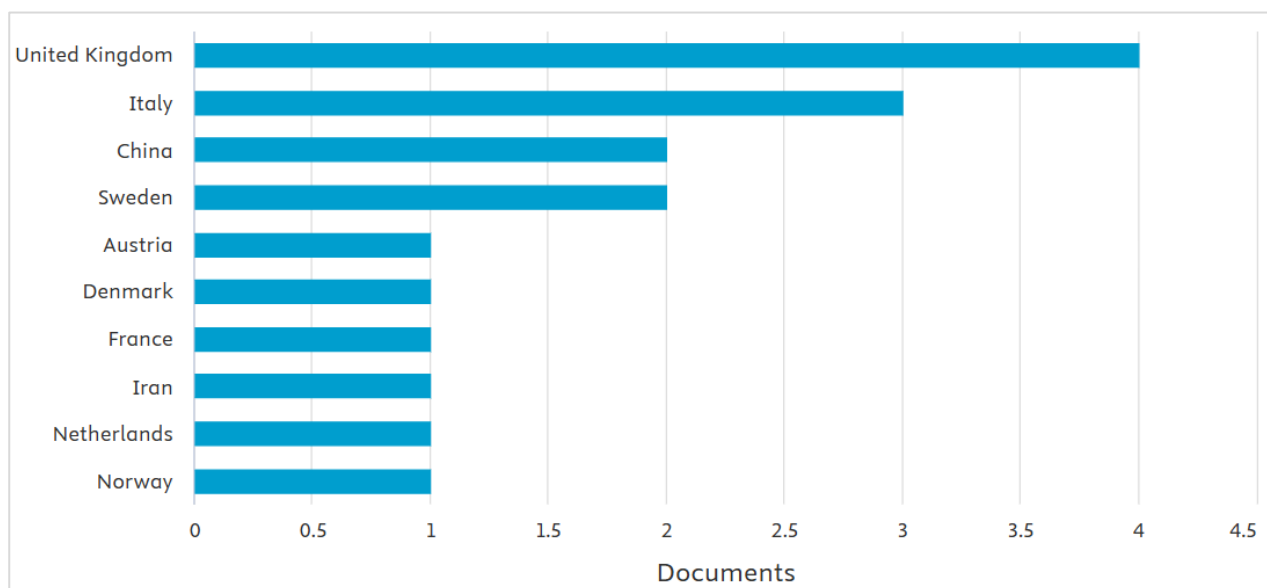


Figura 16. Documenti per Paese (Paesi con il maggior numero di ricerche)

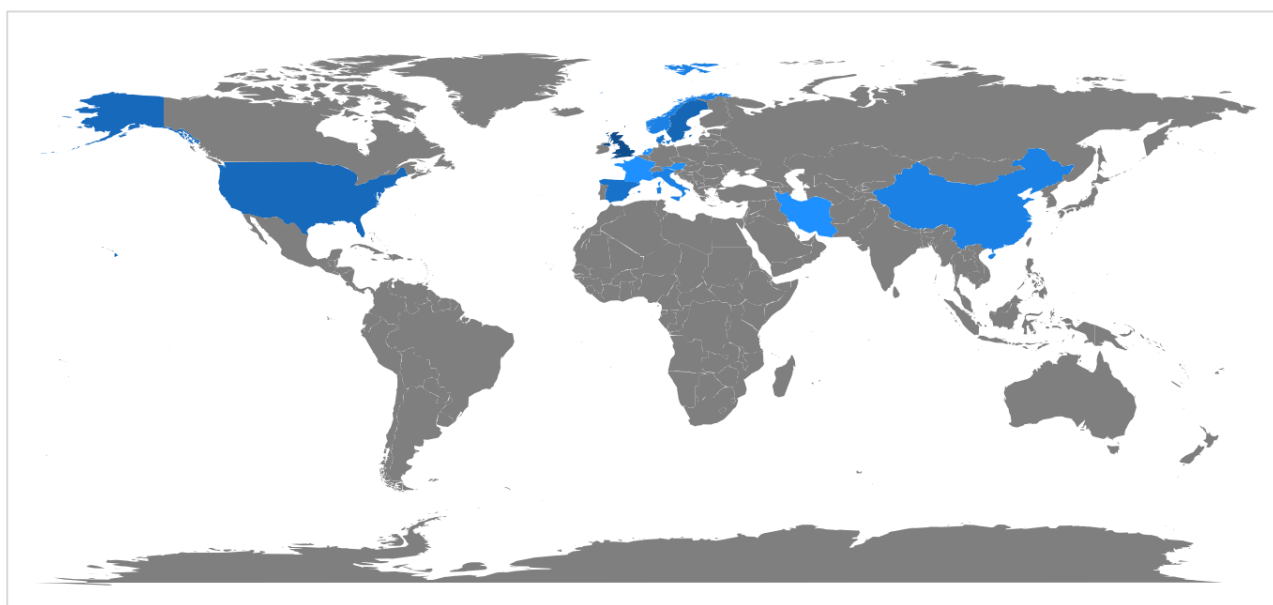


Figura 17. Produzione scientifica per Paese (mappa)

All'interno della Figura 18 e della Tabella 3 vengono, invece, indicati i documenti con il maggior numero di citazioni.

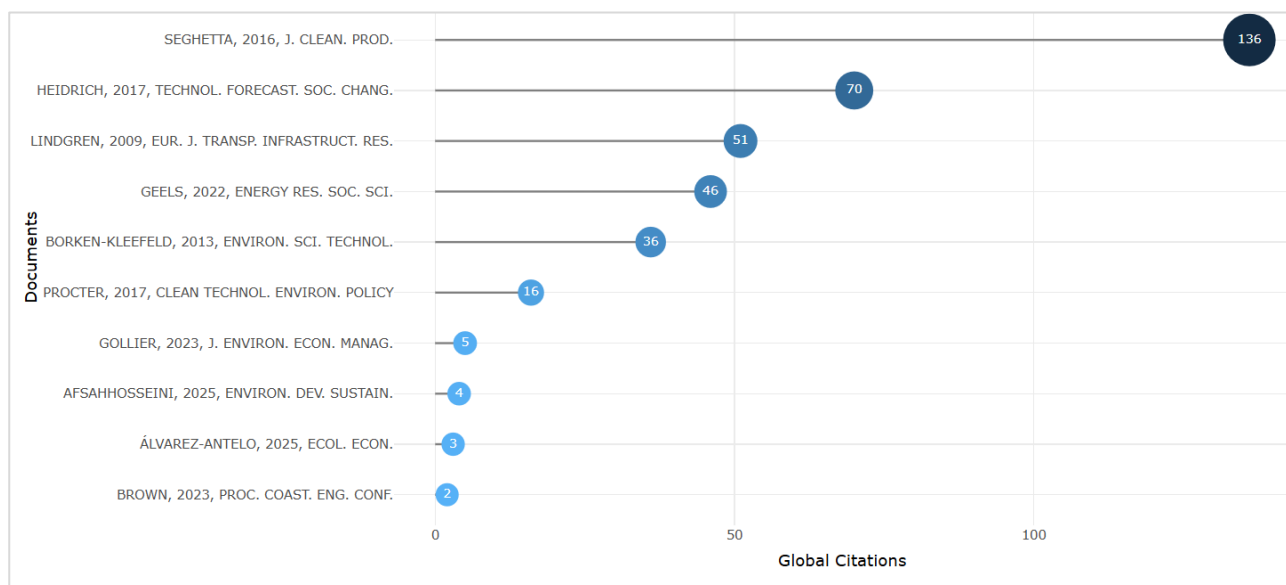


Figura 18. Documenti con il maggior numero di citazioni

Tabella 3. Documenti con il maggior numero di citazioni

Authors	Title	Year	Source title	Cited by
Lindgren, J.; Jonsson, D.K.; Carlsson-Kanyama, A.	Climate adaptation of railways: Lessons from Sweden	2009	European Journal of Transport and Infrastructure Research	51
Geels, F.W.; Pereira, G.I.; Pinkse, J.	Moving beyond opportunity narratives in COVID-19 green recoveries: A comparative analysis of public investment plans in France, Germany, and the United Kingdom	2022	Energy Research and Social Science	46
Borken-Kleefeld, J.; Fuglestvedt, J.; Berntsen, T.	Mode, load, and specific climate impact from passenger trips	2013	Environmental Science and Technology	36

2.1.4.2 Analisi delle parole chiave

La co-occurrence analysis (analisi di co-occorrenza) è una tecnica bibliometrica che studia come spesso due parole compaiono insieme in uno stesso documento. L'obiettivo è di identificare i temi principali della letteratura, le relazioni concettuali tra i termini, le aree di ricerca emergenti, la struttura concettuale di un campo (cluster tematici). Nella figura 19

viene mostrata la visualizzazione del network. All'interno della figura 20 è possibile osservare lo sviluppo temporale delle parole chiave utilizzate dagli autori all'interno dei documenti. Infine, la tabella 4 riassume la composizione dei cluster e la forza dei link e delle co-occorrenze.

Nel complesso, la struttura dei cluster suggerisce una letteratura organizzata attorno a un core concettuale sistemico sul cambiamento climatico, affiancato da filoni più specializzati, uno orientato all'adattamento e uno focalizzato su strumenti tecnologici e di policy.

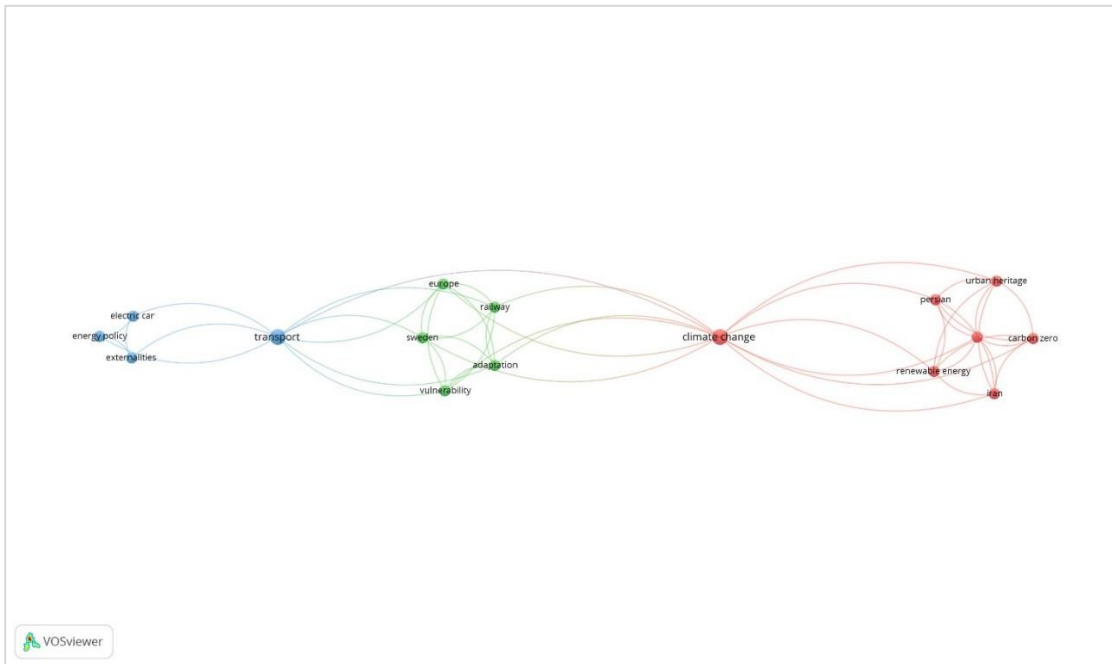


Figura 19. Network visualization -Vosviewer

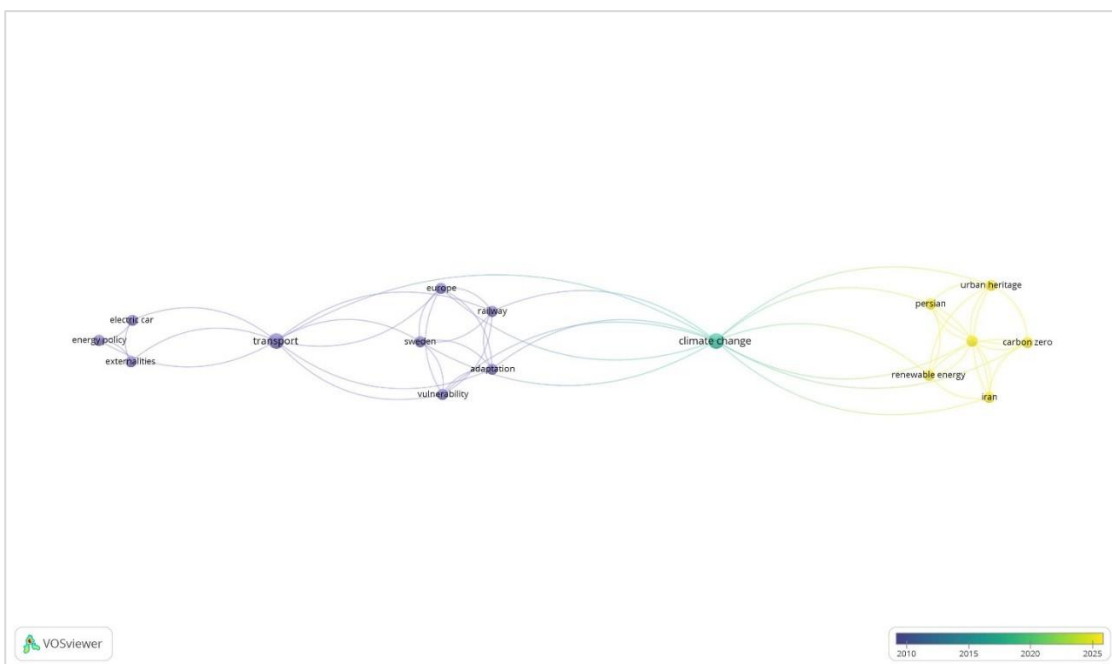


Figura 20. Overlay visualization: sviluppo temporale delle parole chiave

Tabella 4.

Parole chiave	cluster	weight<Total strength>	link	weight<Occurrences>
carbon zero	1	6		1
climate change	1	12		2
iran	1	6		1
persian	1	6		1
renewable energy	1	6		1
sustainable development goals	1	6		1
urban heritage	1	6		1
adaptation	2	6		1
europe	2	6		1
railway	2	6		1
sweden	2	6		1
vulnerability	2	6		1
electric car	3	3		1
energy policy	3	3		1
externalities	3	3		1
transport	3	9		2

Cluster 1 – Climate Change and Mitigation Framework

Parole chiave principali: carbon zero, climate change, iran, persian, renewable energy, sustainable development goals, urban heritage.

Rappresenta il cluster centrale che ruota attorno al concetto di climate change (la parola chiave con il maggior numero di connessioni e occorrenze). Questo cluster può essere interpretato come il nucleo concettuale di questo campione di articoli, al suo interno confluiscono riflessioni di carattere generale sul cambiamento climatico configurandosi come la base teorica e sistemica su cui si innestano gli altri filoni. La sua posizione e densità

indicano che questi temi possono rappresentare il punto di riferimento dominante del dibattito scientifico su questo fenomeno.

Cluster 2 – Climate Adaptation

Parole chiave principali: adaptation, europe, railway, sweden, vulnerability.

Questo secondo cluster, più periferico ma concettualmente coerente, è legato ad adaptation. Questo insieme tematico si concentra sulle risposte adattive al cambiamento climatico. La collocazione del cluster suggerisce che l'adattamento viene trattato come un ambito specifico e quindi posizionato ai margini del core teorico.

Cluster 3 – Energy Transition and Policy Instruments

Parole chiave principali: electric car, energy policy, externalities, transport

È un cluster periferico orientato verso una dimensione più tecnico-applicativa e policy-driven. Questo cluster riflette l'attenzione della letteratura verso soluzioni operative, strumenti di policy e tecnologie per la riduzione delle emissioni. La sua posizione periferica indica che questi temi sono spesso affrontati come applicazioni specifiche piuttosto che come elementi centrali del quadro teorico generale.

3. Analisi comparativa

3.1 Analisi del contesto europeo: acciaio, calcestruzzo e cemento nelle infrastrutture ferroviarie

L'acciaio e il cemento rappresentano rispettivamente il 5% e il 4% delle emissioni di gas serra (GHG) dell'Unione Europea (European Commission, 2022; Marmier, 2023). Il settore edilizio e quello delle infrastrutture sono responsabili della grande maggioranza della domanda di mercato di acciaio e cemento, mentre le emissioni del settore edilizio sono in diminuzione, quelle del settore dei trasporti sono rimaste stagnanti (Danish Standards et al., 2025). Ad esempio, secondo uno studio LCA pubblicato dalla World Steel Association, le emissioni medie di settore per le barre d'armatura (acciaio) prodotte in Europa sono pari a 2.360 kgCO₂e per tonnellata di acciaio (Rebar, 2023; COWI, 2024). Mentre nell'ambito del cemento è in particolare il cemento Portland ad essere responsabile di circa l'80% delle emissioni totali legate alla produzione del calcestruzzo (COWI, 2024). In Europa, è la norma armonizzata europea per l'acciaio "EN 10020" a definire la classificazione in tre diverse categorie di acciaio in base alla loro composizione chimica: acciai non legati, acciai inossidabili e altri acciai legati. Mentre la norma europea armonizzata per il cemento "EN 197-1" definisce 27 tipologie di prodotti e costituenti del cemento per il mercato unico. Questi 27 tipi sono raggruppati in cinque categorie di cemento (CEM 1-5) in base alla percentuale di clinker contenuta nel prodotto. Per il calcestruzzo, la norma europea armonizzata "EN 206-1" definisce classi di resistenza comuni a livello europeo. Tuttavia, ciascun Paese europeo dispone di allegati nazionali alla EN 206-1 che stabiliscono quali classi di resistenza debbano essere utilizzate nella costruzione di infrastrutture (Danish Standards et al., 2025).

Il Mercato Unico sta subendo fenomeni di dumping di acciaio a basso costo, in particolare proveniente da Paesi asiatici, e dal 2008 la produzione di acciaio all'interno dell'Unione Europea è diminuita del 30%, raggiungendo un minimo storico. Le importazioni europee di acciaio da Paesi extra-UE sono aumentate significativamente, superando i 30 milioni di tonnellate annue. Allo stesso modo, le importazioni europee da Paesi extra-UE sono in crescita, con un aumento di circa il 260% dal 2016. Nello stesso periodo, le esportazioni di cemento dell'UE verso Paesi non UE sono diminuite di circa il 52% (Danish Standards et al., 2025).

I governi dell'UE e dell'OCSE investono circa 120 miliardi di euro all'anno nelle infrastrutture di trasporto quota compresa tra lo 0,5% e l'1,5% del PIL per ciascun Paese EU (European Climate Foundation, 2026). Nell'ambito delle infrastrutture di trasporto, l'80% delle emissioni incorporate di GHG deriva dai materiali, in particolare dall'acciaio e dal calcestruzzo contenente clinker di cemento (European Climate Foundation and H&Z Group companies, 2025a). Il restante 10–20% del carbonio incorporato deriva principalmente dalle emissioni in cantiere, ossia in particolare dall'uso di macchinari e di energia elettrica (Danish Standards et al., 2025).

Considerando il solo settore ferroviario dell'UE il fabbisogno annuo di acciaio è pari a ~2.200.000 tonnellate; mentre il fabbisogno annuo di cemento a ~5.500.000 tonnellate (European Climate Foundation, 2026). L'acciaio rappresenta il 75% del carbonio incorporato dell'infrastruttura ferroviaria (European Climate Foundation and H&Z Group companies, 2025a) – figura21.

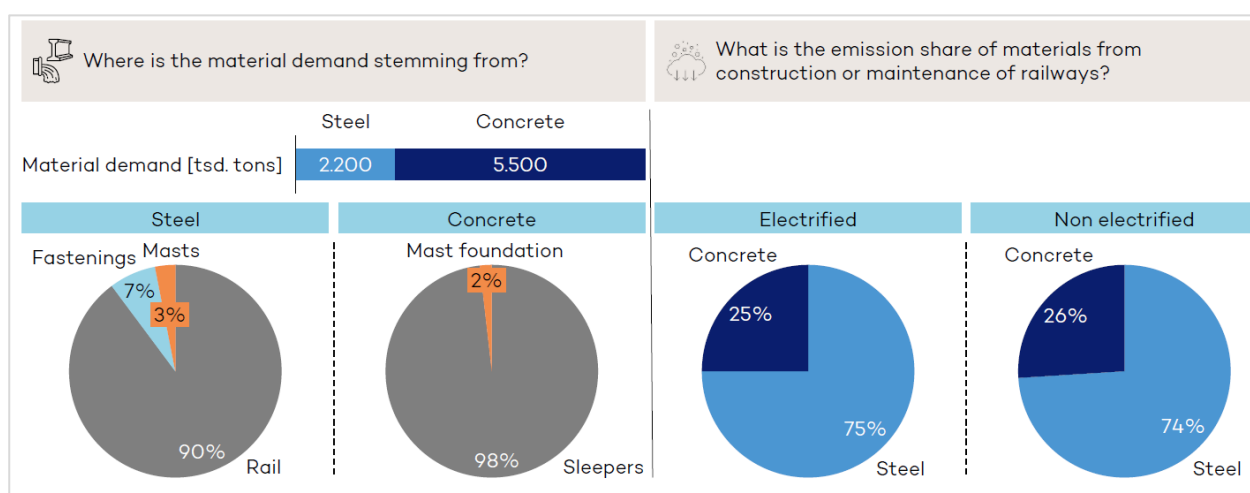


Figura 21. Valutazione dell'impatto di cemento ed acciaio per le infrastrutture ferroviarie (fonte: European Climate Foundation and H&Z Group companies, 2025a)

La spesa annuale stimata dei gestori delle infrastrutture per i materiali ferroviari si articola tra diverse categorie. Per le rotaie in acciaio si stima un costo compreso tra 1,1 e 3,1 miliardi di EUR, mentre per le traverse in calcestruzzo la spesa oscilla tra 1,0 e 1,8 miliardi di EUR.

A queste si aggiungono i sistemi di fissaggio in acciaio, con una spesa stimata tra 0,04 e 0,2 miliardi di EUR, e i pali, la cui spesa annua si attesta tra 0,08 e 0,11 miliardi di EUR (European Climate Foundation and H&Z Group companies (2025b)). L'impronta di carbonio dei materiali utilizzati annualmente per la costruzione e la manutenzione dell'infrastruttura ferroviaria dell'UE-27 è dominata dall'acciaio impiegato nelle rotaie (European Climate Foundation and H&Z Group companies (2025b) – Figura 22.

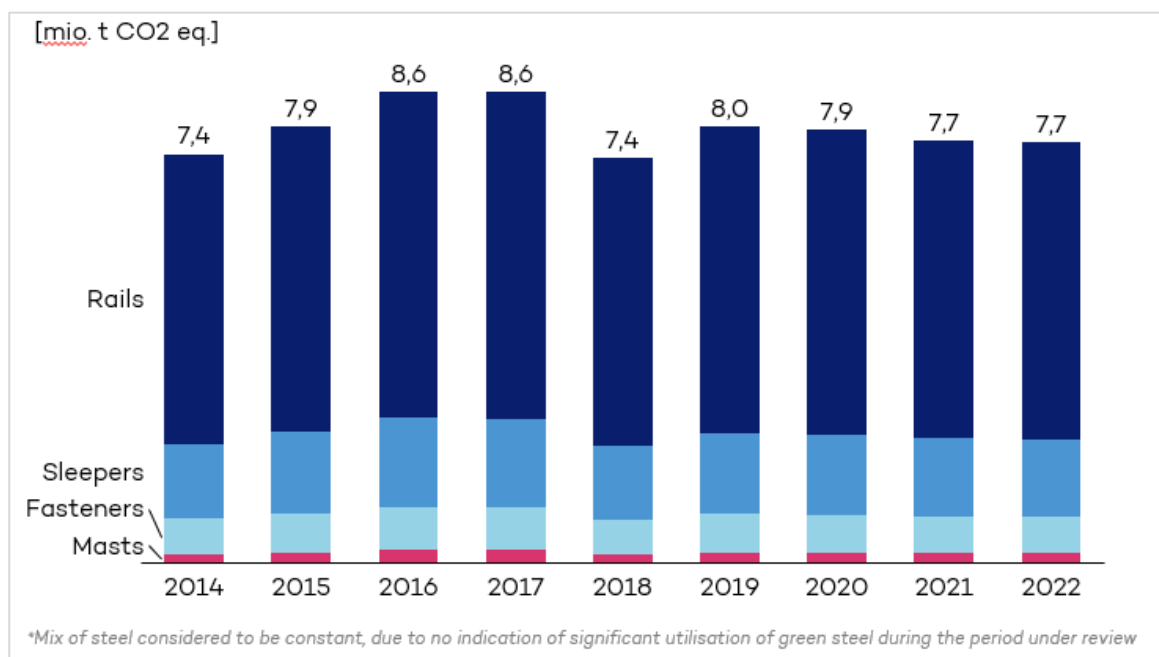


Figura 22. Impronta dei materiali nell'ambito delle infrastrutture ferroviarie (fonte: European Climate Foundation and H&Z Group companies, 2025b)

Le emissioni di queste due categorie di prodotti derivano principalmente dai processi di produzione. Le emissioni di gas serra derivanti dalla produzione di acciaio provengono sia dalla produzione di energia sia dalle emissioni legate ai processi. La maggior parte degli stabilimenti siderurgici odierni utilizza il metodo ad alta intensità di carbonio BF-BOF (Blast Furnace–Basic Oxygen Furnace), in cui il minerale di ferro viene fuso grazie al calore prodotto dalla combustione del carbone, che funge anche da “agente riducente” necessario per trasformare il minerale in metallo. Tra i metodi già operativi per la riduzione delle emissioni rientrano il miglioramento dell'efficienza energetica, il passaggio dal carbone a combustibili a minore contenuto di carbonio come il gas naturale o la biomassa, l'aumento del riciclo attraverso i forni elettrici ad arco (EAF), l'utilizzo di elettricità rinnovabile per gli EAF e l'impiego di materie prime alternative. Tra le tecnologie emergenti figurano i processi di riduzione basati sull'idrogeno (COWI, 2024).

Nel caso del cemento, il carbonio incorporato deriva prevalentemente dalle reazioni chimiche, nonché dai processi di riscaldamento e calcinazione di materiali calcarei e

argillosi. Questi processi variano in funzione dei diversi tipi di cemento e delle rispettive classi di resistenza. Durante la produzione del clinker di cemento, che costituisce il principale componente del cemento, il calcare viene riscaldato in forno a temperature elevate, in un processo chiamato calcinazione, che rilascia CO₂ come sottoprodotto. Inoltre, l'uso di combustibili (prevalentemente di origine fossile) per il riscaldamento dei forni, contribuisce ulteriormente alle emissioni di CO₂. Tra i metodi già in uso per ridurre le emissioni di GHG rientrano, ad esempio la sostituzione del clinker con materiali quali ceneri volanti, scorie e pozzolane, il riciclo del calcestruzzo demolito come aggregato per nuovi conglomerati, il miglioramento dell'efficienza energetica, l'utilizzo di combustibili alternativi, la carbonatazione e la mineralizzazione della CO₂, l'impiego di leganti alternativi, il calcestruzzo a base biologica, l'elettificazione della produzione del cemento, i cementi a base di magnesio e l'ulteriore ottimizzazione delle ricette del calcestruzzo. Inoltre, le tecnologie di cattura, utilizzo e stoccaggio del carbonio sono attualmente in fase di crescente integrazione negli impianti produttivi (COWI, 2024).

L'implementazione del GPP comporterebbe una riduzione delle GHG del 21% nel settore del cemento e del 18% in quello dell'acciaio (European Climate Foundation, 2026). Gli appalti pubblici nell'UE rappresentano tra il 14% e il 20% del PIL dell'Unione, costituendo quindi una leva significativa per la decarbonizzazione (European Climate Foundation and H&Z Group companies, 2025a). Il 15% delle emissioni globali può essere attribuito agli appalti pubblici, di cui i prodotti da costruzione sono responsabili del 12% (Ramboll, 2025). Un approccio sostenibile all'approvvigionamento ferroviario richiede politiche di appalto pubblico che impongano e consentano l'inclusione di criteri ambientali (European Climate Foundation and H&Z Group companies, 2025a). In Norvegia, Francia e Svezia, i criteri di sostenibilità sono legalmente obbligatori e devono essere inclusi negli appalti pubblici (Figura 23 - European Climate Foundation and H&Z Group companies, 2025a).

	National decarbonization targets	Rail a key lever in national decarbonization ¹	Funding for rail-decarbonization projects ²	Public procurement regulations explicitly support sustainable procurement ³	Company has decarbonization targets	Company's procurement policies meaningfully implement sustainability criteria	Takeaways
	✓	✓	✓	✓	 BANE NOR	✓	• Bane Nor, SNCF and Trafikverket have integrated sustainability criteria into tenders inline with national public procurement requirements • National decarbonization plans and funding are focused on rail expansion, electrification and modal switching, not sustainable procurement
	✓	✓	✓	✓	 BANEDANMARK	✗	
	✓	✓	✓	✗	 DB	✓	
	✓	✓	✓	✓	 ÖBB	✓	
	✓	✓	✓	✓	 SNCF	✓	
	✓	✓	✓	✓	 TRAFIKVERKET	✓	
	✓ Yes	✓ Somewhat	✗ No				

Figura 23. Analisi delle politiche pubbliche europee per un approccio sostenibile nel settore ferroviario (fonte: European Climate Foundation and H&Z Group companies, 2025a)

Non esiste però ancora un quadro normativo a livello UE che disciplini il carbonio incorporato delle infrastrutture di trasporto. L'unica normativa europea pertinente collegata alla valutazione, divulgazione e riduzione dell'impatto climatico a livello di progetto per la costruzione di infrastrutture di trasporto è la Direttiva sulla Valutazione di Impatto Ambientale (VIA) (2011/92/UE) e la Direttiva sulla Valutazione Ambientale Strategica (VAS) (2001/42/CE). La Direttiva VIA del 2011 obbliga le autorità infrastrutturali degli Stati membri europei a sviluppare una VIA e, nell'ambito di tali valutazioni, a divulgare l'impatto climatico e ambientale dei principali progetti infrastrutturali, come ferrovie a lunga percorrenza, autostrade e aeroporti. Successivamente, qualora le autorità concludano che l'impatto sia significativo, la Direttiva VAS le obbliga a limitare in modo strategico l'impatto climatico e ambientale. Tuttavia, la Direttiva VIA non contiene standard armonizzati su come l'impatto climatico derivante dalla costruzione o dal rinnovo delle infrastrutture debba essere valutato, né su come tale impatto debba essere comunicato e integrato nella fase decisionale del progetto.

Nel 2022 il Parlamento europeo ha adottato la Direttiva sulla rendicontazione di sostenibilità delle imprese (CSRD – 2022/2464) e nel 2024 è stata adottata la Direttiva sulla due diligence di sostenibilità delle imprese (CSDDD – 2024/1760). Questi due nuovi atti normativi si applicano alle grandi imprese infrastrutturali europee, che sono obbligate a effettuare valutazioni e rendicontazioni climatiche a livello organizzativo in conformità agli European Sustainability Reporting Standards, allineati anche con lo strumento globale noto come GHG Protocol. La rendicontazione delle emissioni Scope 3 è inclusa nell'ambito degli ESRS e del GHG Protocol; di conseguenza, anche la rendicontazione del carbonio incorporato nei materiali diventerà obbligatoria (Danish Standards et al., 2025).

3.2 Best practices nel settore ferroviario a livello europeo

3.2.1 Best practices relative alla riduzione della CO₂ incorporata nei materiali

SNCF Réseau e Saarstahl (Francia) hanno firmato un accordo pluriennale per un contratto del valore superiore a 1 miliardo di euro per la fornitura di rotaie in acciaio a basse emissioni di carbonio, prodotte tramite forno elettrico ad arco, combinato con un programma a ciclo chiuso per rifondere rotaie recuperate. Secondo la relativa EPD, ciò comporta fino al 70% in meno di CO₂ rispetto alle rotaie prodotte con processo BF/BOF. La policy di Sustainable Procurement viene definita annualmente e comunicata a livello di gruppo (European Climate Foundation and H&Z Group companies, 2025a).

Trafikverket (Svezia) richiede le EPD come requisito obbligatorio o criterio di esclusione ("knock-out") nelle gare sopra una determinata soglia di valore. I progetti devono presentare una dichiarazione climatica; è previsto un bonus per chi supera gli obiettivi di riduzione del carbonio, erogato in fase di verifica. Sono richieste EPD specifiche del fornitore, verificate

da terza parte quando nei calcoli delle emissioni vengono utilizzati fattori di emissione specifici del fornitore, al fine di verificare il rispetto dei requisiti sui materiali. Trafikverket utilizza il “Klimatkalkyl”, basato sul modello di Life Cycle Assessment sviluppato dalla Swedish Transport Authority. Questo approccio è impiegato per modellare le emissioni incorporate e per rilasciare una dichiarazione climatica di progetto; il calcolo si basa su EPD verificate, che vengono riesaminate dalla funzione di verifica di Trafikverket ((European Climate Foundation and H&Z Group companies, 2025a).

ÖBB (Austria) ha utilizzato rotaie prodotte con idrogeno da voestalpine utilizzando la tecnologia HYFOR (ferro puro ridotto con idrogeno), miscelato con rottame. La EPD di Tipo III del 2024 di voestalpine per le “rotaie medie” mostra una significativa riduzione delle emissioni di carbonio rispetto al percorso produttivo convenzionale. Il programma greentec steel di voestalpine prevede l'entrata in funzione di forni elettrici ad arco dal 2027 a Linz e Donawitz, con l'obiettivo di ridurre di circa il 30% le emissioni di CO₂ del gruppo entro il 2029 ((European Climate Foundation and H&Z Group companies, 2025a).

Deutsche Bahn (Germania) adotta un approccio differente al procurement sostenibile, focalizzato sul coinvolgimento dei fornitori. Questo è collegato anche a un processo di innovazione interno volto a promuovere l'innovazione lungo la catena di fornitura. Le valutazioni di sostenibilità dei fornitori sono state introdotte come standard per migliorare e sviluppare le performance di sostenibilità dei fornitori e gestire i rischi della supply chain. Nel 2024, oltre 1.200 fornitori disponevano di una valutazione di sostenibilità aggiornata, coprendo circa il 70% del volume complessivo degli acquisti. DB sta adottando un approccio graduale per concedere all'azienda e alla base fornitori il tempo necessario alla trasformazione. Le valutazioni di sostenibilità sono richieste nelle gare UE dal 2023; requisiti minimi sono stati introdotti per le aggiudicazioni specifiche DB dal 2025; l'obbligo sarà esteso agli appalti ≥ 100.000 € dal 2026. I KPI monitorati includono: (i) il volume di acquisti coperto da rating di sostenibilità dei fornitori (circa 70% nel 2024) e (ii) il numero di fornitori con rating aggiornato (>1.200). Il procurement utilizza rating di terze parti come requisito di accesso (“gating requirement”) e filtro di rischio, consentendo uno sviluppo mirato dei fornitori. La timeline di implementazione offre ai fornitori un periodo di adattamento per raggiungere le soglie minime prima che venga applicata l'esclusione (European Climate Foundation and H&Z Group companies, 2025a).

Lo studio COWI (2024) ha analizzato due progetti di costruzione di infrastrutture: l'autostrada E6 in Norvegia e una linea metropolitana a Copenaghen con l'obiettivo di valutare il potenziale di riduzione delle emissioni derivante dall'uso di acciaio e calcestruzzo/cemento a basse emissioni di carbonio. I risultati mostrano che i progetti infrastrutturali esaminati dispongono di un considerevole margine di riduzione delle emissioni climalteranti grazie all'utilizzo di acciaio e calcestruzzo a ridotto impatto emissivo. L'analisi del rapporto costo-efficacia di questi materiali indica, inoltre, che la

decarbonizzazione del settore delle costruzioni non implica necessariamente una spesa maggiore. Esaminando l'impiego dell'acciaio nei due progetti emerge che il ricorso a un'alternativa sostenibile consente di ottenere una riduzione delle emissioni pari a circa l'89%. Il green premium connesso all'utilizzo di un prodotto in acciaio a minore impatto ambientale si attesta su un valore negativo (-2,3%). Con riferimento all'impiego del calcestruzzo C35/45, i dati mostrano un potenziale di abbattimento delle emissioni di GHG pari al 54%. Anche in questo scenario il green premium risulta negativo (-5,1%).

Alcuni progetti hanno mostrato che una rotaia con EPD basata su materiale "100% EAF pre-material" (ad esempio, rotaia Saerstahl Pure Steel+) ha determinato una riduzione del GWP* del 64% rispetto all'impronta media delle rotaie in acciaio. Le traversine in composito e polimero hanno mostrato un potenziale medio di riduzione del GWP* del 46% rispetto alla media delle traversine in calcestruzzo (con la traversina in composito a più basso GWP che offre un potenziale di riduzione del 72%). I produttori di traversine in calcestruzzo allo zolfo dichiarano di ottenere un potenziale di riduzione del GWP* del 54% rispetto alle tradizionali traversine in cemento (European Climate Foundation and H&Z Group companies, 2025a).

L'Amministrazione svedese dei trasporti richiede agli appaltatori di ridurre l'impatto climatico dei progetti infrastrutturali in linea con i target climatici definiti dalla stessa STA. Tali requisiti, in vigore dal 2016, riguardano le emissioni derivanti dai materiali, dalle attività di costruzione e dalla futura manutenzione. Per i progetti di sviluppo superiori a 50 milioni di corone svedesi la STA stabilisce un budget di carbonio di riferimento specifico per il progetto utilizzando lo strumento di calcolo climatico (Klimatkalkyl), basato sui dati delle emissioni del 2015. Successivamente, nei documenti di gara vengono inseriti requisiti di riduzione delle emissioni coerenti con gli obiettivi di riduzione della STA. Al completamento del progetto, l'appaltatore presenta una dichiarazione climatica per verificare il raggiungimento delle riduzioni concordate e può ricevere bonus in caso di superamento dei target o incorrere in penali in caso di mancato raggiungimento (Swedish Transport Administration, 2023). Per tutti i progetti, sono stabiliti requisiti specifici per materiali appartenenti a gruppi chiave di prodotti (acciaio, calcestruzzo e cemento, asfalto, veicoli, attrezzature di lavoro e carburanti), con valori determinati in base all'anno di completamento del progetto. I materiali devono essere verificati mediante dati di GWP (provenienti da EPD di prodotto o dall'uso di EPD di prodotti equivalenti, che coprono i moduli del ciclo di vita A1–A3) e approvati dalla STA. Analogamente ai grandi progetti, possono essere applicati bonus o penali in base alle performance (Swedish Transport Administration, 2023; Ramboll, 2025)

Stahl-Holding-Saar è il quarto maggiore produttore di acciaio in Germania ed è protagonista del più grande progetto finanziato sull'idrogeno in Germania. Il processo di produzione dei bloom (semilavorati di acciaio) consente di generare fino al 70% in meno di emissioni di CO₂ rispetto ai processi produttivi convenzionali basati su minerale di ferro e carbone. Sono state risparmiate 1,75 milioni di tonnellate di CO₂ nella produzione di rotaie a basse emissioni fino al 2025 grazie all'utilizzo dei bloom Ascoval dal 1° gennaio 2021. Il

programma “Decarbonized Steel Rail”, avviato nel dicembre 2020, si basa su un approccio di economia circolare tra Saarlouis Rail, Saarlouis Ascoval e le reti ferroviarie. Saarlouis Rail propone ai clienti la possibilità di riciclare e recuperare le rotaie usate per produrre nuove rotaie verdi. Saarlouis Ascoval ricicla gli scarti metallici provenienti dallo stabilimento Saarlouis Rail e dalle reti ferroviarie: tali rotaie sono rifuse in un forno elettrico ad arco, producendo bloom di acciaio di alta qualità. Questi bloom vengono poi utilizzati per laminare rotaie verdi, che generano emissioni di CO₂ fino a 3 volte inferiori rispetto a quelle di un processo convenzionale che utilizza minerale di ferro e carbone come materie prime - corrispondenti a una riduzione di 1,84 tonnellate di CO₂ per tonnellata di rotaia (Saarlouis Rail, 2025)

3.2.1 Best practices relative all'applicazione di principi di circolarità alla gestione dei materiali

L'UIC è l'associazione professionale mondiale che rappresenta il settore ferroviario e promuove il trasporto ferroviario. Riunisce più di 200 membri tra compagnie ferroviarie, metropolitane, gestori dell'infrastruttura, produttori e istituzioni. Sei membri dell'UIC hanno avviato e finanziato un progetto chiamato REUSE (2019-2021) individuando ballast (pietrisco), acciaio (rotaie, ecc.) e traverse in calcestruzzo come materiali chiave, nell'ambito del settore ferroviario, in termini di gestione sostenibile delle risorse, di riuso, riciclo con connessa riduzione delle emissioni di CO₂, uso di risorse naturali e costi. Hanno poi condiviso un report con la raccolta delle migliori pratiche nella gestione di tali materiali chiave (UIC, 2021) che vengono presentate di seguito.

Network Rail (UK) ha un centro di riciclo ferroviario a Whitemoor, dove ogni giorno vengono consegnati pannelli di binario, traverse, rotaie, piccoli componenti in acciaio e unità di scambi e incroci. Questi materiali vengono classificati e selezionati in base a ciò che può essere riutilizzato sulla rete e a ciò che può essere venduto a rivenditori esterni autorizzati. È stato creato un team dedicato per coordinare la vendita e il riutilizzo degli asset ferroviari non più utilizzati, assicurando che tutte le operazioni siano monitorate, misurate e controllate. Inoltre, l'azienda ha sviluppato una piattaforma interna denominata “Surplus App” per facilitare la redistribuzione interna delle risorse, con l'obiettivo di aumentare l'efficienza finanziaria e promuovere una maggiore sostenibilità. Rispetto alla gestione delle traverse alla fine del loro primo ciclo di vita Network Rail invia tutte le traverse usate, raccolte durante la manutenzione, presso impianti centralizzati dove vengono controllate da esperti. Se soddisfano i criteri di riutilizzo, vengono reinviolate ai cantieri; se non possono essere riutilizzate, vengono riciclate con tecniche che variano a seconda del materiale. Nello specifico, le traverse in calcestruzzo vengono generalmente frantumate, il tondino viene estratto e venduto come rottame, mentre l'aggregato riciclato può essere impiegato come alternativa all'aggregato vergine nella produzione di nuovo calcestruzzo.

Deutsche Bahn (Germany) valuta gli impatti dei materiali grezzi attraverso uno strumento chiamato “Green Evaluation Tool”, basato su tre indicatori: (1) consumo cumulato di materie prime (in tonnellate), (2) consumo cumulato di energia (in GJ) e (3) potenziale di riscaldamento globale (in tonnellate di CO₂). L'azienda ha inoltre fornito un esempio di riparazione delle traverse. Se nelle traverse in calcestruzzo si formano crepe, queste perdono stabilità e possono causare errori nella posizione del binario ma riparando le crepe la vita utile della traversa può essere prolungata. Quindi durante il processo di ispezione, le traverse deteriorate vengono ricondizionate da DB Bahnbau e reinstallate nel letto del binario (nel 2020 sono state reinstallate 240.000 traverse ricondizionate, pari a circa 72.000 tonnellate di calcestruzzo, ovvero il 10% del totale delle traverse installate).

Trafikverket (Svezia) ha mostrato risultati positivi dal proprio processo di approvvigionamento delle traverse basato sul modello “Design, Bid, Build” in cui gli appaltatori sono responsabili della pianificazione dettagliata. In questo modello, la descrizione tecnica indica cosa deve essere realizzata ed è valutata secondo un computo metrico. La descrizione tecnica dei requisiti funzionali deve essere definita con precisione dall'ente appaltante, includendo aspetti come la riduzione dell'uso di materiali vergini; entro certi limiti, l'appaltatore può scegliere metodi di produzione e materiali. Trafikverket utilizza la metodologia Klimatkalkyl per calcolare i risultati dell'analisi del ciclo di vita. È stata analizzata una gara d'appalto relativa alla fornitura di 400.000 traverse all'anno. Nel bando era inclusa una clausola che richiedeva una riduzione del 20% delle emissioni nel periodo 2018–2022; il bando indicava l'obbligo di utilizzare la metodologia LCA. Inoltre, vengono applicate le Environmental Product Declarations per verificare le prestazioni climatiche. I risultati preliminari hanno mostrato una riduzione del 26% delle emissioni di CO₂ e una riduzione dei costi del 14%. Sulla base di questa buona pratica, tutti i nuovi progetti con un budget superiore a 5 milioni di euro richiedono ora una riduzione dell'18% delle emissioni di CO₂ rispetto alle traverse prodotte in modo tradizionale.

Rispetto all'acciaio presente delle rotaie SNCF Réseau (Francia) ha riferito che 3.500 tonnellate di rotaie rimosse sono state ritratte dall'acciaieria elettrica di ASCOVAL (Saint-Saulve) per produrre 144 blocchi (40% di vecchie rotaie e 60% di rottami metallici). I blocchi sono stati laminati e saldati in lunghe barre ferroviarie che sono state posate sui binari per essere testate in vista del completamento dell'omologazione.

Nel report viene evidenziata anche l'importanza della collaborazione tra i diversi attori all'interno del settore ferroviario. Un esempio di collaborazione di successo è quella tra con un'organizzazione esterna è il Wallasea Island Wild Coast Project nell'Essex (Regno Unito), un progetto ferroviario (Crossrail), il settore delle costruzioni e la charity RSPB (Royal Society for the Protection of Birds). Il progetto Crossrail trasporterà ogni anno circa 200 milioni di persone e ridurrà fino a 30.000 viaggi in auto da e verso Londra. Tra gli obiettivi di sostenibilità di Crossrail figura il riuso o riciclo del 95% del terreno di scavo proveniente dai

tunnel. Oltre 4,5 milioni di tonnellate di questo materiale saranno destinate all'Isola di Wallasea, trasportate principalmente via ferrovia e strada, riducendo ulteriormente le emissioni associate ai trasporti. Questo materiale verrà utilizzato per ripristinare le aree costiere e proteggere la terra dall'innalzamento del livello del mare.

PRORAIL (Paesi Bassi) attribuisce un valore monetario all'impatto ambientale nella valutazione delle offerte. Lo strumento chiave è l'Environmental Cost Indicator (ECI), utilizzato attraverso un software (DuboCalc) per calcolare i costi ambientali di un progetto. Questi costi diventano un fattore determinante nella gara: un'offerta con ECI inferiore ottiene un vantaggio competitivo significativo. L'ECI è un indicatore a punteggio singolo, espresso in euro. Integra tutti i principali impatti ambientali in un unico valore che rappresenta il "prezzo ombra ambientale" di un prodotto o progetto. Per calcolare la riduzione di prezzo associata all'ECI, vengono considerati: l'impatto ambientale di riferimento, l'impatto ambientale dell'offerta, l'impatto ambientale obiettivo, il vantaggio massimo predefinito. Questa azienda ha inoltre evidenziato la necessità di costruire un mercato europeo comune, soprattutto per i componenti specializzati più costosi e prodotti in piccole quantità con standard comuni per evitare che piccole differenze tecniche possano rendere i materiali incompatibili e non idonei allo scambio tra Paesi (ad esempio, piccole differenze nelle traverse impediscono l'uso di traverse olandesi usate in Germania).

Nel report concludono inoltre che il riciclo dell'acciaio risulta spesso molto conveniente, mentre il riutilizzo dei componenti presenta alcune sfide tecniche come la mancanza di standardizzazione o l'incertezza sulle prestazioni dei componenti riutilizzati. L'acciaio che viene ispezionato può avere in particolare tre possibili esiti: se i componenti risultano "come nuovi" possono essere reinstallati su qualsiasi linea, se sono "quasi come nuovi" e rispettano i criteri richiesti, possono essere riutilizzati su linee meno trafficate (es. linee storiche), se nessuna delle opzioni è possibile il materiale viene venduto come rottame.

Riguardo alle rotaie usurate, invece, queste possono essere impiegate come pali per recinzioni, come supporti per apparecchiature ferroviarie (come segnali), oppure vendute per la produzione di mobili di design. Vengono evidenziate anche possibilità di creare prodotti upcycled realizzati con materiali ferroviari usati come borse da spiaggia ricavate da vecchi rivestimenti dei sedili, tavoli da ping-pong costruiti con pavimentazioni dei treni, diffusori acustici realizzati da altoparlanti ferroviari, tavoli ottenuti dagli scalini di accesso ai treni, mobili ricavati dai pavimenti dei convogli, scrivanie fatte con pannelli del soffitto, sedute e tavolini da gioco prodotti da pavimentazioni, fioriere ricavate da cestini dei rifiuti, quaderni, fogli di servizio e lampade ottenuti dalle vecchie bacheche gialle delle informazioni di viaggio, cassette per uccelli, mangiatoie e decorazioni ricavate dalle stesse bacheche, custodie per laptop e cuscini ottenuti dai rivestimenti dei sedili. Infine, viene identificato che, considerando che le infrastrutture ferroviarie e i loro componenti hanno un ciclo di vita molto lungo, è necessario individuare delle strategie di sostenibilità di lungo periodo e per definire una strategia di economia circolare è necessario considerare sia la sostenibilità ambientale (le strategie di EC possono essere integrate nel documento strategico di sostenibilità

ambientale. Gli obiettivi devono essere allineati puntando a ridurre l'estrazione di materiali vergini) sia quella economica (molte tecnologie di riciclo sono ancora in fase di sviluppo e in alcuni casi costose, rendendo le materie prime seconde più care dei materiali primari. È quindi importante una valutazione tecnica ed economica globale per ottimizzare i processi di riciclo e raggiungere un ritorno sull'investimento in tempi sostenibili) sia la sostenibilità sociale (nell'attuazione di grandi cambiamenti organizzativi è fondamentale raggiungere un consenso sociale lungo l'intera catena del valore).

3.3 Analisi del contesto italiano: acciaio, calcestruzzo e cemento nelle infrastrutture ferroviarie

Dal report Cassa Depositi e Prestiti del 2023 emerge che l'Italia si è confermata come seconda siderurgia d'Europa con la produzione di 21 milioni di tonnellate di acciaio grezzo. La produzione si concentra prevalentemente nel Nord Italia (Figura 24) e per più dell'85% è rappresentata da acciaio secondario, prodotto a partire da rottame di ferro nei forni elettrici, a fronte della media europea che si attesta sul 44%. Meno del 15% dell'output nazionale è rappresentato da acciaio primario prodotto a partire da minerale ferroso (Cassa Depositi e Prestiti, 2023).

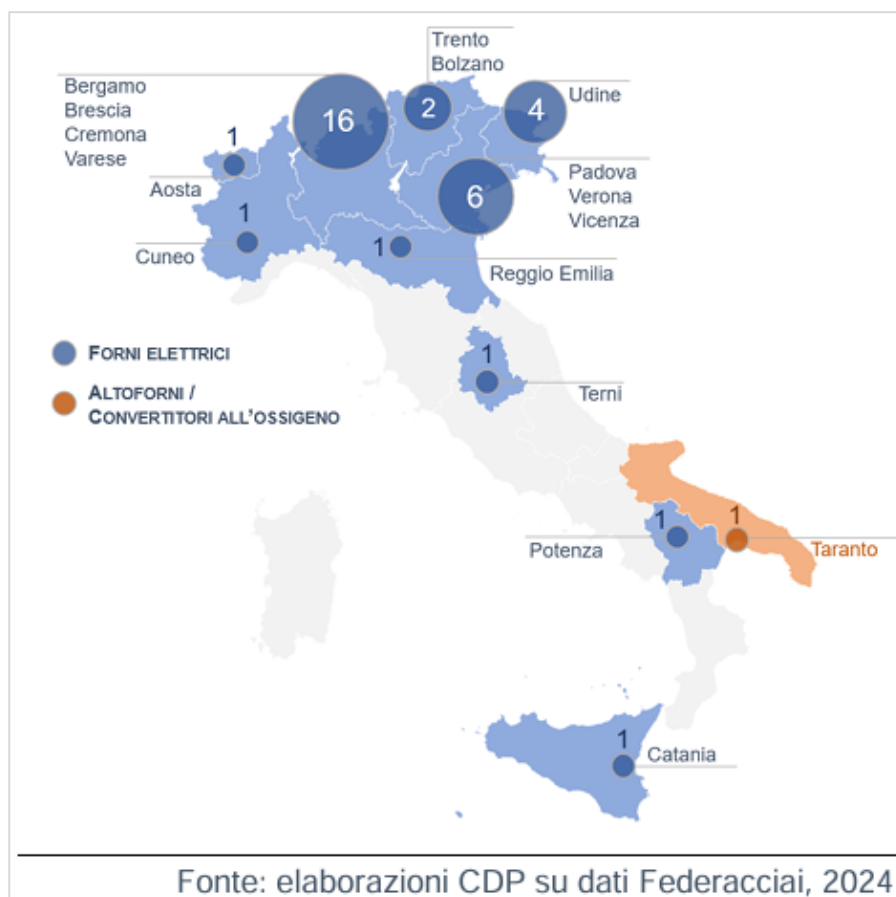


Figura 24. Produzione di acciaio in Italia (fonte: Cassa Depositi e Prestiti, 2023)

La figura 25 mostra le top 6 filiere utilizzatrici di acciaio in Italia, tra cui figurano rotaie e treni (3%).

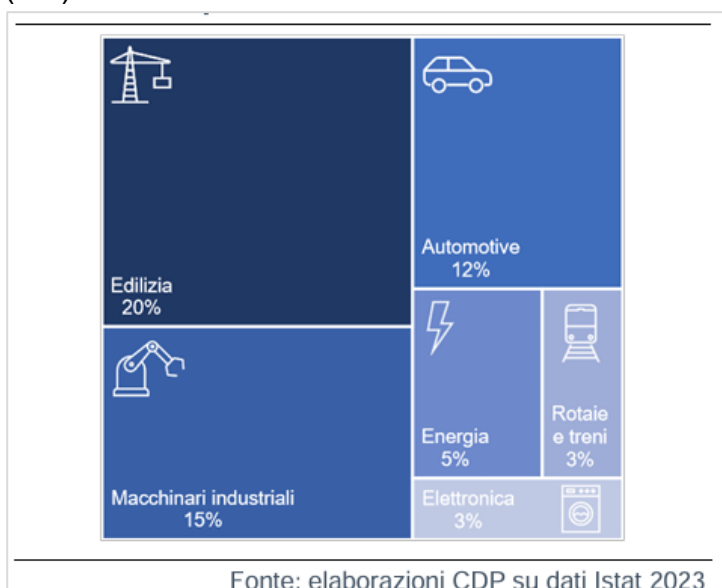


Figura 25. Filiere utilizzatrici di acciaio (fonte: Cassa Depositi e Prestiti, 2023)

Grazie alla prevalenza di produzione da forno elettrico, la siderurgia italiana è tra le più virtuose sul piano dell'economia circolare (a livello comunitario, è la prima per quantità di rottame ferroso riciclato e riutilizzato) e tra i primi produttori mondiali, è quella con la minore intensità emissiva (0,7 tonnellate di CO₂ emesse per tonnellata di acciaio prodotto a fronte della media mondiale di 1,5) come evidenziato nella figura 25 (Cassa Depositi e Prestiti, 2023).

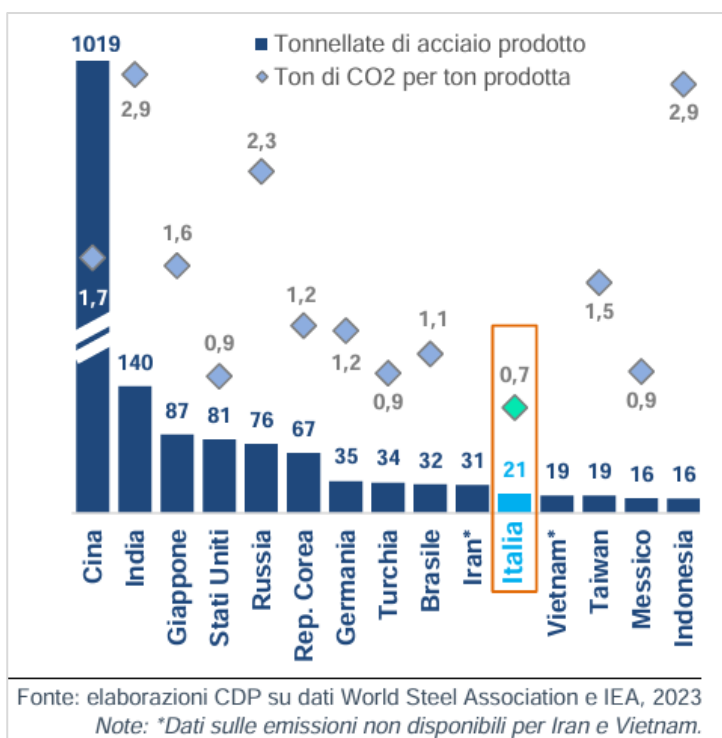


Figura 25. Produzione e intensità emissiva dell'acciaio dei top15 produttori mondiali (fonte: Cassa Depositi e Prestiti, 2023)

Nonostante questo, nel 2023 l'industria nazionale risultava dipendente dall'estero (in particolare dai Paesi extra-UE) per tre quarti del fabbisogno di prodotti piani, attualmente impiegati più dei lunghi nel sistema produttivo e nello specifico in settori quali la meccanica, i mezzi di trasporto e gli elettrodomestici (Cassa Depositi e Prestiti, 2023).

Il progetto Green Steel (Rossi et al., 2026) fornisce una panoramica degli impatti in termini di impronta di carbonio dei prodotti lunghi e dei prodotti piani ed emerge che a parità di tipologia di acciaio l'impatto dei prodotti lunghi è inferiore rispetto a quello dei prodotti piani, a loro volta meno impattanti dei prodotti speciali ed INOX (figura 26).

Impronta di carbonio (kg CO2 eq / ton)	Non legato	Legato	INOX	Non specificato	Media
Prodotti al carbonio lunghi	660			1161	860
Prodotti al carbonio piani	875				875
Prodotti speciali		1270			1270
Prodotti INOX			2238		2238
Media	666	1270	2238	1161	983

Risultati riferiti a 1 tonnellata di acciaio

Figura 26. Impronta di carbonio prodotti lunghi e piani (fonte: Rossi et al., 2026)

Nel 2025 le acciaierie nazionali hanno prodotto 20,7 milioni di tonnellate di acciaio, segnando un incremento del 3,6% sul 2024. La produzione di lunghi, pari a 12,3 milioni di tonnellate, è aumentata del 5,5% e quella di piani, 8,9 milioni di tonnellate, del 3,8% (la Repubblica, 2026).

Tra le principali aziende produttrici di acciaio in Italia emergono:

Acciaieria Arvedi (<https://www.arvedi.it/acciaieria/>) con fatturato pari a 2.706.878 euro. L'azienda produce acciai laminati a caldo, acciai zincati a caldo e acciai preverniciati. I centri produttivi sono situati a Cremona e a Trieste. Il sito produttivo di Cremona è un insediamento industriale moderno che può essere definito come un nuovo sistema per produrre acciaio. È il primo esempio in Europa di mini-mill ed il secondo al mondo per la produzione di laminati piani in acciaio. Dispone dal 2009 di due linee complete per la produzione di acciaio sotto forma di prodotti piani in rotoli, ognuna dotata di un proprio impianto fusorio (Acciaieria) per la produzione dell'acciaio liquido e di una linea integrata di colaggio e laminazione (ISP ed ESP). Con il secondo impianto si realizza il processo di colata e laminazione in continuo denominato Arvedi ESP - Endless Strip Production (brevettato nei principali Paesi). Il sito produttivo di Trieste offre il prodotto laminato a freddo. Il processo di laminazione a caldo di Cremona consente l'approvvigionamento di coils dalle caratteristiche geometriche adeguate per la produzione di acciai a freddo. La rilaminazione a freddo nello stabilimento di Trieste è in grado di mantenere inalterata la struttura omogenea a grano fine dell'acciaio di base prodotto a Cremona e quindi le sue elevate caratteristiche di formabilità.

Marcegaglia (<https://www.marcegaglia.com/officialwebsite/>) con sede a Gazoldo degli Ippoliti (Mantova) e fatturato 10 miliardi di euro. Il Gruppo è il principale trasformatore indipendente di acciaio al mondo, dotato di una gamma di prodotti che varia dal carbonio all'inossidabile, dai lunghi ai piani, dalla commodity alla specialty. La produzione Marcegaglia è destinata a molteplici settori: dalla distribuzione, all'ingegneria meccanica, dall'impiantistica industriale, all'edilizia e alle costruzioni, dall'automotive, alle specializzazioni per l'industria alimentare, l'agricoltura, la chimica e petrolchimica, la termomeccanica e l'idraulica, l'arredamento e molti altri. Hanno investito in Stegra, la prima acciaieria al mondo a emissioni zero; sono tra i partner di un progetto di cattura e stoccaggio della CO2 nell'area industriale di Ravenna e stanno esplorando l'utilizzo dell'idrogeno verde. Hanno anche fatto importanti scelte come: l'adesione al Global Compact delle Nazioni Unite e l'adesione alla First Movers Coalition, l'iniziativa legata al World Economic Forum. Sono entrati anche in ResponsibleSteel™, l'iniziativa globale che vuole contribuire allo sviluppo di un'industria siderurgica capace di produrre e trasformare in maniera sempre più responsabile e sostenibile.

Acciaierie d'Italia (<https://www.acciaierieditalia.com/it/home/>) con sede a Milano e diversi stabilimenti come Taranto, Genova, Novi Ligure. Il 20 febbraio 2024 il Ministro delle Imprese e del Made in Italy ha ammesso Acciaierie d'Italia S.p.A. alla procedura di Amministrazione Straordinaria. Oggi Acciaierie d'Italia fornisce prodotti alla maggior parte dei settori industriali i nastri laminati a caldo e a freddo sono utilizzati nel settore automotive (lamiere esposte o strutturali) e nella creazione di elettrodomestici, serramenti, scambiatori di calore, strutture metalliche leggere, tubi (sia strutturali che non), macchine movimento terra, serbatoi e caldaie in pressione, fusti per olio e alimenti, packaging. Le lamiere sono largamente impiegate nella cantieristica navale (civile e militare), nelle costruzioni edili, nella costruzione di grandi macchine per movimento terra, nella produzione di pali e di elementi strutturali per le torri eoliche, nella fabbricazione delle piattaforme di estrazione del petrolio e nella costruzione di tubi per il trasporto di fluidi (acqua, petrolio, gas, chimici, etc.).

Il Gruppo Pittini (<https://www.pittini.it/>) con sede ad Osoppo Udine ha una produzione annua di oltre 3 milioni di tonnellate di acciaio, è il primo produttore italiano di acciai lunghi destinati all'edilizia e all'industria meccanica. Gli stabilimenti gestiscono l'intero ciclo produttivo in ottica di economia circolare: dalla materia prima (materiali ferrosi riciclati) al prodotto finito. L'acciaio si ottiene attraverso un processo fusorio basato sull'utilizzo del forno elettrico (EAF, Electric Arc Furnace). Nel 1995, il Gruppo Pittini ha avviato il progetto Zero Waste con l'obiettivo di valorizzare e riciclare i residui della produzione. Il programma Green Steel rappresenta un progetto che riguarda lo stabilimento di Potenza e identifica un programma d'investimenti costituito da una serie di complessi interventi per il miglioramento degli effetti dell'attività produttiva sull'ambiente, con particolare riferimento: alla razionalizzazione del consumo delle acque; alla riduzione delle emissioni in atmosfera; all'incremento dell'efficienza energetica; al miglioramento dell'impatto acustico; alla copertura dell'area

dedicata al deposito del materiale ferroso. Inoltre, le 3 acciaierie del Gruppo Pittini Ferriere Nord (Osoppo), Acciaierie di Verona (Verona) e Siderpotenza (Potenza) utilizzano la tecnologia del forno fusorio elettrico (EAF) che permettono la fusione di cariche composte perlopiù da rottame: materiale riciclato (a differenza dal ciclo integrale). Il rottame ferroso, proveniente oltre il 70% via treno consente un ciclo produttivo con basso impatto ambientale. La produzione di billette da colata continua contribuisce ad alimentare i laminatoi del gruppo consentendo un controllo di tutto il ciclo produttivo. Il Gruppo Pittini contribuisce anche alla realizzazione della linea ferroviaria ad alta velocità che collegherà l'Europa all'Italia meridionale. Il Gruppo Pittini è stato scelto tra i partner per la realizzazione di questa prima tranche di lavori, con la fornitura di tralicci e barre. Sono stati infatti forniti al cliente Edil Fiorentini S.r.l., 700 tonnellate di tralicci. Nel corso dei lavori sono state inoltre utilizzate 10.000 tonnellate di barre, realizzate nello stabilimento di Siderpotenza.

Riguardo al cemento e al calcestruzzo considerando il Rapporto sulla Sostenibilità di Federbeton (2024) emerge che nel 2024 la produzione di cemento in Italia è stata di 19.959.203 tonnellate e hanno operato sul territorio 16 aziende di produzione del cemento con un numero di impianti pari a 28 cementerie a ciclo completo e a 11 centri di macinazione. Il cemento è un materiale da costruzione disciplinato dal Regolamento sui Prodotti da Costruzione e prodotto secondo la norma UNI EN 197-1. Si tratta di un legante idraulico inorganico, finemente macinato e composto prevalentemente da materiali di origine naturale, caratterizzato da una composizione statisticamente omogenea. Miscelato con aggregati e acqua, reagisce formando una massa progressivamente indurente capace di legare materiali inerti, dando origine a conglomerati cementizi, premiscelati e malte, elementi fondamentali delle strutture edili.

Il componente idraulicamente attivo del cemento è il clinker Portland, ottenuto dalla cottura della farina cruda. La composizione del cemento conferisce al prodotto idratato non solo proprietà meccaniche, ma anche resistenza agli attacchi chimici e chimico-fisici. Il ciclo produttivo del cemento comprende l'estrazione e la preparazione delle materie prime, la produzione e cottura della farina cruda per la formazione del clinker, il suo raffreddamento e stoccaggio, l'aggiunta di altri materiali per ottenere differenti tipologie di cemento e la successiva macinazione, fino allo stoccaggio finale e alla spedizione del prodotto. Mentre il calcestruzzo è a tutti gli effetti un semilavorato, in quanto costituito da un insieme di materie prime e componenti di base. Gli ingredienti indispensabili per la sua produzione sono l'acqua, il cemento, gli aggregati lapidei e i leganti, ai quali si aggiungono, per la rilevanza tecnologica assunta, gli additivi e le aggiunte minerali. Il processo di produzione del calcestruzzo si fonda sulla corretta miscelazione di tali componenti secondo specifici mix design, definiti in funzione delle caratteristiche di durabilità e di resistenza meccanica richieste dalla struttura da realizzare (Federbeton, 2024).

In base al report Federbeton (2024), fondato sulla rendicontazione di 349 impianti operanti in Italia, il settore del cemento ha recuperato oltre 2 milioni di tonnellate di materiali alternativi, tra rifiuti non pericolosi, sottoprodotti ed End of Waste, con un incremento del 7% rispetto al 2023. Il tasso di sostituzione delle materie prime naturali si mantiene sostanzialmente stabile all'8%, mentre il consumo di materie prime naturali registra un aumento dell'11% rispetto al 2023 (figura 27).

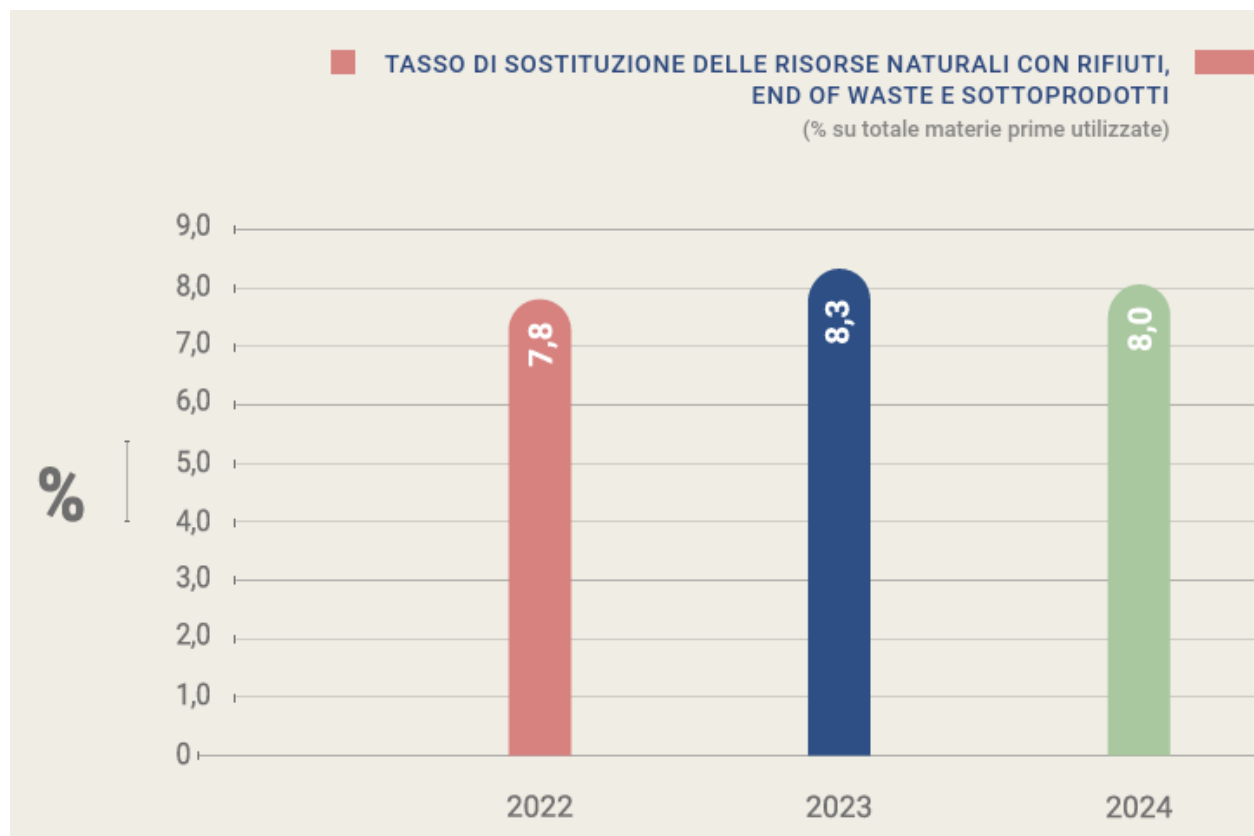


Figura 27. Tasso di sostituzione delle risorse naturali (fonte: Federbeton, 2024)

Inoltre, in merito al calcestruzzo preconfezionato, nel 2024 le aziende partecipanti hanno impiegato circa 16 milioni di tonnellate di aggregati naturali, con un lieve incremento rispetto al 2023, insieme a quantitativi in aumento di aggregati riciclati e aggregati industriali. Nello stesso anno sono state inoltre utilizzate oltre 300.000 tonnellate di terre e rocce da scavo, introdotte come categoria distinta per analizzare il ruolo dei sottoprodotti nell'economia circolare del settore.

Complessivamente, il tasso di sostituzione degli aggregati naturali con materiali di recupero e sottoprodotti si attesta al 2,5%. Considerando esclusivamente gli aggregati recuperati, il tasso di utilizzo nel 2024 raggiunge lo 0,58%, in aumento rispetto all'anno precedente. La figura 27 mostra la produzione di CO₂ per ciascuna tipologia di prodotto e si nota che la CO₂ per tonnellata di cemento prodotto è in calo (-2,3%) rispetto al 2023, così come quella per tonnellata di cementizio prodotto (-0,9%) e per tonnellata di clinker prodotto (-0,4%).

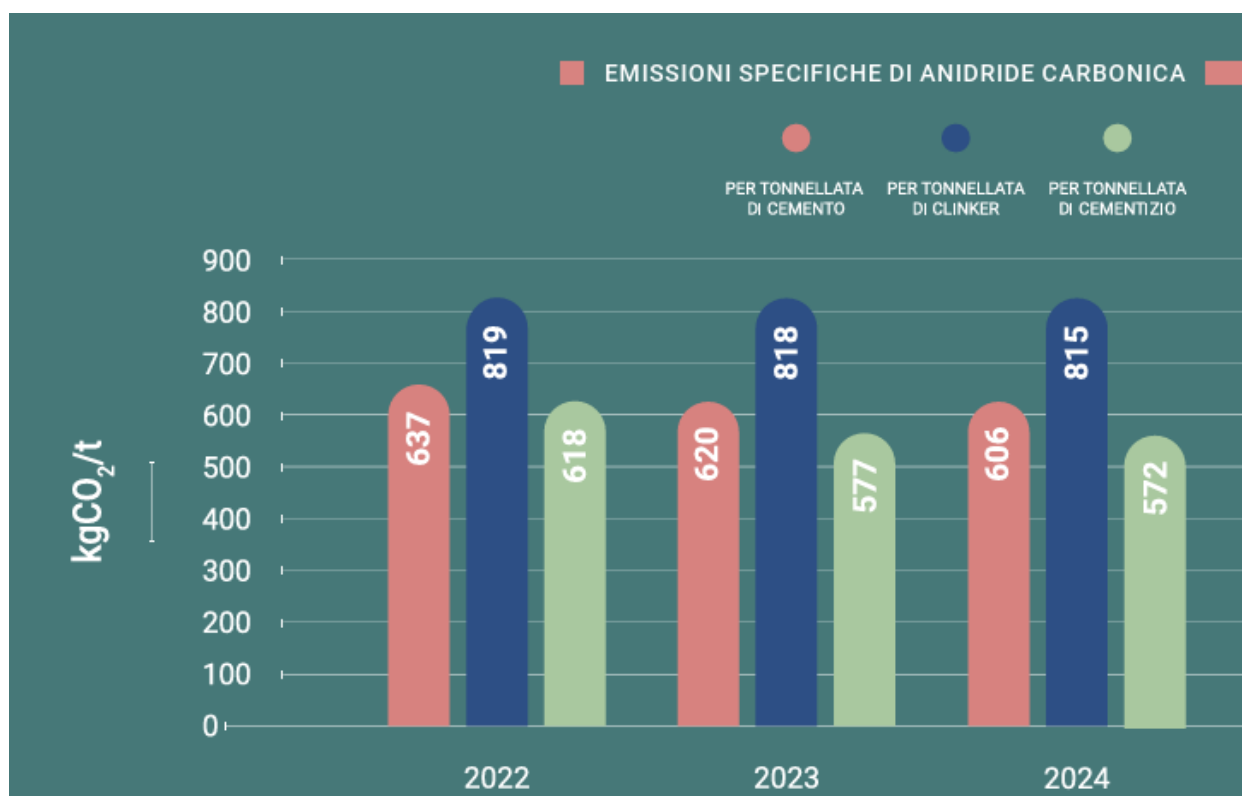


Figura 28. Emissioni di CO₂ (fonte: Federbeton, 2024)

Nel report sono inoltre definiti scenari di decarbonizzazione finalizzati a individuare le leve e le combinazioni più efficaci per il raggiungimento degli obiettivi al 2030 e al 2050 (figura 29). La traiettoria inerziale è utilizzata come scenario di riferimento e mostra che, in assenza di ulteriori investimenti, la neutralità climatica al 2050 non risulterebbe raggiungibile.

Sono stati elaborati due scenari alternativi. Lo scenario High SCM prevede la massimizzazione dell'uso di materiali di sostituzione del clinker, riducendo il ricorso alle tecnologie di CCS e consentendo una riduzione delle emissioni del 71% entro il 2030 rispetto al 1990; la neutralità climatica sarebbe raggiunta grazie all'impiego di CCS, con un abbattimento stimato di circa 6,1 milioni di tonnellate di CO₂ al 2050. Lo scenario High CCS prevede invece la massimizzazione dell'uso delle tecnologie di Carbon Capture and Storage, con una riduzione delle emissioni del 69% entro il 2030; in questo caso la neutralità climatica sarebbe raggiunta attraverso la cattura di circa 7,1 milioni di tonnellate di CO₂ al 2050.

Il costo annuo complessivo per l'implementazione delle leve di decarbonizzazione è stimato tra 805 e 1.145 milioni di euro al 2050, includendo i costi di trasporto e stoccaggio della CO₂ catturata. A tali costi si affianca un significativo investimento di capitale, stimato tra 4.870 e 5.300 milioni di euro, necessario per l'implementazione delle tecnologie CCS, della digitalizzazione, dell'adeguamento degli impianti all'uso di combustibili alternativi e di

materiali di sostituzione del clinker, nonché per l'installazione di fonti rinnovabili e sistemi di accumulo per l'autoproduzione (Federbeton, 2024).

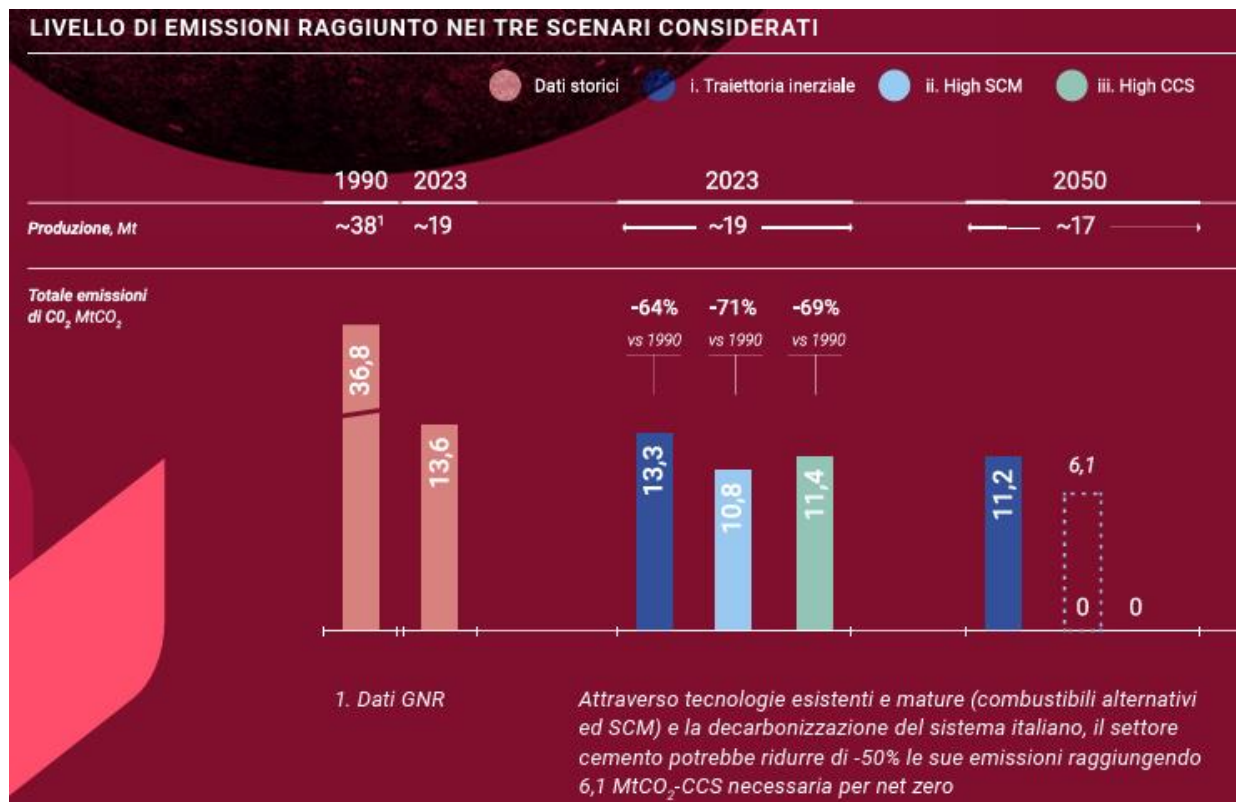


Figura 29. Livello di emissioni nei tre scenari (fonte: Federbeton, 2024)

Tra le principali aziende produttrici di cemento e calcestruzzo in Italia emergono:

Buzzi Unicem SRL (<https://www.buzziunicem.it/>) con sede a Casale Monferrato (Alessandria) e fatturato di 601.4 M di euro. È un gruppo multi-regionale internazionale, focalizzato su cemento e calcestruzzo preconfezionato. Nel settore cemento la società dispone di 8 cementerie a ciclo completo, 3 centri di macinazione e 4 terminali, disposti su tutto il territorio nazionale. Con una capacità produttiva pari a circa 11 milioni di ton/anno. Buzzi è impegnata nella mitigazione dei cambiamenti climatici e nella rendicontazione trasparente della sua strategia di gestione dei rischi e delle opportunità ad essi correlati. La produzione di calcestruzzo rientra anch'essa nel processo virtuoso di economia circolare grazie all'utilizzo di rifiuti da costruzione e demolizione opportunamente trattati, come, ad esempio, gli aggregati di riciclo. Scarti della lavorazione dell'acciaio e residui di produzione di acido solforico possono essere utilizzati al posto dei minerali di ferro. Il gesso chimico, ottenuto dal trattamento dei gas di combustione delle centrali elettriche può sostituire il gesso naturale mentre scorie e ceneri volanti possono essere parzialmente utilizzate al posto di clinker e pozzolana.

Heidelberg Materials Italia (<https://www.heidelbergmaterials.it/it>) con sede a Peschiera Borromeo (Milano) e fatturato di 760.82 M di euro. Italcementi e Calcestruzzi sono diventate Heidelberg Materials, uno dei principali produttori integrati di soluzioni e materiali per le costruzioni nei settori cemento, inerti e calcestruzzo preconfezionato. Nel settembre 2024 Heidelberg Materials ha avviato uno studio di fattibilità per un progetto di decarbonizzazione presso il suo cementificio di Rezzato Mazzano, in provincia di Brescia, che potrebbe diventare il primo stabilimento in Italia a produrre cemento e calcestruzzo a emissioni zero di carbonio catturate. I siti produttivi hanno ottenuto la certificazione ambientale ISO 14001 a cui si aggiunge, in alcune aree geografiche, la certificazione CSC che certifica il processo di approvvigionamento responsabile su tutta la filiera di produzione, secondo i principi base della Sostenibilità. Heidelberg Materials fornisce LCA e /o EPD per i suoi prodotti al fine di comunicare il loro impatto ambientale in modo trasparente e in modo che possano essere valutati sulla base del CAM per gare d'appalto pubbliche e protocolli per la valutazione della sostenibilità dell'edificio, in particolare LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) e nei protocolli GBC Italia UNI / PdR 13.1: 2015, noti come i protocolli ITACA e BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method).

Colacem SPA (<https://www.colacem.com/it/it>) con sede a Gubbio (Perugia) e fatturato pari a 493.63 M di euro. La società è presente in Italia con 6 stabilimenti a ciclo completo, 4 terminal e 3 depositi. Gli impianti di Tunisi (Tunisia), Sabana Grande de Palenque (Repubblica Dominicana), Lafiteau (Haiti), Balldre (Albania), insieme ai terminal di Alicante e Cartagena (Spagna), Montego Bay (Giamaica) e Lafiteau (Haiti), rappresentano la realtà internazionale del Gruppo. Gli stabilimenti produttivi Colacem adottano tutte le tecniche disponibili di settore a tutela dell'ambiente e della salute pubblica (BAT – Best Available Techniques), con i valori delle emissioni in atmosfera sotto i limiti di norma. Tutti i punti di emissione in atmosfera sono provvisti di impianti di abbattimento delle polveri i quali, come indicato dalle BAT, sono costituiti da filtri a tessuto del tipo a maniche, da filtri elettrostatici e da filtri ibridi in cui il filtro elettrostatico è abbinato in serie ad un filtro a maniche. Le linee di cottura degli stabilimenti Colacem sono dotate di appositi Sistemi di Monitoraggio in Continuo delle Emissioni in atmosfera, i quali provvedono a misurare e registrare i dati relativi alle emissioni, per essere poi trasmessi alle autorità competenti ed agli enti di controllo secondo quanto disposto dalle specifiche autorizzazioni. Le principali materie prime impiegate da Colacem sono costituite da marna, calcare, argilla, gesso e pozzolana. Esse sono estratte da cave e miniere. Al fine di contenere i consumi delle materie prime naturali, come previsto dalle migliori tecniche disponibili di settore, vengono anche utilizzati rifiuti non pericolosi derivanti da altre attività, recuperandoli in sostituzione dei suddetti materiali.

3.3.2 Il caso di studio del Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane

Come emerge da quanto dichiarato dal Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane, principale operatore e leader a livello nazionale nel settore ferroviario (con una rete ferroviaria che si

estende per oltre 17.000 chilometri), tra i materiali maggiormente impiegati nelle attività di costruzione e manutenzione delle linee ferroviarie rientrano l'acciaio e le traversine in cemento armato precompresso (CAP).

In particolare, l'acciaio è utilizzato prevalentemente per la realizzazione delle rotaie (armamento) e delle strutture a supporto dei sistemi di alimentazione elettrica dei treni. Le traverse in CAP, invece, sono ormai adottate in sostituzione delle tradizionali traverse in legno, grazie alla loro maggiore durabilità e all'assenza di sostanze pericolose per l'ambiente (Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane, 2024a).

All'interno della figura 2 sono rappresentati i consumi di acciaio, cemento e calcestruzzo relativi alla fase di realizzazione delle infrastrutture ferroviarie in collaborazione con imprese terze.

MATERIALI APPALTATORI INFRASTRUTTURA FERROVIARIA	UNITÀ DI MISURA	2024
Acciaio per armamento ferroviario	t	24.505
- Proveniente da riciclo (5%)	t	1.327
Acciaio per sistemi tecnologici ferroviari	t	1.934
- Proveniente da riciclo (15%)	t	283
Calcestruzzo	t	20.743.903
- Contenente inerti riciclati (0,06%)	t	47.143
Traverse CAP	t	560.264
- Proveniente da riciclo (0%)	t	-

Figura 2. Acciaio, cemento e calcestruzzo utilizzati nelle ferrovie italiane (dati report 2024, fonte: Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane, 2024a)

Nel 2024 il Gruppo ha gestito un flusso di 259.250 tonnellate di acciaio per armamento ferroviario e 149.077 tonnellate di traverse in cemento armato precompresso, di cui il 14% proveniente da riciclo e recuperato (Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane, 2024b - Figura 2).

Materiali utilizzati con contenuto riciclato:			
acciaio da riciclo e recuperato:	Traverse CAP da riciclo e recuperato:	Traverse in legno da riciclo e recuperato:	Batterie industriali da riciclo:
14.569	20.968	242	16.143
tonnellate (6% del totale)	tonnellate (14% del totale)	tonnellate (5% del totale)	kg (3% del totale)

Figura 2. Percentuale di circolarità dei materiali (fonte: Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane, 2024b)

Dal Rapporto Ambientale del Gruppo FS 2024 (Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane, 2024b) emerge che tra le varie strategie relative alla tutela ambientale applicate dal Gruppo rientrano l'obiettivo delle zero emissioni nette (Net Zero) entro il 2040 perseguito anche attraverso la progressiva riduzione delle emissioni di gas a effetto serra lungo l'intera catena del valore (Scope 1, 2 e 3) e la preferenza per materiali non vergini e l'applicazione di criteri di sostenibilità negli approvvigionamenti, con l'obiettivo di trasformare i flussi in uscita da problema a risorsa. In tale prospettiva, il Gruppo ha introdotto criteri di sostenibilità nelle procedure di acquisto, rafforzato la collaborazione con fornitori allineati alla Politica Ambientale e sviluppato alleanze strategiche con i principali attori dell'economia circolare italiana, promuovendo progetti innovativi di recupero e valorizzazione. La figura 2 mostra il trend 2021-2023 delle loro emissioni Scope 3 mentre la figura 27 il trend 2023-2024. Le figura 2 e 2 evidenziano, invece, la scomposizione delle emissioni di anidride carbonica equivalente ed illustrano rispettivamente i contributi che hanno concorso alla differenza di emissioni tra il 2022-2023 3 tra il 2023-2024 per Scope 3.

	Unità di Misura	2023	2022	2021	Δ% 23 vs 22
Emissioni totali indirette di CO₂e Scope 3	tCO₂e	5.116.694	4.071.521	3.939.342	26%
Emissioni indirette di CO ₂ e scope 3 (categorie rilevanti - GHG Protocol)	tCO ₂ e	5.037.957	4.009.868	3.881.342	26%
- Beni e servizi acquistati	tCO ₂ e	11.138	4.674	59.435	138%
- Beni capitalizzati	tCO ₂ e	4.012.866	3.173.003	2.985.375	26%
- Approvvigionamenti energetici upstream	tCO₂e	416.992	282.765	302.057	47%
- Utilizzo dell'infrastruttura ferroviaria da parte di altre imprese ferroviarie	tCO ₂ e	596.961	549.426	534.474	9%
Emissioni indirette di CO₂e scope 3 (categorie non rilevanti - GHG Protocol)	tCO₂e	78.737	61.652	58.000	28%
- Gestione dei rifiuti prodotti	tCO ₂ e	13.133	15.050	12.504	-13%
- Viaggi d'affari (inclusi viaggi in aereo e hotel)	tCO ₂ e	7.231	5.115	3.329	41%
- Spostamenti casa lavoro	tCO ₂ e	49.743	30.834	29.928	61%
- Asset immobiliare in locazione (tenant)	tCO ₂ e	8.629	10.653	12.239	-19%

Figura 2. Emissioni Scope 3 Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane trend 2021-2023 (fonte: Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane, 2023)

Emissioni Scope 3 (value chain) Trend e commento	2024	8.347.521 tCO ₂ e	Variazione % 2024 vs 2023: +63,1% Nel 2024 le emissioni Scope 3 hanno registrato un incremento sostanziale principalmente dovuto a: • beni capitalizzati (6.324.783 tCO₂e): il cui incremento rispetto all'anno precedente riflette i maggiori investimenti in infrastrutture e cantieri RFI, incluse le opere del PNRR • utilizzo dell'infrastruttura da parte di terzi (764.529 tCO₂e): legato a maggior traffico di operatori terzi • approvvigionamenti energetici upstream (750.409 tCO₂e): legato all'incremento dei fattori emissivi dei mix energetici europei • trasporto e distribuzione upstream (431.939 tCO₂e): nuova categoria inclusa nel 2024
	2023	5.116.694 tCO ₂ e	

Figura 2. Emissioni Scope 3 Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane trend 2023-2024 (fonte: Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane, 2024b)

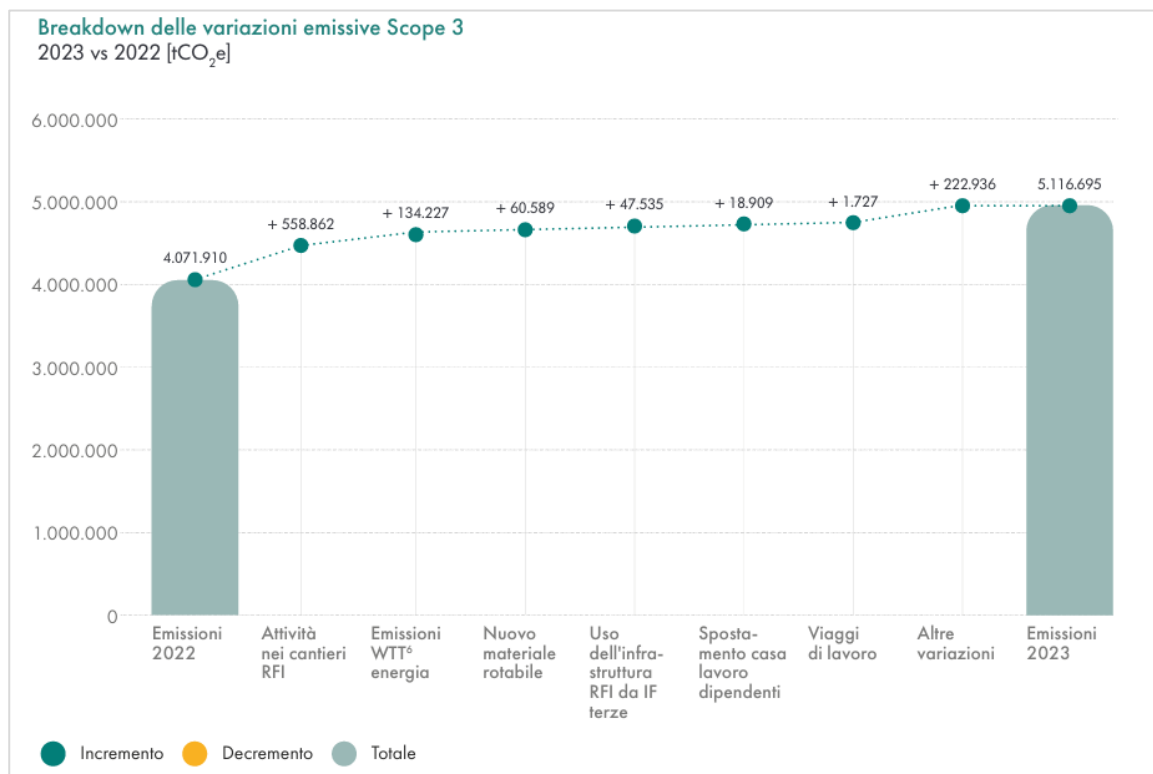


Figura 2. Breakdown delle emissioni Scope 3 Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane 2022-2023 (fonte: Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane, 2023)

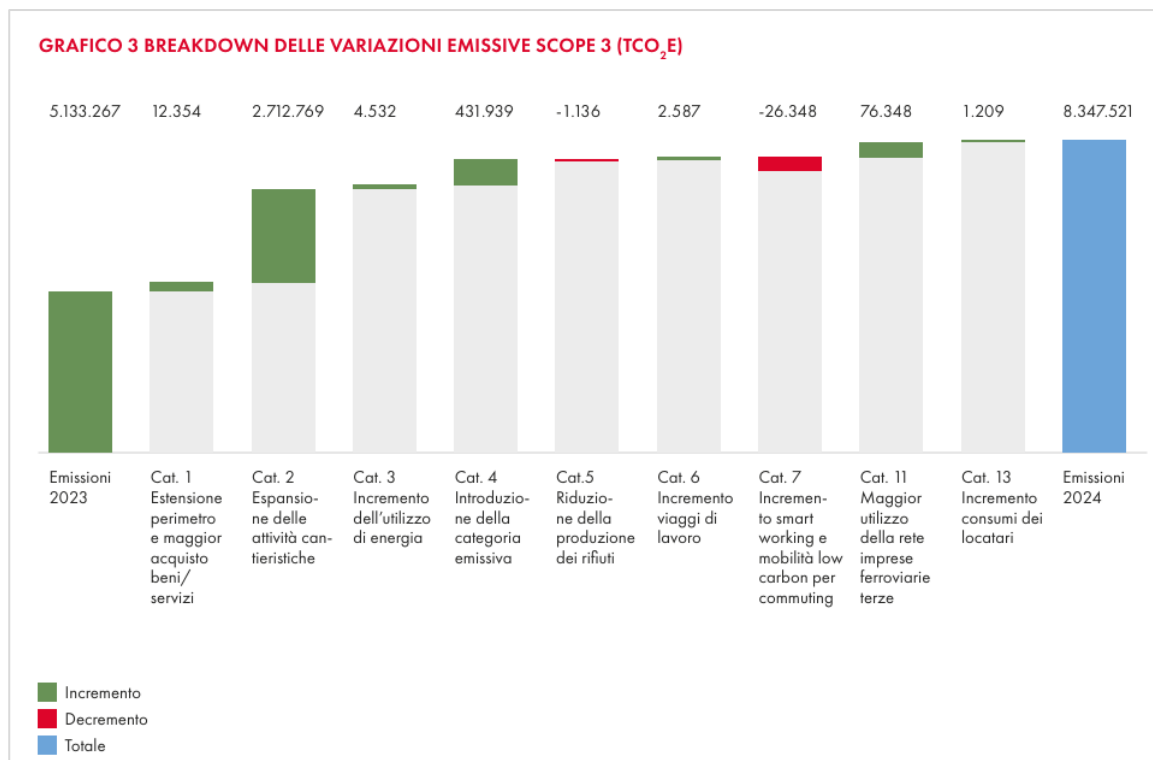


Figura 2. Breakdown delle emissioni Scope 3 Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane 2023-2024 (fonte: Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane, 2024b)

Con l'obiettivo di ridurre le emissioni Scope 3, innovare i materiali (acciaio riciclato, legno certificato, eliminazione del glifosato entro il 2030), allargare l'applicazione dell'economia circolare e rendere il sistema più resilienza del sistema, l'azienda si è impegnata anche nel procurement sostenibile. Nello specifico, dal 2024 è operativa la piattaforma digitale gratuita capace di valutare le performance ambientali, sociali e di governance degli operatori economici che lavorano con il Gruppo. Il sistema assegna un Rating da E (minimo) ad A+ (massimo) basato su oltre 100 criteri facendo diventare la sostenibilità un criterio di scelta con un impatto concreto sulle gare (Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane, 2024b).

3.3.3 Stima comparativa degli impatti emissivi di cemento e acciaio: scenari di best e worst practice

Il Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane dichiara che nel 2024 ha gestito un flusso di 259.250 tonnellate di acciaio per armamento ferroviario e 149.077 tonnellate di traverse in cemento armato precompresso (Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane, 2024b). La quantità di cemento Portland contenuta in 1 tonnellata di traverse in cemento armato precompresso varia all'incirca tra 180 e 220 kg. È quindi possibile concludere che in 149.077 tonnellate di traverse in cemento armato precompresso, considerando il valore più alto di 220 kg, sono contenute 32.797 tonnellate di cemento.

La produzione di una tonnellata di cemento Portland ordinario comporta un'emissione di circa 0,54 t di CO₂, mentre l'impiego di un cemento alternativo, come ad esempio il Solidia Cement, consente una riduzione delle emissioni pari a circa il 30% (Antunes et al., 2022), con un rilascio stimato di 0,378 t di CO₂ per tonnellata di materiale. Sulla base di tali dati, è possibile stimare che la produzione di traverse in cemento armato precompresso realizzate con cemento Portland ordinario può determinare un'emissione complessiva pari a 17.710 t di CO₂ equivalente, a fronte di 12.397 t di CO₂ equivalente nel caso di utilizzo del cemento alternativo, con un potenziale risparmio di 5.313 t di CO₂, corrispondente ad una eventuale riduzione complessiva del 30%.

Inoltre, una tonnellata di traverse in cemento armato precompresso contiene circa 40 kg di acciaio sotto forma di tondini. Considerando una produzione complessiva pari a 149.077 tonnellate di traverse, il quantitativo totale di acciaio impiegato risulta quindi pari a 5.963 tonnellate. Assumendo, in riferimento a una condizione di *best practice*, un fattore emissivo pari a 500 kg di CO₂ per tonnellata di acciaio (Fondazione Ecosistemi, 2024), le emissioni complessive associate risultano pari a 2.982 t di CO₂. Al contrario, considerando un approccio *worst practice*, con emissioni medie pari a 1.500 kg di CO₂ per tonnellata di acciaio liquido prodotto attraverso il sistema BF-BOF (Fondazione Ecosistemi, 2024), il totale delle emissioni associate raggiunge 8.945 t di CO₂.

Sommando i valori stimati di CO₂ associati al cemento e all'acciaio contenuti nelle traverse in cemento armato precompresso, e facendo riferimento a condizioni di best practice, è

possibile ipotizzare che le emissioni complessive generate da questi due materiali all'interno del prodotto ammontino a circa 15.379 t di CO₂.

Analogamente, considerando scenari a maggiore impatto ambientale (worst practice), la CO₂ complessivamente prodotta può essere stimata in circa 26.655 t di CO₂. Sulla base di tali assunzioni, è quindi ragionevole ritenere che l'impiego di materiali a minore impatto per la produzione di traverse in cemento armato precompresso possa determinare una riduzione potenziale delle emissioni pari a circa il 42,3%.

Il Gruppo FSI dichiara inoltre un utilizzo complessivo di 259.250 tonnellate di acciaio per l'armamento ferroviario. Applicando le medesime assunzioni adottate per la valutazione delle traverse in cemento armato precompresso, è possibile stimare che le emissioni di CO₂ associate all'impiego di acciaio prodotto tramite il sistema BF-BOF ammontino a circa 388.875 t di CO₂, mentre quelle relative all'utilizzo di acciaio a minore impatto si attestino intorno a 129.625 t di CO₂. Sulla base di tali ipotesi, si può dunque ipotizzare una riduzione potenziale delle emissioni pari a circa il 66,7% utilizzando un acciaio a minor impatto.

3.3.4 Gruppo di lavoro 3 prodotti intermedi del tavolo Ecodesign per l'acciaio

Federacciai, la federazione delle imprese siderurgiche italiane, è impegnata nelle attività di consultazione nell'ambito del tavolo sull'Ecodesign per l'acciaio. In tale contesto, ha fornito commenti e contributi rappresentativi del punto di vista delle acciaierie nazionali in relazione allo studio preparatorio del Joint Research Centre sui prodotti intermedi in acciaio e alle relative implicazioni per l'atto delegato della Commissione europea.

Si riportano di seguito i commenti proposti da Federacciai che saranno inviati alla Commissione Europea a seguito del 2° stakeholder meeting sullo studio preparatorio sui prodotti intermedi in ferro e acciaio.

Considerando la sezione "Classi di performance" Federacciai riporta quanto segue: *"si condividono i principi fondamentali alla base della definizione delle classi di performance per i cinque prodotti rappresentativi. In particolare, si ritiene che i seguenti principi essenziali adottati dal Joint Research Centre debbano essere mantenuti invariati nello sviluppo dell'atto delegato sull'acciaio nell'ambito dell'ESPR: l'adozione della metodologia del Product Carbon Footprint (PCF); la specificità del prodotto; la neutralità tecnologica; la correlazione positiva tra la quota di materiali secondari impiegati nella produzione e la classe assegnata al prodotto (senza ricorso a scale scorrevoli); la semplicità e la coerenza con le politiche esistenti. Si sostiene inoltre l'adozione di una metodologia specifica per prodotto nella definizione delle classi di performance ambientale. In tal senso, l'atto delegato relativo ai prodotti intermedi in acciaio dovrebbe attenersi a tale principio, al fine di garantire una differenziazione accurata, equa e significativa tra i prodotti ed evitare aggregazioni*

inappropriate di categorie eterogenee. Si raccomanda di aumentare il livello di ambizione della proposta, introducendo una maggiore granularità all'interno della Classe A, ad esempio mediante la creazione di sottoclassi (A+, A++, ecc.). La definizione delle classi dovrebbe essere accompagnata da una metodologia di monitoraggio e verifica dettagliata e coerente, finalizzata al calcolo del PCF e all'attribuzione della classe ai singoli prodotti in acciaio. Per quanto riguarda il calcolo delle emissioni di Scope 1, si evidenzia la necessità di considerazioni specifiche relative al metano e alle Garanzie di Origine. Analogamente, per le emissioni di Scope 2, occorre includere valutazioni relative all'energia rinnovabile e alle Garanzie di Origine. Si segnalano inoltre criticità intrinseche associate all'utilizzo del Metodo 2. Le classi di performance per l'acciaio inossidabile dovrebbero essere meglio definite, facendo riferimento a dati reali più rappresentativi. A tal fine, per consentire analisi più approfondite, sarebbe opportuno distinguere chiaramente tra i dati relativi a BOF-UE e BOF-importazioni, nonché tra EAF-UE ed EAF-importazioni. Le soglie di classificazione dovrebbero basarsi, ove possibile, su valori reali di PCF associati ai volumi di produzione, poiché l'utilizzo del Metodo 2 non appare sufficientemente robusto. Inoltre, tali soglie dovrebbero essere revisionate periodicamente sulla base di dati empirici, al fine di garantire una traiettoria chiara e coerente verso la decarbonizzazione del settore siderurgico. Infine, si sottolinea l'importanza di assicurare un adeguato allineamento tra le metodologie previste dall'ESPR e quelle del Construction Products Regulation, così da evitare incoerenze e duplicazioni indebite dei processi di certificazione per i medesimi prodotti".

Rispetto al Task 4 – Life Cycle Assessment di seguito i commenti: "si supporta l'impostazione del parametro A pari a 1 all'interno del Circular Footprint Formula, in linea con la metodologia Product Environmental Footprint, per i prodotti intermedi. I rottami pre-consumo e post-consumo dovrebbero essere trattati in modo equivalente ai fini dell'attribuzione degli impatti ambientali. Si propone inoltre di includere nello scenario di analisi anche il percorso produttivo DRI-EAF (Direct Reduced Iron – Electric Arc Furnace), oltre agli attuali scenari basati su EAF a rottame e BF/BOF, al fine di garantire una rappresentazione più completa delle tecnologie disponibili".

Per quanto riguarda il contenuto di materiale riciclato, le posizioni espresse sono le seguenti. "Si concorda sull'utilizzo di una formula basata sugli input (input-based formula). Si propone la definizione di una formula generale e univoca per il contenuto di riciclato, che consideri congiuntamente i rottami pre-consumo e post-consumo, prevedendo al contempo, come opzione, una dichiarazione separata delle due componenti. Si sostiene un approccio di bilancio di massa a livello di sito (site-level mass balance), supportato da un sistema di verifica da parte di terzi. Si evidenziano criticità connesse all'esclusione degli scarti interni (internal scrap) dal calcolo del contenuto di materiale riciclato. Non si supporta la proposta di una possibile futura esclusione degli scarti interni di processo (home scrap) dal calcolo del contenuto di riciclato. Si richiede un allineamento tra le metodologie previste dall'ESPR e quelle delle Environmental Product Declarations per la valutazione del contenuto di materiali riciclati. Si segnala infine che il Regolamento (UE) 2024/3110 di revisione del

Construction Products Regulation introduce il termine Assessment and Verification System (AVS) in sostituzione di Assessment and Verification of Constancy of Performance (AVCP), precedentemente utilizzato nel Regolamento (UE) n. 305/2011. Si richiede pertanto di sostituire il termine AVCP con AVS in tutte le 11 occorrenze presenti nel documento”.

Infine, in merito alle Substances of Concern, si evidenziano i seguenti aspetti. “La definizione della categoria SoC (d) risulta ambigua: le sostanze che influiscono negativamente sul riuso e sul riciclo dei materiali nel prodotto in cui sono presenti non sono necessariamente sostanze problematiche dal punto di vista sanitario o ambientale. Piuttosto, esse sono da considerarsi critiche esclusivamente in relazione alle attività di riuso e riciclo. Si rende pertanto necessaria una definizione più chiara di tale categoria, al fine di evitare di indurre in errore i consumatori circa la natura effettiva delle problematiche associate alla presenza di tali sostanze.

Le soglie previste per rame e stagno risultano troppo basse. Si esprime supporto per l’opzione cosiddetta “reduced option” e per la piena esenzione della categoria SoC (b)”. Mentre rispetto al Digital Product Passport (DPP) “si ritiene che il livello di granularità proposto per la dichiarazione del PCF e del contenuto di materiale riciclato debba essere definito a livello di modello di prodotto”.

Riferimenti bibliografici

Antunes, M., Santos, R. L., Pereira, J., Rocha, P., Horta, R. B., & Colaço, R. (2021). Alternative clinker technologies for reducing carbon emissions in cement industry: A critical review. *Materials*, 15 (1), 209.

Cassa Depositi e Prestiti (2023). La siderurgia italiana tra sfide nazionali ed europee: quali prospettive di sviluppo. Accessibile a chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.cdp.it/resources/cms/documents/CDP-Brief-La-siderurgia-italiana-ITA.pdf

COWI (2024). Low-carbon cement and steel, and the green premium in larger infrastructure projects.

Danish Standards, Nordic Council of Ministers and European Climate Foundation (2025). Lowering embodied carbon of road- & rail infrastructure - Nordic conference Summit. Nordic conference, Copenhagen, 3rd – 4th April 2025.

Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of business research*, 133, 285-296.

European Climate Foundation (2026). Leveraging the transport infrastructure sector to increase the demand for low-carbon materials – meeting presentation.

European Climate Foundation and H&Z Group companies (2025a). Delivering Climate Neutral Rail Infrastructure - Report and discussions on reducing Scope 3 emissions through the reduction of material related embodied carbon in the European rail network.

European Climate Foundation and H&Z Group companies (2025b). Decarbonization of key materials - Rail Track.

European Commission (2022). EU climate targets: how to decarbonise the steel industry. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/eu-climate-targets-how-decarbonise-steel-industry-2022-06-15_en#:~:text=The%20steel%20industry%20is%20responsible,with%20the%20EU's%20climate%20targets

Federbeton (2024). Il Rapporto di Sostenibilità. Accessibile a chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.federbeton.it/Portals/0/PubDoc/Pubblicazioni/Rapporti/Rapporto_di_Sostenibilit%C3%A0_Federbeton_2024.pdf

Fondazione Ecosistemi (2024). Report tecnico sul GPP in Italia. I criteri ambientali minimi per le costruzioni e l'obiettivo di mitigazione dei cambiamenti climatici: lo stato dell'arte.

Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane (2024a). Impiego di materie prime. Accessibile alla pagina <https://www.fsitaliane.it/it/sostenibilita/tutelare-l-ambiente/salvaguardia-del-territorio/impiego-di-materie-prime.html>

Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane (2024b). Mobilità, Ambiente, Responsabilità. Il Rapporto Ambientale Del Gruppo Fs. Accessibile alla pagina chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.fsitaliane.it/content/dam/fsitaliane/Documents/sostenibilit%C3%A0/rapporto-ambientale/2024/rapporto_ambientale_gruppofs_2024.pdf

Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane (2023). GHG Report 2023. Accessibile alla pagina chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.fsitaliane.it/content/dam/fsitaliane/Documents/sostenibilit%C3%A0/GHG_2023_WEB_0225.pdf

La Repubblica (2026). Federacciai, produzione acciaio chiude 2025 a 20,7 milioni tonnellate. Accessibile a

https://finanza.repubblica.it/News/2026/01/20/federacciai_produzione_acciaio_chiude_2025_a_20_7_milioni_tonnellate-

133/#:~:text=Complessivamente%20nel%202025%20le%20acciaierie%20nazionali%20hanno,acciaio%2C%20segnando%20un%20incremento%20del%203%2C6%25%20sul

Marmier, A. (2023). Decarbonisation options for the cement industry, EUR 31378 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, JRC131246.

Ramboll (2025). Towards Low-Carbon Transport Infrastructure In The Nordics. Comparative study on embodied carbon management for road and rail infrastructure across the Nordic countries.

Rebar (2023). Worldsteel LCA eco-profile Europe. chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Rebar-Europe-Construction.pdf

Rossi, F., Schweiger, A., Albano, F., Iraldo, F., Niero, M. (2025). Progetto Green Steel. Tavolo Ecodesign MASE –Gruppo Metalli.

Pickering, C., & Byrne, J. (2014). The benefits of publishing systematic quantitative literature reviews for PhD candidates and other early-career researchers. Higher Education Research & Development, 33(3), 534-548.

Pickering, C., Grignon, J., Steven, R., Guitart, D., & Byrne, J. (2015). Publishing not perishing: How research students transition from novice to knowledgeable using systematic quantitative literature reviews. Studies in Higher Education, 40(10), 1756-1769.

Saarstahl Rail (2025). EU's Industries: Decarbonization Rail Products. Railway Supplier Summit, 14-15 May 2025.

UIC (2021). Circular practices in the railway and ways forward REUSE Project final Report.

Accessibile alla pagina chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://uic.org/IMG/pdf/reuse_project_final_report.pdf