

OSSERVATORIO



Analisi “dalla culla al cancello con opzioni” di traverse ferroviarie in calcestruzzo

*“Cradle to gate with options” analysis
of railway concrete sleepers*

Giulia DEL SERRONE^(*)

Giuseppe LOPRENCIPE^(*)

Gennaro RICCIO^(*)

Laura MORETTI^(*)

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.04.2024.ART.2>)

Sommario - I trasporti sono responsabili di circa il 25% delle emissioni climalteranti e rivestono un ruolo primario nel contrasto al surriscaldamento globale. Il sistema di trasporto ferroviario è tra i meno impattanti, sia per le merci sia per le persone, visto le sue basse emissioni per unità di trasporto. Tuttavia, è utile valutare gli impatti dell’infrastruttura nelle fasi di produzione, costruzione e dismissione. Lo studio ha lo scopo di valutare gli impatti ambientali derivanti dal ciclo di vita di una traversa ferroviaria RFI 230 VN in calcestruzzo armato precompresso dotata di organi di attacco. La metodologia utilizzata è il *Life Cycle Assessment – LCA* condotto secondo la norma UNI EN 15804:2012 + A2:2019. Il ciclo di vita esaminato comporta l’emissione di 83 kg di CO₂ eq, di cui solo il 10% dovuti alla fase di costruzione. Specializzando lo studio al *Product Stage*, la produzione di materie prime ed energia elettrica, e il trasporto su gomma comportano i maggiori contributi (rispettivamente 92%, 3%, 5%) agli impatti climalteranti. I risultati evidenziano le variabili determinanti per aumentare la sostenibilità del sistema di trasporto ferroviario.

Parole chiave: *Life Cycle Assessment, Traverse ferroviarie, LCA comparativa, Calcestruzzo.*

1. Introduzione

I settori delle costruzioni e dei trasporti, responsabili per circa il 33% e il 25% delle sostanze climalteranti [1] sono tra i più decisivi per il contrasto al riscaldamento globale e la riduzione delle emissioni nell’atmosfera [2]. A tal proposito, l’Unione Europea nel 2014 ha redatto il pri-

Summary - The transportation sector is responsible for about 25% of greenhouse gases and plays a pivotal role in countering global warming and emissions to the air. Railway is the most efficient transport system due to its low emissions per transport unit for freights and passengers. However, it is meaningful to assess the impacts of the infrastructure itself at the Product Stage, Construction Process Stage, and End of Life Stage. This study assesses the environmental impact of the production, installation, and dismantling of one 230 VN prestressed concrete railway sleeper with fastening system. The methodology used is the Life Cycle Assessment - LCA according to the standard UNI EN 15804:2012 + A2:2019. The examined life cycle involves the emission of 83 kg of CO₂ eq. whose 10% is from the Construction Process Stage. Raw materials extraction, electricity production, and road transportation contribute 92%, 3%, and 5% to climate-altering impacts of the Product stage. The results highlight the variables to be addressed to increase the sustainability of the rail transportation system.

Keywords: *Life Cycle Assessment, railway concrete sleepers, LCA, recycled concrete.*

1. Introduction

The construction and transportation sectors are responsible for about 33% and 25%, respectively, of greenhouse gases [1] and are strategic to counter global warming and emissions to the air [2]. In 2014, the European Union published the first energy and climate policies for 2030 [3], and from 2015 the Paris Agreement aims to limit the increase in global temperature to well below 2 °C above the pre-indus-

^(*) Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale, Sapienza Università di Roma, Via Eudossiana 18, 00184 Roma, Italia - Contatti: Giulia DEL SERRONE, Email: giulia.delserrone@uniroma1.it.

^(*) Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale, Sapienza Università di Roma, Via Eudossiana 18, 00184 Roma, Italia - Contatti: Giulia DEL SERRONE, Email: giulia.delserrone@uniroma1.it.

OSSE

mo quadro per le politiche dell'energia e del clima per il 2030 [3] e nel 2015 è stato raggiunto l'Accordo di Parigi finalizzato a contenere l'aumento della temperatura globale al di sotto di 2°C rispetto ai livelli preindustriali [4]. Gli obiettivi definiti a livello europeo per ridurre le emissioni nette di gas serra prefiggono una riduzione di almeno il 55% delle emissioni nette di gas serra entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990 [5]. In Italia i Criteri Ambientali Minimi (CAM) per l'affidamento del servizio di progettazione di interventi edilizi recepiscono le linee di indirizzo ambientale europee [6]. Divenuti obbligatori per i contratti pubblici, i CAM promuovono l'utilizzo del *Life Cycle Assessment* (LCA) come metodo oggettivo di valutazione e quantificazione dei carichi energetici, ambientali e degli impatti potenziali di un prodotto o un servizio [7]. Nel settore dei trasporti la ricerca ha esplorato quasi esclusivamente criticità e potenzialità dei veicoli [8] stimandone le emissioni nel medio-lungo periodo [9]. Tuttavia, è necessario focalizzare gli interventi anche sul ciclo di vita dell'infrastruttura e sull'ottimizzazione degli impatti ambientali delle sue componenti [10]. È stato dimostrato ad esempio che la costruzione dell'infrastruttura stradale causa più del 50% degli impatti dell'intera vita utile [11], mentre la costruzione/manutenzione dell'infrastruttura ferroviaria incide per il 25% sul totale delle emissioni di CO₂ secondo l'Agenzia Federale dell'ambiente tedesca [12]. Per quanto riguarda la fase di uso, il sistema di trasporto più efficiente in termini di emissioni di CO₂ è quello su ferro (25.4 g/tkm di CO₂ eq. rispetto a 78.6 g/tkm del trasporto su gomma) [12]. Si evince che il sistema ferroviario è molto efficiente nelle fasi di trasporto, tuttavia presenta degli impatti non trascurabili in termini di costruzione/manutenzione delle sue componenti [13]. Gli impatti ambientali connessi a produzione, costruzione, utilizzo, manutenzione e smaltimento delle infrastrutture sono difatti parte della metodologia di studio del ciclo di vita dell'infrastruttura [14]. Il processo di costruzione implica infatti l'utilizzo di risorse energetiche e minerarie spesso non rinnovabili, oltre che emissioni di sostanze inquinanti in aria, acqua e suolo [15]. In letteratura la maggior parte degli studi approfondisce la tematica strutturale e prestazionale dei componenti della sovrastruttura ferroviaria. In riferimento all'armamento alcuni studi focalizzano l'attenzione sulle traverse in calcestruzzo armato con analisi agli elementi finiti [16], identificazione dei meccanismi di rottura [17], ottimizzazione dei materiali [18] e prove di carico [19]. Pochi studi LCA comparativi analizzano differenti tipologie di infrastrutture ferroviarie, in particolare HAUSBERGER *et al.* [13] valutano l'impatto ambientale di 1 km di *ballast track* e 1 km di *ballastless track* ai sensi della UNI EN 15804, evidenziando come il maggior contributo agli impatti sia dato dalla produzione di traverse e rotaie. Tuttavia, la produzione di *high-performance* infrastrutture ferroviarie può contribuire alla riduzione degli impatti dovuti alla fase di manutenzione dell'opera. PONS *et al.* [20] utilizzando il metodo di modellazione ReCiPe 2008 [21], effettuano uno studio analogo ottenendo come contributo maggiore agli impatti quello re-

trial level [4]. The European efforts in the fight against climate change include endeavors for 2030 to reduce net greenhouse gas emissions by at least 55% compared to 1990 levels [5]. In Italy, the Minimum Environmental Criteria (CAM) to purchase public goods and services comply with the European environmental guidelines [6]. CAMs recognize Life Cycle Assessment (LCA) as an objective method to assess a product or service's energy and environment loads and potential impacts [7]. In the transport sector, the scientific literature has often explored critical issues and the potential of vehicles [8] predicting their medium- and long-term emissions [9]. However, focusing on the infrastructure life cycle and environmental impacts is required [10]. The literature shows that road construction causes more than 50% of the total impact [11]. The construction and maintenance activities for railway infrastructures account for around 25% of total CO₂ emissions according to [12]. In the use stage, the rail transport system is the most efficient related to CO₂ emissions (25.4 g/tkm CO₂ eq. compared to 78.6 g/tkm CO₂ eq. from the road system) [12]. The railway transport system ensures high performance in the use stage but has a significant impact due to the construction and maintenance of its components [13]. Production, construction, use, maintenance, and demolition burdens from transport infrastructures cannot be overlooked when assessing their life cycle impacts [14]. In particular, the construction stage often consumes non-renewable energy and resources and emits substances into air, water, and soil [15]. In the literature, several studies deepen the structural and functional performances of railway components. Concerning railway superstructure, some research studies concrete sleepers through finite elements analyses [16] and investigates failure mechanisms [17], materials properties [18], and loading tests [19]. Few LCA studies compare railway infrastructures. HAUSBERGER *et al.* [13] assess the environmental impacts of 1 km ballast track and 1 km ballastless track according to UNI EN 15804. Rails and sleepers contribute the most to the environmental impact during the production phase. On the other hand, high-performance railway infrastructures can reduce the maintenance impacts. PONS *et al.* [20] assess the environmental impact according to ReCiPe 2008 [21] and confirm the use and maintenance of the infrastructure imply high impacts. In the literature, some LCA studies compare sleepers composed of concrete and alternative materials. DOLCI *et al.* [22] investigate the environmental performance of railway sleepers with an outer shell made of recycled materials. They use the Product environmental footprint method [23] to calculate the impact categories and the Cumulative Energy Demand [24] to model the energy behavior. THOMPSON *et al.* [25] compare alternative composite railway sleepers made of timber, concrete, short fiber, and long fiber to identify the most cost-competitive and sustainable solution.

This study assesses the environmental burdens of producing and installing one prestressed concrete railway sleeper compliant with standard lines. The life cycle analysis complies with the standard UNI EN 15804:2012 + A2:2019 that lists the Product Category Rules for construction pro-

OSSERVATORIO

lativo alle fasi di utilizzo e manutenzione dell'infrastruttura. In letteratura sono inoltre disponibili LCA comparativi degli impatti derivanti dall'utilizzo di materiali diversi dal calcestruzzo per la realizzazione delle traverse. In DOLCI *et al.* [22] vengono analizzati gli impatti di traverse il cui guscio esterno è realizzato con materiali riciclati, utilizzando come metodo di calcolo per le categorie di impatto ambientale il PEF (*Product environmental footprint*) [23] e il *Cumulative Energy Demand* [24] per caratterizzare le performance energetiche. THOMPSON *et al.* [25] confrontano traverse ferroviarie in legno, calcestruzzo, fibre corte e fibre lunghe in composito per identificare le soluzioni più economiche ed ecologiche.

Questo studio determina l'impatto derivante dalla produzione e messa in opera di una traversa ferroviaria in calcestruzzo armato precompresso omologata per linee standard. L'analisi LCA recepisce la Norma armonizzata UNI EN 15804:2012 + A2:2019, che definisce il *Product Category Rule* per prodotti e servizi da costruzione [26]. La valutazione di impatto ha permesso la quantificazione dei principali indicatori di impatto ambientale, dei parametri che descrivono l'uso delle risorse e di altre informazioni ambientali che descrivono le categorie di rifiuto. Lo studio consente di individuare le variabili di input significative per ridurre gli impatti ambientali.

2. Metodi e dati di inventario

Le fasi principali per la redazione dello studio LCA sono quattro, normate dalla UNI EN ISO 14044:2021 [27]:

- definizione dello scopo e dell'obiettivo;
- fase di inventario (LCI);
- valutazione degli impatti ambientali (LCIA);
- interpretazione dei risultati ottenuti.

Nel presente studio, l'analisi condotta è del tipo "cradle to gate with options". La Tab. 1 illustra i confini di sistema (*system boundaries*) definiti dalla UNI EN 15804 [26]. Nel *product stage* sono comprese le fasi di estrazione/produzione materie prime e combustibili, il trasporto degli stessi al sito di produzione e la produzione di una traversa (fasi A1-A3). Nel *construction process stage* sono invece compresi il trasporto su gomma della traversa dal sito di produzione al cantiere ferroviario e la sua installazione con treni di posa (fasi A4 e A5).

L'unità funzionale del sistema è una traversa prefabbricata in calcestruzzo armato precompresso con organi di attacco omologati per linee standard [28]. In particolare, l'elemento modellato è RFI 230 VN conforme alle specifiche tecniche di fornitura RFI: "Traverse Marca RFI 230, RFI 240 e RFI 260 in calcestruzzo vibrato, armato e precompresso", codifica: "RFI TCAR SF AR 03 002 F" [29] e alle norme EN 13230 - parti 1 e 2 [30][31]. In Tab. 2 sono riportate le relative specifiche tecniche.

Il periodo di riferimento è l'anno solare di produzione 2022. Il software SimaPro ver. 9.3.0.3 [32] ha permesso il calcolo LCA utilizzando dati primari e secondari disponi-

ducts [26]. The outputs are core environmental impact, resource use, and waste indicators. This study permits to identify significant input data to reduce the environmental impacts.

2. Methods and inventory data

The standard UNI EN ISO 14044:2021 identifies four main phases to carry out a LCA [27]:

- definition of objectives and the scope of the study;
- collection of the inventory of input data (life cycle inventory – LCI);
- impact assessment (life cycle impact assessment – LCIA);
- interpretation and evaluation of the results.

This study presents a "cradle to gate with options" analysis. Tab. 1 shows the system boundaries according to UNI EN 15804 [26]. The product stage includes the extraction and production of raw materials and fuels, their transport to the factory, and the production of one railway prestressed concrete sleeper (A1 to A3 phases). The construction stage includes transport burdens from the factory to the construction site and the sleeper positioning with a track construction train (phases A4 and A5).

The functional unit of this study is one prestressed concrete monoblock sleeper with fastening system [28]. The modeled product guarantees stability, reliability, and operational safety of standard lines. In particular, the RFI 230 VN sleeper is compliant with RFI Technical Specifications "Traverse Marca RFI 230, RFI 240 e RFI 260 in calcestruzzo vibrato, armato e precompresso" [29] and the European standards EN 13230 - parts 1 and 2 [30][31]. Tab. 2 lists the technical specifications of RFI 230 VN.

The reference year for the analysis is 2022. The SimaPro ver. 9.3.0.3 [32] software allowed LCA calculation with primary and secondary data from Ecoinvent ver. 3.8 library [33]. Using other library data and software, different results would be obtained [34]. Therefore, it is difficult to compare results from different LCA studies carried out on similar products [35]. Tab. 3 lists inventory data of A1–A5 modules. They consist of raw materials and energy consumption, emissions into air, transportation, and waste production.

Tab. 4 lists the core environmental impact categories.

According to UNI EN 15804 [26], resource use (Tab. 5) and waste categories (Tab. 6) have been assessed.

Equation 1 describes the analytical procedure to calculate each impact category (IC):

$$IC = \sum_x CF_{ic}(x) \cdot INV(x) \quad (1)$$

where $CF_{ic}(x)$ is the substance- or resource-specific characterization factor, x is the substance or resource, and $INV(x)$ is the inventory of the substance or resource x . Several input data can contribute to each impact category (Fig. 1) according to the normalization defined by CF_{ic} values.

The characterization model describes with an equivalent

OSSERVATORIO

Tabella 1 – *Table 1*

Moduli dichiarati *Declared modules*

X: modulo dichiarato, ND: modulo non dichiarato.
X: declared module; ND: not declared module.

bili nella libreria Ecoinvent ver. 3.8 [33]. Utilizzando altre banche dati e software, si ottengono risultati diversi [34]. Perciò, diventa arduo comparare risultati provenienti da studi LCA differenti effettuati su prodotti simili [35]. Si riportano in Tab. 3 i dati di inventario relativi ai moduli A1–A5, che comprendono i consumi di materie prime ed energia, le emissioni in aria, i trasporti e i rifiuti prodotti.

Le categorie di impatto calcolate sono elencate in Tab. 4:

Oltre agli indicatori di impatto ambientale, la norma EN 15804 [26] richiede il calcolo dell'utilizzo delle risorse (*resource use*, Tab. 5) e della produzione di rifiuti (*waste categories*, Tab. 6):

Ciascuna categoria di impatto (IC) è calcolata secondo l'Equazione 1:

$$IC = \sum_{i=1}^n CF_{i,c}(x) \cdot INV(x) \quad (1)$$

dove $CF_{ic}(x)$ è il fattore di caratterizzazione per la sostanza x e $INV(x)$ è l'inventario della sostanza x. Ne consegue che diverse sostanze concorrono a medesima categoria di impatto (Fig. 1) secondo la normalizzazione definita dai valori CF_{ic} .

Il modello di caratterizzazione descrive il peso di una

unit the weight of a substance compared to other substances within the same impact category. According to [26], the LCA assesses the impacts of each phase. The outputs help producers, designers, and railway managers to balance often conflicting goals of environmental sustainability, green mobility, and energy efficiency.

3. Results

Tab. 7 lists the output LCA of A1-A3, A4-A5, and A1-A5 modules.

According to data in Tab.7, the construction process stage (i.e., A4-A5) has a negligible contribution to most parameters. It is less than 10% and 13.5% of GWP-total and ADP-fossil. Therefore, the interpretation phase focuses on the production process stage of one RFI 230 prestressed concrete sleeper and identifies the most impacting inventories of A1-A3 modules. The bar graphs in Fig. 2 to Fig. 4 show the percentage contribution of input data to the core environmental impact categories, natural resources consumption, and waste production, respectively.

Steel and CEM I 52.5 are key impact determiners of the environmental impact categories that assess emissions into

OSSERVATORIO

determinata sostanza confrontata con altre sostanze all'interno della medesima categoria d'impatto, espressa in unità equivalente. Per ciascuno stage, la LCA calcola il totale degli impatti secondo il metodo illustrato. I risultati consentono a produttori, progettisti e gestori ferroviari di adottare un approccio critico per bilanciare obiettivi spesso contrastanti di sostenibilità ambientale, mobilità *green* ed efficienza energetica.

3. Risultati

Gli *output* per i moduli A1-A3, A4-A5 e A1-A5 sono elencati in Tab. 7.

Da un'analisi degli output si osserva che il contributo del *construction process stage* (A4-A5) è trascurabile per numerosi IC e inferiore al 10% e 13.5% del totale per GWP-total e ADP-fossil. La fase di interpretazione dei risultati focalizza pertanto l'attenzione sul processo di produzione dell'unità funzionale. Per ciascuna IC sono state individuate le voci di inventario che contribuiscono maggiormente al risultato complessivo dei moduli A1-A3. Per le principali categorie di impatto ambientale (Fig. 2), consumo di risorse naturali (Fig. 3) e produzione di rifiuti (Fig. 4) si riportano i contributi percentuali delle voci di inventario relative alla produzione di una traversa RFI 230 VN.

Per le principali categorie di impatto ambientale, che quantificano emissioni in aria e consumo di risorse abiotiche, acciaio e CEM I Portland 52.5 R sono le voci di inventario più impattanti. In media rispetto alle principali categorie di impatto, acciaio di armatura e cemento contribuiscono al 72.1% e il calcestruzzo fresco (comprendendo quindi di aggregati, acqua di impasto e additivi) al 50.8%. In particolare, il contributo minimo dell'acciaio è 25.3% (ODP), mentre il cemento è pari a 5.4% (EP-freshwater). L'acciaio è particolarmente impattante nel caso di EP-freshwater (83.9%) e di ADP-minerals&metals (65.4%), mentre il cemento lo è per GWP-total (48.0%) e ODP (47.8%). Gli aggregati naturali contribuiscono in media al 6.7% delle principali categorie di impatto ambientale e sono rappresentativi di oltre il 21.9% di WDP. Gli additivi acceleranti del calcestruzzo sono responsabili del 9.3% di ADP-minerals&metals, mentre per ciascuna delle altre categorie di impatto non superano

Tabella 2 – *Table 2*

Specifiche tecniche – Traversa RFI 230 VN
Technical specifications – RFI 230 VN sleeper

Parametro <i>Parameter</i>	RFI-230 VN
Velocità massima <i>Maximum speed</i>	≤ 250 km/h
Peso traversa <i>Sleeper weight</i>	250 kg
Classe di resistenza <i>Minimum compressive strength class of concrete</i>	C50/60
R_{ck} minima alla precompressione <i>Minimum R_{ck} at pre-tensioning</i>	45 MPa
Rapporto a/c <i>Water-to-cement ratio</i>	< 0.45
Lunghezza <i>Length</i>	2300 mm
Larghezza <i>Width</i>	300 mm
Altezza sottorotaia <i>Height under rail</i>	170 mm
Tipo di rotaia <i>Type of rail</i>	50E5, 60E1
Tipo di attacco <i>Fastening system</i>	Vossloh W14, PANDROL E1 2039, PANDROL FAST CLIP
Carichi di progetto <i>Design loads</i>	Momento di flessione positivo per la sezione sottorotaia $M_{dr} = 12.5 \text{ kNm}$ <i>Positive bending moment for the section under rail</i> $M_{dr} = 12.5 \text{ kNm}$
	Momento di flessione negativo per la sezione di mezzeria $M_{dcn} = 10.5 \text{ kNm}$ <i>Negative bending moment for the center line section</i> $M_{dcn} = 10.5 \text{ kNm}$
	Momento di flessione positivo per la sezione di mezzeria $M_{dc} = 7.5 \text{ kNm}$ <i>Positive bending moment for the center line section</i> $M_{dc} = 7.5 \text{ kNm}$

the air and consumption of abiotic resources. The contribution analysis reveals that reinforcing steel and cement contribute 72.1% and fresh concrete 50.8%. In particular, the minimum contribution from steel is 25.3% for ODP, and from cement it is 5.4% for EP-freshwater. Steel is the relevant data for EP-freshwater (83.9%) and contributes to 65.4% of ADP-minerals&metals. Cement is the main element affecting GWP-total (48.0%) and ODP (47.8%). The aggregates cause an average of 6.7% of the core environ-

OSSEVATORIO

il 2.6%. L'acqua ha un contributo inferiore all'1% anche nell'indicatore WDP (0.96%). Il trasporto su gomma, sia interno sia esterno al sito di produzione, è responsabile del 15.0% di ODP (massimo contributo percentuale) e del 0.9% di WDP; significativo è il suo contributo a GWP-total (5.2%) e ADP-fossils (8.4%). Gli organi di attacco, composti di elementi in acciaio e polietilene, impattano in media per il 23.1% (17.6% dovuto all'acciaio e 5.4% dovuto al polietilene). Il polietilene ha il suo massimo contributo in relazione a ADP-fossils (13.2%).

Con riferimento alle categorie di consumo di risorse naturali pari a 0, PERM e PENRM evidenziano il mancato consumo come materia prima di energia rinnovabile e non rinnovabile, mentre RSF e NRSF indicano il mancato uso di combustibili secondari, sia rinnovabili sia non rinnovabili, nel processo di produzione delle traverse e trasporto delle stesse al cantiere ferroviario. Dal momento che il metodo definito dalla EN 15804 [26] definisce PERT pari alla somma di PERE e PERM e PENRT pari alla somma di PENRE e PENRT, vengono discussi solo PERE e PENRE. La LCA del consumo di risorse naturali conferma i risultati discussi in termini di emissioni e consumo di risorse abiotiche. Il cemento contribuisce al 28.6% di PERE, al 27.3 di PENRE, al 12.2% di FW ed è l'unica voce di inventario che determina il valore di SM dovuto alle materie prime seconde impiegate nel processo di produzione del *clinker* [36][37]. L'acciaio è la massima voce di impatto per PERE (46.4%), PENRE (42.1%) e FW (47.9%). Nel complesso, il calcestruzzo è responsabile del 32.1% di PERE, 31.2% di PENRE e 35.6% di FW. Il consumo di risorse per il trasporto su gomma incide per l'8.3% di PENRE, cui contribuisce significativamente anche il polietilene con il 14.4%. L'energia elettrica ad alto voltaggio consumata nei moduli A1-A3 incide per il 10.6% di PERE e per meno del 3% di PENRE e FW. Il consumo di gas naturale, di fatto trascurabile in Fig. 2, è 0.1% per PERE, 1.2% per PENRE e 0.05% per FW. Gli organi di attacco impattano in media il 23.5% delle categorie di consumo di risorse naturali.

La produzione e posa in opera di una traversa RFI 230 VN non implica la produzione di rifiuti radioattivi. La produzione di rifiuti pericolosi e non dipende soprattutto dal processo di produzione dell'acciaio e dallo smaltimento di traverse non conformi. In particolare, le produzioni di cemento e acciaio sono responsabili dell'11.3% e dell'88.5% in peso dei rifiuti pericolosi. Il 75.8% dei rifiuti non pericolosi sono traverse non



Figura 1 - Rappresentazione schematica della definizione di una categoria di impatto.

Figure 1 - Contribution of input and inventory data to impact categories.

Tabella 3 – Table 3

Dati di input LCA
LCA input data

	Dati di input Input data	Quantità Quantity	Unità Unit
Materiali Materials	- aggregato varie pezzature - aggregates - CEM I Portland 52.5R - CEM I Portland 52.5R - acciaio - steel - acqua - water - polietilene - polyethylene - additivi acceleranti - chemical admixture	277.3	kg
Trasporto Transport	Autocarro, euro 5 Transport, freight, lorry	65.4	tkm
	Diesel, macchine da cantiere Diesel machineries	0.4	1
Elettricità/Calore Electricity/heat	Elettricità, fornitura ad alto voltaggio High voltage electricity	11.2	MJ
		5.6	MJ
Emissioni in aria Emissions into air	Polveri > 10 μm Polveri > 10 μm	3.5	mg
Flusso dei rifiuti finali Output flows	Rifiuti non pericolosi a recupero Non-hazardous waste	1.7	kg
		<0.1	kg

mental impact categories and more than 21.9% of WDP. Accelerating concrete admixtures are responsible for 9.3% of ADP-minerals&metals and not more than 2.6% of other pa-

OSSERVATORIO

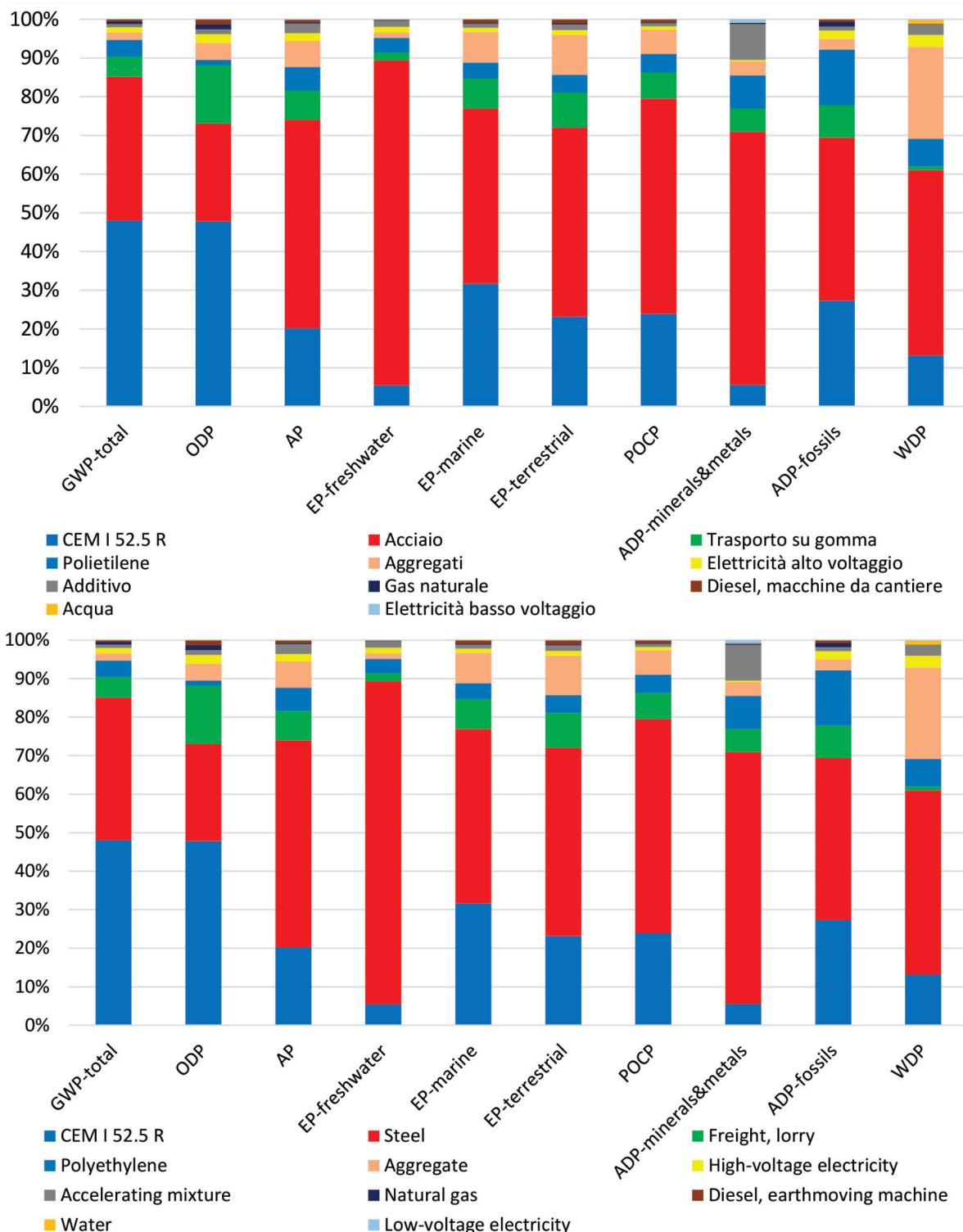


Figura 2 - Principali categorie di impatto ambientale - contributi delle voci di inventario A1-A3.
 Figure 2 - Core environmental impact categories - A1-A3 modules.

OSSERVATORIO

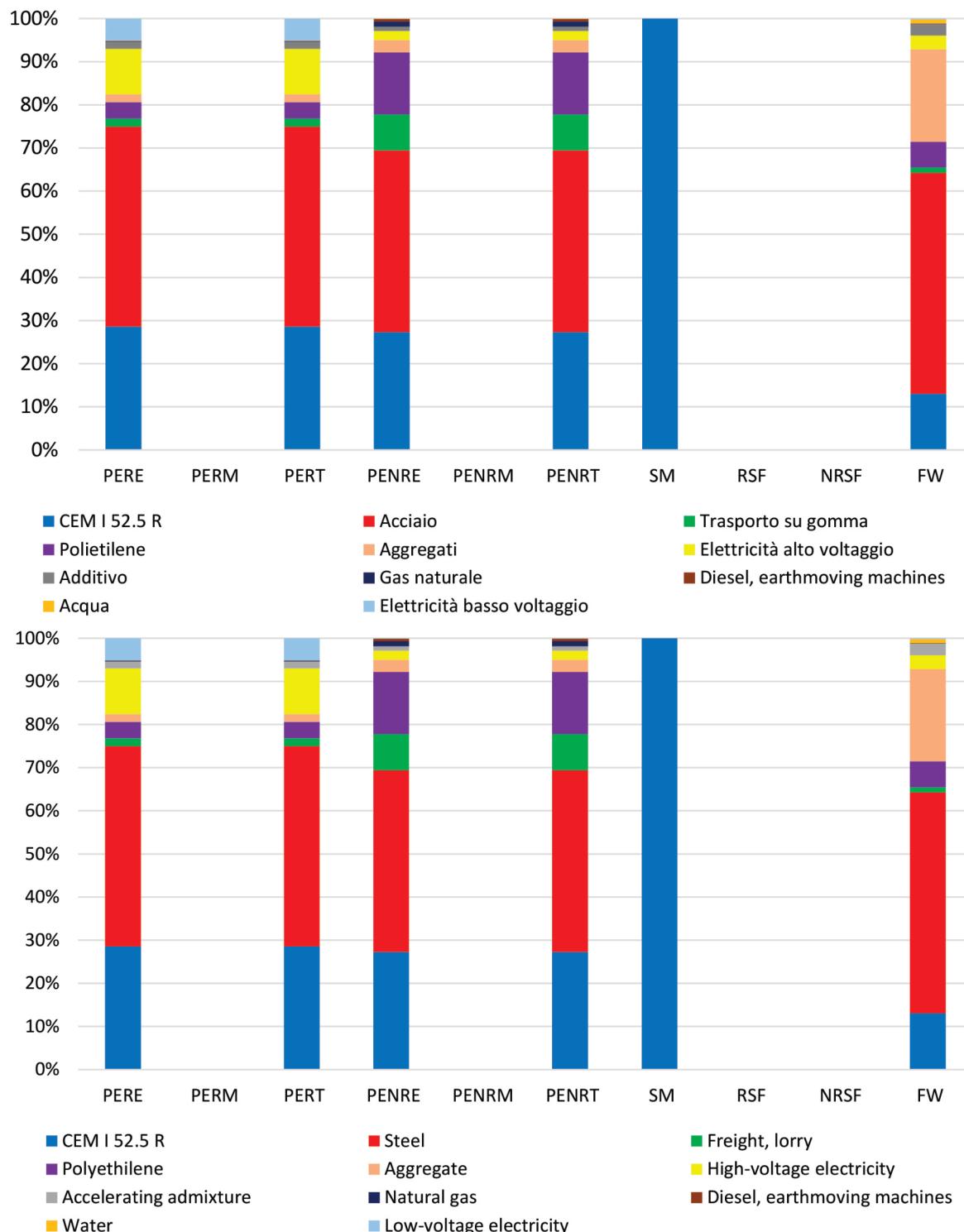


Figura 3 - Consumo di risorse naturali - contributi delle voci di inventario A1-A3.
Figure 3 - Consumption of natural resources - A1-A3 modules.

OSSERVATORIO

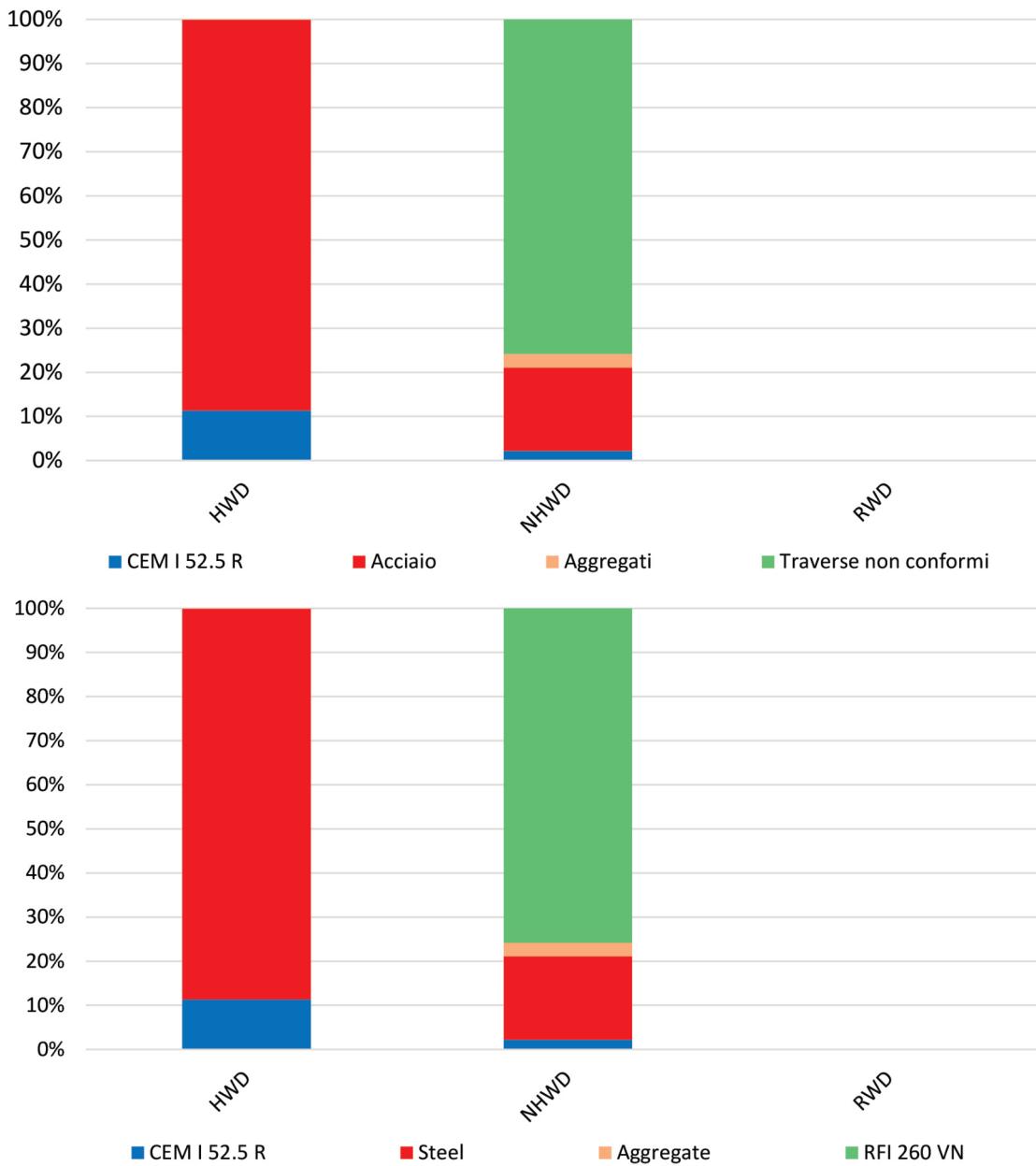


Figura 4. Produzione di rifiuti - Contributi delle voci di inventario A1-A3.
Figure 4. Waste production - A1-A3 modules.

conformi e la produzione dell'acciaio contribuisce per il 18.9% degli stessi.

4. Discussione

Visti i dati di inventario responsabili dei maggiori contributi alle categorie di impatto presentate, è possibile pro-

rameters in Fig. 2. Water consumption is not significant for WDP (i.e., 0.9%). Road internal and external transport is responsible for 15.0% of ODP (maximum percentage) and 0.9% of WDP; it causes 5.2% of GWP-total and 8.4% of ADP-fossils. Fastening, composed of steel and polyethylene, impacts 23.1% on average (17.6% due to steel and 5.4% due to polyethylene). The main percentage contribution from

OSSEVATORIO

Categorie di impatto [26]
Impact categories [26]

Categoria di impatto Impact category	Acronimo Acronym	Unità Unit
Potenziale di riscaldamento globale, totale <i>Climate change, total</i>	GWP-total	kg CO ₂ eq.
Potenziale di riduzione dello strato di ozono stratosferico <i>Ozone depletion</i>	ODP	kg CFC 11 eq.
Potenziale di acidificazione del suolo e dell'acqua <i>Acidification</i>	AP	Mol H ⁺ eq.
Potenziale di eutrofizzazione dell'acqua dolce <i>Eutrophication aquatic freshwater</i>	EP-freshwater	kg PO ₄ eq.
Potenziale di eutrofizzazione dell'acqua marina <i>Eutrophication aquatic marine</i>	EP-marine	kg N eq.
Potenziale di eutrofizzazione terrestre <i>Eutrophication terrestrial</i>	EP-terrestrial	Mol N eq.
Potenziale di formazione di ozono troposferico <i>Photochemical ozone formation</i>	POCP	kg NMVOC eq.
Potenziale di esaurimento abiotico delle risorse non fossili <i>Depletion of abiotic resources - minerals and metals</i>	ADP-minerals & metals	kg Sb eq.
Potenziale di esaurimento abiotico delle risorse fossili <i>Depletion of abiotic resources - fossil fuels</i>	ADP-fossil	MJ
Scarsità d'acqua <i>Water use</i>	WDP	m ³ eq.

porre strategie tecniche di riduzione degli impatti dovuti ai moduli A1-A3 nel caso di una traversa ferroviaria di calcestruzzo per linea standard. Le alternative sostenibili includono l'uso di aggregato riciclato e materie prime a minore impatto, sistemi di trasporto efficienti, recupero di energia da fonti rinnovabili e modifica del mix energetico della fornitura elettrica. Le opzioni proposte presentano diverse possibilità di realizzazione nel breve, medio o lungo periodo.

In letteratura sono disponibili LCA comparative che analizzano gli effetti del contenuto di aggregato riciclato nella miscela del calcestruzzo [38]. Tuttavia le potenzialità di tale soluzione sono limitate nel caso studio per vincoli normativi. L'uso di aggregato riciclato nel calcestruzzo è infatti limitato al 10% in peso a causa dei requisiti prestazionali imposti dalle NTC 2018 nel caso di miscele strutturali con $R_{ck} \geq 45$ MPa [39]. Il cemento ha un impatto considerevole, dovuto alla produzione del *clinker*. Il miglioramento dello scenario può avvenire considerando una produzione di *clinker* con combustibili secondari solidi (CSS). Il cemento utilizzato per produrre le traverse è il Portland

Tabella 4 – Table 4 fastening is for ADP-fossils (i.e., 13.2%).

Fig. 3 allows the contribution analysis concerning the consumption of natural resources.

Concerning the consumption of natural resources equal to 0, PERM and PENRM reveal that the consumption of renewable and non-renewable energy as raw materials is null. RSF and NRSF mean that renewable and non-renewable secondary fuels are not used to produce and transport sleepers. Since PERT is the sum of PERE and PERM and PENRT is the sum of PENRE and PENRT according to [26], the contribution analysis discusses only PERE and PENRE. The LCA output in Fig. 3 confirms the results of emissions into the air and consumption of abiotic results. Cement is responsible for about 28.6% of PERE, 27.3% of PENRE, and 12.2% of FW, and it is the only inventory item contributing to SM due to the secondary raw materials used in the clinker production process [36]/[37]. Steel is the highest impact item for PERE (46.4%), PENRE (42.1%), and FW (47.9%). In the modeled sleeper, concrete is responsible for 32.1% of PERE, 31.2% of PENRE, and 35.6% of FW. The resource consumption from road transport accounts for 8.3% of PENRE, and polyethylene accounts for 14.4% of PENRE. In A1-A3, the high-voltage electricity accounts for 10.6%

of PERE and less than 3% of PENRE and FW. In Fig. 2, the natural gas consumption is 0.1% for PERE, 1.2% for PENRE, and 0.05% for FW. Fastening system impacts on average 23.5% of natural resource consumption categories.

The production and installation of one RFI 230 VN do not imply radioactive waste. Hazardous and non-hazardous waste mainly depends on steel production and non-compliant sleepers in A1-A3. In particular, hazardous waste is 11.3% from cement production and 88.5% from steel production. 75.8% of non-hazardous waste are non-compliant sleepers, and steel production contributes 18.9%.

4. Discussion

The results of the "from cradle to gate with options" LCA and the contribution analysis allow technical strategies to reduce the environmental impacts of one concrete railway sleeper. The most impacting stage is modules A1-A3, and it is meaningful to modify their

OSSERVATORIO

di tipo I, classe di resistenza 52.5R, la produzione del cui *clinker* prevede l'uso di materie prime seconde in sostituzione delle materie prime naturali e il consumo di combustibili tradizionali derivanti da fonti non rinnovabili. L'alimentazione del forno di cottura del *clinker* potrebbe prevedere la parziale sostituzione calorica del combustibile con combustibili secondari fino a coprire anche l'80% del fabbisogno energetico totale [40]. L'acciaio è responsabile dei maggiori impatti, perciò sarebbe opportuno valutarne il riutilizzo includendo nello studio i potenziali benefici ambientali ottenibili dai rifiuti che ricevono la qualifica di *end-of-waste*. Secondo DE BORTOLI *et al.* (2020), l'utilizzo dei rottami da smaltimento delle traverse comporta consumi di energia elettrica 20 volte inferiori a quelli di produzione di acciaio primario a ciclo integrale [41]. Per quanto concerne il sistema di trasporto, una possibile alternativa consiste nella minimizzazione del trasporto su gomma in favore del trasporto su ferro, con una riduzione di un terzo delle emissioni di CO₂ per km percorso circa del 30% [42]. In particolare, è necessario uno studio di fattibilità per verificare la possibilità operativa di tale scelta e un'analisi di sensibilità per individuare le condizioni al contorno ottimali in termini di distanze percorse e quantità trasportate [10]. Per quanto concerne il mix energetico dal quale vengono prodotte fonti di energia secondarie per uso diretto, come quella elettrica, occorre assumere nel medio-lungo periodo variazioni del mix energetico italiano. Di fatto, occorre quantificare i benefici di un mix con maggiore aliquota rinnovabile e privo di contributi provenienti da fonti nucleari.

5. Conclusioni

Il crescente impiego del trasporto su ferro, riconosciuto tra i meno impattanti per passeggeri e merci, richiede un'analisi oggettiva e quantitativa degli impatti ambientali ad esso associati. A tal fine, lo studio ha valutato l'impatto ambientale della produzione e messa in esercizio di traverse in calcestruzzo armato precompresso per linee standard. La metodologia di calcolo utilizzata è il *Life Cycle Assessment*, disciplinato dalla serie di norme europee armonizzate 14000. Il ciclo di vita delle traverse è sta-

Tabella 5 – *Table 5*

Indicatori di impatto per l'utilizzo delle risorse [26]
Resource use [26]

Categoria di impatto <i>Parameter</i>	Acronimo	Unità
Consumo di energia primaria rinnovabile, a esclusione delle risorse energetiche primarie rinnovabili impiegate come materie prime <i>Use of renewable primary energy excluding renewable primary energy resources used as raw materials</i>	PERE	MJ
Consumo di risorse energetiche primarie rinnovabili impiegate come materie prime <i>Use of renewable primary energy resources used as raw materials</i>	PERM	MJ
Consumo totale di risorse energetiche primarie rinnovabili (energia primaria e risorse energetiche primarie impiegate come materie prime) <i>Total use of renewable primary energy resources (primary energy and primary energy resources used as raw materials)</i>	PERT	MJ
Consumo di energia primaria non rinnovabile, a esclusione delle risorse energetiche primarie rinnovabili impiegate come materie prime <i>Use of non-renewable primary energy excluding renewable primary energy resources used as raw materials</i>	PENRE	MJ
Consumo di risorse energetiche primarie non rinnovabili impiegate come materie prime <i>Use of non-renewable primary energy resources used as raw materials</i>	PENRM	MJ
Consumo totale di risorse energetiche primarie non rinnovabili (energia primaria e risorse energetiche primarie impiegate come materie prime) <i>Total use of non-renewable primary energy resources (primary energy and primary energy resources used as raw materials)</i>	PENRT	MJ
Consumo di materie prime seconde <i>Use of secondary material</i>	SM	kg
Consumo di combustibili secondari da fonte rinnovabile <i>Use of renewable secondary fuels</i>	RSF	MJ
Consumo di combustibili secondari da fonte non rinnovabile <i>Use of non-renewable secondary fuels</i>	NRSF	MJ
Consumo netto di acqua dolce <i>Net use of fresh water</i>	FW	m ³

inventory data. Sustainable alternatives include recycled aggregate and low-impact raw materials, efficient transport systems, energy recovery from renewable sources, and a "green" power generation mix. These options involve different strategies and activities for the short-, medium-, or long-term implementation.

OSSEVATORIO

Tabella 6 – Table 6

Indicatori di impatto per le categorie di rifiuto [26]
Waste categories [26]

Categoria di impatto Parameter	Acronimo Acronym	Unità Unit
Rifiuti pericolosi a discarica <i>Hazardous waste disposed</i>	HWD	kg
Rifiuti non pericolosi a discarica <i>Non-hazardous waste disposed</i>	NHWD	kg
Rifiuti radioattivi a discarica <i>Radioactive waste disposed</i>	RWD	kg

Tabella 7 – Table 7

Output LCA moduli A1-A5 - Traversa RFI 230 VN
Output LCA – A1-A5 modules

Categoria di impatto Parameter	Unità Unit	A1-A3	A4-A5	A1-A5
GWP-total	kg CO ₂ eq.	75	8	83
ODP	kg CFC11 eq.	5.60E-06	2.10E-06	7.70E-06
AP	mol H ⁺ eq.	2.11E-01	2.96E-02	2.41E-01
EP-freshwater	kg P eq.	1.45E-02	4.99E-04	1.50E-02
EP-marine	kg N eq.	6.08E-02	9.15E-03	7.00E-02
EP-terrestrial	mol N eq.	5.63E-01	9.66E-02	6.60E-01
POCP	kg NMVOC eq.	2.27E-01	2.96E-02	2.57E-01
ADP-minerals&metals	kg Sb eq.	2.20E-04	2.19E-05	2.42E-04
ADP-fossil	MJ	671	105	776
WDP	m ³ depriv.	22	3.37E-01	22.3
PERE	MJ	35	1	36
PERM	MJ	0	0	0
PERT	MJ	35	1	36
PENRE	MJ	689	103	792
PENRM	MJ	0	0	0
PENRT	MJ	689	103	792
SM	kg	2	0	2
RSF	MJ	0	0	0
NRSF	MJ	0	0	0
FW	m ³	5.72E-01	1.10E-02	5.83E-01
HWD	kg	3.18E-02	0	3.18E-02
NHWD	kg	1.7	0	1.7
RWD	kg	0	0	0

to modellato secondo le indicazioni delle regole di categoria di prodotto (Product category rules – PCR) per i prodotti da costruzione EN 15804. Il modello elaborato è del tipo “from cradle to gate with options” e include dati di inventario relativi a materie prime, energia, combustibili, trasporti e lavorazioni necessari per la produzione di una traversa (product stage) e per la sua posa in opera (construction stage). I dati

In the literature, comparative LCA studies analyze the effects of recycled aggregate in the concrete mix [38]. However, this solution is not feasible in the case study due to regulatory constraints. The percentage of recycled aggregates to the total aggregates by mass in the concrete mix shall not exceed 10% for structural mixtures with $R_{ck} \geq 45 \text{ MPa}$ [39]. Cement plays a pivotal impacting role due to clinker production. Therefore, solid secondary fuels used in the cement factory can improve the current scenario. The fossil fuel substitution rate in the cement industry can achieve 80% of total thermal energy [40]. The CEM I Portland cement type strength class 52.5 R used for precast elements can be produced with secondary raw materials to replace natural ones. Moreover, steel is responsible for the highest impacts, and its reuse offers environmental benefits if it ceases to be waste and becomes end-of-waste. According to DE BORTOLI et al. (2020), scrap from sleeper disposal involves electricity consumption 20 times lower than integral cycle primary steel production [41]. As regards the transport system, a possible alternative aims to substitute the road with the rail system [42]. This option can reduce CO₂ emissions per km by around 30%. In particular, a feasibility study is necessary to test this choice, and a sensitivity analysis shall identify the optimal boundary conditions in terms of distances and quantities transported [10]. As regards the energy mix, changes in the Italian energy mix are necessary in the medium- and long-term to increase the renewable rate without contributions from nuclear sources.

5. Conclusions

The increasing use of passenger and freight rail transportation is justified by its low impact but requires an objective and quantitative analysis of environmental impact. The proper implementation of international sustainability efforts is needed for the impact calculation of rail infrastructures. Sensitivity analyses of the current state allow comparative studies between functional and structural alternatives.

This study assessed the environmental impacts of the production and installation of one pre-stressed reinforced concrete sleeper for standard lines. The adopted calcula-

OSSERVATORIO

di inventario utilizzati sono primari e secondari. Il software SimaPro ver. 9.3.0.3 e la libreria *Ecoinvent* ver. 3.9 hanno permesso la valutazione degli impatti relativi ai moduli A1-A5: 83 kg CO₂ eq (GWP-total), 792 MJ (PENRT), 2.42E-04 kg Sb eq (ADP-minerals&metals) e circa 0.6 m³ di acqua per traversa. Nella fase di interpretazione dei risultati, sono stati individuati gli stage e i dati di inventario che contribuiscono maggiormente al valore di ciascuna categoria di impatto. La fase di installazione di una traversa comprensiva di organi di attacco è responsabile di meno del 10% dell'impatto totale nel caso degli indicatori di emissioni in aria e del 13.5% nel caso degli indicatori di consumo energetico. Focalizzando l'attenzione sulla fase di produzione, quindi, i dati di inventario maggiormente impattanti sono le materie prime, quali acciaio e cemento CEM I 52.5R, il trasporto su gomma e il consumo di energia elettrica ad alto voltaggio. In particolare, l'acciaio contribuisce per almeno il 25% di tutte le principali categorie di impatto ambientale, mentre il cemento è responsabile di quasi la metà degli impatti GWP-total e ODP (circa 48% di entrambi). Gli aggregati naturali e gli additivi acceleranti del calcestruzzo sono responsabili in media del 9% delle principali categorie di impatto ambientale, mentre il consumo di acqua ha un contributo inferiore all'1%. Il trasporto su gomma causa significativi impatti in termini di ODP (15%), GWP-total (5%) e ADP-fossils (8%). Il consumo di risorse naturali conferma i significativi impatti di acciaio (46% di PERE), cemento (29% di PERE) ed energia elettrica (16% di PERE). Il consumo di acqua (FW) è per il 48% dovuto all'acciaio e per il 20% agli aggregati. Gli organi di attacco impattano in media il 23.5% delle categorie di consumo di risorse naturali. I rifiuti prodotti (1.7 kg/traversa) sono relativi al processo di produzione del calcestruzzo e a quello di produzione delle traverse.

I risultati evidenziano in modo chiaro e oggettivo le variabili sulle quali intervenire attraverso modifiche del processo produttivo e gestionale delle traverse ferroviarie in modo da aumentare la sostenibilità del sistema di trasporto ferroviario. Alternative dell'attuale mix energetico, sistema di trasporto, produzione di acciaio e cemento possono garantire vantaggi ambientali da quantificare tramite una LCA comparativa. Infine, un'analisi di tipo "cradle to grave" integrerebbe nello studio le fasi di smaltimento delle traverse (moduli C1-C4), con possibili valutazioni dei benefici derivanti dal riciclo del materiale proveniente da traverse dismesse.

tion methodology is Life Cycle Assessment according to the ISO 14000 series harmonized European standards. The calculation complies with the product category rules for construction products EN 15804. This study investigates a "from cradle to gate with options" system because it includes inventory data about raw materials, energy, fuels, transport, and processes to produce (production stage) and install (construction stage) one sleeper. Primary and secondary inventory data have been used in SimaPro software ver. 9.3.0.3 with the Ecoinvent library ver. 3.9 to model the functional unit (i.e., a prestressed concrete railway sleeper RFI 230 VN). The main results of A1-A5 modules are 83 kg CO₂ eq (GWP-total), 792 MJ (PENRT), 2.42E-04 kg Sb eq (ADP-minerals&metals) e 0.6 m³ of water for each product whose weight is 270 kg. The interpretation of the results helped identify the critical stages and inventory items for each parameter. The construction stage accounts for less than 10% of total emissions to air and 13.5% of energy consumption. Concerning the production stage, steel, CEM I 52.5R, transport by truck, and high-voltage electricity consumption are the pivotal data. In particular, steel is responsible for at least 25% of environmental impact categories, and cement accounts for about 48% of GWP-total and ODP. Natural aggregates and chemical admixtures cause 9% of the core environmental impact categories, and net freshwater consumption is responsible for less than 1% of those categories. Transport by road causes 15% of ODP, 5% of GWP-total, and 8% of ADP-fossils. The consumption of natural resources confirms the significant impacts of steel (46% of PERE), cement (29% of PERE), and electricity (16% of PERE). Water consumption (FW) is 48% due to steel and 20% to aggregates. Fastening system impacts on average 23.5% of natural resource consumption. Hazardous and non-hazardous waste (i.e., 1.7 kg/sleeper) relates mainly to cement, steel, and sleeper production.

The quantitative results highlight which variables of production and management process can increase the sustainability of the railway system. Alternative power mix, transport system, steel and cement production may ensure environmental benefits to assess with a comparative LCA. Moreover, a "cradle to grave" analysis shall complete the study with the dismantling stage (i.e., C1-C4 modules) and end-of-life stage to calculate the avoided impact of recycling waste sleepers.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] SIZIRICI B., FSEHA Y., CHO C.S., YILDIZ I.. BYON Y.J. (2021), "A Review of Carbon Footprint Reduction in Construction Industry", from Design to Operation. Materials, 14, 6094. doi: 10.3390/ma14206094.
- [2] CHURCHILL S.A., INEKWE J., IVANOVSKI K., SMYTH R. (2021), Transport infrastructure and CO₂ emissions in the OECD over the long run. Transportation Research Part D, 95, 102857. doi: 10.1016/j.trd.2021.102857.
- [3] Commissione Europea, "Comunicazione della Commissione su un quadro per le politiche dell'energia e del clima dal 2020 al 2030".
- [4] Commissione Europea (2016), "L 282/4. Official Journal of the European Union 19.10.2016. Paris agreement".

OSSEVATORIO

- [5] Commissione Europea, "European Green Deal", Yearbook of the Law Department, vol. 9, no. 10, pp. 304–315, 2022, doi: 10.33919/yldnbu.20.9.12.
- [6] Ministero della Transizione Ecologica, Decreto 23 giugno 2022: "Criteri ambientali minimi per l'affidamento del servizio di progettazione di interventi edilizi, per l'affidamento dei lavori per interventi edilizi e per l'affidamento congiunto di progettazione e lavori per interventi edilizi". (22A04307) (GU Serie Generale n.183 del 06-08-2022).
- [7] Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti, Decreto Legislativo 31 marzo 2023, n. 36: Ripubblicazione del testo del decreto legislativo 31 marzo 2023, n. 36, recante: "Codice dei contratti pubblici in attuazione dell'articolo 1 della legge 21 giugno 2022, n. 78, recante delega al Governo in materia di contratti pubblici" (Decreto legislativo pubblicato nel Supplemento ordinario n. 12/L alla Gazzetta Ufficiale - Serie generale - n. 77 del 31 marzo 2023). (23A02179) (GU Serie Generale n.87 del 13-04-2023 - Suppl. Ordinario n. 14).
- [8] PATELLA S. M., SCRUCCA F., MANNINI L., ASDRUBALI F. (2022), "Integrated approach for the road traffic greenhouse gas emissions calculation in a life-cycle perspective", Ingegneria Ferroviaria, 77(4), pp. 277-296.
- [9] CORAZZA M.V. (2022), "Ecology of Transportation Infrastructure to protect the environment: concepts and criteria for a research extended to the transportation studies", Ingegneria Ferroviaria, pp. 787-808, doi: 10.57597/IF.10.2022.ART.2.
- [10] DI MASCIO P., LOPRENCEPI G., MORETTI L. (2014), "Competition in rail transport: Methodology to evaluate economic impact of new trains on track", In Sustainability, Eco-Efficiency and Conservation in Transportation Infrastructure Asset Management-Proceedings of the 3rd International Conference on Tranportation Infrastructure, pp. 669-675, doi: 10.1201/b16730-97.
- [11] TRUNZO G., MORETTI L., D'ANDREA A. (2019), "Life Cycle Analysis of Road Construction and Use". Sustainability, 11, 377. doi: 10.3390/su11020377.
- [12] MOTTSCHALL M., BERGMANN T. (2013), "Treibhausgas-Emissionen durch Infrastruktur und Fahrzeuge des Strassen-, Schienen- und Luftverkehrs sowie der Binnenschifffahrt in Deutschland: Arbeitspaket 4 des Projektes" Weiterentwicklung des Analyseinstrumentes Renewbility"(UBA-FB 001786/1). TEXTE, (2013, 96).
- [13] HAUSBERGER L., CORDES T., GSCHÖSSER F. (2023), "Life Cycle Assessment of High-Performance Railway Infrastructure, Analysis of Superstructures in Tunnels and Open Tracks, Sustainability", 15, 7064. doi: 10.3390/su15097064.
- [14] SIAHKOUI M., HAN X., WANG M., MANALO A., JING G. (2022), "Development and performance evaluation of self-healing concrete railway sleepers using different size PU tubes", Engineering Structures, 283, 115920. doi: 10.1016/j.engstruct.2023.115920.
- [15] WMO, "State of the Global Climate in 2022" (2023) 1316.
- [16] NAIK B. V., KISHOR Y., SAHA S., GOUDAR S. K. (2023), "Performance studies on two types of prestressed concrete railway sleepers using finite element model", Materials Today: Proceedings. doi: 10.1016/j.matpr.2023.03.147.
- [17] DE SOUZA LIMA E. H., PEREIRA CARNEIRO A. M. (2022), "A review of failures of railway monoblock prestressed concrete sleepers", Engineering Failure Analysis, 137, 106389. doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106389.
- [18] SHOJAEI M., BEHFARNIA K., MOHEBI R. (2015), "Application of alkali-activated slag concrete in railway sleepers", Materials and Design, 69, 89-95. doi: 10.1016/j.matdes.2014.12.051.
- [19] FARNAM M., REZAEI F. (2017), "Experimental Analysis of Fracture and Damage Mechanics of Pre-Stressed Concrete Sleepers B70: Part B-Analysis", International Journal of Transportation Engineering, 5 (1), 17. doi: researchgate.net/publication/363672096.
- [20] PONS J. J., VILLALBA SANCHIS I., INSA FRANCO R., YEPES V. (2020), "Life cycle assessment of a railway tracks substructures: Comparison of ballast and ballastless rail tracks", Environmental Impact Assessment Review, 85, 106444. doi: 10.1016/j.eiar.2020.106444.
- [21] GOEDKOOP M., HEIJUNGS R., HUIJBREGTS M., DE SCHRYVER A., STRUIJS J., VAN ZELM R. (2009), "ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level", 1, 1-126.
- [22] DOLCI G., RIGAMONTI L., GROSSO M. (2020), "Potential for improving the environmental performance of railway sleepers with an outer shell made of recycled materials", Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 6, 100160. doi: 10.1016/j.trip.2020.100160.
- [23] PEDERSEN E., REMMEN A. (2022), "Challenges with product environmental footprint: a systematic review". The International Journal of Life Cycle Assessment, 27(2), 342-352. doi: 10.1007/s11367-022-02022-3.
- [24] HISCHIER R., WEIDEMA B., ALTHAUS H.J., BAUER C., DOKA G., DONES R., FRISCHKNECHT R., HELLWEG S., HUMBERT S.,

OSSERVATORIO

- JUNGBLUTH N., KÖLLNER T., LOERINCICK Y., MARGNI M., NEMECEK T. (2010), "Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods". Ecoinvent report 3, v 2.2. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- [25] THOMPSON S., KING C., RODWELL J., RAYBURG S., NEAVE M., "Life Cycle Cost and Assessment of Alternative Railway Sleeper Materials", Sustainability (Switzerland), 14, pp. 1-18. doi: 10.3390/su14148814
- [26] EN, 2019. EN 15804:2019+A2:2019. "Sustainability of construction works-Environmental product declarations-Core rules for the product category of construction products".
- [27] EN, 2021. EN 14044:2021. Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida.
- [28] NATONI F. (2013), "Italian precompressed concrete sleepers", Ingegneria Ferroviaria.
- [29] RFI, Traverse marca "RFI-230", "RFI-240" e "RFI-260" in calcestruzzo vibrato, armato e precompresso, Codifica: RFI TCAR SF AE 03 002 F.
- [30] EN, 2016. EN 13230-1:2016 Applicazioni ferroviarie - Binario - Traverse e traversoni di calcestruzzo - Parte 1: Requisiti generali.
- [31] EN, 2016. EN 13230-2:2016 Applicazioni ferroviarie - Binario - Traverse e traversoni di calcestruzzo - Parte 2: Traverse monoblocco precomprese.
- [32] Pre consultants (2016) "Software SimaPro".
- [33] WERNET G., BAUER C., STEUBING B., REINHARD J., MORENO-RUIZ E., WEIDEMA B. (2016), "The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology", Int J Life Cycle Assess, 21, pp. 1218-1230. doi: 10.1007/s11367-016-1087-8.
- [34] SCHRIJVERS D. L., LOUBET P., SONNEMANN G. (2016), "Critical review of guidelines against a systematic framework with regard to consistency on allocation procedures for recycling in LCA", The International Journal of Life Cycle Assessment, 21, pp. 994-1008, doi: 10.1007/s11367-016-1069-x.
- [35] EPD, Railway sleepers SBR25ML with fastening system, 100 % Portland cement and 0 % green PC-steel, manufactured in Kungsör (<https://www.environdec.com/library/epd8087>).
- [36] MORETTI L., CARO S. (2017), "Critical analysis of the Life Cycle Assessment of the Italian cement industry", Journal of Cleaner Production, 152, pp. 198-210. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.136.
- [37] DEL SERRONE G., MORETTI L. (2023), "A stepwise regression to identify relevant variables affecting the environmental impacts of clinker production", Journal of Cleaner Production, 398, 136564. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136564.
- [38] MARINKOVI S. B., MALEŠEV M., IGNJATOVIC I. (2014), "Life cycle assessment (LCA) of concrete made using recycled concrete or natural aggregates, Eco-Efficient Construction and Building Materials: Life Cycle Assessment (LCA)", Eco-Labelling and Case Studies", pp. 239-266, 2013, doi: 10.1533/9780857097729.2.239.
- [39] NTC 2018 – Nuove norme sismiche per il calcolo strutturale. Approvate con Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018.
- [40] MORETTI L., DURASTANTI C. (2020), "Environmental Impacts of Cement Production: A Statistical Analysis", Applied Sciences, 10, 8212. doi: 10.3390/app10228212.
- [41] DE BORTOLI A., BOUHAYA L., FERAILLE A. (2020), "A life cycle model for high-speed rail infrastructure: environmental inventories and assessment of the Tours-Bordeaux railway in France", International Journal of Life Cycle Assessment, 25 (4), pp. 814-830, doi: 10.1007/s11367-019-01727-2.
- [42] GATTUSO D. (2022), "Fair and sustainable railway transport at the service of the whole community", Ingegneria Ferroviaria, pp. 761-786, doi: 10.57597/IF.10.2022.ART.1.