POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Life Cycle Assessment su materiale rotabile: metodologia e applicazione / Life Cycle Assessment on rolling stock:

Original
Life Cycle Assessment su materiale rotabile:
metodologia e applicazione / Life Cycle Assessment on rolling stock:
methodology and application / Cappelli, F., Grosso, P., Dalla Chiara, B.. - In: INGEGNERIA FERROVIARIA. - ISSN 0020-0956. - ELETTRONICO. - 81:4(2026), pp. 301-320.

Availability:
This version is available at: 11583/3015771 since: 2026-09-21T15:27:30Z

Publisher:
CIFI Collegio Ingegneri Ferroviari Italiani

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

26 October 2026

Life Cycle Assessment su materiale rotabile: metodologia e applicazione

Life Cycle Assessment on rolling stock: methodology and application

Flavio Cappelli(*)
Paolo Grosso(**)
Bruno Dalla Chiara(***)

(https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.04.2026.ART.1)

Sommario - La ricerca di sistemi di trasporto sempre più attenti alla sostenibilità e alla transizione energetica esercita una spinta verso una progettazione accurata, che punti alla minimizzazione di consumo di risorse e di energia, allo scopo di ridurre l'impronta ambientale dei sistemi stessi. Tra le diverse modalità di trasporto, quella ferroviaria è capace - per le sue caratteristiche intrinseche - di un'elevata efficienza energetica e un basso impatto ambientale, soprattutto per il numero di passeggeri che riesce a spostare. Emerge, quindi, la necessità di quantificare tale impatto, in modo da evidenziare il beneficio, in primo luogo, in termini di consumo energetico ed emissioni di agenti climalteranti delle scelte progettuali applicate al sistema ferroviario; per di più, per un sistema come quello ferroviario, occorre prestare attenzione ai dettagli per poter apprezzare variazioni di tale beneficio, rendendo questa necessità ancora più forte.

Entra quindi in gioco l'analisi del ciclo di vita del sistema ferroviario, che in questo articolo verrà applicata al materiale rotabile, in un servizio di trasporto interregionale notturno.

Attraverso la scomposizione del processo che conduce alla produzione del materiale rotabile e considerando l'uso, la manutenzione e lo smaltimento, diventa possibile quantificare l'impatto e mettere in evidenza quali sono le componenti del processo che concorrono in misura maggiore al valore finale.

1. Introduzione

Il settore ferroviario riveste da tempo un ruolo chiave nella transizione ecologica della mobilità, grazie alle sue caratteristiche strutturali che lo rendono intrinsecamente

(*) Autore corrispondente: flavio.cappelli@polito.it - Politecnico di Torino, Dip. DIATI - Trasporti, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129, Torino (TO).
(**) grossopaolo27@gmail.com.
(***) Politecnico di Torino, Dip. DIATI - Trasporti, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129, Torino (TO).

Summary *- The search for transport systems that have sustainability and energy transition as their main objectives requires careful design that aims to minimise resource and energy consumption in order to reduce the environmental footprint of the systems themselves. Among the different transport modes, the railway is capable - due to its intrinsic characteristics - of high energy efficiency and low environmental impact, especially for the number of passengers it is able to move. There emerges, therefore, the need to quantify this impact, so as to highlight the benefit, first of all, in terms of energy consumption and emissions of climate-altering agents of the design choices applied to the railway system; moreover, for a system such as the railway, attention to detail is required in order to be able to appreciate variations in this benefit, making this need even stronger.*

This brings into play the Life Cycle analysis of the railway system, which in this article will be applied to the Rolling Stock in an interregional overnight transport service.

By breaking down the process that leads to the production of Rolling Stock and considering use, maintenance and disposal, it becomes possible to quantify the impact and highlight which process components contribute most to the final value.

1. Introduction

The railway sector has long played a key role in the ecological transition of mobility, due to its structural characteristics that make it inherently more efficient and less impactful than other transport systems. The high load capacity, the possibility of having the power supplied from renewable sources, the optimised use of infrastructure and the long-lasting life of rail vehicles make them one of the most

(*) Corresponding author: flavio.cappelli@polito.it - Politecnico di Torino, Dept. DIATI - Transport system, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129, Torino (TO).
(**) grossopaolo27@gmail.com.
(***) Politecnico di Torino, Dept. DIATI - Transport systems, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129, Torino (TO).

più efficiente e meno impattante rispetto ad altri sistemi di trasporto. L'elevata capacità di carico, la possibilità di alimentazione elettrica da fonti rinnovabili, l'utilizzo ottimizzato dell'infrastruttura e la durabilità dei veicoli ferroviari ne fanno una delle soluzioni più promettenti per ridurre il consumo energetico e le emissioni climalteranti nel settore dei trasporti.

A livello europeo, l'attenzione istituzionale verso il trasporto ferroviario è andata consolidandosi negli ultimi anni, soprattutto con l'introduzione del Green Deal Europeo e della strategia *Fit for 55*, che mirano a ridurre del 90% le emissioni del settore trasporti entro il 2050 [1]. Il comparto ferroviario, già oggi responsabile di una quota molto contenuta delle emissioni complessive, è chiamato ad assumere un ruolo ancora più centrale, non solo come alternativa sostenibile, ma come sistema da ottimizzare ulteriormente attraverso soluzioni tecnologiche e progettuali innovative.

In questo scenario, emerge con forza la necessità di valutare l'intero ciclo di vita del materiale rotabile, superando l'approccio limitato alla sola fase operativa. Infatti, se da un lato l'esercizio ferroviario risulta tra i più virtuosi in termini di emissioni specifiche di CO_2 per passeggero o per tonnellata trasportata, dall'altro, le fasi di produzione, manutenzione e fine vita dei veicoli possono incidere in modo significativo sull'impronta ambientale complessiva del sistema. Ignorare questi contributi significherebbe sottovalutare il reale impatto ambientale e perdere opportunità di ottimizzazione nelle fasi a monte e a valle dell'utilizzo del treno.

L'Analisi del Ciclo di Vita (*Life Cycle Assessment* – LCA) rappresenta oggi lo strumento più completo per affrontare questa complessità. Conforme agli standard ISO 14040 e 14044 [2][3], l'LCA consente di valutare in modo oggettivo e comparabile gli impatti ambientali generati lungo tutte le fasi della vita di un prodotto: dalla produzione delle materie prime, all'assemblaggio, all'uso, fino allo smaltimento o riciclo finale. Applicare tale approccio al materiale rotabile permette di individuare le fasi a maggiore impatto, di quantificare i benefici di interventi a favore dell'efficienza o generando maggiore riciclo, e di supportare scelte progettuali realmente orientate alla sostenibilità ambientale.

A rafforzare questa esigenza interviene il nuovo Regolamento (UE) 2024/1781, che stabilisce un quadro normativo per la progettazione ecocompatibile dei prodotti e introduce strumenti operativi come il passaporto digitale del prodotto [4]. Tale passaporto conterrà informazioni ambientali, energetiche e di composizione dei prodotti, inclusi treni e loro sottosistemi, e richiederà dati verificabili e strutturati secondo criteri di trasparenza e tracciabilità. È chiaro, dunque, che l'approccio *life-cycle* e le Dichiarazioni Ambientali di Tipo III (EPD) diventeranno strumenti fondamentali non solo per la comunicazione ambientale, ma anche per la conformità normativa e la competitività industriale.

Nel contesto della competitività industriale si evidenzia il sistema delle commesse, per cui i costruttori si trovano a progettare materiale rotabile cercando di contenerne

promising solutions for reducing energy consumption and climate-changing emissions in the transport sector.

At European level, the institutional focus on rail transport has been consolidated in recent years, especially with the introduction of the European Green Deal and the Fit for 55 strategy, which aim to reduce transport sector emissions by 90% by 2050 [1] . The railway sector, already responsible for a very small share of overall emissions, is asked to assume an even more central role, not only as a sustainable alternative, but as a system to be further optimised through innovative technological and design solutions.

In this scenario, the need to evaluate the entire life cycle of Rolling Stock emerges strongly, going beyond the approach limited to the operational phase alone. In fact, while railway operations are among the most virtuous in terms of specific CO_2 emissions per passenger or per tonne transported, the production, maintenance and end-of-life phases of vehicles can significantly affect the system's overall environmental footprint. Ignoring these contributions would mean underestimating the real environmental impact and missing optimisation opportunities in the upstream and downstream phases of train use.

Today, Life Cycle Assessment (LCA) is the most comprehensive tool to address this complexity. Compliant with ISO standards 14040 and 14044 [2][3], LCA makes it possible to objectively and comparably assess the environmental impacts generated throughout all phases of a product's life: from the production of raw materials, through assembly and use, to final disposal or recycling. Applying such an approach to Rolling Stock makes it possible to identify the phases with the greatest impact, to quantify the benefits of interventions to improve efficiency or generate more recycling, and to support design choices that are truly oriented towards environmental sustainability.

Reinforcing this need is the new Regulation (EU) 2024/1781, which establishes a regulatory framework for the eco-design of products and introduces operational tools such as the digital product passport [4]. This passport will contain the environmental, energy and composition information on products, including trains and their sub-systems, and will require verifiable and structured data according to criteria of transparency and traceability. It is clear, therefore, that the life-cycle approach and Type III Environmental Declarations (EPDs) will become key tools not only for environmental communication, but also for regulatory compliance and industrial competitiveness.

In the context of industrial competitiveness, the order system is highlighted, whereby manufacturers have to design Rolling Stock while trying to keep costs down in order to win supply for rail transport operators. A detailed analysis of the environmental impact of one's product and its communication with a standardised and harmonised tool allows one to add a further element of value to one's product.

In the light of this technical, environmental and regulatory context, this article aims to:

- *apply a detailed LCA analysis to a railway carriage used*

i costi, al fine di vincere la fornitura per gli operatori del trasporto ferroviario. L'analisi dettagliata dell'impatto ambientale del proprio prodotto e la sua comunicazione con uno strumento standardizzato e armonizzato consentono di aggiungere un ulteriore elemento di valorizzazione del proprio prodotto.

Alla luce di questo contesto tecnico, ambientale e regolatorio, il presente articolo si propone di:

- applicare un'analisi LCA dettagliata a una carrozza ferroviaria adibita a servizio notturno;
- identificare le fasi più impattanti del suo ciclo di vita e valutarne il contributo relativo;
- eseguire un'analisi di sensitività in base all'area geografica di produzione;
- discutere il ruolo delle EPD e del Regolamento (UE) 2024/1781 come strumenti per l'adozione strutturata dell'LCA nel settore ferroviario.

Obiettivo ultimo è offrire un modello metodologico chiaro e replicabile, utile sia per gli operatori del settore sia per le autorità normative, in vista di una progettazione ferroviaria sempre più sostenibile, misurabile e conforme alle future richieste europee, per quanto possibile in modo oggettivo e soprattutto condivisibile.

Nella maggior parte delle analisi correnti il focus è ancora centrato quasi esclusivamente sulla fase di esercizio, trascurando l'influenza significativa delle fasi a monte (estrazione delle materie prime, produzione e assemblaggio dei componenti) e a valle (manutenzione, dismissione, riciclo): questa lacuna metodologica rende difficile la definizione di benchmark ambientali condivisi per il materiale rotabile e limita le possibilità di progettazione migliorativa basata su dati oggettivi.

Le ricerche disponibili includono il materiale rotabile in un sistema composto anche dall'infrastruttura, mostrando che, per alcuni rotabili moderni, la loro fase di produzione può rappresentare fino al 20% delle emissioni complessive su tutto il ciclo di vita, mentre il fine vita, se ben gestito, può addirittura generare crediti ambientali significativi grazie al recupero di materiali ad alto valore [5]. Tuttavia, tali risultati derivano da casi studio molto eterogenei per metodologia, perimetro di analisi e qualità dei dati, rendendo difficile una comparazione sistematica tra veicoli diversi. Inoltre, sono ancora pochi i costruttori che rilasciano dichiarazioni ambientali di tipo EPD complete e verificabili per le proprie piattaforme ferroviarie, a differenza di quanto avviene in altri settori industriali, come l'edilizia o l'automotive.

Alla luce di queste considerazioni, l'obiettivo principale di questo lavoro è contribuire a colmare il divario tecnico-metodologico nella valutazione ambientale del materiale rotabile, proponendo un caso studio rappresentativo realizzato secondo gli standard internazionali della metodologia LCA (ISO 14040 e ISO 14044). La scelta è ricaduta su carrozze ferroviarie adibite a servizio notturno, destinata a percorrenze medio-lunghe e caratterizzata da

for night service;

- *identify the phases that impact most within its life cycle and assess their relative contribution;*
- *perform a sensitivity analysis according to the geographical area of production;*
- *discuss the role of EPDs and Regulation (EU) 2024/1781 as tools for the structured adoption of LCA in the railway sector.*

The ultimate goal is to offer a clear and replicable methodology, useful for both industry players and regulatory authorities, in view of an increasingly sustainable, measurable and compliant railway design in line with future European requirements, as far as possible in an objective and, above all, shareable manner.

In most current analyses the focus is still centred almost exclusively on the operational phase, neglecting the significant influence of the upstream (extraction of raw materials, production and assembly of components) and downstream (maintenance, decommissioning, recycling) phases: this methodological shortcoming makes it difficult to define shared environmental benchmarks for Rolling Stock and limits the possibilities for improved design based on objective data.

Available research includes Rolling Stock in a system composed also of infrastructure, showing that, for some modern Rolling Stock, their production phase can account for up to 20 per cent of total emissions over their entire life cycle, while their end-of-life, if well managed, can even generate significant environmental credits through the recovery of high-value materials [5]. However, these results are derived from case studies that are very heterogeneous in terms of methodology, scope of analysis and data quality, making a systematic comparison between different vehicles very challenging. Furthermore, there are still few manufacturers issuing comprehensive and verifiable EPD-type environmental declarations for their railway platforms, unlike in other industrial sectors such as construction or automotive.

In the light of these considerations, the main objective of this paper is to contribute to bridging the technical-methodological gap in the environmental assessment of Rolling Stock, by proposing a representative case study carried out according to the international standards of the LCA methodology (ISO 14040 and ISO 14044). The choice fell on railway carriages for night service, intended for medium-long distances and characterised by a modular interior composition (with comfort, economy and deluxe configurations), which well represent the constructive and functional complexity of a modern passenger vehicle. The analysis was conducted with the OpenLCA software, using the Ecoinvent database for modelling the elementary processes and considering all the main phases of the life cycle: upstream (production of materials and components), core (assembly at the manufacturer's premises) and downstream (use, maintenance and decommissioning).

una composizione interna modulare (con configurazioni comfort, economy e deluxe), che ben rappresenta la complessità costruttiva e funzionale di un veicolo passeggeri moderno. L'analisi è stata condotta con il software OpenLCA, utilizzando il database Ecoinvent per la modellazione dei processi elementari e considerando tutte le fasi principali del ciclo di vita: upstream (produzione dei materiali e componenti), core (assemblaggio presso il costruttore) e downstream (utilizzo, manutenzione e dismissione).

Accanto all'analisi base, è stata svolta una valutazione di sensitività sulla localizzazione geografica della produzione, ipotizzando tre scenari distinti (Italia, media europea, Cina) per l'approvvigionamento energetico e industriale. Questa analisi è finalizzata a quantificare quanto le condizioni di contesto influenzino il profilo emissivo complessivo del prodotto, e a fornire indicazioni utili per le strategie di supply chain e localizzazione della produzione.

In questo articolo viene altresì discusso il ruolo delle EPD (*Environmental Product Declarations*) come strumento normato per la comunicazione degli impatti ambientali in ambito ferroviario, alla luce del nuovo Regolamento (UE) 2024/1781 che introduce, tra gli altri, il passaporto digitale del prodotto. Questo regolamento, in fase di implementazione, prevede l'obbligo di fornire dati ambientali verificabili per i prodotti complessi immessi sul mercato europeo, spingendo verso una standardizzazione della rendicontazione ambientale basata su analisi LCA complete e confrontabili. L'obiettivo è mostrare come l'approccio sviluppato in questo studio possa rappresentare un punto di riferimento per futuri sviluppi normativi, progettuali e industriali nel settore ferroviario europeo.

2. Stato dell'arte e confronto tra sistemi di trasporto

Si può effettuare un confronto tra sistemi di trasporto osservando la variazione dei consumi specifici (espressi in kWh/pkm) e delle emissioni (espresse in gCO_2/pkm) in funzione della distanza percorsa. Modi di trasporto energivori vedono ammortizzato sulla distanza percorsa e sul numero di passeggeri trasportati il loro impatto, andando a posizionarsi in una gerarchia definita in funzione della distanza percorsa [6]. Nella Fig. 1 è possibile osservare la differenza tra il consumo specifico di alcune categorie di aeromobile, il trasporto su strada e l'ETR500 nelle distanze in cui sono chiamati ad operare. La dimensione dei punti è rappresentativa del consumo specifico dei modi di trasporto in funzione della distanza. In Tab. 1 si riportano i diversi tipi di aeromobile analizzati in Fig. 1.

Per le distanze in cui si trova ad operare, il trasporto su rotaia si dimostra come la modalità di trasporto a minor consumo specifico, e conseguentemente a minor impatto emissivo, rispetto alle altre, durante l'uso. Questa valutazione comparativa rivela significative differenze in termini di impatto ambientale, misurato attraverso le emissioni di CO_2 per posto-chilometro (gCO_{2eq}/pkm) e il consumo energetico (kWh/pkm). Queste metriche sono influenzate

Alongside the core analysis, a sensitivity assessment was carried out on the geographical location of production, assuming three distinct scenarios (Italy, European average, China) for energy and industrial supply. The purpose of this analysis is to quantify how much the contextual conditions influence the overall emission profile of the product, and to provide useful indications for supply chain and production location strategies.

This article also discusses the role of EPDs (Environmental Product Declarations) as a standardised tool for communicating environmental impacts in railways, in the light of the new Regulation (EU) 2024/1781 that introduces, among others, the digital product passport. This regulation, which is currently being implemented, includes the obligation to provide verifiable environmental data for complex products placed on the European market, pushing towards a standardisation of environmental reporting based on comprehensive and comparable LCA analyses. The aim is to show how the approach developed in this study can represent a benchmark for future regulatory, design and industrial developments in the European railway sector.

2. *State of the art and comparison among transport systems*

A comparison between transport systems can be made by observing the variation of specific consumption (expressed in kWh/pkm) and emissions (expressed in gCO_2/pkm) as a function of distance travelled. Energy-intensive modes of transport see their impact spread over the distance travelled and the number of passengers transported, ranking in a defined hierarchy according to the distance travelled [6] . In Fig. 1 it is possible to observe the difference between the specific consumption of certain categories of aircraft, road transport and the ETR500 in the distances over which they operate. The point size is representative of the specific consumption of the transport modes as a function of distance. Tab. 1 shows the different types of aircraft analysed in Fig. 1.

For the distances over which it operates, rail transport proves to be the mode of transport with the lowest specific consumption, and consequently the lowest emission impact, compared to the others, during use. This comparative assessment reveals significant differences in terms of environmental impact, measured through CO_2 emissions per seat-kilometre (gCO_{2eq}/pkm) and energy consumption (kWh/pkm). These metrics are influenced by various factors, including vehicle efficiency, the type of fuel used, average occupancy and the national energy mix. Electrified railways, as mentioned above, are characterised by their low footprint, with average emissions of around 24 gCO_{2eq}/pkm in Europe, which can drop to 7 gCO_{2eq}/pkm in the Nordic countries due to a lower carbon energy mix [7][8] . Energy consumption for high-speed trains varies between 0.03-0.09 kWh/pkm [9], highlighting their superiority to other means of transport [10]. Electric vehicles have emissions of around 15 gCO_{2eq}/pkm in Europe, while internal combustion vehicles, such as petrol and diesel cars, emit 42 and 46 gCO_{2eq}/pkm respectively. Energy consumption for cars varies be-

Tabella 1 – *Table 1*

Dettaglio categorie di aeromobile analizzati
Details of aircraft categories analysed

Codice	Tipo di aeromobile
B1	Business jet
B2	Business jet
RTP1	Regional turboprop airliner
RTP2	Regional turboprop airliner
RTF1	Regional turbofan airliner
RTF2	Regional turbofan airliner engine option 1
RTF3	Regional turbofan airliner
RTF4	Regional turbofan airliner engine option 2
S1	Short to medium haul airliner
S2	Short to medium haul airliner

Code	Aircraft type
B1	Business jet
B2	Business jet
RTP1	Regional turboprop airliner
RTP2	Regional turboprop airliner
RTF1	Regional turbofan airliner
RTF2	Regional turbofan airliner engine option 1
RTF3	Regional turbofan airliner
RTF4	Regional turbofan airliner engine option 2
S1	Short to medium haul airliner
S2	Short to medium haul airliner

da vari fattori, tra cui l'efficienza del veicolo, il tipo di carburante utilizzato, l'occupazione media e il mix energetico nazionale. Le ferrovie elettrificate, come anticipato, si distinguono per la loro impronta contenuta, con emissioni medie di circa 24gCO_{2eq}/pkm in Europa, che possono

tween 0.35 and 0.47 kWh/pkm, making them less efficient than trains. Air transport remains the least decarbonised, with emissions varying between 133 gCO_{2eq}/pkm for scheduled economy class flights and 298 gCO_{2eq}/pkm for business class flights. In Europe, taking into account the use of main-

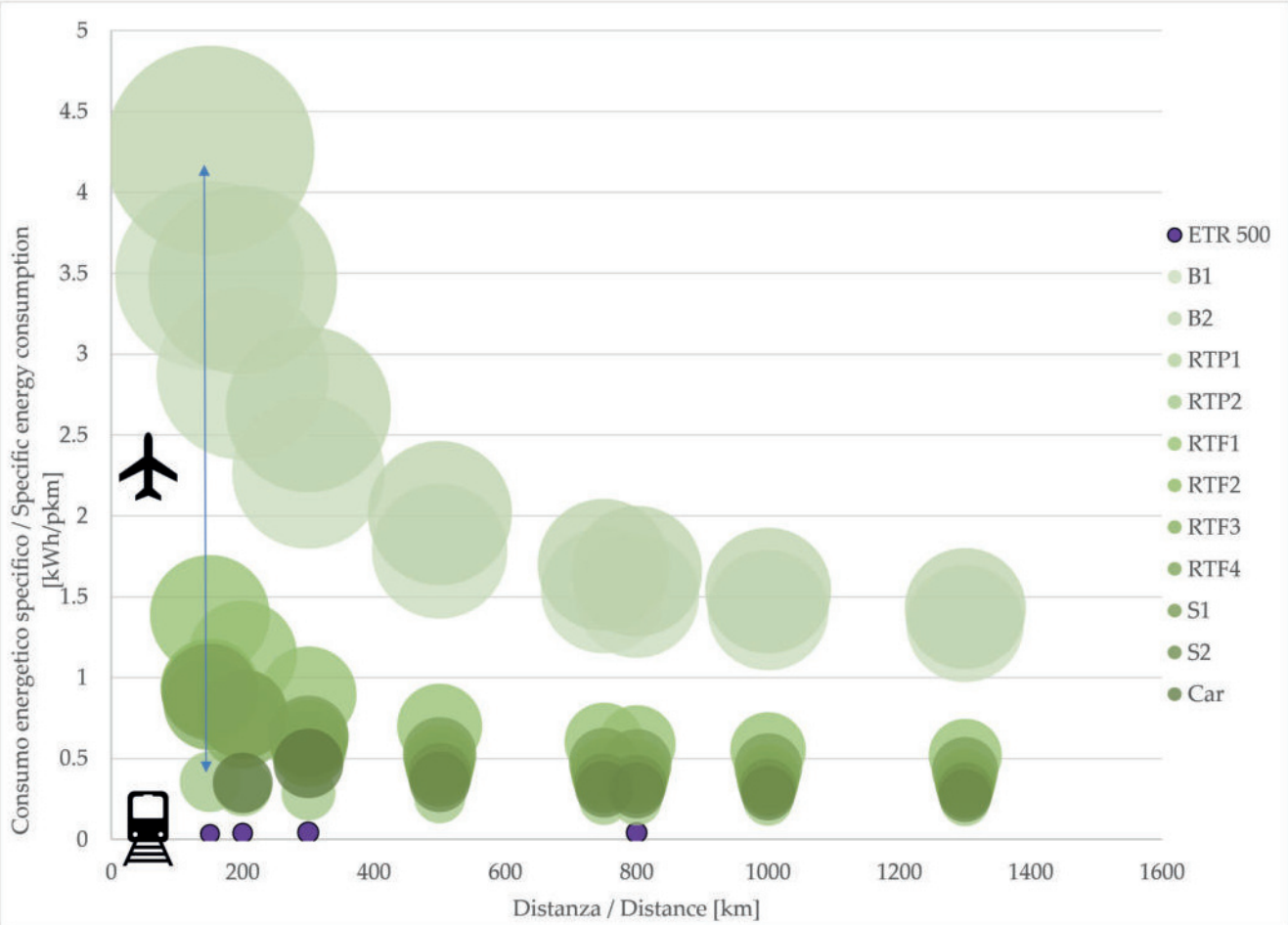

Figura 1 - Consumo energetico specifico in funzione della distanza percorsa per modo di trasporto [6].
Figure 1 - Specific energy consumption as a function of distance travelled by transport mode [6].

scendere a 7gCO_{2eq}/pkm nei paesi nordici grazie a un mix energetico a minore tenore di carbonio [7][8]. Il consumo energetico per i treni ad alta velocità varia tra 0.03-0.09 kWh/pkm [9], evidenziando la loro superiorità rispetto ad altri mezzi di trasporto [10]. I veicoli elettrici presentano emissioni di circa 15gCO_{2eq}/pkm in Europa, mentre i veicoli a combustione interna, come le auto a benzina e diesel, emettono rispettivamente 42 e 46gCO_{2eq}/pkm. Il consumo energetico per le auto varia tra 0.35 e 0.47kWh/pkm, rendendole meno efficienti rispetto ai treni. Il trasporto aereo rimane il meno decarbonizzato, con emissioni che variano tra 133gCO_{2eq}/pkm per i voli di linea in classe economica e 298gCO_{2eq}/pkm per quelli in classe business. In Europa, tenendo conto dell'uso principalmente di velivoli di linea per tratte di media distanza (categoria S1, S2 della Fig. 1), il consumo energetico per gli aerei si aggira tra 0.72 e 1.98kWh/pkm, sottolineando la loro elevata intensità energetica. I pullman a lunga percorrenza mostrano emissioni di circa 31gCO_{2eq}/pkm, rendendoli una delle opzioni più ecologiche tra i veicoli motorizzati [11].

La Fig. 2 sintetizza i dati sopra menzionati, fornendo una base per la creazione di grafici comparativi.

Questi dati evidenziano l'importanza di promuovere modalità di trasporto più sostenibili, sia da un punto di vista energetico che emissivo, come il treno e i veicoli elettrici, per ridurre l'impatto ambientale del settore dei trasporti.

ly medium-distance scheduled aircraft (category S1, S2 of Fig. 1), the energy consumption for aircraft is between 0.72 and 1.98 kWh/pkm, underlining their high energy intensity. Long-distance coaches show emissions of around 31 gCO_{2eq}/pkm, making them one of the most environmentally friendly options among motorised vehicles [11].

Fig. 2 summarises the above data, providing a basis for creating comparative graphs.

These data highlight the importance of promoting more sustainable modes of transport, both in terms of energy and emissions, such as rail and electric vehicles, to reduce the environmental impact of the transport sector.

In fact, it can be seen that specific consumption decreases as the travelled distances increase, making rail travel extremely advantageous, even after the claimed efficiency improvements on aircrafts [12].

Although the analysis of specific consumption offers a useful insight into operational efficiency, it is necessary to extend the scope of the study to include the Well-to-Wheel analysis of the energy carrier used - divided into a part that focuses on the processes of producing the carrier and its distribution (Well-To-Tank, WTT) and a part that takes into account the specific use (Tank-To-Wheel, TTW) - and the life cycle of the system (LCA). The latter approach takes into account not only energy efficiency during operation, but the entire environmental impact associated with vehicle production, distribution and disposal, offering a comprehensive and sustainable view.

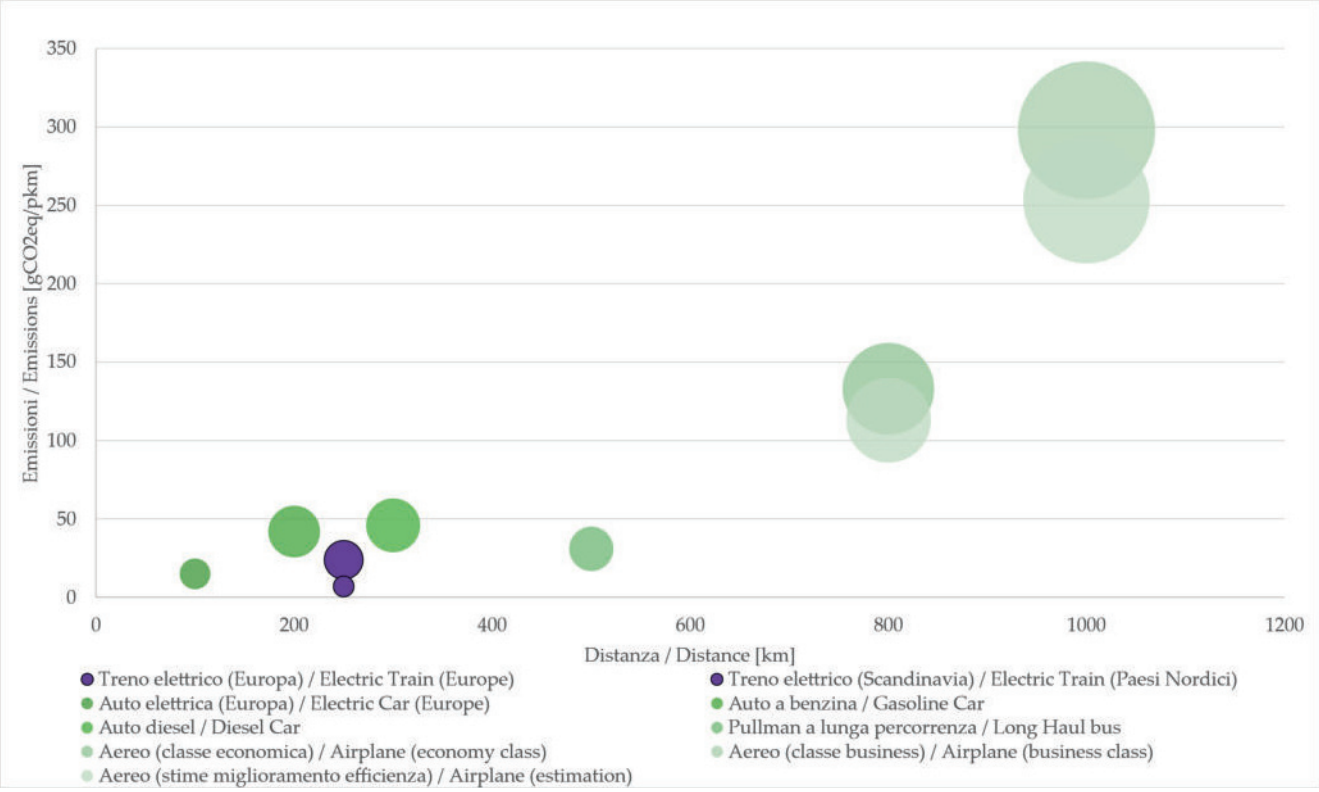

Figura 2 - Comparazione delle emissioni per unità funzionale dei principali modi di trasporto in Europa.
Figure 2 - Comparison of emissions per functional unit of the main transport modes in Europe.

Difatti, si può vedere come il consumo specifico si riduca all'aumentare delle distanze percorse, rendendo lo spostamento su rotaia estremamente vantaggioso, anche a valle dei miglioramenti in termini di efficienza dichiarati sugli aeromobili [12].

Sebbene l'analisi del consumo specifico offra una visione utile dell'efficienza operativa, si rende necessario estendere il campo di studio includendo l'analisi Well-to-Wheel del vettore energetico utilizzato - diviso in una parte che si focalizza sui processi di produzione del vettore e della sua distribuzione (*Well-To-Tank*, WTT) e in una parte che tiene conto dell'uso specifico (*Tank-To-Wheel*, TTW) - e del ciclo di vita del sistema (LCA). Quest'ultimo approccio non tiene solo conto dell'efficienza energetica durante l'esercizio, ma l'intero impatto ambientale associato alla produzione, distribuzione e smaltimento dei veicoli, offrendo una visione complessiva e sostenibile.

Nonostante la crescente attenzione verso la sostenibilità del trasporto ferroviario, l'applicazione sistematica della metodologia LCA al materiale rotabile resta ancora relativamente poco sviluppata nella letteratura scientifica e tecnica.

In studi precedenti si è focalizzata l'attenzione sulla questione energetica relativa ai diversi sistemi di trasporto, andando a evidenziare la potenzialità dei sistemi ferroviari, e quali elementi possono contribuire al miglioramento del suo rendimento energetico [13].

I contributi esistenti si concentrano su casi specifici, spesso eterogenei per tipologia di veicolo, perimetro analizzato e approccio metodologico. Sono particolarmente diffusi studi relativi a treni metropolitani e ad alta velocità, mentre risultano più rari quelli che trattano in modo approfondito le carrozze passeggeri convenzionali o i rotabili per servizi notturni a media e lunga percorrenza.

Tra gli studi più completi si segnala l'analisi LCA del treno AZUR di Alstom, pubblicata sotto forma di EPD di Tipo III certificata esternamente. Tale documento fornisce un bilancio dettagliato degli impatti ambientali lungo l'intero ciclo di vita del rotabile, evidenziando un'impronta complessiva di appena 0.8gCO_{2eq} per passeggero-km, con una durabilità ipotizzata di 40 anni e un tasso di recuperabilità dei materiali pari al 97% [14]. A motivare un'analisi che prenda in considerazione l'intero ciclo di vita del materiale rotabile, si trovano i risultati delle analisi condotte sulla linea metropolitana di Tokyo e sulla linea Douro in Portogallo, che hanno esplorato l'interazione tra materiale rotabile, infrastruttura e sistema energetico, mostrando che la fase di produzione dei veicoli può arrivare a incidere per oltre un terzo sull'impronta totale di CO_2, specialmente in presenza di forniture elettriche a bassa quota di rinnovabili [14][8].

Gli studi comparativi internazionali, come quelli promossi da EcoPassenger, Ecoinvent e l'Agenzia Europea per l'Ambiente, confermano che l'LCA applicata al materiale rotabile può restituire impatti ambientali altamente variabili in funzione della metodologia impiegata: i principali fattori che influenzano i risultati sono il mix energetico nazionale (che incide fortemente sulla fase di esercizio), la durata ipo-

Despite the increasing focus on the sustainability of rail transport, the systematic application of LCA methodology to Rolling Stock is still relatively underdeveloped in the scientific and technical literature.

Previous studies have focused on the energy issue related to different transport systems, highlighting the potential of railway systems, and which elements can contribute to the improvement of its energy performance [13].

Existing contributions focus on specific cases, often heterogeneous in terms of vehicle type, scope and methodological approach. Studies on underground and high-speed trains are particularly widespread, while those dealing in depth with conventional passenger carriages or Rolling Stock for medium- and long-distance night services are rarer.

Among the most comprehensive studies there is the LCA analysis of the AZUR train by ALSTOM, published as an externally certified Type III EPD. This document provides a detailed balance of environmental impacts over the entire life cycle of the Rolling Stock, showing an overall footprint of just 0.8 gCO_{2eq}/pkm, with an assumed durability of 40 years and a material recoverability rate of 97% [14]. Motivating an analysis that takes into account the entire life cycle of Rolling Stock are the results of analyses conducted on the Tokyo Metro line and the Douro line in Portugal, which explored the interaction between Rolling Stock, infrastructure and the energy system, showing that the vehicle production phase can account for more than one-third of the total CO_2 footprint, especially in the presence of low renewable electricity supplies [14][8].

International comparative studies, such as those promoted by EcoPassenger, Ecoinvent and the European Environment Agency, confirm that the LCA applied to Rolling Stock can return highly variable environmental impacts depending on the methodology used: the main factors influencing the results are the national energy mix (which strongly affects the operating phase), the assumed useful life of the Rolling Stock, the average passenger load and the strategy adopted for end-of-life modelling. In particular, the latter can be approached in different ways: the first is the cut-off approach, whereby the impact due to the recycling of components and materials is allocated to the product that will use them, while the second, called the "APOS" (Allocation at the Point Of Substitution) approach, provides for the allocation of the impact to the product that generated the component, when it replaces virgin material [15][16].

Some studies show how LCA is used to test the application of recycling methods to rolling stock that would raise its sustainability score. [21].

No less relevant is the difference between studies adopting a cradle-to-gate (upstream + core) approach, stopping at the production and assembly phase, and the more comprehensive cradle-to-grave (upstream + core + downstream) studies, which also include maintenance, operation, and decommissioning. Only the latter allow a comprehensive and comparable assessment of the actual sustainability of a Rolling Stock, in line with the requirements of ISO 14040 and 14044.

tizzata di vita utile del rotabile, il carico medio di passeggeri e la strategia adottata per la modellazione del fine vita. In particolare quest'ultimo può essere approcciato in modi diversi: il primo è l'approccio cut-off, il quale prevede che l'impatto dovuto al riciclo di componenti e materiali venga allocato al prodotto che ne farà uso, mentre il secondo, chiamato approccio "APOS" (*Allocation at the Point Of Substitution*), prevede l'allocazione dell'impatto al prodotto che ha generato il componente, quando questo vada a sostituire del materiale vergine [15][16].

Alcuni studi mostrano come si faccia uso dell'analisi LCA del materiale rotabile per applicare modalità di riciclo che aumentino la sostenibilità del materiale stesso [21].

Non meno rilevante è la differenza tra gli studi che adottano un approccio *cradle-to-gate (upstream + core)*, fermandosi alla fase di produzione e assemblaggio, e quelli più completi *cradle-to-grave (upstream + core + downstream)*, che includono anche manutenzione, esercizio, e dismissione. Soltanto i secondi consentono una valutazione completa e comparabile dell'effettiva sostenibilità di un rotabile, in linea con le prescrizioni delle norme ISO 14040 e 14044.

Tuttavia, dalla revisione sistematica della letteratura emergono alcune criticità ricorrenti:

1. una marcata assenza di dati primari standardizzati su molti dei componenti fondamentali del materiale rotabile, come i carrelli, i cablaggi, le dotazioni interne o gli impianti di bordo. Questo obbliga spesso i ricercatori a ricorrere a dati secondari o a medie di settore, riducendo l'accuratezza delle valutazioni;
2. una scarsa disponibilità di certificati EPD per i rotabili in commercio, a differenza di quanto accade ad esempio nel settore dell'edilizia, dove le dichiarazioni ambientali sono ormai diffuse e standardizzate grazie a normative consolidate (come EN 15804). Nel ferroviario, le EPD di tipo III restano una pratica volontaria e limitata a pochi operatori, rendendo difficile la comparazione tra prodotti simili offerti da diversi costruttori;
3. la variabilità metodologica nei modelli adottati: alcuni studi utilizzano modelli di allocazione semplici, altri adottano approcci più raffinati (come l'APOS 100:100 di Ecoinvent), ma raramente si trovano confronti sistematici che valutino l'influenza di queste scelte sui risultati finali. Anche la definizione dei confini del sistema può variare significativamente da uno studio all'altro, includendo o meno la produzione di ricambi, la fase di manutenzione ordinaria, o l'energia necessaria per la gestione delle officine.

In questo scenario parziale e frammentato, il presente studio intende proporsi come contributo metodologico e pratico per rafforzare la base conoscitiva disponibile, introducendo un'analisi LCA dettagliata e verificabile su una carrozza ferroviaria reale, con dati strutturati, scenari comparabili e un approccio *cradle-to-grave* coerente con le migliori pratiche internazionali.

L'efficacia di un'analisi LCA nel settore ferroviario dipende in larga parte non solo dalla qualità dei dati, ma

However, the systematic literature review reveals some recurring criticalities:

1. *a marked absence of standardised primary data on many of the key components of Rolling Stock, such as bogies, cabling, interior equipment or on-board systems. This often forces researchers to resort to secondary data or industry averages, reducing the accuracy of assessments;*
2. *a lack of availability of EPD certificates for commercial Rolling Stock, unlike for example in the construction sector, where environmental declarations are now widespread and standardised thanks to established standards (such as EN 15804). In railways, Type III EPDs remain voluntary and limited to a few operators, making it difficult to compare similar products offered by different manufacturers;*
3. *methodological variability in the models adopted: some studies use simple allocation models, others adopt more refined approaches (such as Ecoinvent's APOS 100:100), but systematic comparisons assessing the influence of these choices on the final results are rarely found. Even the definition of system boundaries can vary significantly from one study to the next, whether or not it includes the production of spare parts, the routine maintenance phase, or the energy required to run workshops.*

In this partial and fragmented scenario, the present study intends to serve as a methodological and practical contribution to strengthen the available knowledge base by introducing a detailed and verifiable LCA analysis on a real railway carriage, with structured data, comparable scenarios and a cradle-to-grave approach consistent with international best practice.

The effectiveness of an LCA in the railway sector depends to a large extent not only on the quality of the data, but also on the software tools used to model material and energy flows. In recent years, the landscape of available tools has expanded, offering diverse solutions for both academic and industrial purposes.

The pool of tools for the development of LCA methodology is populous; among the best known commercial software, GaBi (Sphera) and SimaPro (Pré Sustainability) are worth mentioning, which provide tools tailored to the industry sector in which they will be used. Each software can be used with the various databases available, including ecoinvent, which provide secondary data.

For the development of the case at hand, it was decided to use the ecoinvent database in combination with OpenLCA, an open-source platform developed by GreenDelta, which is widely used in academia and research due to its flexibility [20] and free access.

OpenLCA allows detailed modelling of processes, with the possibility of customising flows, creating alternative scenarios and integrating geographical or temporal data. The transparency of the software and the possibility to export models make this tool particularly suitable for applications that require traceability and replicability, such as the pro-

anche dagli strumenti software utilizzati per modellare i flussi di materia ed energia. Negli ultimi anni, il panorama degli strumenti disponibili si è ampliato, offrendo soluzioni diversificate sia per scopi accademici che industriali.

Il parco degli strumenti per lo sviluppo della metodologia LCA è popoloso; tra i software commerciali più conosciuti meritano menzione GaBi (Sphera) e SimaPro (*Pré Sustainability*), i quali forniscono strumenti cuciti su misura per il settore industriale in cui verranno utilizzati. Ciascun software può essere utilizzato con i diversi database presenti, tra cui ecoinvent, che mettono a disposizione dati secondari.

Per lo sviluppo del caso in oggetto, si è deciso di utilizzare il database ecoinvent in combinazione con OpenLCA, una piattaforma open-source sviluppata da GreenDelta, largamente impiegata in ambito universitario e di ricerca, grazie alla sua flessibilità [20] e all'accesso gratuito.

OpenLCA consente una modellazione dettagliata dei processi, con possibilità di personalizzazione dei flussi, creazione di scenari alternativi e integrazione di dati geografici o temporali. La trasparenza del software e la possibilità di esportare i modelli rendono questo strumento particolarmente adatto per applicazioni che richiedono tracciabilità e replicabilità, come l'elaborazione di dichiarazioni ambientali verificate (EPD).

Alla luce di questi elementi, l'LCA applicata al materiale rotabile si configura come uno strumento fondamentale non solo per valutare il contributo ambientale intrinseco dei rotabili stessi, ma anche per posizionarli correttamente nel quadro complessivo delle opzioni di mobilità a basse emissioni.

È possibile quindi evidenziare un vuoto specifico nella letteratura tecnica: quello relativo all'analisi ambientale completa di una carrozza ferroviaria per servizio notturno, costruita in Italia, modellata con dati reali e suddivisa in fasi di vita chiaramente distinguibili. Il caso studio è stato selezionato perché rappresentativo di una categoria di rotabili che, pur essendo utilizzata regolarmente nel servizio passeggeri nazionale, è raramente oggetto di studi LCA sistematici.

Attraverso l'analisi proposta si intendono fornire risultati comparabili e utili sia per il confronto intermodale, sia per la costruzione di benchmark ambientali interni al comparto ferroviario, in un'ottica di progettazione sostenibile orientata alle nuove richieste normative europee.

3. Metodologia LCA, norme e PCR

La metodologia utilizzata per l'analisi del ciclo di vita delle carrozze ferroviarie per servizio intercity notte si basa sul quadro normativo internazionale stabilito dalle norme ISO 14040 e ISO 14044, che definiscono i principi, le fasi e i requisiti per un LCA completo e comparabile. L'approccio seguito è di tipo attributivo, che valuta l'impatto diretto dei materiali e dei processi sul ciclo di vita del prodotto, e *cradle-to-grave*, con modellazione dei flussi fisici e ambientali associati a tutte le fasi del ciclo di vita:

cessing of verified environmental declarations (EPDs).

In light of these elements, LCA applied to Rolling Stock emerges as a key tool not only to assess the inherent environmental contribution of the Rolling Stock itself, but also to position it correctly in the overall picture of low-emission mobility options.

It is therefore possible to highlight a specific gap in the technical literature: that of a complete environmental analysis of a railway carriage for night service, built in Italy, modelled with real data and divided into clearly distinguishable life phases. The case study was selected because it is representative of a category of Rolling Stock that, although regularly used in national passenger service, is rarely the subject of systematic LCA studies.

The proposed analysis is intended to provide comparable and useful results both for intermodal comparisons and for the construction of environmental benchmarks within the railway sector, with a view to sustainable design oriented towards the new European regulatory requirements.

3. LCA methodology, standards and PCR

The methodology used for the life cycle analysis of railway carriages for overnight service is based on the international regulatory framework established by ISO 14040 and ISO 14044, which define the principles, phases and requirements for a complete and comparable LCA. The approach followed is attributive, assessing the direct impact of materials and processes on the product life cycle, and cradle-to-grave, with modelling of the physical and environmental flows associated with all phases of the life cycle: from material production to end-of-life, via operation and maintenance. The entire study was implemented in the OpenLCA software, using the Ecoinvent 3.8 database as the main source of secondary data, supplemented with direct technical information obtained from industrial documentation and construction specifications of the analysed carriages.

To set up the analysis, the Rolling Stock-specific Product Category Rules (PCR 2009:05) were followed, which establish guidelines for the modelling, communication and verification of environmental information on trains, carriages and metro systems.

The first methodological phase involved defining the objective and scope of the analysis. The objective of the study is to quantify the environmental impacts associated with the production, use and decommissioning of a long-distance railway carriage in a night-time configuration, and to identify the most critical phases for sustainable design. The functional unit was defined as 'the transport of a passenger in a night train car over a distance of one kilometre (1 pkm), over a useful life of 40 years', assuming an average occupancy level consistent with operational data provided by the service operators. This definition allows normalisation of impacts with respect to actual vehicle performance and facilitates comparison with other transport systems.

The system boundaries consider all relevant activities

dalla produzione dei materiali alla fine vita, passando per la fase operativa e di manutenzione. L'intero studio è stato implementato nel software OpenLCA, utilizzando il database Ecoinvent 3.8 come fonte principale di dati secondari, integrati con informazioni tecniche dirette ottenute da documentazione industriale e specifiche costruttive delle carrozze analizzate.

Per impostare l'analisi, sono state seguite le *Product Category Rules* (PCR 2009:05) specifiche per il materiale rotabile, che stabiliscono le linee guida per la modellazione, la comunicazione e la verifica delle informazioni ambientali relative a treni, carrozze e sistemi metropolitani.

La prima fase metodologica ha riguardato la definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione dell'analisi. L'obiettivo dello studio è quantificare gli impatti ambientali associati alla produzione, all'uso e alla dismissione di una carrozza ferroviaria a lunga percorrenza in configurazione notturna, e individuare le fasi maggiormente critiche ai fini della progettazione sostenibile. L'unità funzionale è stata definita come "il trasporto di un passeggero su una carrozza ferroviaria notte per una distanza di un chilometro (1 pkm), su una vita utile di 40 anni", assumendo un livello medio di occupazione coerente con i dati operativi forniti dai gestori del servizio. Questa definizione permette di normalizzare gli impatti rispetto alla prestazione reale del veicolo e facilita il confronto con altri sistemi di trasporto.

I confini del sistema considerano tutte le attività rilevanti lungo l'intero ciclo di vita del prodotto. La fase *upstream* comprende l'estrazione e la lavorazione delle materie prime, la produzione dei componenti e il loro trasporto fino al sito di assemblaggio. In particolare, è stato modellato il contributo ambientale di sottosistemi come la cassa (telaio, fiancate, imperiale e pareti di testa), i carrelli, il cablaggio elettrico e gli allestimenti interni distinti in tre configurazioni (*comfort, economy, deluxe*). La fase *core* include le attività di assemblaggio presso il costruttore, dove sono stati considerati i consumi energetici reali del processo produttivo e le perdite di materiali. Infine, la fase *downstream* comprende l'uso del rotabile, la manutenzione ordinaria e straordinaria, e le operazioni di dismissione, con particolare attenzione al recupero e al riciclo dei materiali strutturali e degli impianti di bordo. Il fine-vita è stato modellato assumendo una percentuale di riciclabilità variabile per tipologia di materiale, in coerenza con le indicazioni della norma ISO 22628 e con i tassi stimati per il settore ferroviario europeo. Una sintesi di questo si può vedere nella Fig. 3.

La suddivisione in queste tre macro-fasi ha lo scopo principale di separare gli elementi che contribuiscono all'impatto ambientale del prodotto che sono sotto la piena responsabilità del costruttore (fase Core), in quanto le trasformazioni dei materiali e il consumo energetico avvengono sotto la sua osservazione diretta, dagli elementi che dipendono dalla progettazione e dalle scelte dei fornitori; questi elementi, di cui tocca tenere conto dell'impatto per una corretta valutazione LCA, richiedono informazioni dai fornitori per quanto riguarda i consumi energetici e l'uso

throughout the entire product life cycle. The upstream phase includes the extraction and processing of raw materials, the production of components and their transport to the assembly site. In particular, the environmental contribution of sub-systems such as the body (chassis, sides, roof and headwalls), bogies, electrical wiring and interior fittings distinguished in three configurations (comfort, economy, deluxe) was modelled. The core phase includes the assembly activities at the manufacturer, where the real energy consumption of the production process and material losses were considered. Finally, the downstream phase includes the use of the Rolling Stock, ordinary and extraordinary maintenance, and decommissioning operations, with particular attention to the recovery and recycling of structural materials and on-board equipment. The end-of-life has been modelled assuming a variable recyclability rate per material type, consistent with ISO 22628 and estimated rates for the European railway sector. A summary of this can be seen in Fig. 3.

The subdivision into these three macro-phases has the main purpose of separating the elements that contribute to the environmental impact of the product that are under the full responsibility of the manufacturer (Core phase), as material transformations and energy consumption take place under his direct observation, from the elements that depend on the design and choices of the suppliers; these elements, whose impact must be taken into account for a correct LCA assessment, require information from the suppliers regarding energy consumption and raw material use for the components that reach the manufacturer's premises to enter the Core phase.

The Life Cycle Inventory (LCI) was constructed by mapping each input and output flow for each of the three phases. Primary data was collected from technical specifications, material sheets, specifications and construction layouts of the coaches under study, while secondary data was extracted from processes in the Ecoinvent database, selecting the most coherent unit processes by geographical location and technology. Particular attention was paid to disaggregating the data by functional groups of the vehicle (e.g. bogies, interiors, systems) in order to allow a modular analysis of impacts. Energy flows were calculated on the basis of the estimated mileage over a 40-year life and include both traction power consumption and the consumption of on-board auxiliary systems (HVAC, lighting, device charging, etc.).

The next stage of the analysis concerned the assessment of environmental impacts (LCIA), carried out according to the EF 3.0 midpoint characterisation method, consistent with the European reference framework. The impact categories analysed include: Global Warming Potential (GWP), primary energy consumption, use of mineral and fossil resources, acidification, eutrophication and fine particulate formation. The results were normalised against the functional unit and analysed for each life cycle phase and vehicle functional group.

Finally, in the interpretation phase, the results were critically read to identify the phases with the greatest impact, verify the internal consistency of the model, and assess the

delle materie prime per i componenti che raggiungono la sede del costruttore per inserirsi nella fase Core.

L'inventario del ciclo di vita (LCI) è stato costruito mappando ogni flusso in ingresso e in uscita per ciascuna delle tre fasi. I dati primari sono stati raccolti da specifiche tecniche, schede materiali, capitolati e layout costruttivi delle carrozze oggetto di studio, mentre i dati secondari sono stati estratti dai processi presenti nel database Ecoinvent, selezionando le *unit process* più coerenti per localizzazione geografica e tecnologia. Particolare attenzione è stata posta nel disaggregare i dati per gruppi funzionali del veicolo (es. carrelli, interni, impianti) in modo da consentire un'analisi modulare degli impatti. I flussi energetici sono stati calcolati in funzione della percorrenza stimata su una vita utile di 40 anni e includono sia il consumo elettrico di trazione sia i consumi dei sistemi ausiliari di bordo (HVAC, illuminazione, carica dispositivi, ecc.).

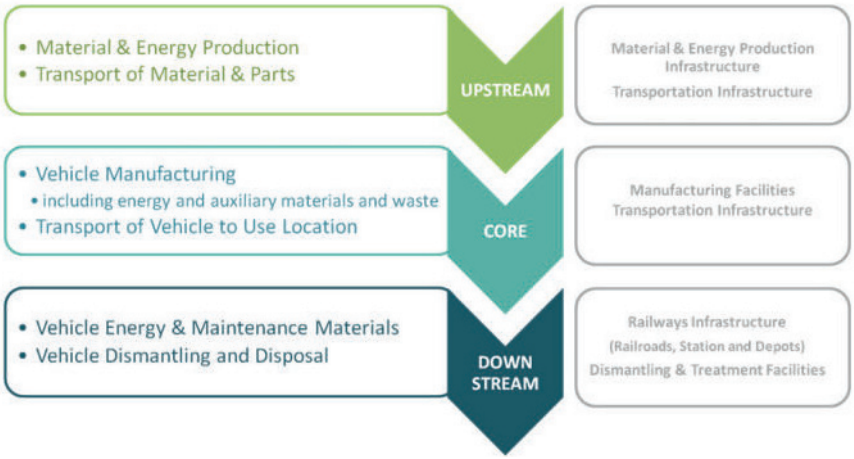

Figura 3 - Suddivisione del processo secondo la PCR di categoria [2].
Figure 3 - Breakdown of the process according to category PCR [2].

La fase successiva dell'analisi ha riguardato la valutazione degli impatti ambientali (LCIA), realizzata secondo il metodo di caratterizzazione EF 3.0 *midpoint*, coerente con il quadro europeo di riferimento. Le categorie di impatto analizzate includono: *Global Warming Potential* (GWP), consumo di energia primaria, uso di risorse minerali e fossili, acidificazione, eutrofizzazione e formazione di particolato fine. I risultati sono stati normalizzati rispetto all'unità funzionale e analizzati per ciascuna fase del ciclo di vita e per ciascun gruppo funzionale del veicolo.

Infine, nella fase di interpretazione, i risultati sono stati letti criticamente per identificare le fasi a maggiore impatto, verificare la coerenza interna del modello, e valutare l'affidabilità dei dati tramite analisi di completezza, sensibilità e robustezza. È stato inoltre predisposto un confronto fra tre scenari geografici di produzione (Italia, media europea, Cina), modificando le ipotesi sul mix energetico e sul trasporto dei componenti, al fine di quantificare l'influenza della geografia produttiva sugli impatti finali.

Nel rispetto delle prescrizioni della norma ISO 14025, i risultati sono stati strutturati in forma compatibile con i requisiti di una futura EPD (*Environmental Product Declaration*). Il modello è stato sviluppato tenendo conto dei criteri di modularità, trasparenza e verificabilità, necessari per un'eventuale pubblicazione ufficiale all'interno di un programma EPD di tipo III riconosciuto.

4. Caso pratico: Analisi LCA di una carrozza ferroviaria per servizio notte

Il caso studio presentato in questo articolo si concentra sull'analisi del ciclo di vita (LCA) di una carrozza fer-

reliability of the data through completeness, sensitivity and robustness analyses. A comparison between three geographical production scenarios (Italy, European average, China) was also prepared, modifying the assumptions on the energy mix and component transport, in order to quantify the influence of production geography on final impacts.

In compliance with the requirements of ISO 14025, the results were structured in a form compatible with the requirements of a future EPD (Environmental Product Declaration). The model was developed taking into account the criteria of modularity, transparency and verifiability, which are necessary for a possible official publication within a recognised EPD type III programme.

4. Practical case: LCA analysis of a night service railway carriage

The case study presented in this article focuses on the life cycle analysis (LCA) of a railway carriage for intercity night service, configured in different versions (Comfort, Economy, Deluxe) and intended to operate on medium to long-distance electrified national routes. The object of the study is exclusively the carriage, thus excluding the locomotive, the infrastructure and the entire train system, in order to focus the analysis on a single asset representative of the Rolling Stock.

The carriage considered has an estimated useful life of 40 years, with an annual mileage of approximately 300000 km. The typical operating profile involves night journeys at medium speed (100-160 km/h) with regular intermediate stops. The assumed average occupancy rate, consistent with the standards for night routes in Europe, is 70%.

From a functional point of view, the analysis was referred to a functional unit of 1 passenger-kilometre (pkm). This choice allows direct comparability with other studies in the literature and ensures consistency with the data used in European environmental benchmarks.

roviaria per servizio intercity notte, configurata in diverse versioni (*Comfort, Economy, Deluxe*) e destinata a operare su tratte nazionali elettrificate a media-lunga percorrenza. L'oggetto dello studio è esclusivamente la carrozza, escludendo quindi la locomotiva, le infrastrutture e l'intero sistema treno, per focalizzare l'analisi su un singolo asset rappresentativo del materiale rotabile.

La carrozza considerata ha una vita utile stimata pari a 40 anni, con una percorrenza annuale di circa 300000 km. Il profilo operativo tipo prevede viaggi notturni a media velocità (100–160 km/h) con fermate intermedie regolari. Il tasso di occupazione medio ipotizzato, coerente con gli standard delle tratte notturne in Europa, è dell'70%.

Dal punto di vista funzionale, l'analisi è stata riferita a una unità funzionale di 1 passeggero-chilometro (pkm). Questa scelta permette una comparabilità diretta con altri studi presenti in letteratura e garantisce coerenza nei confronti dei dati utilizzati nei benchmark ambientali europei.

La carrozza è stata modellata suddividendola in cinque gruppi funzionali, come segue:

1. Cassa: include telaio, fiancate, imperiale e pareti di testa. È il gruppo strutturale portante, costruito prevalentemente in acciaio e alluminio.
2. Carrelli: comprendono assi, sospensioni, impianti frenanti e sistemi di ammortizzazione.
3. Impianti e cablaggi: sistemi elettrici, climatizzazione, riscaldamento, illuminazione, dispositivi di sicurezza.
4. Allestimenti interni: arredi, letti, finiture, pavimenti, rivestimenti per le diverse classi.
5. Sistemi di comfort: toilette, porte automatiche, finestrature, insonorizzazione, sensori e dispositivi accessori.

Per ciascun gruppo sono stati individuati i materiali prevalenti, i pesi specifici e le modalità di assemblaggio, utilizzando dati forniti dal costruttore integrati con fonti da letteratura tecnica e database LCI. In totale, la carrozza presenta un peso complessivo stimato di circa 44 t, di cui quasi il 70% imputabile a strutture metalliche (acciaio, alluminio), il 15% a impianti e cablaggi, e il restante 15% agli interni e comfort (Fig. 4).

Il ciclo di vita della carrozza è stato suddiviso nelle tre macro-fasi - già descritte nei precedenti capitoli - secondo lo schema delle PCR (*Product Category Rules*) specifiche per il settore ferroviario:

- Fase *Upstream*: include estrazione, produzione e trasporto dei materiali e componenti preassemblati prima dell'assemblaggio presso il costruttore della carrozza.
- Fase *Core*: riguarda le operazioni di lavorazione interna e assemblaggio, condotte presso il sito produttivo nazionale del costruttore.
- Fase *Downstream*: comprende utilizzo, manutenzione

The carriage was modelled by dividing it into five main functional groups, as it follows:

1. *Body: includes frame, sides, roof and headwalls. It is the load-bearing structural group, constructed mainly of steel and aluminium.*
2. *Bogies: includes axles, suspension, braking and damping systems.*
3. *Installations and wiring: electrical systems, air conditioning, heating, lighting, safety devices.*
4. *Interior fittings: furniture, beds, finishes, flooring, upholstery for the different classes.*
5. *Comfort systems: toilets, automatic doors, windows, soundproofing, sensors and accessory devices.*

For each group, the prevailing materials, specific weights and assembly methods were identified, using data provided by the manufacturer supplemented with sources from technical literature and LCI databases. In total, the coach has an estimated total weight of approximately 44 tonnes, of which almost 70% is attributable to metal structures (steel, aluminium), 15% to systems and wiring, and the remaining 15% to interiors and comfort (Fig. 4).

The life cycle of the wagon has been divided into the three macro-phases - already described in the previous chapters - according to the scheme of the PCR (Product Category Rules) specific to the railway sector:

- *Upstream Phase: includes extraction, production and transport of pre-assembled materials and components prior to assembly at the wagon manufacturer.*
- *Core Phase: covers in-house machining and assembly operations conducted at the manufacturer's national production site.*
- *Downstream Phase: includes use, ordinary and extraordinary maintenance, end-of-life and waste management after leaving the manufacturer's production site.*

All input and output flows were modelled using OpenLCA 2.3.0 and the Ecoinvent 3.8 database, following a cradle-to-grave approach. The adoption of a modular segmentation of the system allowed detailed tracking of environmental contributions for each phase and component.

This case study represents one of the first attempts to fully apply LCA on Rolling Stock intended for night services in a national context, with detailed modelling in accordance with the latest ISO 14040-44 and ISO 14025 guidelines. The next section will describe in detail the configuration of the LCA model used and the data collected at different stages of the life cycle.

The LCA modelling was conducted according to the cradle-to-grave approach, dividing the entire product life cycle into the three macro-phases highlighted above. The software platform used is OpenLCA v2.3.0, with Ecoinvent 3.8 database.

The modelling took as its functional unit the transport of 1 passenger per kilometre (pkm), over a useful life horizon of

ordinaria e straordinaria, fine vita e gestione dei rifiuti in seguito all'uscita dal sito produttivo del costruttore.

Tutti i flussi in ingresso e in uscita sono stati modellati tramite OpenLCA 2.3.0 e database Ecoinvent 3.8, seguendo un approccio *cradle-to-grave*. L'adozione di una segmentazione modulare del sistema ha consentito una tracciabilità dettagliata dei contributi ambientali per ogni fase e componente.

Questo caso studio rappresenta uno dei primi tentativi di applicazione integrale dell'LCA su materiale rotabile destinato a servizi notturni in ambito nazionale, con una modellazione dettagliata e conforme alle più recenti linee guida ISO 14040-44 e ISO 14025. La prossima sezione descriverà nel dettaglio la configurazione del modello LCA utilizzato e i dati raccolti nelle diverse fasi del ciclo di vita.

La modellazione LCA è stata condotta secondo l'approccio *cradle-to-grave*, suddividendo l'intero ciclo di vita del prodotto nelle tre macro-fasi evidenziate sopra. La piattaforma software utilizzata è OpenLCA v2.3.0, con database Ecoinvent 3.8.

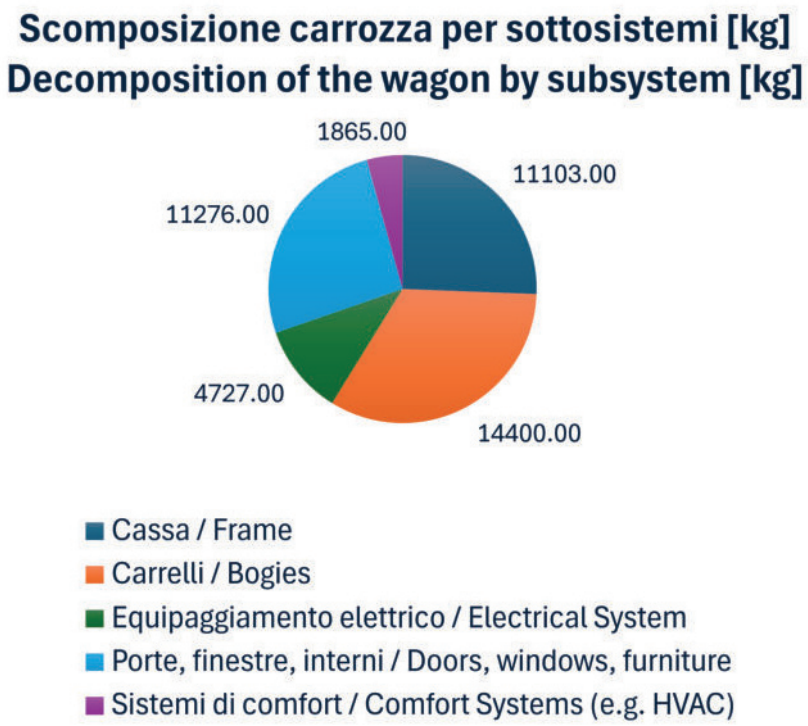

Figura 4 - Scomposizione della massa della carrozza in sottosistemi.
Figure 4 - Breakdown of the coach mass into subsystems.

La modellazione ha preso come unità funzionale il trasporto di 1 passeggero per chilometro (pkm), in un orizzonte di vita utile di 40 anni. La percorrenza annuale della carrozza in esercizio è stimata in 300000 km, portando il totale a 12000000 km sul ciclo di vita. Il consumo energetico annuale è stato valutato in 644.11 MWh.

La fase Upstream rappresenta uno step estremamente rilevante del modello, sia in termini di contributo agli impatti ambientali che per la quantità di materiali trasformati. La carrozza ha una massa a vuoto di circa 44 t, con una composizione di materiali progettata per massimizzare la durabilità e la riciclabilità. La Tab. 2 riassume la distribuzione in massa e il tasso di riciclo atteso per ciascun materiale.

I materiali metallici rappresentano oltre il 75% della massa totale, a conferma dell'elevata densità strutturale del veicolo. L'alluminio è largamente utilizzato per l'imperiale, le fiancate e gli elementi secondari, grazie alla sua leggerezza e facilità di estrusione. L'acciaio, impiegato nel telaio e nei carrelli, garantisce elevate prestazioni meccaniche e resistenza alla fatica. Il rame è utilizzato principalmente nei cablaggi elettrici e nei sistemi HVAC. I polimeri e i materiali organici (pannelli, finiture, rivestimenti) trovano spazio negli interni, soprattutto nella configurazione *Comfort* e *Deluxe*.

La fase *Core*, riferita al processo di assemblaggio e ver-

Tabella 2 – *Table 2*
Distribuzione in massa e tasso di riciclo per ciascun materiale di cui è composta la carrozza
Mass distribution and recycling rate for each material of which the coach is composed

Materiale *Material*	% in massa *% by mass*	Tasso di riciclo *Recycling rate*
Alluminio *Aluminium*	37%	98%
Acciaio *Steel*	32%	98%
Rame *Copper*	5.7%	98%
Ghisa grigia *Grey cast iron*	2%	98%
Vetro *Glass*	2.5%	100%
Polimeri tecnici *Technical polymers*	6.8%	67%
MONM (cuoio, legno, tessuti) *MONM (leather, wood, textiles)*	2.3%	95%
Oli, refrigeranti, acidi *Oils, coolants, acids*	1.0%	80%
Vernici e rivestimenti *Paints and coatings*	1.2%	0%

niciatura della carrozza presso lo stabilimento produttivo, è stata modellata considerando consumi energetici elettrici e termici specifici forniti da misurazioni industriali. Il consumo energetico di produzione è stimato in circa 23 MWh di elettricità e 8 MWh di energia termica per carrozza, inclusi impianti ausiliari, compressori, robotica e test funzionali. Le emissioni associate alla verniciatura (composti organici volatili, particolati) sono incluse con un processo dedicato, la verniciatura a spruzzo con zero recupero, che non richiede la cattura delle emissioni in quanto è evitato *l'overspray*, ossia dispersione incontrollata di particelle di vernice nebulizzata che non aderiscono alla superficie.

La fase *Downstream* copre esercizio, manutenzione e fine vita. L'utilizzo per 300000 km/anno genera un consumo complessivo di 25764.4 MWh sul ciclo di vita. Il consumo medio è stato suddiviso tra trazione indiretta (locomotiva) e servizi ausiliari interni.

L'analisi degli impatti ambientali è stata svolta con il metodo EF 3.0 (*midpoint*), normalizzando tutti i risultati sulla base dell'unità funzionale, pari a 1 pkm. I risultati delle singole categorie d'impatto sono riportati in Tab.3.

La Fig. 5 evidenzia una distribuzione degli impatti ambientali tra le tre fasi principali del ciclo di vita: *Upstream*, *Core* e *Downstream*, ognuna delle quali gioca un ruolo fondamentale in diverse categorie di impatto.

Questi risultati confermano l'importanza della scelta di materiali ad alta riciclabilità e la centralità dell'approccio modulare anche in ottica normativa: il modello sviluppato è compatibile con la redazione di EPD verificabili e potrà facilmente essere adattato ai requisiti del Passaporto Digitale del Prodotto previsto dal Regolamento (UE) 2024/1781.

5. Analisi di sensitività: produzione e uso in Cina, Italia e media UE

L'analisi di sensitività proposta in questo capitolo ha l'obiettivo di valutare come la localizzazione geografica della produzione e il mix energetico della fase d'uso influenzino significativamente l'impatto ambientale complessivo della carrozza ferroviaria analizzata. A tal fine sono stati considerati tre scenari distinti per ciascuna fase (produzione e uso): Italia, media UE e Cina. L'unità funzionale è quella adottata per l'intero studio: 1 passeggero-chilometro (pkm), su un ciclo di vita di 40 anni, con percorrenza annuale di 300.000 km, per un consumo energetico totale di 25.76 GWh, a cui corrisponde un consumo medio annuo pari a 644.11 MWh, ovvero 2.15 kWh/pkm.

La fase di produzione comprende sia le attività di assemblaggio presso lo stabilimento finale, sia i trasporti dei materiali/componenti e i consumi energetici di processo (elettricità, termici, ausiliari). Le emissioni totali di CO_2 sono fortemente influenzate dal mix energetico con il quale si è prodotta l'energia elettrica utilizzata in stabilimento. Considerando un consumo elettrico stimato per la pro-

40 years. The annual mileage of the carriage in operation is estimated at 300000 km, bringing the total to 12000000 km over the life cycle. Annual energy consumption was estimated at 644.11 MWh.

The Upstream phase represents an extremely important step in the model, both in terms of its contribution to environmental impacts and the amount of materials processed. The carriage has an unladen mass of approximately 44 t, with a material composition designed to maximise durability and recyclability. Tab. 2 summarises the mass distribution and expected recycling rate for each material.

Metallic materials account for over 75% of the total mass, confirming the high structural density of the vehicle. Aluminium is widely used for the roof, the sides and the secondary elements, thanks to its lightness and ease of extrusion. Steel, used in the chassis and bogies, provides high mechanical performance and fatigue resistance. Copper is mainly used in electrical wiring and HVAC systems. Polymers and organic materials (panels, trim, upholstery) are used in the interior, especially in the Comfort and Deluxe configurations.

The Core phase, referring to the carriage assembly and painting process at the production plant, was modelled considering specific electrical and thermal energy consumption provided by industrial measurements. Production energy consumption is estimated at approximately 23 MWh of electricity and 8 MWh of thermal energy per carriage, including auxiliary equipment, compressors, robotics and functional tests. Emissions associated with painting (volatile organic compounds, particulates) are included with a dedicated process, spray painting with zero recovery, which does not require emission capture as overspray (i.e. uncontrolled dispersion of atomised paint particles that do not adhere to the surface) is avoided.

The Downstream phase covers operation, maintenance and end-of-life. Operation for 300000 km/year generates a total life cycle consumption of 25764.4 MWh. The average consumption was divided between indirect traction (locomotive) and internal auxiliary services.

The analysis of environmental impacts was carried out using the EF 3.0 (midpoint) method, normalising all results to the functional unit of 1 pkm. The results of the individual impact categories are shown in Tab. 3.

Fig. 5 shows a distribution of environmental impacts among the three main life cycle phases: Upstream, Core and Downstream, each of which plays a key role in different impact categories.

These results confirm the importance of choosing highly recyclable materials and the centrality of the modular approach also in a regulatory perspective: the developed model is compatible with the drafting of verifiable EPDs and can easily be adapted to the requirements of the Digital Product Passport foreseen by Regulation (EU) 2024/1781.

Tabella 3 – *Table 3*

Risultati dell'analisi degli impatti secondo il metodo EF 3.0 (midpoint)
Results of impact analysis according to EF 3.0 method (midpoint)

Categoria di Impatto *Impact Category*	**Descrizione** *Description*	**Unità di misura** *Unit of measurement*	**Risultato** *Result*
Acidificazione *Acidification*	Misura il potenziale aumento dell'acidità dei suoli e specchi d'acqua. *Measures the potential increase in acidity of soils and bodies of water.*	mol $H+_{eq}$	8.75E-06
Cambiamento Climatico *Climate Change*	Tiene conto di tutte le emissioni di agenti climalteranti. *Takes into account all emissions of climate-change agents.*	kg CO_{2eq}	1.72E-03
- Biogenico *- Biogenic*			2.23E-05
- Fossile *- Fossil*			1.69E-03
- Uso del suolo e cambio destinazione d'uso *- Land use and change of use*			7.56E-06
Ecotossicità, acque dolci *Ecotoxicity, freshwater*	Misura il potenziale impatto di sostanze chimiche tossiche emesse in ecosistemi acquatici. *Measures the potential impact of toxic chemicals released in aquatic ecosystems.*	CTUe	3.14E-02
- materia inorganica *- inorganic matter*			2.56E-03
- metalli *- metals*			2.84E-02
- materia organica *- organic matter*			5.73E-04
Eutrofizzazione, acque dolci *Eutrophication, freshwater*	Misura il potenziale di arricchimento eccessivo di nutrienti (azoto e fosforo) in ecosistemi acquatici o terrestri, che causa una crescita incontrollata di alghe e piante, portando a una carenza di ossigeno che danneggia la biodiversità. *Measures the potential for excessive nutrient (nitrogen and phosphorous) enrichment in aquatic or terrestrial ecosystems, which causes uncontrolled growth of algae and plants, leading to oxygen deficiency that damages biodiversity.*	kg P_{eq}	4.92E-07
Eutrofizzazione, acque salate *Eutrophication, salt water*		kg N_{eq}	1.62E-06
Eutrofizzazione, terrestre *Eutrophication, terrestrial*		mol N_{eq}	1.60E-05
Tossicità Umana – Cancro *Human Toxicity – Cancer*	Valuta gli effetti cancerogeni delle emissioni chimiche (aria, acqua, suolo). *Assesses the carcinogenic effects of chemical emissions (air, water, soil).*	CTUh	2.19E-12
- materia inorganica *- inorganic matter*			0.00E+00
- metalli *- metals*			1.20E-12
- materia organica *- organic matter*			9.81E-13
Tossicità Umana - Non Cancro *Human Toxicity – Non-Cancer*	Valuta gli effetti avversi sulla salute umana non cancerogeni (es. effetti neurologici, respiratori, riproduttivi) causati dall'ingestione o inalazione di sostanze tossiche. *Evaluates non-cancer adverse human health effects (e.g. neurological, respiratory, reproductive effects) caused by ingestion or inhalation of toxic substances.*	CTUh	2.40E-11
- materia inorganica *- inorganic matter*			5.89E-12
- metalli *- metals*			1.71E-11
- materia organica *- organic matter*			7.51E-13
Radiazioni ionizzanti *Ionising radiation*	Misura le emissioni radioattive associate ciclo di vita del prodotto. *Measures radioactive emissions associated with product life cycle.*	kBq $U235_{eq}$	2.38E-04

Segue Tabella 3 – *Table 3*

Categoria di Impatto ***Impact Category***	**Descrizione** ***Description***	**Unità di misura** ***Unit of measurement***	**Risultato** ***Result***
Uso del suolo *Land use*	Valuta le conseguenze ecologiche derivanti dall'occupazione e dalla trasformazione del territorio. *Assesses the ecological consequences of land use and land transformation.*	adim	7.50E-03
Potenziale di Deplezione dell'Ozono *Ozone Depletion Potential*	Misura la capacità delle sostanze emesse di degradare lo strato di ozono stratosferico. *Measures the ability of emitted substances to degrade the stratospheric ozone layer.*	kg $CFC\text{-}11_{eq}$	1.93E-10
Emissione di Particolato *Particulate Emission*	Quantifica il rilascio di particelle solide o liquide sospese in aria. *Quantifies the release of airborne solid or liquid particles.*	Incidenza malattie *Rate of deseases*	7.27E-11
Formazione di Ozono Fotochimico *Photochemical Ozone Formation*	Misura la formazione di ozono troposferico ("ozono cattivo") a livello del suolo. *Measures the formation of tropospheric ozone ("bad ozone") at ground level.*	kg $NMVOC_{eq}$	6.57E-06
Uso di risorse – Fossile *Resource Use - Fossil*	Quantifica il consumo di materiale di derivazione fossile. *Quantifies the consumption of fossil derived material.*	MJ	2.61E-02
Uso di risorse - Minerali e Metalli *Resource use - Minerals and Metals*	Quantifica il consumo di risorse minerali e metalliche. *Quantifies the consumption of mineral and metal resources.*	kg Sb_{eq}	1.59E-08
Uso di acqua *Water use*	Quantifica l'utilizzo di acqua. *Quantifies the use of water.*	$m^3\text{-}world_{eq}$. *Deprived*	3.37E-03

duzione di una carrozza pari a 30 MWh, le sole emissioni da energia elettrica ammonterebbero a:

- 7.6 t CO_{2eq} (Italia),
- 6.8 t CO_{2eq} (media UE),
- 16.1 t CO_{2eq} (Cina) [8][17][18].

A queste si sommano i contributi dei trasporti di componenti (più elevati in caso di approvvigionamenti globali), stimati in media in:

- 1.1 t CO_{2eq} per trasporto interno/UE,
- 2.4 t CO_{2eq} in caso di trasporto marittimo dalla Cina.

Inoltre, i processi termici e ausiliari generano circa 3.2 t CO_{2eq} per carrozza, secondo uno studio LCA condotto da Siemens Austria per veicoli ferroviari comparabili [19].

Applicando i fattori di emissione del mix energetico di ciascuno scenario:

- 1.15 g $CO_{2\ eq}$/pkm in Cina
- 0.55 g $CO_{2\ eq}$/pkm in Italia
- 0.49 g $CO_{2\ eq}$/pkm considerando una media europea.

Andando a dividere le emissioni totali in fase di produzione e quelle dovute al trasporto dei componenti per l'unità funzionale, e sommando i tre contributi per ciascuno scenario, si ottiene il quadro complessivo dell'impronta climatica rappresentato in Fig. 6.

5. *Sensitivity analysis: production and use in China, Italy and EU average*

The sensitivity analysis proposed in this chapter aims to assess how the geographical location of production and the energy mix of the use phase significantly influence the overall environmental impact of the analysed railway carriage. To this end, three separate scenarios were considered for each phase (production and use): Italy, EU average and China. The functional unit is the one adopted for the entire study: 1 passenger-kilometre (pkm), over a life cycle of 40 years, with an annual mileage of 300000 km, for a total energy consumption of 25.76 GWh, corresponding to an average annual consumption of 644.11 MWh, or 2.15 kWh/pkm.

The production phase includes assembly activities at the final plant as well as the transport of materials/components and process energy consumption (electricity, thermal, auxiliary). The total CO_2 emissions are strongly influenced by the energy mix with which the electricity used at the plant is produced. Considering an estimated electricity consumption for the production of one carriage of 30 MWh, emissions from electricity alone would amount to:

- *7.6 t CO_{2eq} (Italy),*
- *6.8 t CO_{2eq} (EU average),*

6. Discussione

Lo studio condotto ha dimostrato come sia possibile applicare in modo strutturato la metodologia LCA al materiale rotabile, con un livello di dettaglio tecnico compatibile con le future esigenze di dichiarazione ambientale di tipo III (EPD) e di passaporto digitale del prodotto. La scomposizione del veicolo in gruppi funzionali, l'organizzazione delle fasi di ciclo di vita secondo la logica *upstream–core–downstream*, e l'impiego di software *open-source* validati a livello internazionale, costituiscono una base metodologica replicabile in contesti industriali reali.

Seguendo le indicazioni delle regole di categoria prodotto (PCR) per materiale rotabile 2009:05, e attraverso il software OpenLCA, l'analisi è stata definita seguendo il modello cradle-to-grave utilizzando dati di inventario secondari raccolti nella libreria ecoinvent v.3.8; gli impatti sono stati calcolati scegliendo la metodologia EF 3.0 *midpoint*.

Con le sue 44t di massa a vuoto, la carrozza è compo-

- *16.1 t CO_{2eq} (China) [8][17][18].*

To these are added the contributions of component transports (higher in the case of global supplies), estimated on average at:

- *1.1 t CO_{2eq} per internal/EU transport,*
- *2.4 t CO_{2eq} in the case of maritime transport from China.*

In addition, thermal and auxiliary processes generate approximately 3.2 t CO_{2eq} per carriage, according to an LCA study conducted by Siemens Austria for comparable rail vehicles [19].

Applying the emission factors of the energy mix of each scenario:

- *1.15 g CO_{2eq}/pkm in China*
- *0.55 g CO_{2eq}/pkm in Italy*
- *0.49 g CO_{2eq}/pkm considering a European average.*

Dividing the total emissions in the production phase and those due to transport of the components for the functional unit, and summing up the three contributions for each sce-

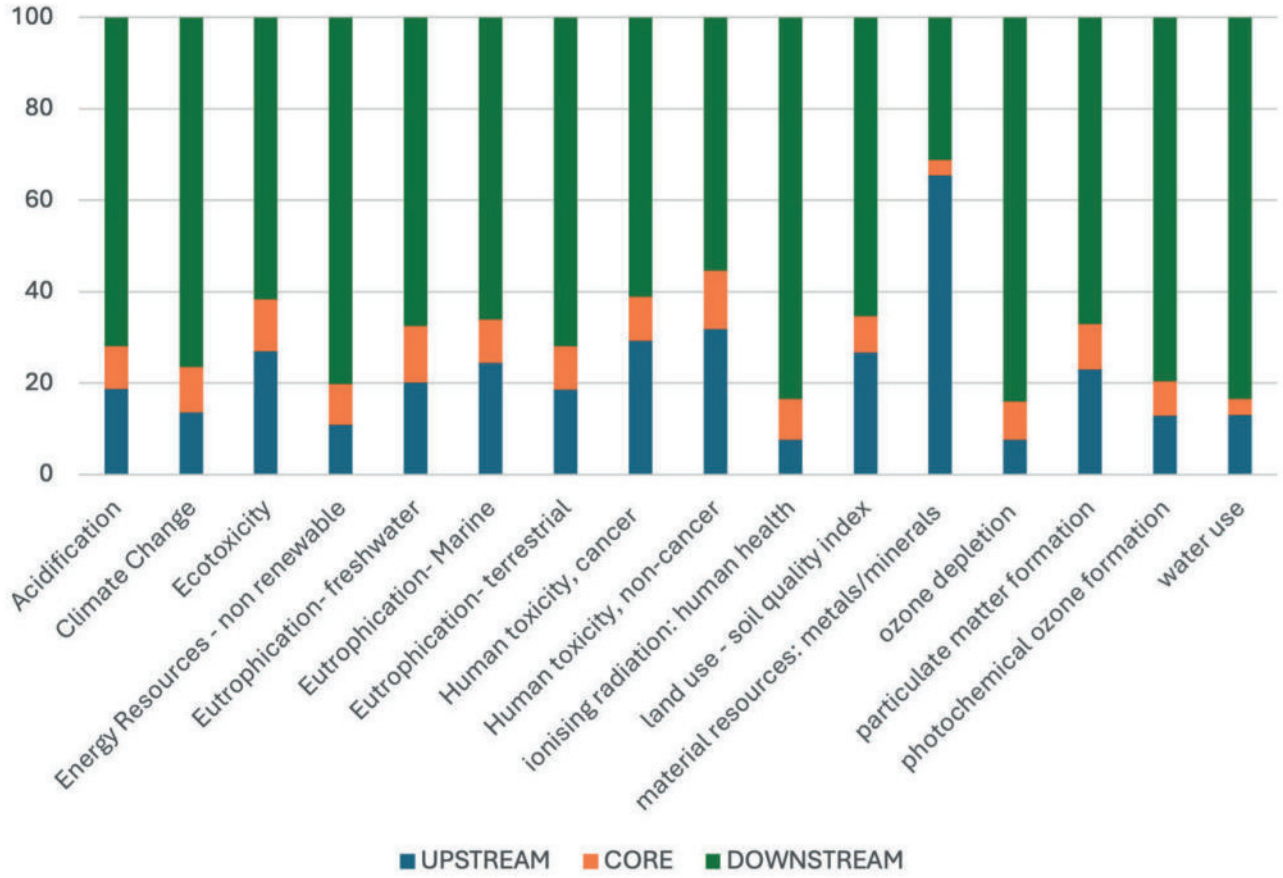

Figura 5 - Distribuzione degli impatti di ciascuna macro-fase per categoria d'impatto.
Figure 5 - Distribution of impacts of each macro-phase by impact category.

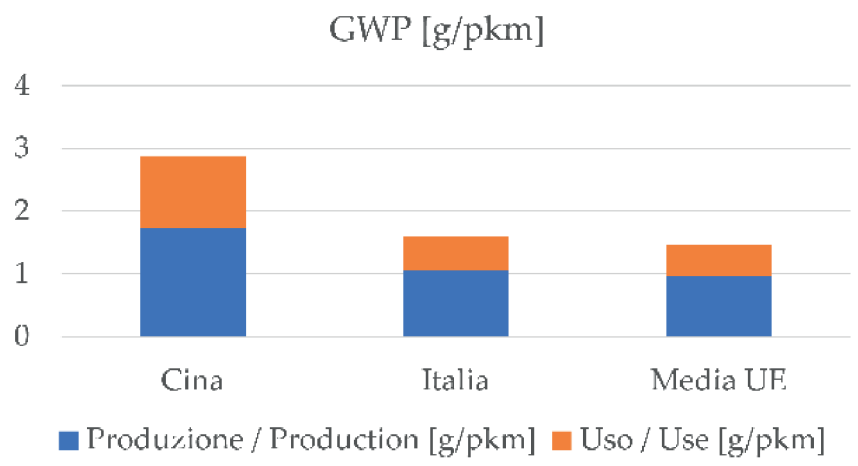

Figura 6 - Totale di emissioni di CO_2 nei diversi scenari.
Figure 6 - Total CO_2 emissions in different scenarios

sta al 75% di materiali metallici (alluminio, acciaio, rame, ghisa grigia), i quali garantiscono una riciclabilità fino al 98%.

L'impatto è stato definito attraverso l'unità funzionale di 1 passeggero per chilometro (pkm) su un orizzonte di vita di 40 anni, stimando una percorrenza annuale della carrozza in esercizio di 300000km.

La fase di utilizzo (Downstream) è risultata come quella che contribuisce di più a tutte le categorie di impatto (circa il 60-80%), tranne che per quella di consumo di materiali. La fase Core, invece, è responsabile di circa il 10-20% dell'impatto per tutte le categorie. Il restante è in carico alla fase Upstream.

Sono stati evidenziati anche gli effetti sulla localizzazione del sito di produzione della carrozza, in quanto la produzione in Cina comporta - allo stato attuale - un raddoppio delle emissioni CO_2 in atmosfera per la produzione e il trasporto verso il luogo di esercizio.

7. Conclusioni

L'adozione dell'analisi del ciclo di vita (LCA) nel settore ferroviario rappresenta oggi una necessità sempre più concreta, spinta da una duplice transizione: da un lato, l'industria è chiamata a dimostrare la sostenibilità dei propri prodotti attraverso indicatori misurabili e confrontabili; dall'altro, la normativa europea sta introducendo strumenti sempre più stringenti per il monitoraggio e la comunicazione delle performance ambientali.

In questo quadro, l'analisi di sensitività geografica assume un ruolo centrale: non si tratta solo di una variazione nei risultati numerici, ma di una riflessione più ampia su quanto le scelte di delocalizzazione produttiva, i mix energetici nazionali e la logistica globale influenzino la sostenibilità ambientale effettiva di un prodotto. Un approccio LCA robusto consente non solo di misurare gli

nario, we obtain the overall picture of the climate footprint represented in Fig. 6.

6. Discussion

The study conducted has shown how it is possible to apply the LCA methodology to Rolling Stock in a structured manner, with a level of technical detail compatible with future requirements for type III environmental declarations (EPDs) and digital product passports. The breakdown of the vehicle into functional groups, the organisation of the life-cycle phases according to upstream-core-downstream logic, and the use of internationally validated open-source software provide a methodological basis that can be replicated in real industrial contexts.

Following the indications of the product category rules (PCR) for Rolling Stock 2009:05, and through the OpenLCA software, the analysis was defined following the cradle-to-grave model using secondary inventory data collected in the ecoinvent v.3.8 library; the impacts were calculated using the EF 3.0 midpoint methodology.

With its 44t unladen mass, the carriage is composed of 75% metallic materials (aluminium, steel, copper, grey cast iron), which guarantee up to 98% recyclability.

The impact was defined through the functional unit of 1 passenger per kilometre (pkm) over a 40-year life horizon, estimating an annual mileage of the carriage in operation of 300000km.

The use phase (Downstream) was found to contribute the most to all impact categories (about 60-80%), except for material consumption. The Core phase, on the other hand, is responsible for about 10-20% of the impact for all categories. The remainder is the responsibility of the Upstream phase.

The effects on the location of the carriage production site were also highlighted, as production in China leads - at present - to a doubling of the CO_2 emissions into the atmosphere for production and transport to the place of operation.

7. Conclusions

The adoption of LCA in the railway sector today represents an increasingly concrete necessity, driven by a twofold transition: on the one hand, the industry is called upon to demonstrate the sustainability of its products through measurable and comparable indicators; on the other, European legislation is introducing increasingly stringent tools for monitoring and reporting environmental performance.

In this framework, geographical sensitivity analysis assumes a central role: it is not just a variation in numerical

impatti, ma anche di orientare le strategie industriali verso soluzioni più responsabili, in termini di progettazione, approvvigionamento e ciclo operativo. Un passo in avanti nell'analisi si otterrebbe attraverso informazioni più dettagliate sui fornitori di materiali e componenti, andando a rendere più precisi i risultati sia della produzione che della manutenzione. Lo studio descritto nell'articolo si è basato su dati medi relativi al trasporto di componenti industriali a livello internazionale, considerando una possibile distribuzione geografica dei principali fornitori.

Il contesto normativo attuale impone un'accelerazione in questa direzione. Con il Regolamento (UE) 2024/1781 sull'ecodesign dei prodotti sostenibili, e l'introduzione del passaporto digitale del prodotto (Digital Product Passport), le aziende saranno tenute a raccogliere, validare e comunicare in modo strutturato una vasta gamma di informazioni ambientali, energetiche e di circolarità. LCA ed EPD diventeranno non solo strumenti volontari di trasparenza, ma veri e propri requisiti per l'accesso al mercato europeo.

Per il materiale rotabile, ciò significa ripensare i processi di documentazione tecnica, integrare i dati ambientali nel ciclo di progettazione e predisporre modelli aggiornabili e verificabili. La standardizzazione dei metodi, il raccordo tra industria e istituzioni, nonché l'adozione di strumenti digitali interoperabili saranno condizioni fondamentali per affrontare questo passaggio.

In prospettiva, sarà auspicabile:

- estendere l'approccio all'intero sistema treno (carrozze, locomotive, componenti di trazione);
- integrare i modelli LCA con le pratiche aziendali di gestione del ciclo di vita del prodotto (PLM);
- collegare le valutazioni ambientali con le logiche economiche, attraverso analisi costi-benefici e indicatori di impatto per euro investito.

Il presente lavoro, oltre a offrire un contributo tecnico all'applicazione dell'LCA nel settore ferroviario, intende rappresentare anche un primo passo operativo verso l'integrazione strutturata delle metriche ambientali nelle decisioni progettuali, industriali e regolatorie. La sostenibilità, per essere tale, deve essere misurabile, contestualizzata e comunicabile: l'LCA rappresenta oggi lo strumento più solido per realizzare questo obiettivo in un contesto ambientale.

results, but a broader reflection on the extent to which production relocation choices, national energy mixes and global logistics influence the actual environmental sustainability of a product. A robust LCA approach makes it possible not only to measure impacts, but also to steer industrial strategies towards more responsible solutions in terms of design, sourcing and operating cycle. A step forward in the analysis would be achieved through more detailed information on suppliers of materials and components, making both production and maintenance results more accurate. The study described in the article was based on average data on the transport of industrial components internationally, considering a possible geographical distribution of the main suppliers.

The current regulatory environment calls for an acceleration in this direction. With Regulation (EU) 2024/1781 on the eco-design of sustainable products, and the introduction of the Digital Product Passport, companies will be required to collect, validate and communicate a wide range of environmental, energy and circularity information in a structured manner. LCAs and EPDs will become not only voluntary transparency tools, but real requirements for access to the European market.

When it comes to Rolling Stock, this means rethinking the technical documentation processes, integrating environmental data into the design cycle and preparing updatable and verifiable models. The standardisation of methods, the link between industry and institutions, and the adoption of interoperable digital tools will be key conditions for this transition.

Looking ahead, it will be desirable to:

- *extend the approach to the entire Train System (carriages, locomotives, traction components);*
- *integrate LCA models with corporate Product Lifecycle Management (PLM) practices;*
- *link environmental assessments with economic logic, through cost-benefit analyses and impact indicators per euro invested.*

This work, besides offering a technical contribution to the application of LCA in the railway sector, is also intended to represent a first operational step towards the structured integration of environmental metrics in design, industrial and regulatory decisions. Sustainability, to be such, must be measurable, contextualised and communicable: the LCA today represents the most solid tool for achieving this goal in an environmental context..

BIBLIOGRAFIA – *REFERENCES*

[1] Commissione Europea, *"Sustainable and Smart Mobility Strategy"* [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52020DC0789.

[2] ISO, *"ISO 14040:2006 - Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework"* [Online].

[3] ISO, *"ISO 14044:2006 - Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines"* [Online]. Available: https://www.iso.org/standard/38498.html.

[4] Parlamento Europeo e Consiglio dell'UE, *"Regolamento (UE) 2024/1781 sull'ecodesign per i prodotti sostenibili"* [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj/eng.

[5] H. Stripple (2010), *"Life cycle assessment of railways and rail transports - Application in environmental product declarations (EPDs) for the Bothnia Line"*, IVL Swedish Environmental Research Institute, Stockholm.

[6] B. Dalla Chiara, D. De Franco, N. Coviello, D. Pastrone (2017), *"Comparative specific energy consumption between air transport and high-speed rail transport: A practical assessment"*, Transportation Research Part D, vol. 52, pp. 227-243, 2017.

[7] H. Ritchie (2020), *"Cars, planes, trains: where do CO2 emissions from transport come from?"* 2020. [Online]. Available: https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport.

[8] P.J. Pérez-Martínez, I.A. Sorba, *"Energy Consumption of Passenger Land Transport Modes", Volume 21, Issue 6, Energy & Environment, https://doi.org/10.1260/0958-305X.21.6.577.*

[9] Italo Treno, *"Quanto consuma un treno ad alta velocità?"* [Online]. Available: https://blog.italotreno.com/mondo-treno/quanto-consuma-un-treno-ad-alta-velocita/.

[10] Travel & Climate, *"Transport Calculations - Transport carbon calculator"* [Online]. Available: https://ks3.travelandclimate.org/transport-calculations.

[11] NAVIT Mobility, *"Carbon Emissions of Transport Modes Ranked"* [Online]. Available: https://www.navit.com/resources/bus-train-car-or-e-scooter-carbon-emissions-of-transport-modes-ranked.

[12] N. Buchholz, B. Fehrm, L. Kaestner, S. Uhrenbacher, M. Vesco, (2023), *"Study: How To Accelerate Aviation's CO2 Reduction"*, 12 June 2023. [Online]. Available: https://aviationweek.com/air-transport/aircraft-propulsion/study-how-accelerate-aviations-co2-reduction.

[13] B. Dalla Chiara, R. Ricagno, M. Santarelli (2008), *"Sostenibilità energetica dei trasporti: analisi dei consumi e della soluzione ferroviaria",* Ingegneria Ferroviaria, 2008.

[14] Alstom (2015), "Environmental Product Declaration - AZUR Metro Train. International EPD System", EPD reg. no. S-P-00519 2015. [Online]. Available: https://www.environdec.com/library/epd519.

[15] PRé Sustainability, *"SimaPro LCA Software"* [Online]. Available: https://pre-sustainability.com/solutions/tools/simapro-craft/.

[16] GreenDelta, "openLCA Software Documentation" [Online]. Available: https://greendelta.github.io/openLCA2-manual/introduction/index.html.

[17] G. Maguire (2025), *"China cuts electricity emissions to record lows in 2025"*, 16 07 2025. [Online]. Available: https://www.reuters.com/markets/commodities/china-cuts-electricity-emissions-record-lows-2025-2025-07-16/.

[18] C. A. Balaras, E. G. Dascalaki, I. Psarra, T. Cholewa, (2022), *"Primary Energy Factors for Electricity Production in Europe",* Energies, 21 12 2022.

[19] M. Sexauer, F. Bleicher, M. Hacksteiner, *"MSc Thesis - Life cycle assessment of rail vehicle production based on manufacturing at the Siemens Mobility facility: Vienna Leberstraße",* Technische Universität Wien.

[20] A. Ciroth (2024), *"openLCA past, present, future",* GreenDelta GmbH, 15 04 2024. [Online]. Available: https://www.greendelta.com/wp-content/uploads/2024/05/openLCA_how_it_started_final.pdf.

[21] L. Cheul-Kyua, K. Yong-Kia, P. Phiradaa, K. Jung-Suka, L. Kun-Mob, J. Chang-Sikc (2010), "*Assessing environmentally friendly recycling methods for composite bodies of railway rolling stock using life-cycle analysis*", Transportation Research Part D, Volume 15, Issue 4, https://doi.org/10.1016/j.trd.2010.02.001.