

Gaetano Bosurgi · Stefano Coropulis
Giovanni Giacomello · Marinella Silvana Giunta
Mattia Intignano · Aldo La Placa
Giovanni Leonardi · Giuseppe Loprencipe
Emiliano Pasquini · Roberto Roberti
Fabio Rondinella · Valeria Vignali

INFRASTRUTTURE FERROVIARIE

Didattica, ricerca,
normativa
e nuove sfide

Rapporto tecnico della S.I.I.V.



Federico II University Press



fedOA Press

INFRASTRUTTURE FERROVIARIE

Didattica, ricerca, normativa e nuove sfide

Rapporto tecnico della S.I.I.V.

Gaetano Bosurgi, Stefano Coropulis, Giovanni Giacomello, Marinella Silvana Giunta, Mattia Intignano, Aldo La Placa, Giovanni Leonardi, Giuseppe Loprencipe, Emiliano Pasquini, Roberto Roberti, Fabio Rondinella, Valeria Vignali

Pubblicato da FedOA - Federico II University Press
Università degli Studi di Napoli Federico II
Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale
Via Claudio, 21, 80125, Napoli, Italia
web site: <https://www.dicea.unina.it/>
e-mail: dip.ing-civ-ed-amb@pec.unina.it

ISBN: 978-88-6887-372-1
DOI: 10.6093/978-88-6887-372-1

This book is licensed under Creative Commons Attribution 4.0 International
(CC BY 4.0)



<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Premessa

La "Società Italiana di Infrastrutture Viarie" (S.I.I.V.)

La "Società Italiana di Infrastrutture Viarie" (S.I.I.V.), fondata nel 1990, rappresenta il mondo accademico del settore scientifico disciplinare "Strade, ferrovie e aeroporti" con lo scopo statutario di promuovere ed agevolare la diffusione della cultura e delle conoscenze scientifiche nel campo delle infrastrutture di trasporto, sia all'interno degli Atenei, sia rivolgendosi agli Enti operanti nel comparto della mobilità.

I contenuti del settore scientifico disciplinare "Strade, ferrovie e aeroporti" riguardano le teorie, i modelli, le tecniche e i processi per la concezione, la progettazione, la costruzione, l'adeguamento, la manutenzione e la gestione degli asset stradali, ferroviari, aeroportuali e intermodali. Le tematiche prevalenti sono la funzionalità, le prestazioni, la sicurezza, la sostenibilità, il rischio, la resilienza, l'impatto sull'ambiente e il territorio, l'efficacia sociale ed economica degli investimenti nel ciclo di vita, la digitalizzazione e le nuove tecnologie. Sono inoltre approfonditi gli aspetti di modellazione e tecnologici dei materiali tradizionali, innovativi ed ecosostenibili, delle opere e del corpo stradale, delle sovrastrutture e degli impianti, oltre ai sistemi costruttivi, alla qualità, all'organizzazione e alla sicurezza dei cantieri. Sono affrontate altresì le problematiche relative ai dispositivi di sicurezza, alla sicurezza della circolazione, ai fattori umani e all'interazione dell'infrastruttura con i diversi utenti e veicoli, anche a guida connessa e automatizzata.

Della S.I.I.V. fanno parte ricercatori, studiosi e tecnici coinvolti nella progettazione, costruzione, manutenzione e gestione di strade, ferrovie e aeroporti.

Il Presidente della S.I.I.V.

Prof Ing. Gianluca Dell'Acqua

INDICE

Sommario

1	La didattica sulle “Infrastrutture Ferroviarie”	9
1.1	Richiami storici: l’insegnamento delle ferrovie prima della riforma 509/99	9
1.2	L’insegnamento delle ferrovie nei corsi delle lauree triennali e magistrali italiani	27
1.3	L’insegnamento delle ferrovie nelle Università Europee	34
1.3.1	Germania: RWTH Aachen University - Corso di Laurea Magistrale in Railway Systems Engineering (https://www.rse.rwth-aachen.de/)	35
1.3.2	Grecia - Aristotle University of Thessaloniki - Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile (https://qa.auth.gr/en/class/1/600119016/M1)	38
1.3.3	Inghilterra - Università di Nottingham - Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile (https://uoncourses.org/module/CIVE4036)	39
1.3.4	Olanda: Delft University of Technology - Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile e Geoscienze (Civil Engineering and Geosciences - TU Delft)	39
1.3.5	Spagna: Università di Granada - Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile (https://www.ugr.es/estudiantes/grados/grado-ingenieria-civil/ferrocarriles-construcciones-civiles)	41
1.3.6	Spagna: Università Politecnica di Madrid - Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile e Ambientale (https://caminos.upm.es/grado-de-ingenieria-civil-y-territorial/#1632380538163-9a9ac63a-698e)	41
1.3.7	Svezia: KTH Royal Institute of Technology - Corso di Laurea Magistrale in Railway Engineering (https://www.kth.se/en/studies/master/railway-engineering)	41
1.3.8	Francia - École des Ponts ParisTech, INSA Hauts-de-France e Université de Technologie de Compiègne (UTC) - Master in Ingegneria dei sistemi di trasporto ferroviario e urbano (https://ecoledesponts.fr/en/advanced-master-railway-and-urban-transport-system-engineering)	44
1.3.9	Offerta Formativa Europea in Ingegneria Ferroviaria: un Database di Riferimento	45
1.4	L’insegnamento delle ferrovie nelle università del resto del Mondo	46
1.5	Confronto tra gli insegnamenti delle Università italiane, europee e del resto del Mondo	51
1.6	Proposte per la didattica	51
1.6.1	Potenziare la formazione ferroviaria italiana: spunti dal modello europeo	51

1.6.2 Potenziare la formazione ferroviaria italiana: spunti dalle Università del resto del Mondo.....	52
APPENDICE A.....	53
2 Le principali tematiche di ricerca per le “Infrastrutture Ferroviarie”	91
2.1 Premessa.....	91
2.2 Sede ferroviaria e materiali.....	98
2.2.1 Lo stato dell’arte nazionale e internazionale.....	100
2.2.2 Il contributo alla ricerca	109
2.2.3 Criticità e sviluppi futuri	110
2.2.4 Bibliografia	111
2.3 Geometria del binario, diagnostica e monitoraggio	115
2.3.1 Lo stato dell’arte nazionale e internazionale.....	116
2.3.2 Contributo alla ricerca.....	125
2.3.3 Criticità e sviluppi futuri	126
2.3.4 Bibliografia	127
2.4 Sostenibilità ambientale e sicurezza operativa.....	127
2.4.1 Lo stato dell’arte nazionale e internazionale.....	138
2.4.2 Il contributo alla ricerca	145
2.4.3 Criticità e sviluppi futuri	146
2.4.4 Bibliografia	148
2.5 Il BIM e la trasformazione digitale	153
2.5.1 Lo stato dell’arte nazionale e internazionale.....	157
2.5.2 Contributo alla ricerca.....	163
2.5.3 Criticità e sviluppi futuri	164
2.5.4 Bibliografia	165
3 Normativa.....	171
3.1 La nascita delle ferrovie di stato	171
3.2 L’evoluzione della regolazione del sistema ferroviario in Europa e in Italia negli ultimi cinquant’anni	172
3.3 Normativa europea.....	175
3.4 Direttive	175
3.5 Raccomandazioni	177
3.6 Regolamenti	178
3.7 Specifiche tecniche interoperabilità	180
3.8 Normativa nazionale	181
3.9 Le Norme Tecniche di Progetto e il ruolo di RFI	182
3.10 Principali norme UNI-EN	184
3.11 Digitalizzazione della progettazione:.....	188

Prefazione

Con l'apertura della linea Stockton-Darlington avvenuta il 27 settembre del 1825, il XIX secolo segnò l'inizio delle ferrovie. Il viaggio inaugurale, percorso alla media di 20 km/h, evidenziò le enormi potenzialità di questo nuovo sistema di trasporto che, ben presto, trovò ampia diffusione nel resto dell'Europa e del mondo. Come riportano le cronache dell'epoca, su quel treno costituito da 33 vagoni montarono almeno 500 persone. Le potenzialità di questo nuovo sistema di trasporto collettivo furono presto accolte in tutta Europa.

Nel nostro Paese, in pieno periodo pre-unitario, e precisamente il 3 ottobre 1839, venne inaugurato il primo tratto ferroviario tra Napoli e Portici. L'avventura della "strada di ferro" non si concluse a Portici. Infatti, nell'estate del 1840 furono raggiunte Resina e Torre del Greco e, nel 1844 la linea ferrata, come da programma, giunse a Nocera. L'apertura dell'epoca delle ferrovie, soprattutto nel centro-nord del Paese, mutò gli equilibri territoriali dei vari Stati pre-unitari e, successivamente, del nuovo Regno d'Italia. Da questo periodo in poi avvenne l'unificazione delle varie reti ferroviarie per dare inizio a quello che costituirà il futuro sistema di trasporto ferroviario nazionale.

La nascita della "strada ferrata" ha dato vita ad una nuova disciplina, denominata "Ingegneria Ferroviaria", che ha creato le basi scientifiche per lo sviluppo e l'evoluzione tecnologica del settore ferroviario in tutte le sue componenti che ne fanno un sistema complesso e multi-disciplinare. Lo sviluppo delle conoscenze, frutto di una ricerca scientifica molto attiva, ha consentito di definire, nei decenni a seguire, standard e normative per la progettazione, l'esecuzione e la gestione delle varie componenti che caratterizzano il sistema ferroviario. Una multidisciplinarietà che investe svariate competenze il cui obiettivo comune è quello di garantire un sistema di trasporto sicuro ed efficiente che, oggi, trova la sua massima espressione nell'Alta Velocità (AV) ferroviaria.

Un ruolo determinante nell'avanzamento e divulgazione delle conoscenze tecnico-scientifiche nell'ambito della progettazione, costruzione e gestione delle infrastrutture ferroviarie è stato rivestito, storicamente, dai docenti del settore scientifico-disciplinare "Strade, Ferrovie ed Aeroporti". Nel secolo scorso, tanti nomi illustri hanno contribuito allo sviluppo di metodologie per

la progettazione geometrica dei tracciati, per l'analisi strutturale della sovrastruttura ferroviaria ivi compresa l'ideazione di nuove soluzioni tipologiche, per lo studio, la classificazione e il controllo dei materiali per la costruzione del corpo stradale, e per il monitoraggio delle caratteristiche geometriche del binario e per la gestione della manutenzione. Gli stessi principi, opportunamente contestualizzati, hanno trovato piena applicazione nell'ingegneria stradale.

La S.I.I.V. (Società Italiana Infrastrutture Viarie), cui afferiscono gran parte dei docenti del settore "Strade, Ferrovie ed Aeroporti", dalla sua istituzione, avvenuta nel 1990, ha continuato nell'operato di diffusione e sviluppo della cultura dell'Ingegneria Ferroviaria. Ciò, nell'ambito di specifici corsi universitari e attraverso una ricerca scientifica rispondente alle esigenze del trasporto ferroviario oggi inquadrato in un contesto dinamico che nella sicurezza, sostenibilità e resilienza trova la sua espressione.

In quest'ottica, il Gruppo di Lavoro "Ferrovie" della S.I.I.V., ha prodotto questo volume in cui viene riportata un'approfondita ricognizione effettuata tra i soci S.I.I.V. sulle infrastrutture ferroviarie per gli aspetti relativi alla didattica, alla ricerca e all'ampia rete normativa di interesse, con l'intento di delineare un quadro aggiornato delle attività formative e scientifiche che caratterizzano tale ambito disciplinare. L'iniziativa si inserisce in un percorso di riflessione condivisa, volto a mettere in evidenza il contributo che la comunità accademica italiana del settore CEAR-03/A offre, in termini di conoscenze e metodologie, allo sviluppo delle ferrovie.

Il tema delle infrastrutture ferroviarie si conferma di particolare rilevanza strategica sia nel contesto nazionale e ancora di più a livello mondiale, in ragione del ruolo centrale che la mobilità sostenibile riveste per la competitività dei sistemi economici e per la riduzione degli impatti ambientali. In tale prospettiva, le università e i centri di ricerca sono chiamati a svolgere una funzione essenziale, sia nella formazione delle nuove generazioni di ingegneri e tecnici specializzati, sia nell'elaborazione di metodi e modelli innovativi di progettazione, gestione e manutenzione delle opere a servizio del sistema di trasporto ferroviario.

Il volume si suddivide in tre capitoli in cui vengono trattate, come già anticipato, le seguenti tematiche:

- Didattica (capitolo 1) – Attraverso i contributi raccolti nelle varie sedi universitarie italiane (S.I.I.V.), è stata effettuata una puntuale ricognizione dei contenuti didattici dei corsi con l’obiettivo di condividere utili informazioni e, nello stesso tempo, individuare percorsi formativi sempre più mirati alle esigenze del trasporto ferroviario. A tal riguardo, l’analisi è stata estesa anche in ambito internazionale.
- Ricerca (capitolo 2) – Con lo stesso criterio è stata effettuata una ricognizione della ricerca scientifica e delle relative tematiche.
- Normativa (capitolo 3) – Il capitolo contiene un excursus sull’impianto normativo inerente agli aspetti legati alla progettazione e gestione della manutenzione dell’infrastruttura ferroviaria limitata ai componenti di competenza dell’ingegneria civile.

La ricognizione, basata su un’ampia raccolta di contributi, consente di individuare i principali indirizzi della didattica, le linee di ricerca emergenti e le connessioni con il quadro normativo e tecnico di riferimento. Ne emerge un utilissimo patrimonio di esperienze eterogenee ma complementari, che testimonia la vitalità della comunità scientifica e la sua capacità di dialogare con i soggetti istituzionali e con tutti gli operatori del settore.

Il volume si configura dunque come uno strumento di conoscenza e di confronto, utile non soltanto per documentare lo stato attuale della disciplina, ma anche per orientare le future attività di ricerca e di didattica specialmente nelle sedi dove ancora non sono attivi insegnamenti di “Infrastrutture ferroviarie”. La sistematizzazione dei contenuti, unitamente all’evidenziazione delle criticità e delle prospettive di sviluppo, offre infatti elementi utili per alimentare il dibattito scientifico e per rafforzare le sinergie tra mondo accademico, istituzioni e i numerosi operatori del settore.

Con questo lavoro si intende contribuire al consolidamento di una cultura condivisa nel campo delle infrastrutture ferroviarie, nella convinzione che solo attraverso un approccio integrato e interdisciplinare sia possibile affrontare in maniera efficace le sfide poste dall’innovazione tecnologica e dalla transizione verso una mobilità più sostenibile.

I Responsabili del Gruppo di Lavoro S.I.I.V. “Ferrovie”

Prof. Ing. Gaetano Bosurgi

Prof. Ing. Giuseppe Loprencipe

1 La didattica sulle “Infrastrutture Ferroviarie”

Premessa

La crescente necessità di infrastrutture ferroviarie moderne e sostenibili rende imprescindibile disporre di figure professionali dotate di adeguate competenze tecniche, gestionali e progettuali.

Nel presente capitolo, al fine di promuovere l'armonizzazione delle conoscenze e dei curricula universitari in ambito ferroviario, viene presentata la didattica sulle infrastrutture ferroviarie nei corsi di Ingegneria. Nel primo paragrafo è illustrata la storia della didattica a partire dalla fine del diciannovesimo secolo fino al 1980 circa. Viene poi descritta l'offerta formativa universitaria erogata sulle infrastrutture ferroviarie in ambito nazionale, dalle sedi della Società Italiana di Infrastrutture Viarie (S.I.I.V.) nell'ambito del SSD CEAR-03/A – “Strade, ferrovie e aeroporti”, europeo ed internazionale.

Per ciascuno dei primi due ambiti (nazionale ed europeo) sono stati catalogati gli insegnamenti universitari erogati su tematiche ferroviarie con particolare attenzione ai contenuti ed alle principali caratteristiche quali il corso di studio di appartenenza, il tipo di attività formativa, il numero di crediti erogati, la presenza di attività di esercitazione e di formazione. A livello internazionale sono presentati gli insegnamenti universitari erogati su tematiche ferroviarie, descrivendone i contenuti e le principali caratteristiche del corso di studio di appartenenza rispetto ai diversi continenti.

Il capitolo ha, quindi, l'obiettivo di restituire, a partire dalle radici dell'insegnamento sulle infrastrutture ferroviarie, una mappatura aggiornata della didattica nazionale in tema ferroviario, da confrontare con quelle europea ed internazionale al fine di trarre da queste ultimi spunti interessanti di potenziamento e miglioramento.

1.1 Richiami storici: l'insegnamento delle ferrovie prima della riforma 509/99

Nel ripercorrere l'evoluzione storica degli insegnamenti dedicati alle Infrastrutture Ferroviarie in Italia, prima di analizzare nel dettaglio i contenuti di appunti di lezioni e testi al riguardo, può risultare interessante riportare quanto indicato nella prefazione dell'opera in due volumi “Costruzione ed esercizio delle ferrovie” del Prof. Ing. Felice Corini (edizione 1950 - Unione Tipografica - Editrice Torinese).

Nella prefazione dell'opera si ripercorre l'evoluzione degli studi di ingegneria, ed in particolare quelli dedicati alle ferrovie, dalla fine del diciannovesimo secolo al 1950, data in cui usciva l'opera come postuma.

Così scriveva il Corini:

Quest'opera è dedicata particolarmente agli studenti di Ingegneria delle Sezioni Civile e Industriale, i quali hanno fra le materie di studio per il conseguimento delle rispettive lauree, la "Tecnica ed Economia dei Trasporti".

Per poter comprendere lo sviluppo dato ai vari argomenti, è necessario avere presente l'evoluzione della suddetta materia d'insegnamento universitario attraverso i successivi ordinamenti delle Facoltà di Ingegneria.

L'ordinamento degli studi di Ingegneria ha interessato vivamente opinione pubblica e Governi sin da quando si è laureato in Italia il primo Ingegnere. Critiche, proposte, riforme si sono susseguite in tutto il secolo scorso, ed oggi l'ordinamento di questi studi è all'ordine del giorno delle discussioni di scienziati, di tecnici e di industriali, oltre che delle pubbliche Amministrazioni.

Non si riscontra un fermento analogo per le altre Facoltà universitarie; per esse si è trattato sempre di ritocchi. La ragione è evidente: gli studi di Ingegneria hanno inizio con l'affermarsi delle applicazioni della scienza alla vita pratica, si sviluppano con le conquiste della meccanica e dell'elettrotecnica, si moltiplicano con le grandi scoperte dell'epoca nostra nel campo dei trasporti e delle comunicazioni. Nella seconda metà del Settecento e nei primi anni dell'Ottocento, all'ingegnere si chiedevano cognizioni limitate ai campi delle prime applicazioni tecniche: nell'agricoltura, nell'edilizia, nelle costruzioni di ponti e strade. Con il progredire delle industrie, con il moltiplicarsi delle discipline tecniche, si rese sempre più complesso l'ordinamento degli studi di Ingegneria.

Dopo numerosi contributi dati alla soluzione della importante questione da scienziati, da tecnici e da politici, fra i quali primeggiarono il Casati ed il Sella, la questione venne posta con cristallina chiarezza da Giuseppe Colombo.

Nel discorso inaugurale dell'anno accademico 1914 del Politecnico di Milano, in occasione del cinquantesimo anniversario della sua fondazione, il Colombo ricordò che all'inizio della vita del Politecnico cominciava appena a svolgersi quel meraviglioso progresso scientifico e industriale, che caratterizzò la seconda metà del secolo decimonono, progresso fenomenale, stupefacente, di cui la storia del pensiero umano non aveva mai registrato l'uguale. Fece notare che dopo il 1880 apparve ad un tratto l'elettrotecnica, che ingigantì in pochi anni, rivoluzionò l'ordinamento delle scuole di

ingegneria, diede mezzi e vita a studi nuovi, in tutti i campi dello scibile, e che tutta quella congerie di insegnamenti, concentrati in tre anni, in quegli stessi tre anni del 1864, si approssimava già a mostrarsi superiore alla media capacità e alla media forza cerebrale delle masse, che frequentavano le scuole di ingegneria. Concluse il suo pensiero formulando il dilemma: o aumentare il numero degli anni di studio o semplificare il programma.

Dal 1914 ad oggi (1950 ndr) altri progressi meravigliosi si sono avuti nella scienza, nella tecnica e nell'industria. L'automobilismo, la trazione elettrica, l'aviazione, le telecomunicazioni e le radiocomunicazioni costituiscono altrettanti nuovi capitoli, che si sovrappongono ai precedenti e che aumentano ancora le materie dell'ingegneria.

Nell'elenco delle materie fondamentali e complementari, previste per le lauree di ingegneria, annesso al Regio Decreto 7 maggio 1936, n. 882, si trovano registrati settanta insegnamenti.

Sin dai primi ordinamenti degli studi di Ingegneria sono stati previsti gli insegnamenti riguardanti le strade e le ferrovie, che assunsero nelle diverse scuole diverse denominazioni. L'ordinamento preponderante è stato quello secondo il quale, una materia d'insegnamento veniva dedicata alla costruzione delle sedi stradale o ferroviaria e un'altra all'esercizio delle Ferrovie.

Corsi nel Politecnico a Milano si ebbero per molti anni le due materie "Costruzioni stradali e Materiale fisso delle Ferrovie" e "Esercizio ferroviario e Materiale Mobile delle Ferrovie".

Nelle scuole di Ingegneria di Bologna, Torino, Pisa, Padova, Roma, Napoli, si ebbero le due materie "Costruzioni Stradali e Ferroviarie" e "Ferrovie" (Esercizio e Materiale).

Mentre la prima materia raggiunse rapidamente la sua definitiva fisionomia e denominazione, la seconda andò via via mutando tendendo ad un contenuto più ampio e di maggiore respiro, sembrando eccessivo dedicare una apposita materia di insegnamento ad un ramo speciale della tecnica mentre si moltiplicavano i rami moderni della tecnica con il moltiplicarsi dei mezzi di trasporto e di comunicazione. D'altra parte, un capitolo dell'insegnamento delle "Ferrovie" acquistava tale interesse e tale importanza da richiedere per sé solo un nuovo insegnamento. Nasceva così la "Trazione Elettrica" come materia autonoma. Fu la scuola di Ingegneria di Roma a concretarne le aspirazioni e le tendenze sopra accennate, sostituendo l'insegnamento di "Ferrovie" con quello, di più ampio respiro, di "Tecnica ed Economia dei Trasporti" e introducendo il nuovo insegnamento di "Trazione Elettrica".

Le riforme in questo campo della scuola di Ingegneria di Roma furono riconosciute giuste, tanto che, con il citato decreto del 1936, venne imposta

per tutte le Facoltà di Ingegneria l'adozione delle due materie d'insegnamento “Tecnica ed Economia dei Trasporti” e “Trazione Elettrica”.

Ma anche con ciò non poté dirsi ben definito il contenuto della prima materia. Stando alla lettera della denominazione si dovrebbe intendere che essa dovesse contenere tutti gli argomenti riguardanti la tecnica e l'economia di tutti i trasporti: terrestri, marittimi ed aerei. Ma con ciò tale materia assumerebbe un'ampiezza enorme, incompatibile con quello che deve essere la normale ampiezza di un insegnamento universitario, e risulterebbe in contrasto con il sorgere e lo svilupparsi di nuove materie caratterizzanti altrettanti rami dell'Ingegneria e così: le costruzioni Navali e le costruzioni Aeronautiche.

Il problema riguardante il contenuto della “Tecnica ed Economia dei trasporti” è ancor oggi da risolvere. Si potrebbe dare ad essa il carattere di materia di informazione generale su tutti i mezzi di trasporto. In un primo tempo la Commissione Ministeriale per la riforma degli studi d'Ingegneria si era orientata in questo senso, tanto che in un primo progetto era prevalsa l'idea di istituire l'insegnamento della “Tecnica ed Economia dei Trasporti” obbligatorio per tutte le sezioni di Ingegneria.

Con tale indirizzo tale insegnamento avrebbe perduto il carattere d'insegnamento universitario, non potendo approfondire, come si addice appunto agli insegnamenti universitari, tutti gli argomenti oggetto dell'insegnamento stesso.

Anche la suddetta Commissione abbandonò il primo progetto riservando la “Tecnica ed Economia dei Trasporti” ad una sola sottosezione di Ingegneria. Riteniamo che, tenuta presente l'evoluzione storica di detta materia e gli insegnamenti autonomi oggi previsti, la migliore soluzione del problema consiste nel dare il più ampio sviluppo alla tecnica e all'economia dei trasporti ferroviari, limitando la tecnica dei trasporti marittimi e aerei soltanto ad uno studio generico e avente carattere informativo, con lo scopo di completare la cultura degli ingegneri non specialisti in tali trasporti, lasciando agli ingegneri navali e agli specialisti in costruzioni aeronautiche la trattazione degli argomenti riguardanti la progettazione di tali mezzi di trasporto. All'economia dei trasporti marittimi e aerei viene dedicato ampio sviluppo in modo da poter affrontare con nuovo criterio i problemi di concorrenza e collaborazione dei vari mezzi di trasporto.

Questo I Volume viene diviso in due sezioni:

- *Sezione I - Tecnica dei trasporti ferroviari:*
- *Sezione II - Economia dei trasporti.*

La Sezione I viene suddivisa in cinque parti:

- *Parte I - Introduzione;*

- *Parte II - Meccanica della locomozione terrestre;*
- *Parte III - Impianti fissi delle ferrovie e impianti di segnalamento;*
- *Parte IV - Trazione termica e materiale mobile;*
- *Parte V - Movimento e Traffico.*

La Sezione II viene suddivisa in tre parti:

- *Parte I - Il costo dei trasporti ferroviari;*
- *Parte II - Teoria generale delle tariffe;*
- *Parte III - Legislazione ferroviaria.*

Non abbiamo dedicato nessuno sviluppo alla tecnica dei trasporti marittimi e aerei, ritenendo più conveniente che i giovani allievi si formino la loro cultura in tale ramo della tecnica, consultando i classici testi di Architettura navale e di costruzioni navali mercantili e militari di aerodinamica e di costruzioni aeronautiche.

Ci auguriamo che il nuovo trattato possa corrispondere alle attuali esigenze degli Allievi Ingegneri senza perdere, per ciò che riguarda i trasporti ferroviari, quelle caratteristiche del trattato "Costruzione ed esercizio delle Ferrovie", che lo rendevano utile anche ai professionisti addetti ai Trasporti ferroviari.

Alla "Trazione Elettrica" viene dedicato un apposito volume, il 2°, in armonia alle premesse, secondo le quali la "Trazione Elettrica" costituisce un insegnamento autonomo.

Confidiamo che questa nostra nuova opera costituisca un notevole contributo alla resurrezione degli alti studi tecnici italiani e alla ricostruzione della nostra Patria che dovrà ancora primeggiare come in passato nel campo degli studi scientifici e tecnici.

Sostanzialmente quello che ci dice il Corini, almeno fino al 1950, è che l'aspetto costruttivo delle ferrovie veniva in genere trattato assieme alle strade (Costruzioni stradali e ferroviarie), che questo aspetto costruttivo aveva già raggiunto rapidamente la sua definitiva fisionomia e denominazione, mentre l'aspetto dell'esercizio delle ferrovie era ancora in evoluzione (Tecnica ed economia dei trasporti; Trazione elettrica).

Inizialmente, per quanto riguarda l'aspetto costruttivo i principali argomenti erano i movimenti terra, la costruzione delle opere d'arte, l'armamento e, anche se in misura minore, la geometria del tracciato.

Per quanto riguarda l'aspetto gestionale i principali argomenti erano i veicoli di trazione, le resistenze al moto dei veicoli e, in misura minore, i segnali.

Fino a poco dopo la riforma del 1936, circa fino alla fine degli anni 30, gli argomenti presenti nei libri utilizzati a livello universitario riguardavano, in generale, tutti gli aspetti delle ferrovie (costruttivo e gestionale) e nella maggioranza dei casi erano trattati assieme alle strade.

Si riporta di seguito alcuni frontespizi di alcuni libri del periodo e l'indice del libro “Lezioni di Costruzioni stradali e Ferroviarie” del Prof. Ing. Luigi Stabilini, Edizioni CEDAM Padova 1939, che è rappresentativo di quanto presente anche in altri testi dello stesso periodo (cfr. Figg. 1.1, 1.2, 1.3 e 1.4). Si tenga conto che il libro era, come definito dal suo stesso Autore, *“non un trattato ma un corso di lezioni universitarie, ossia un corso nel quale sono sviluppate con ampiezza le questioni generali e concettualmente fondamentali, mentre sono più succintamente studiati e talora solo accennati i problemi tecnici particolari, la cui trattazione trova invece posto in monografie e nei corsi di perfezionamento”*.

Come si può notare, scorrendo l'indice, venivano trattati moltissimi argomenti sia di strade che di ferrovie, che riguardavano l'aspetto sia costruttivo che gestionale.



Fig. 1.1 Frontespizi di alcuni libri storici sulle Infrastrutture Ferroviarie

CAPITOLO I. LA DIDATTICA SULLE "INFRASTRUTTURE FERROVIARIE"

PARTE I: PROGETTO XI 7. — Prove sui terreni Pag. 68 8. — Profili geologici e carte geotecniche 71 C) LA STATICA DEL TERRENO. (Richiami della teoria del suolo elastico e della spinta delle terre). 9. — Distribuzione delle pressioni nei terreni caricati 71 10. — I fondamenti fisici delle teorie della spinta delle terre 72 11. — La teoria del masso illimitato 73 12. — La teoria del prisma di massima spinta 78 13. — La spinta delle terre per superfici di scorrimento non piane 81 14. — Influenza della coesione 82 15. — Bibliografia 83 CAP. IV. — I VEICOLI E LE RESISTENZE AL MOTO. A) VEICOLI PER STRADA ORDINARIA. 1. — Le slitte 85 2. — Veicoli per la trazione animale 85 3. — Veicoli a trazione meccanica 88 4. — Veicoli a cingoli 90 5. — Resistenza al moto delle slitte 91 6. — Resistenza al moto dei veicoli a trazione animale (la ruota condotta) 91 7. — Attrito sul perno 93 8. — Attrito volante 93 9. — Determinazione sperimentale della resistenza al moto dei veicoli a trazione animale 97 10. — Valori numerici della resistenza al moto 98 11. — Resistenza per attrito volante dei veicoli a trazione meccanica 99 12. — Resistenza dell'aria 99 13. — Determinazione sperimentale della resistenza a trazione delle automobili 100 14. — Valori numerici della resistenza a trazione delle automobili 101 15. — Resistenza dovuta alle curve 101 16. — Resistenza all'avviamento 101 17. — Resistenza per la pendenza della via 103 18. — La cinematica dell'automobile 103 B) VEICOLI FERROVIARI. 19. — Carrozze e carri 104 20. — Locomotive 106 21. — Resistenza alla trazione dei veicoli ferroviari 108 22. — Attrito fra bocca e fusello 108 23. — Attrito volante 109 24. — Resistenza in curva 111 25. — Resistenza dell'aria 111 26. — Moti anormali dei veicoli 112 27. — Resistenza per la pendenza della via 113 28. — Resistenza all'avviamento e nel moto vario dei veicoli ferroviari 114 29. — Determinazione sperimentale della resistenza al moto dei veicoli ferroviari 114 30. — Formole sperimentali per la resistenza alla trazione dei veicoli ferroviari 116 31. — Formole sperimentali per la resistenza al moto delle locomotive 116 32. — Resistenza al moto all'interno treno 118 33. — Formole sperimentali per la resistenza al moto in curva 118	PARTE I: PROGETTO XII 34. — Resistenza al moto nelle linee a scartamento ridotto Pag. 119 35. — Esempio numerico 119 36. — Freni 120 37. — Attrito nei freni 121 38. — La meccanica del frenamento 122 39. — La ruota frenata 123 40. — La frattura nei carruaggi 129 41. — Esempi numerici 128 42. — Bibliografia 129 CAP. V. — LA LOCOMOZIONE E I MOTORI. A) LA LOCOMOZIONE. 1. — La slitta 131 2. — La ruota motrice — L'aderenza 132 3. — La «scuola» 134 B) I MOTORI. 4. — Generalità 134 a) Motori animati. 5. — Generalità 135 6. — La formula di Maschek 136 7. — La nuova formula delle forze 136 8. — Influenza del numero dei motori e delle curve sullo sforzo di trazione utile 138 9. — Esempio numerico 139 b) Motori a vapore. 10. — Generalità 139 11. — La potenza e lo sforzo di trazione della locomotiva 140 12. — La caratteristica meccanica delle locomotive 144 13. — Esempi numerici 145 c) Motori elettrici. 14. — Generalità 146 15. — Motori a corrente continua 147 16. — Motori monofasi 148 17. — Motori trifasi 148 d) Motori a combustione interna. 18. — Generalità 148 19. — Potenza dei motori Diesel 148 20. — Potenza dei motori a scoppio 149 21. — Momento e sforzo motore al cerchio 150 22. — Esempi numerici 150 23. — Bibliografia 151 CAP. VI. — LA TRAZIONE. A) METODI DI STUDIO. 1. — Generalità 153 2. — L'equazione generale della trazione 153	PARTE I: PROGETTO XIII 3. — Esempi numerici Pag. 154 4. — Il metodo dell'accelerazione media 156 5. — Esempi numerici 157 6. — Il metodo della forza viva 159 7. — Esempi numerici 160 8. — L'integrazione grafica dell'equazione differenziale del moto: a) Il metodo delle curve di accelerazione 161 b) Il metodo grafico semplificato 163 9. — Le caratteristiche della linea del metodo grafico 164 10. — Esempio 164 11. — I diagrammi di potenza e di consumo nel metodo grafico 166 12. — L'integrazione analitica 166 B) LA TEORIA DELLA TRAZIONE NELLA TECNICA DEI TRASPORTI. 13. — La trazione e l'esercizio ferroviario 167 14. — Rendimento del trasporto 170 15. — Esempio numerico 171 16. — Bibliografia 171 CAP. VII. — IL CONFRONTO FRA I DIVERSI TRACCIATI. 1. — Generalità 172 A) STRADE. 2. — Le lunghezze virtuali nelle strade ordinarie per la trazione animale 172 3. — Esempio numerico 173 4. — Le lunghezze virtuali nelle strade ordinarie per la trazione meccanica 174 5. — Esempio numerico 175 6. — Il confronto integrale 176 B) FERROVIE. 7. — Generalità 176 8. — Le lunghezze virtuali con i criteri del tempo e del costo di trasporto in base alle tariffe 176 9. — Il criterio del consumo di lavoro motore 177 10. — Il criterio della spesa di trazione 178 11. — Il criterio delle spese di esercizio 182 12. — Il metodo delle alture virtuali (o di Petersen) 183 13. — Bibliografia 183 CAP. VIII. — ANDAMENTO PLANIMETRICO. A) LA «PROIEZIONE DELL'ASSE». 1. — Generalità 184 2. — Il cerchio nella proiezione dell'asse 185 3. — Le curve di raccordo 186 4. — La cloiche 190 5. — Esempio. — La «linea rossa» di una pista ciclistica 192 6. — La parabola cubica 192 7. — Applicazioni (racordi a retta spostata, a raggio conservato, ecc.) 194	PARTE I: PROGETTO XIV 8. — Esempi numerici Pag. 196 9. — Altre curve di raccordo 196 B) STRADE. 10. — La visibilità nelle strade in rapporto alla sicurezza di circolazione 197 11. — La curvatura dell'asse in rapporto alla visibilità 200 12. — Valori pratici dei raggi stradali 201 13. — Le curve di raccordo nei tracciati stradali 201 C) FERROVIE. 14. — La curvatura dell'asse in rapporto alla circolazione dei veicoli 202 15. — Valori pratici dei raggi ferroviari 204 16. — Le curve di raccordo nei tracciati ferroviari 204 17. — Bibliografia 204 CAP. IX. — ANDAMENTO ALTIMETRICO. 1. — Generalità 208 A) STRADE. 2. — Pendenza limite (o di frenamento) per la trazione animale e livellette di riposo 208 3. — Pendenza limite per la trazione meccanica e lunghezze di sosta 207 4. — Pendenza normale o media 207 5. — Pendenza più conveniente per la trazione animale 207 6. — Valori pratici della pendenza più conveniente 209 7. — Pendenza massima per la trazione animale 209 8. — Pendenza più conveniente per la trazione meccanica 211 9. — Pendenza massima per la trazione meccanica 211 10. — Valori pratici della pendenza massima 211 11. — Il raccordo delle livellette nei tracciati stradali 212 12. — Esempio numerico 218 13. — Lunghezza minima di una livelletta generica 218 14. — Il profilo dell'asse sulle opere d'arte. Escavato verticale con la sinuosità 219 B) FERROVIE. 15. — Pendenza in rettilineo ed in curva 219 16. — Esempio numerico 220 17. — Pendenza all'aperto e in galleria 220 18. — Esempi numerici 221 19. — Pendenza limite e pendenza nelle stazioni 222 20. — Pendenze innocue e nocive 222 21. — Pendenza più conveniente 222 22. — Esempio numerico 223 23. — Pendenza fondamentale di una ferrovia 223 24. — Esempio numerico 224 25. — Pendenza massima di una ferrovia 224 26. — Esempio numerico 225 27. — Valori pratici della pendenza massima 225 28. — Pendenza media di una ferrovia e sviluppo fra due punti di dato dislivello 225 29. — Profilo più economico fra due punti e pendenze perdute 226 30. — Tratti con pendenza superiore alla massima. Rampe di slancio 227
--	---	---	--

Fig. 1.2 Indice del libro "Lezioni di Costruzioni stradali e Ferroviarie" (parte 1)

CAPITOLO I. LA DIDATTICA SULLE “INFRASTRUTTURE FERROVIARIE”

PARTE I: PROGETTO		XV
31. — Esempio numerico		Pag. 228
32. — Livellette di avviamento		228
33. — Esempio numerico		229
34. — Binari di salvamento		229
35. — Esempio numerico		232
36. — Binari di incanalamento		232
37. — Il raccordo delle livellette nei tracciati ferroviari. Lunghezza minima di una livelletta		233
38. — Bibliografia		233
CAP. X. — SEZIONE TRASVERSALE.		
1. — Generalità		235
2. — Inclinazione delle scarpate		235
3. — Fossati (o fossi colatori)		236
A) STRADE.		
4. — Larghezza delle strade in rettilineo		236
5. — Larghezza delle strade in curva. Allargamento esterno		238
6. — Larghezza delle strade in curva. Allargamento interno		242
7. — Larghezza delle strade in curva. Allargamento esterno ed interno		244
8. — Valori pratici degli allargamenti esterni ed interni		244
9. — Larghezza e visibilità negli incroci		245
10. — Marciapiedi, marciatram e banchine ciclistiche		245
11. — Alzezza libera sulla sede stradale		245
12. — Forma della sezione trasversale in rettilineo		246
13. — Esempio (La costruzione dello sponone)		247
14. — Forma della sezione trasversale in curva		249
15. — Applicazioni (sezioni trasversali delle piste)		253
16. — La superficie stradale agli estremi delle curve		253
17. — Esempi		257
18. — La costante della curva di raccordo nelle strade		257
19. — Esempio numerico		258
B) FERROVIE.		
20. — Scartamento in rettilineo		259
21. — Piattaforma in rettilineo		259
22. — Sezione trasversale libera		260
23. — Scartamento in curva		261
24. — Piattaforma in curva		261
25. — Sezione trasversale libera in curva		263
26. — Sopraelevazione della rotaia estera in curva		263
27. — Raccordo della sopraelevazione agli estremi delle curve		264
28. — Lunghezza minima dei rettilinei in pianimetria		266
29. — La costante delle curve di raccordo nelle ferrovie		266
30. — Bibliografia		267
CAP. XI. — CRITERI GENERALI DI PROGETTO.		
1. — Generalità		269
A) STRADE.		
2. — Andamento generale di una strada di pianura		269

PARTE I: PROGETTO		XVI
3. — Andamento generale di una strada di montagna		Pag. 270
4. — Criteri generali di progetto per una strada di pianura		270
5. — Criteri generali di progetto per una strada di montagna		271
B) FERROVIE.		
6. — Andamento generale di una ferrovia		274
7. — Criteri generali di progetto in relazione all'esercizio		275
8. — Il tracciato in rapporto alla natura del terreno		280
9. — Criteri di progetto per le ferrovie di pianura		281
10. — Criteri di progetto per le ferrovie di montagna		282
11. — Criteri di progetto per le ferrovie di collina		286
12. — Criteri di progetto per le ferrovie litoranee		286
13. — Bibliografia		287
CAP. XII. — STUDIO DEI TRACCIATI.		
1. — Generalità		288
A) STRADE.		
2. — Studio preliminare per una strada di pianura		288
3. — Studio definitivo per una strada di pianura		292
4. — Studio preliminare per una strada di montagna		292
5. — Studio di massima per una strada di montagna con rilievo topografico		294
6. — Studio di massima su carte topografiche per una strada di montagna		299
7. — Studio definitivo per una strada di montagna		299
8. — Studio di una strada di pianura o di montagna con rilievi aerofotogrammetrici		302
B) FERROVIE.		
9. — Generalità		304
10. — Studio di una ferrovia in pianura		304
11. — Studio generale di una ferrovia in terreno di montagna		305
12. — Studio di dettaglio per una ferrovia in terreno di montagna		306
13. — Studio generale di una ferrovia in collina		307
14. — Osservazioni riassuntive generali		307
15. — Bibliografia		307
CAP. XIII. — IL CORPO STRADALE.		
1. — Generalità		309
A) AREA D'OCCUPAZIONE E SCARPATE.		
2. — Larghezza d'occupazione		309
3. — Esempi numerici		310
4. — Area di occupazione		311
5. — Esempi		313
6. — Superficie delle scarpate		313
7. — Esempio numerico		314
B) CURATURA DEI SOLIDI STRADALI.		
8. — Area delle sezioni trasversali		314
9. — Formule di curatura		318

PARTE I: PROGETTO		XVII
10. — I prismi particolari più frequenti		Pag. 322
11. — Rappresentazione grafica della curva delle aree		322
12. — Metodi approssimati per il calcolo dei solidi stradali		324
13. — Esempi		326
14. — Applicazione. Il problema del compenso fra lo sterzo ed il riporto		326
15. — Calatura di alcuni solidi particolari		327
16. — Esempio		329
17. — Bibliografia		330
CAP. XIV. — I LAVORI DI TERRA NELLO STUDIO DEI PROGETTI.		
A) NOZIONI GENERALI.		
1. — Trasporto orizzontale		331
2. — Applicazioni		332
3. — Trasporto verticale		334
4. — Trasporto per via inclinata		335
B) COSTO DEI LAVORI DI TERRA.		
5. — Costo dello scavo		337
6. — Costo dei lavori accessori		337
7. — Prestazione dei trasporti		338
8. — Analisi del costo di trasporto		339
9. — Costo effettivo dei trasporti		341
10. — Influenza della pendenza sul costo di trasporto		343
11. — Scelta del mezzo di trasporto		345
C) STUDIO DELLA DISTRIBUZIONE.		
12. — I trasporti nei lavori di terra		347
13. — Il costo dei trasporti e il problema della distribuzione		347
14. — La « curva dei volumi »		348
15. — Correzioni alla curva delle aree		349
16. — Proprietà della curva dei volumi		350
17. — L'orizzontale di minima spesa		351
18. — Studio della distribuzione		352
19. — Influenza della pendenza delle vie di trasporto sulla distribuzione		353
20. — Depositi e prestiti		353
21. — Esempio		355
22. — Rappresentazione grafica dei trasporti di deposito e prestito. Scelta fra il compenso longitudinale ed il deposito e prestito		355
23. — Cenni su alcune modificazioni del metodo Bruckner		357
24. — La « curva dei momenti »		357
25. — Bibliografia		359
CAP. XV. — MANUFATTI STRADALI CORRENTI E OPERE ACCESSORIE.		
1. — Generalità		361
A) MANUFATTI DI SOSTEGNO.		
2. — Nozioni generali		361
3. — Muri a secco		362

PARTE I: PROGETTO		XVIII
4. — Muri in malta		Pag. 363
5. — Esempi di cemento armato		367
6. — Verifica di stabilità dei muri di sostegno		368
7. — Esempi		374
8. — Calcolo diretto dei muri a tutto spessore		376
9. — Esempi numerici		377
10. — Confronto fra i diversi tipi di muro a tutto spessore		377
B) OPERE DI ATRAVEASAMENTO.		
11. — Generalità		378
12. — Incroci e traversale a raso		379
13. — Attraversamenti con sottopassaggi		379
14. — Passaggi a livello		380
15. — Tombini in genere		381
16. — Tipi costruttivi di tombini		383
17. — Disposizioni delle fronti dei tombini		383
C) MANUFATTI DI DIFESA.		
18. — Generalità		385
19. — Difesa dalle valanghe		386
20. — Difesa dalla caduta di massi		386
21. — Difesa dalla neve e dalla sabbia		389
22. — Difesa dal vento e dal fuoco		390
23. — Opere di difesa negli attraversamenti di condutture elettriche aeree e di teleferiche		390
D) OPERE ACCESSORIE.		
24. — Nozioni generali		391
25. — Fossi e chiascio		392
26. — Marciapiedi e banchine		392
27. — Puntelli e passerelli		392
28. — Recinzioni		392
29. — Piantamenti		392
30. — Opere di indicazione		392
31. — Bibliografia		392
CAP. XVI. — FRANE E CONSOLIDAMENTI.		
1. — Generalità		395
2. — Cause delle frane		395
3. — Opere di consolidamento in generale		397
4. — Opere di sostegno		399
5. — Opere di proscioglimento		401
6. — Opere di difesa delle acque di pioggia		404
7. — Opere di difesa dalle acque stagnanti o correnti		406
8. — Opere di sistemazione superficiale		406
9. — Esempi		406
10. — Norme generali per la costruzione di strade e ferrovie in terreni franosi		407
11. — Bibliografia		407

Fig. 1.3 Indice del libro “Lezioni di Costruzioni stradali e Ferroviarie” (parte 2)

CAPITOLO I. LA DIDATTICA SULLE "INFRASTRUTTURE FERROVIARIE"

PARTI I: PROGETTO XIX CAP. XVII. — GALLERIE. 1. — Generalità Pag. 408 2. — Cenni storici » 408 3. — Gallerie di valico » 409 4. — Previsioni geologiche » 410 5. — Temperatura in galleria » 411 6. — Spinta e pressioni in galleria » 415 7. — Cause che modificano le spinte in galleria » 420 8. — Sorgenti d'acqua » 421 9. — Andamento planimetrico » 422 10. — Andamento altimetrico » 423 11. — Sezione trasversale » 424 12. — Particolari costruttivi » 428 13. — Stato del rivestimento » 431 14. — Attacchi interni » 432 15. — Particolari costruttivi dei pozzi e delle fucine » 433 16. — Ventilazione delle gallerie » 433 17. — Bibliografia » 434 CAP. XVIII. — LA SOVRASTRUTTURA. A) STRADE. 1. — Generalità » 436 2. — Sovrastutture costituite da un tutto unico » 436 3. — Sovrastutture ad elementi distinti » 441 B) LA STATICA DELLE PAVIMENTAZIONI. 4. — Nozioni generali » 443 5. — Le sollecitazioni prodotte dai veicoli in movimento regolare » 443 6. — Le irregolarità nel movimento dei veicoli e le sollecitazioni conseguenti sulla via » 448 7. — Lo studio statico della sovrastuttura » 451 8. — Distanze fra i giunti » 455 C) FERROVIE. 9. — Generalità » 456 10. — Le rotaie » 457 11. — Armamento corrente con travesine » 456 12. — Armamento speciale con travesine » 461 13. — Armamento con longherine » 461 14. — Scambi semplici » 462 15. — Scambi multipli e traversate » 465 16. — Commutazioni, tracciati schematici » 465 17. — Linee per la presa di corrente » 466 D) STATICA DELLA SOVRASTRUTTURA FERROVIARIA. 18. — Generalità » 468 19. — Sollecitazioni dinamiche » 468 20. — Armamento con travesine » 469 21. — Armamento con longherine » 471		PARTI I: PROGETTO XX 22. — Esempio Pag. 473 23. — L'inflessione laterale delle rotaie » 474 24. — Esempio » 477 25. — Studio statico della sospensione longitudinale » 477 26. — Esempio » 485 27. — Studio statico della sospensione trasversale » 486 28. — Bibliografia » 486 CAP. XIX. — STRADE E FERROVIE SPECIALI. A) STRADE URBANE. 1. — Nozioni generali » 488 B) AUTOSTRADE. 2. — Nozioni generali » 490 C) PUTE. 3. — Nozioni generali » 490 D) STRADE SPERIMENTALI. 4. — Nozioni generali » 492 E) TRANSVI URBANE. 5. — Generalità » 493 6. — Veicoli » 493 7. — Caratteristiche delle linee » 493 8. — Criteri generali di progetto » 495 F) PILOTTE. 9. — Cenni generali » 495 G) FERROVIE SOTTERRANEE ED ELEVATE. 10. — Nozioni generali » 494 H) GUIDOTTE. 11. — Cenni generali » 495 I) DESTIERE. 12. — Nozioni generali » 496 L) FUNICOLARI. 13. — Nozioni generali » 497 14. — Profilo teorico delle funicolari » 501 15. — Problemi speciali » 501 M) TELEFERICHE. 16. — Generalità » 502 17. — I cavi » 503 18. — Appoggi » 503	
PARTI II: COSTRUZIONE XXI 19. — Stazioni Pag. 506 20. — Vaghietti » 506 21. — Sistema ad una fine » 510 22. — Puntive per trasporto di persone » 510 23. — Blonfini » 511 24. — Potenzialità della linea » 511 25. — Studio statico del cavo portante » 511 26. — Bibliografia » 513 PARTI II: COSTRUZIONE. CAP. I. — LA CONDOTTA DEI LAVORI. 1. — Nozioni generali » 517 2. — Assegnazione » 518 3. — Consegna dei lavori » 519 4. — L'evoluzione » 519 5. — Collaudi » 521 6. — Bibliografia » 522 CAP. II. — I MATERIALI STRADALI E GLI STUDI SPERIMENTALI. 1. — I materiali stradali » 523 2. — Prove di laboratorio sui materiali » 524 3. — Prove al traffico artificiale » 526 4. — Prove al traffico reale » 527 5. — Rilievo della superficie stradale » 527 6. — Le statistiche del traffico » 528 7. — Prove sismiche » 528 8. — Bibliografia » 529 CAP. III. — IL TRACCIAMENTO. A) TRACCIAMENTO DELL'ASSE ALL'APERTO. 1. — Generalità » 531 2. — Tracciamento delle curve circolari » 532 3. — Esempio numerico » 536 4. — Tracciamento delle curve a 2 centri e delle curve di raccordo » 537 5. — Tracciamento di curve illimitate » 538 6. — Tracciamento altimetrico » 539 7. — Tracciamento del corpo stradale » 539 B) TRACCIAMENTO DELLE GALLERIE. 8. — Generalità » 540 9. — Tracciamento o collegamento esterno » 540 10. — Perturbazioni locali della gravità » 541 11. — Tracciamento interno in rettilineo » 544 12. — Tracciamento interno in curva » 546 13. — Tracciamento altimetrico » 547		PARTI II: COSTRUZIONE XXII 14. — Approssimazione nei tracciamenti di galleria Pag. 547 15. — Bibliografia » 547 CAP. IV. — SCALI E TRASPORTI. A) SCALI. 1. — Generalità » 549 2. — Caratura della terra » 549 3. — Lavori di spaccatura » 552 4. — Lavori di mina » 552 5. — Richiami sugli esplosivi » 553 6. — Perforazione a mano » 554 7. — Perforazione meccanica » 555 8. — La tecnica delle mine » 555 B) TRASPORTO DELLE TERRE. 9. — Trasporto diretto » 557 10. — Trasporto con veicoli » 561 11. — Bibliografia » 561 CAP. V. — COSTRUZIONE DEL CORPO STRADALE. 1. — Generalità » 562 2. — Costruzione delle trincee » 563 3. — Costruzione dei rilevati » 565 4. — Disposizioni al carico » 567 5. — Disposizioni allo scarico » 568 6. — Rilevati su terreni compressibili » 570 7. — Inerbicamenti e piantagioni » 571 8. — Bibliografia » 571 CAP. VI. — COSTRUZIONE DELLE GALLERIE. A) METODI D'ATTACCO. 1. — Generalità » 572 2. — Metodo belga » 574 3. — Metodo tedesco o del nucleo centrale » 574 4. — Metodo italiano » 575 5. — Metodo austriaco » 575 6. — Metodo americano » 576 7. — Metodo inglese » 577 8. — Metodo dello scudo » 577 9. — Costruzione per affondamento » 578 10. — Costruzione per congelamento o rafforzamento del terreno » 579 11. — Raddoppio delle gallerie » 579 12. — Gallerie artificiali » 579 13. — Scelta del sistema d'attacco » 580 B) PARTICOLARI DI ESECUZIONE. 14. — Cunicolo d'avanzata » 581 15. — Armature » 581	

Fig. 1.3 Indice del libro "Lezioni di Costruzioni stradali e Ferroviarie" (parte 3)

CAPITOLO I. LA DIDATTICA SULLE “INFRASTRUTTURE FERROVIARIE”

PARTE III: MANUTENZIONE		XXIII
16. — Murature		Pag. 583
17. — Piani e finestre		584
18. — L'impregnazione delle gallerie		584
C) OPERE ACCESSORIE E DISPOSIZIONI GENERALI.		
19. — Trasporti		585
20. — Ventilazione		585
21. — Impianti diversi; cantieri		586
22. — Bibliografia		586
CAP. VII. — COSTRUZIONE DELLA SOVRASTRUTTURA.		
1. — Generalità		588
A) STRADE.		
2. — Strade a macadam e massicciate semplici		588
3. — Massicciate con trattamenti superficiali		591
4. — Massicciate con legante idrocarbureo		592
5. — Pavimentazioni in asfalto naturale compresso		596
6. — Pavimentazioni in asfalto celato		597
7. — Massicciate con indurimento artificiale del pietrisco (massicciate al silicato di sodio)		598
8. — Massicciate con legante idraulico e pavimentazioni in cemento		598
9. — Pavimentazioni con elementi distinti		598
10. — Plantagioni		599
B) FERROVIE.		
11. — Generalità		599
12. — Direzione delle traverse		600
13. — Piani dell'armamento		600
14. — Tossatura delle linee aeree		601
15. — Costruzione delle teleferiche		601
16. — Bibliografia		601
PARTE III: MANUTENZIONE.		
CAP. I. — MANUTENZIONE DEL CORPO STRADALE.		
1. — Generalità		607
2. — Frangenti sulle trincee		607
3. — Consolidamento delle trincee		608
4. — Frangenti nei rilevati		609
5. — Consolidamento dei rilevati		610
6. — Manutenzione delle opere accessorie		611
7. — Bibliografia		611
CAP. II. — MANUTENZIONE DELLA SOVRASTRUTTURA.		
A) STRADE.		
1. — Massicciate a macadam		612
XXIV		
PARTE III: MANUTENZIONE		Pag. 614
2. — Massicciate con trattamenti superficiali		614
3. — Massicciate con legante idrocarbureo e con indurimento artificiale del pietrisco		614
4. — Massicciate e pavimentazioni con legante idraulico		615
5. — Pavimentazioni con elementi distinti e diverse		615
6. — Servizi accessori di manutenzione		616
7. — Sistemi amministrativi di manutenzione		616
B) FERROVIE.		
8. — Manutenzione della sovrastruttura		617
9. — Bibliografia		617
INDICE ANALITICO E DEI NOMI		619

Fig. 1.4 Indice del libro “Lezioni di Costruzioni stradali e Ferroviarie” (parte 4)

Negli anni successivi 1940 -1950 rimane la suddivisione indicata dalla riforma del 1936 tra la parte costruttiva (Costruzioni stradali e ferroviarie) e quella gestionale e trasportistica (Tecnica ed economia dei Trasporti).

Per quanto riguarda la parte costruttiva l'insegnamento continuava a prevedere la trattazione sia delle strade che delle ferrovie e gli argomenti erano sempre gli stessi: i veicoli, il tracciato, il corpo stradale, i lavori in terra ed i manufatti, le sovrastrutture. Anche se la trattazione veniva ampliata, in genere restava volutamente semplice come indicato nella prefazione del libro di Azimonti del 1947: *“Qualcuno potrà forse osservare che l'esposizione degli argomenti è fatta in modo elementare. Rispondo — scriveva lo stesso Azimonti nel 1941 - che agli allievi ingegneri si devono insegnare i principi fondamentali sul progetto e sulla costruzione appunto nella maniera più semplice, sopra tutto perché lo sviluppo dei molti corsi attuali nel limitato numero di ore disponibili per ognuno non può dar fondo ad ogni argomento.*

....
Quello che è importante e che gli insegnanti siano agli esami severi ed esigano ciò che hanno insegnato (questo è importante per ragioni innanzitutto

di moralità), e che gli allievi, uscendo dalla scuola, sappiano che ciò che hanno appreso è poco, e che lo studio per essi non è che incominciato.”

Si riportano di seguito i frontespizi di alcuni libri del periodo, e l'indice dei due volumi del Tesoriere, “Strade Ferrovie Aeroporti”, quarta edizione, UTET 1984 (cfr. Fig. 1.5).



Fig. 1.5 Frontespizi di alcuni libri sulle Infrastrutture Ferroviarie (anni 1940 -1950)

Successivamente al 1950 e fino alla fine del ventesimo secolo si evidenziò sempre di più una separazione (in termini di docenza) tra le materie che riguardavano la costruzione dell’infrastruttura ferroviaria (opere d’arte, tracciato, armamento) e l’esercizio delle ferrovie (veicoli, impianti, gestione, ecc.), con una certa sovrapposizione per quanto riguardava la meccanica della locomozione.

Sostanzialmente, però, gli argomenti rimarranno inalterati anche se nel corso degli anni si è assistito ad un continuo ampliamento di quanto insegnato. Cominciano ad essere pubblicati anche libri dedicati alle sole ferrovie, e non assieme alle strade, ed in questo caso si hanno opere che possono avere al loro interno sia la parte costruttiva che gestionale, di cui un esempio è proprio il libro del Corini.

Alcuni argomenti vengono trattati in maniera più approfondita e completa ed anche il grado di complessità aumenta; in particolare per quanto riguarda l’aspetto costruttivo rimangono ancora trattazioni comuni a strade e ferrovie, ma viene approfondita la parte geotecnica e delle sovrastrutture (cfr. Fig. 1.6).

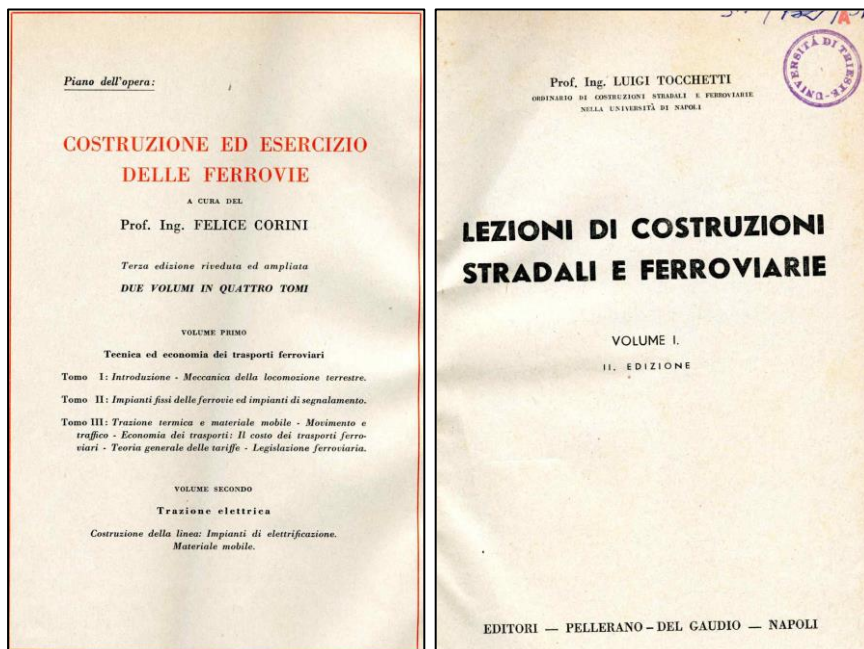


Fig. 1.6 Frontespizi di alcuni libri sulle Infrastrutture Ferroviarie (anni oltre il 1950)

Se si confrontano gli argomenti dei due libri (Stabilini 1939 e Tesoriere 1984) di cui si sono riportati gli indici si possono fare alcune considerazioni di come si siano modificate le lezioni del corso di strade e ferrovie in quasi 50 anni (cfr. Figg. 1.7, 1.8, 1.9 e 1.10).

Per quanto riguarda gli aspetti progettuali legati alle ferrovie (cioè i veicoli ferroviari, la meccanica della locomozione, la trazione, l'andamento planimetrico, l'andamento altimetrico, la sede e l'armamento ferroviario, le opere d'arte) l'impostazione dei due testi è simile, pur avendo diversa estensione nella trattazione dei singoli argomenti.

Per entrambi i libri mancano totalmente argomenti inerenti alla gestione delle ferrovie, ed in particolare al segnalamento.

Lo Stabilini ha anche delle parti relative all'aspetto costruttivo e manutentivo che il Tesoriere non ha, mentre quest'ultimo ha una parte geotecnica, comune a strade e ferrovie molto più ampia.

In sintesi, si può dire che il contenuto dell'aspetto infrastrutturale delle ferrovie non è cambiato di molto, in termini di impostazioni, per gran parte del XX secolo.

Per quanto riguarda, invece, i libri e quindi i corsi di studio dedicati completamente alle ferrovie, come quello del Corini, manca quasi totalmente l'aspetto infrastrutturale del tracciato (andamento planimetrico e altimetrico, opere d'arte e geotecnica) e viene dato ampio spazio a tutti gli argomenti legati alla gestione delle ferrovie propri della tecnica ed economia dei trasporti come la meccanica della locomozione, l'armamento, gli impianti, la trazione, la movimentazione ed il traffico ed il costo dei trasporti ferroviari e la tariffazione.

Quindi l'impostazione data ai corsi di ferrovie fino quasi alla fine del XX secolo ha risentito della riforma universitaria del 1936, e cioè un corso dedicato alla costruzione di strade e ferrovie e uno di tecnica ed economia dei trasporti che si occupava dell'aspetto gestionale.

CAPITOLO I. LA DIDATTICA SULLE "INFRASTRUTTURE FERROVIARIE"

GIUSEPPE TESORIERE Professore ordinario nell'Università di Palermo STRADE - FERROVIE AEROPORTI Volume primo IL PROGETTO E LE OPERE D'ARTE Quarta edizione UTET		INDICE INTRODUZIONE - Notizie storiche p. 1 PARTE PRIMA IL PROGETTO CAPITOLO I - I problemi del traffico p. 13 1. Il traffico in generale » 13 2. Gli indici del traffico » 14 3. La variazione del flusso e curva delle frequenze » 15 4. La velocità della corrente veicolare - La velocità di progetto » 21 5. La capacità di una strada » 27 6. Caratteristiche di deflusso delle strade » 31 7. I livelli di servizio » 33 8. Sulle previsioni di traffico » 39 CAPITOLO II - Meccanica della locomozione » 42 1. Introduzione. I veicoli per strada ordinaria » 42 2. I veicoli ferroviari » 49 3. L'aderenza » 51 4. Le resistenze al moto: a) Resistenze ordinarie all'avanzamento nei veicoli automobilistici » 58 b) Resistenze ordinarie all'avanzamento nei veicoli ferroviari » 62 5. Formule sintetiche per il calcolo delle resistenze ordinarie » 64 6. Resistenze addizionali: a) Resistenza dovuta alla pendenza della strada » 66 b) Resistenza dovuta alle curve » 68 c) Resistenza dovuta all'accelerazione » 69 G. TESORIERE, I.	
X Indice 7. La trazione ferroviaria p. 70 8. La trazione automobilistica » 77 9. La frenatura » 84 CAPITOLO III - La scelta del tracciato: le lunghezze virtuali » 92 1. Generalità e moderni metodi di valutazione e confronto: a) Metodo dei costi annuali » 94 b) Metodo del rapporto benefici - costi » 95 c) Metodo del saggio del rendimento interno » 96 d) Metodo del valore netto attuale » 96 2. Analisi di fattibilità di un progetto stradale » 98 3. Il confronto dei tracciati con il calcolo della virtualità » 102 4. I criteri di equivalenza per il calcolo dei coefficienti di virtualità » 104 a) Metodo dell'equivalenza del lavoro di trazione » 105 b) Metodo dell'equivalenza del tempo di percorrenza » 108 c) Metodo della equivalenza dei consumi di energia o di carburante » 110 CAPITOLO IV - La sede stradale » 112 1. Gli elementi che costituiscono la sede di una strada ordinaria: a) Piastriforme e solido stradale » 112 b) La carreggiata » 114 c) La carreggiata in galleria » 116 d) Le banchine » 117 e) Le delimitazioni della sede » 117 f) Tipologia delle strade » 120 2. La sagoma della carreggiata » 121 3. La sede e l'armamento ferroviario » 124 CAPITOLO V - L'andamento planimetrico delle strade ordinarie e di quelle ferroviarie » 135 A. Le strade ordinarie. 1. Rettifili e curve; tortuosità e sorpassi » 135 2. Allargamento in curva per la iscrizione dei veicoli e per la visibilità » 139 3. Raggio minimo e sopraelevazione in curva » 144 4. I raccordi progressivi » 156 5. I raccordi clotoidici » 157 6. L'inserimento del raccordo clotoidico fra rettilineo e curva circolare. Raccordo a raggio conservato » 164 7. La scelta della costante del raccordo clotoidico » 166 8. Il pratico tracciamento dei raccordi e l'uso delle tavole » 170		Indice XI 9. I raccordi a centro ed a vertice conservato p. 200 10. La sistemazione plano-altimetrica della zona interessata dal raccordo progressivo » 201 11. Cenni sulla lemniscata e sulla spirale policentrica (Searles) » 204 12. Sull'andamento dei rettilineo e delle curve nei tracciati stradali » 210 13. Il tracciamento delle curve stradali ad arco di circonferenza » 213 B. Le strade ferrate. 1. L'iscrizione in curva dei veicoli ferroviari. Il raggio minimo » 217 2. La sopraelevazione in curva della rotaia esterna » 222 3. I raccordi altimetrici e planimetrici. La parabola cubica » 227 4. L'inserimento del raccordo parabolico nella curva circolare » 232 5. Correzione delle curve ferroviarie con il metodo delle frecce » 235 CAPITOLO VI - L'andamento altimetrico dei tracciati stradali e ferroviari » 239 1. Generalità » 239 2. Pendenza limite in discesa e pendenza massima in salita dei tracciati stradali » 241 3. Pendenza economica nelle strade ordinarie » 246 4. Lunghezza critica delle livellate » 248 5. Considerazioni sull'andamento generale dei profili per le strade ordinarie » 250 6. I raccordi verticali nelle strade ordinarie » 252 7. Pendenza economica e pendenza massima dei tracciati ferroviari » 262 8. Curve verticali ferroviarie: dossi e curve concave » 263 CAPITOLO VII - La redazione del progetto della via » 265 1. I gradi della progettazione: a) Il progetto preliminare » 265 b) Il progetto di massima » 265 c) Il progetto esecutivo » 266 2. Studio del tracciato e della poligonale d'asse » 267 3. La planimetria » 273 4. Il profilo longitudinale » 274 5. Le sezioni trasversali » 278 6. Il volume del solido stradale » 282	

Fig. 1.7 Strade - ferrovie aeroporti, Giovanni Tesoriere, volume primo (parte 1)

CAPITOLO I. LA DIDATTICA SULLE "INFRASTRUTTURE FERROVIARIE"

XII	Indice	XIII	Indice
7. Il diagramma delle aree. Costruzione in base al metodo delle sezioni ragguagliate:	p. 285	7. Le caratteristiche geometriche delle piste	p. 351
a) Sezioni omogenee in stero o in rilevato.	» 286	8. L'orientamento delle piste in rapporto ai venti	» 357
b) Sezioni non omogenee	» 286	9. Il numero e la disposizione delle piste di volo	» 360
c) Sezioni a mezza costa	» 287	10. La scelta della pendenza delle piste aeroportuali	» 366
8. Diagramma dei volumi o profilo di Brükner	» 292	11. I piazzali di stazionamento	» 368
9. Distanza media del trasporto	» 295	12. Segnali orizzontali sulle piste di volo e di rullaggio	» 371
10. Ricerca della fondamentale di minima spesa	» 296	13. Gli impianti e le segnalazioni luminose	» 373
11. Metodo grafico per la costruzione del diagramma dei volumi: a) Diagramma delle aree rettangolare	» 298	PARTE SECONDA LE OPERE D'ARTE	
b) Diagramma delle aree triangolare	» 299		
c) Diagramma delle aree di forma trapezia	» 300	CAPITOLO X - Le opere idrauliche a difesa del corpo stradale	p. 379
12. Esempio di costruzione del diagramma dei volumi	» 302	1. Generalità sulle opere d'arte.	» 379
13. Determinazione analitica del volume del solido stradale	» 304	2. Le opere d'arte ed il loro calcolo idraulico	» 381
14. Applicazione di calcolatori elettronici ai progetti stradali	» 306	3. Le cunette ed i fossi di guardia	» 387
15. Gli elaborati relativi alle espropriazioni.	» 307	4. I drenaggi	» 389
16. Completamento del progetto: il computo metrico estimativo ed i capitolati d'appalto	» 310	5. I drenaggi di aree aeroportuali	» 393
17. Cenni sulle norme per la direzione dei lavori	» 312	6. Le opere per lo smaltimento delle acque superficiali negli aeroporti	» 395
CAPITOLO VIII - L'organizzazione del cantiere e macchine per i movimenti di materia.	» 315	CAPITOLO XI - Tombini, ponticelli, ponti e viadotti	» 397
1. Il moderno cantiere stradale	» 315	1. Generalità su tombini, acquedotti, ponticelli	» 397
2. Lo scavo: a) Scavo a mano	» 317	2. Le caratteristiche costruttive dei tombini	» 398
b) Scavo con martelli ad aria compressa	» 318	3. Le caratteristiche costruttive dei ponticelli	» 403
c) Scavo con esplosivi	» 318	4. Cenni sul calcolo dei ponti a travata: a) Ponte a travate semplicemente appoggiate sulle spalle	» 405
d) Scavo con macchine	» 319	b) Ponte a travate appoggiate su pile intermedie e con due sbalzi	» 407
3. Mezzi per lo scavo ed il trasporto	» 323	5. Il carico da considerare per il calcolo dei ponti stradali	» 410
4. Mezzi per il trasporto	» 329	6. Carichi per ponti ferroviari	» 416
CAPITOLO IX - Elementi per la progettazione di un aeroporto	» 332	7. I viadotti	» 418
1. I trasporti aerei ed il loro sviluppo	» 332	CAPITOLO XII - La spinta delle terre	» 421
2. Cenni sulle principali caratteristiche dei moderni aerei civili	» 335	1. Generalità sulla spinta delle terre e sui muri di sostegno	» 421
3. Gli aeroporti: scelta della loro ubicazione	» 338	2. Le teorie classiche per la determinazione della spinta delle terre.	» 422
4. Il calcolo dello spazio di decollo e di atterraggio	» 341	3. Teoria del Coulomb e costruzione del Poncelet	» 425
5. La lunghezza da assegnare ad una pista di volo	» 348		
6. La classificazione degli aeroporti	» 349		
XIV	Indice		
4. Il metodo di Rebhann	p. 435	8. I sistemi d'attacco moderni	p. 506
5. Cenni sulle teorie di Rankine e di Résal	» 439	9. Sistemi di attacco speciali	» 508
6. Formula di Rankine come caso particolare della teoria di Coulomb	» 443	10. Altri problemi riguardanti l'esecuzione	» 512
7. La distribuzione della spinta	» 445	11. Le spinte sui rivestimenti	» 516
8. Determinazione della spinta tenendo conto della coesione	» 449	— Teoria di Ritter	» 520
9. Confronto fra le varie teorie esposte	» 450	— Teoria di Kommerell	» 522
10. La spinta passiva.	» 453	— Teoria di Bierbaumer	» 524
CAPITOLO XIII - Il calcolo dei muri di sostegno	» 456	— Teorie di Caquot e Terzaghi	» 525
1. I tipi ed i materiali	» 456	— Le gallerie parietali	» 527
2. Considerazioni generali sul calcolo	» 458	12. Il calcolo del rivestimento	» 529
A) Verifica allo schiacciamento	» 458	13. Il problema della ventilazione delle gallerie stradali	» 530
B) Centro di sollecitazione interno al nocciolo centrale d'inerzia della sezione di base	» 459	14. Le gallerie urbane	» 535
C) Centro di sollecitazione esterno al nocciolo ma interno alla sezione	» 460	Nota bibliografica	» 539
D) Verifica allo scorrimento	» 461	Indice degli argomenti e degli autori	» 541
E) Verifica al ribaltamento	» 462	Progetto di un tronco di strada ordinaria	» 547
3. Muri di sostegno in cemento armato	» 464		
4. Tipi di muro adoperati nelle costruzioni ferroviarie	» 466		
5. Applicazioni	» 469		
CAPITOLO XIV - Le gallerie	» 480		
1. Generalità	» 480		
2. Andamento planimetrico - Profilo longitudinale e sezioni.	» 484		
3. Rilievi e tracciati	» 486		
4. Durata dei lavori e organizzazione per l'attacco dai pozzi	» 488		
5. Organizzazione del cantiere nella costruzione di gallerie: a) Impianti per il personale e servizi generali	» 492		
b) Impianti per la perforazione ed il trasporto del materiale scavato	» 492		
c) Impianti per la ventilazione ed il raffreddamento	» 494		
d) Impianti per inerti e betonaggio	» 494		
6. Lavori di scavo, armamento e rivestimento	» 495		
7. Sistemi di attacco tradizionali: a) Il sistema belga	» 500		
b) Il sistema italiano	» 502		
c) Il sistema austriaco	» 504		
d) Il sistema inglese	» 505		

Fig. 1.8 Strade - ferrovie aeroporti, Giovanni Tesoriere, volume primo (parte 2)

CAPITOLO I. LA DIDATTICA SULLE "INFRASTRUTTURE FERROVIARIE"

GIUSEPPE TESORIERE Professore ordinario nell'Università di Palermo STRADE - FERROVIE AEROPORTI Volume secondo LE OPERE IN TERRA. LE SOPRASTRUTTURE, GLI IMPIANTI Quarta edizione UTET	INDICE PARTE PRIMA LE OPERE IN TERRA CAPITOLO I - Il terreno e le sue caratteristiche generali p. 3 1. Il suolo e sua costituzione » 3 2. Il binomio acqua-suolo » 5 3. Effetti della capillarità » 8 4. Pressione effettiva e pressione neutra » 10 5. Le caratteristiche fisiche del suolo: a) Il contenuto o percentuale d'acqua » 14 b) Il peso specifico » 16 c) L'indice dei vuoti » 17 d) La permeabilità » 19 e) La granulometria » 20 6. La resistenza a taglio delle terre: a) Resistenza a taglio di terre granulari » 30 b) Resistenza a taglio di terre coesive » 31 7. La misura della suscettività delle terre all'acqua: limiti ed indici di Atterberg: a) Limite di liquidità (LL) » 36 b) Limite di plasticità (LP) » 38 c) Limite di ritiro (LR) » 39 d) Indice di plasticità (IP) » 40 8. L'indice di Gruppo e la classificazione dell'Highway Research Board » 41 9. Classificazione dell'Aviazione Civile Americana (F.A.A.) » 51 b. TESORIERE, II.
X Indice CAPITOLO II - Compressibilità delle terre e costipamento p. 54 1. Compressibilità in generale » 54 2. Curve caratteristiche di compressibilità » 58 3. Curve di compressibilità nel caso di campioni indisturbati e per terreni in sito » 61 4. Equazione della curva di compressibilità » 63 5. Il fenomeno del consolidamento degli ammassi argillosi » 67 6. Il costipamento » 68 7. La prova Proctor » 74 8. Controllo della densità in sito » 80 9. Osservazioni sulla percentuale di addensamento » 83 10. Le macchine per compattare » 85 11. La costruzione dei rilevati » 90 CAPITOLO III - Portanza dei sottofondi e delle soprastrutture stradali » 97 1. Definizioni e caratteristiche generali delle prove » 97 2. Le prove di carico con piastra » 101 3. Portanza mediante la prova a cicli ripetuti » 103 a) Il metodo dell'Highway Research Board » 105 b) Il metodo proposto dal Prof. G. Maresca » 108 4. Studio della portanza in base alla prova C.B.R. (California Bearing Ratio) » 110 5. Modulo di reazione e di compressibilità » 118 6. Distribuzione dei carichi nell'ammasso » 120 CAPITOLO IV - Instabilità riguardanti il corpo stradale ed opere relative » 127 1. Premesse » 127 2. Corpo stradale e generalità sui fenomeni di instabilità ad esso relativi » 128 3. Studi sulle frane e sulle possibili classificazioni » 129 4. Sulle cause della instabilità » 133 a) Instabilità provocate dalle acque sotterranee » 134 b) Instabilità dovute a particolari condizioni orografiche, geologiche e stratigrafiche » 136 c) Instabilità dovute alle acque superficiali ed alle condizioni climatiche » 137 d) Instabilità dovute alla esecuzione di opere » 141	Indice 5. Opere relative ad instabilità riguardanti la sede stradale p. 144 a) Opere per instabilità preesistenti alla costruzione della sede stradale » 145 b) Opere per instabilità determinate dalla costruzione della sede stradale » 151 c) Opere riguardanti direttamente la stabilità del corpo stradale e dei sottofondi » 152 6. La stabilità delle scarpate » 155 PARTE SECONDA LE SOPRASTRUTTURE CAPITOLO V - I materiali stradali e loro requisiti tecnologici p. 167 Generalità sui materiali stradali » 167 A. I materiali lapidei. 1. Classificazione e caratteristiche generali » 168 2. Prove per la determinazione delle caratteristiche fisiche » 172 a) Peso specifico reale » 173 b) Peso di volume o peso specifico apparente » 174 c) Coefficiente di imbibizione » 174 d) Gelività » 176 3. Prove di caratterizzazione e di accettazione dei materiali lapidei: a) Resistenza alla compressione » 177 b) Resistenza all'usura » 178 c) Coefficiente di qualità » 179 d) Potere legante » 186 e) Coefficiente di frantumazione ed altre prove sui pietrischi e le graniglie » 187 f) Prova d'urto » 189 g) Equivalente in sabbia » 190 B. I leganti per gli usi stradali. 1. Generalità e definizioni » 192 2. Elasticità, viscosità, plasticità e visco-elasticità » 199 3. Caratteri fisico-chimici dei bitumi e dei catrami » 208 4. I prodotti bituminosi per gli usi stradali » 210

Fig. 1.9 Strade - ferrovie aeroporti, Giovanni Tesoriere, volume secondo (parte 1)

CAPITOLO I. LA DIDATTICA SULLE "INFRASTRUTTURE FERROVIARIE"

XII Indice 5. Adesione del legante alle pietre p. 215 6. Prove sui bitumi: a) Penetrazione (secondo Dow) » 219 b) Rammollimento (metodo palla-anello) » 221 c) Punto di rottura » 223 d) Duttilità » 223 e) Solubilità in solfuro di carbonio » 223 f) Volatilità » 223 g) Contenuto di paraffina » 224 h) Prova di adesione » 224 7. Suscettività termica e rigidità dei bitumi » 228 8. Influenza dei filler sulle proprietà reologiche dei bitumi » 236 9. Le prove sui bitumi liquidi, sulle emulsioni bituminose e sui catrami; norme di accettazione » 237 10. Ripetibilità e riproducibilità dei risultati di prove tecnologiche » 242 CAPITOLO VI - Le sovrastrutture per strada ordinaria » 245 <i>Premessa</i> » 245 1. I tipi tradizionali di sovrastrutture flessibili: a) Massiciata in macadam » 246 b) Massiciata con trattamento superficiale » 249 c) Massiciata a penetrazione » 250 2. Le moderne sovrastrutture flessibili; le fondazioni, gli strati di base, gli strati superficiali » 251 2.A Strato di fondazione e strato di base » 252 — Fondazione con terreno stabilizzato » 252 — La stabilizzazione terra-calce » 255 — Fondazione in terra stabilizzata a cemento » 260 — Strato di base in misto cementato » 261 — Fondazione o strato di base in terra stabilizzata con bitume » 265 — Strati di base in misto bitumato » 266 2.B Strati superficiali » 267 3. Studio granulometrico di un terreno stabilizzato » 272 4. Composizione di un conglomerato bituminoso » 278 5. Altre caratteristiche dei conglomerati bituminosi » 283 6. La prova Marshall » 284 7. Controllo della densità dei conglomerati mediante la prova Marshall » 290	Indice XIII 8. La porosità dei conglomerati bituminosi p. 294 9. Manti bituminosi di tipo speciale e procedimenti particolari » 296 10. Pavimentazioni in conglomerato di cemento » 299 11. Pavimentazioni ad elementi » 307 12. Sovrastrutture in macadam cementato » 310 13. Il gelo e le pavimentazioni stradali » 311 14. Problemi di manutenzione, Interventi e rinforzi. Il riciclaggio » 313 15. Apparecchiature e mezzi di prova sulle sovrastrutture stradali » 318 CAPITOLO VII - Il calcolo delle sovrastrutture per strada ordinaria » 322 1. Generalità sul calcolo delle pavimentazioni » 322 2. Sul comportamento reologico del conglomerato bituminoso a) La rigidità dei conglomerati bituminosi mediante prove di Creep Compliance » 326 b) Le sollecitazioni a fatica nei conglomerati bituminosi » 328 3. Variazioni termiche negli strati di una pavimentazione flessibile e loro influenza sul dimensionamento » 335 4. Il traffico sulla strada al fine del dimensionamento della sovrastruttura » 338 5. I rilevamenti su strade sperimentali » 341 6. Metodi semiempirici per il calcolo delle pavimentazioni flessibili » 344 a) Metodo di Goldbeck » 344 b) Metodo C.B.R. » 348 c) Metodo dell'Indice di Gruppo » 356 7. Metodi razionali o degli strati » 357 a) Criterio dei due strati secondo Burmister » 360 b) Teoria di Jeuffroy-Bachelez per i sistemi a tre strati » 361 c) Formule per il calcolo delle sovrastrutture a tre o più strati » 363 d) Criterio di calcolo basato sulla deflessione massima (Biroulia-Ivanov) » 366 e) Determinazione dello stato tensionale negli strati della sovrastruttura » 373 f) Scelta della tipologia di una sovrastruttura per mezzo di catalogo » 377
XIV Indice 8. Il calcolo delle pavimentazioni rigide p. 382 a) Metodo di Westergaard » 383 b) Metodo di Burmister-Pettier » 387 c) Metodo di Hogg » 387 PARTE TERZA GLI IMPIANTI PER STRADA ORDINARIA E FERROVIA CAPITOLO VIII - Impianti speciali per strada ordinaria — Autostrade p. 393 1. Le intersezioni a livello e loro sistemazione » 393 2. Corsie di accelerazione e decelerazione » 399 3. Le intersezioni a livelli separati » 404 4. La segnaletica stradale » 413 5. Le autostrade e gli impianti relativi » 417 6. Le autostrade in Italia » 422 CAPITOLO IX - Il calcolo dell'armamento ferroviario » 425 1. Generalità ed ipotesi di calcolo della rotaia » 425 2. Il terzo caso di Zimmermann » 430 3. Altri metodi di calcolo » 432 4. Applicazione sul calcolo della rotaia » 433 5. Stabilità dinamica del binario » 435 6. Stabilità trasversale della rotaia » 439 7. Il calcolo delle traverse » 447 8. Sollecitazioni del giunto di rotaia » 456 9. Una osservazione sull'applicazione del metodo di Zimmermann » 457 CAPITOLO X - Impianti per il movimento ferroviario e cenni sulle ferrovie speciali » 458 1. Apparecchi del binario: a) Intersezioni » 458 b) Deviatori o scambi » 458 c) Bivi » 463 d) Deviatori inglesi » 464 e) Comunicazioni » 464 f) Triangoli e stelle » 465	Indice XV 2. Le stazioni ferroviarie p. 467 3. Stazioni di smistamento » 473 4. Cenni sui segnali e sulla circolazione dei treni » 479 5. Ferrovie a scartamento ridotto » 481 6. Ferrovie a dentiera » 482 7. Ferrovie funicolari » 484 8. Teleferiche e funivie » 492 <i>Nota bibliografica</i> » 501 <i>Indice degli argomenti e degli autori</i> » 503

Fig. 1.10 Strade - ferrovie aeroporti, Giovanni Tesoriere, volume secondo (parte 2)

1.2 L’insegnamento delle ferrovie nei corsi delle lauree triennali e magistrali italiani

Il presente paragrafo esamina l’offerta formativa universitaria erogata sulle infrastrutture ferroviarie dalle sedi S.I.I.V. nell’ambito del SSD CEAR-03/A – “Strade, ferrovie e aeroporti”.

Il quadro risultante mostra che le discipline sulle infrastrutture ferroviarie rappresentano un argomento di fondamentale importanza nella formazione dei professionisti del futuro. L’insegnamento di tali materie, infatti, è previsto nel piano didattico dell’81% delle sedi esaminate (cfr. Fig. 1.11).

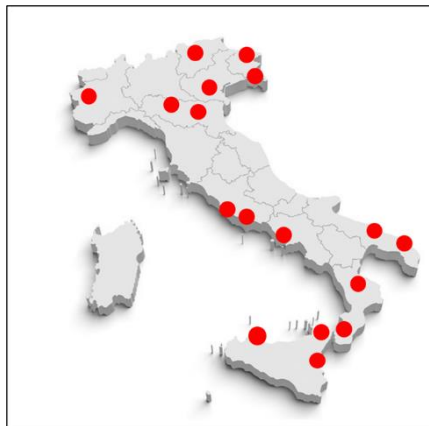


Fig. 1.11 Diffusione dell’offerta didattica sulle infrastrutture ferroviarie nelle sedi S.I.I.V. esaminate

L’insegnamento delle discipline sulle infrastrutture ferroviarie, in particolare, si sviluppa quasi esclusivamente nell’ambito dei corsi di laurea in Ingegneria Civile, a dimostrazione del forte legame con il mondo delle infrastrutture e dell’ingegneria del territorio.

Si concentra principalmente nella laurea magistrale di secondo livello, nella quale lo studente amplia la sua formazione di base e ne acquisisce una specialistica su argomenti di settore. Come riportato in Figura 1.12, l’80% dei corsi esaminati appartengono a percorsi di laurea magistrale, mentre il 20% sono offerti all’interno di percorsi di laurea triennale.

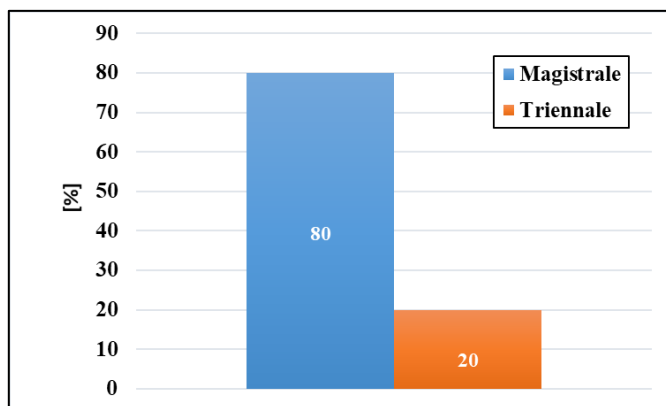


Fig. 1.12 Offerta formativa sulle infrastrutture ferroviarie nei corsi di laurea in Ingegneria Civile magistrale e triennale

Dal punto di vista della tipologia di attività formativa si tratta di corsi caratterizzanti, di tipologia B, cosa che testimonia il riconoscimento della centralità delle tematiche sulle infrastrutture ferroviarie nel percorso formativo degli ingegneri civili (cfr. Fig. 1.13).

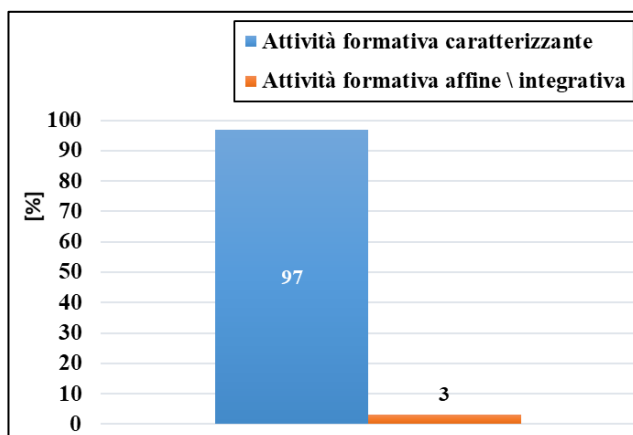


Fig. 1.13 Offerta formativa sulle infrastrutture ferroviarie in termini di corsi caratterizzanti (tipologia B) e a scelta (tipologia C\D)

Un ulteriore elemento significativo riguarda la struttura dell'insegnamento: nel 14% dei casi si tratta di insegnamenti completamente dedicati a discipline sulle infrastrutture ferroviarie. Negli altri casi queste ultime sono inserite all'interno di corsi multidisciplinari che affrontano congiuntamente anche

argomenti relativi alle strade, agli aeroporti o, più in generale, alle infrastrutture di trasporto (cfr. Fig. 1.14).

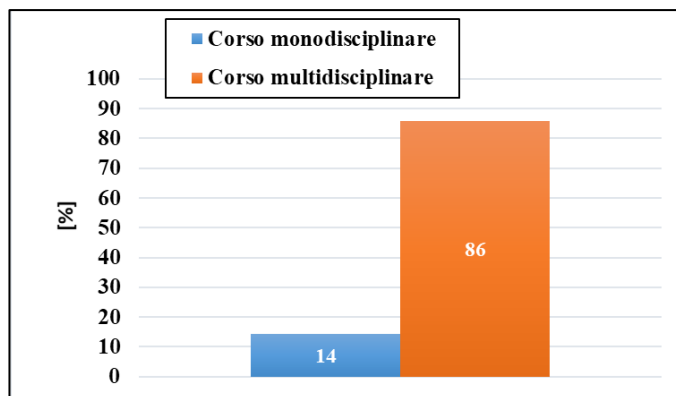


Fig. 1.14 Offerta formativa sulle infrastrutture ferroviarie in termini di corsi monodisciplinari e multidisciplinari

Per quanto concerne la lingua di erogazione dei corsi, l'80% sono impartiti in lingua italiana, il 20% in inglese. Questi ultimi si inseriscono all'interno di corsi di laurea magistrale in Civil Engineering completamente erogati in inglese.

L'analisi delle modalità di valutazione evidenzia una prevalenza per l'esame orale, adottato come unica forma di verifica nel 77% dei casi. Il 6% e il 17%, invece, prevedono una valutazione rispettivamente scritta e mista con prova scritta e orale (cfr. Fig. 1.15).

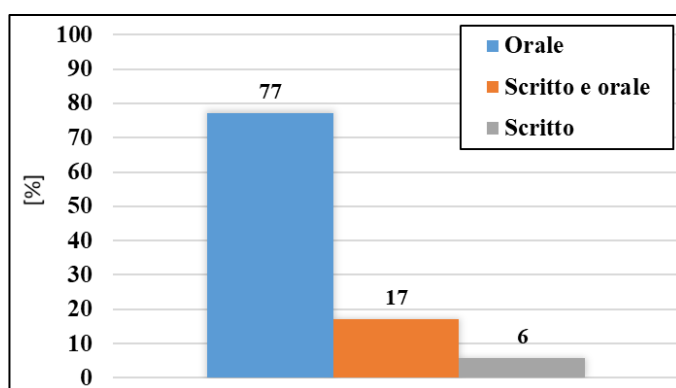


Fig. 1.15 Offerta formativa sulle infrastrutture ferroviarie in termini di modalità di valutazione finale

Degno di nota è il fatto che il 49% dei corsi prevede lo svolgimento di un'esercitazione specifica sulle discipline ferroviarie, mirata a stimolare la capacità di analisi, progettazione e problem-solving degli studenti, attraverso l'uso di strumenti tecnici e software di calcolo dedicati.

Nel 46% corsi analizzati, inoltre, l'offerta formativa si arricchisce attraverso percorsi didattici integrativi che affiancano alle tradizionali lezioni frontali attività quali seminari tematici, testimonianze da parte di professionisti del settore, visite tecniche in cantiere o presso impianti ferroviari. Tali iniziative, di carattere esperienziale, favoriscono una più profonda comprensione applicativa delle conoscenze teoriche acquisite e rafforzano il collegamento tra formazione accademica e mondo professionale.

I libri di testo più frequentemente adottati sono (cfr. Tab. 1.1):

- Bono G., Focacci C., Lanni S., La Sovrastruttura Ferroviaria. CIFI;
- Tesoriere G., Strade, Ferrovie ed Aeroporti. UTET;
- Agostinacchio M., Ciampa D., Olita S., Strade Ferrovie Aeroporti. EPC Libri;
- Profidillis V.A., Railway management and engineering. Ashgate Publishing Company.

Tab. 1.1 Riferimenti bibliografici più frequentemente adottati

Riferimento	n. corsi
Bono G., Focacci C., Lanni S. La Sovrastruttura Ferroviaria. CIFI	6
Tesoriere G. Strade Ferrovie ed Aeroporti. UTET	5
Agostinacchio M., Ciampa D., Olita S. Strade Ferrovie Aeroporti. EPC Libri	4
Profidillis V.A. Railway management and engineering, Ashgate Publishing Company	4
Mayer L. Impianti ferroviari. Ed. CIFI	3
Santagata F.A. et al. Strade. Pearson.	3
Esveld C. Modern Railway Track. Ed. MRT productions	2
Guerrieri M. Fundamentals of Railway Design., Springer Tracts in Civil Engineering	2
Guerrieri M. Infrastrutture ferroviarie, metropolitane, tranviarie e per ferrovie speciali. Maggioli Editore	2
Tocchetti A. Infrastrutture ferroviarie. Aracne	2
Benedetto A. Strade Ferrovie Aeroporti. UTET	2
Antonucci E. Infrastrutture ferroviarie. Pitagora Editrice Bologna	1
Acquaro G. La sicurezza ferroviaria. Principi, approcci e metodi nelle norme nazionali ed europee. CIFI	1
Bensalah M. et al. Railway Information Modeling RIM: the track to rail modernization., Iste/Hermes Science Pub	1
Bonnett C. Practical railway engineering. Ed. Imperial College Press	1
Dell'Acqua G. BIM per infrastrutture: il Building Information Modeling per le grandi opere lineari. EPC	1
Horonjeff R., McKelvet F., Planning and design of airports. McGraw-Hill.	1
Policicchio F. Lineamenti di infrastrutture ferroviarie., Firenze University Press	1
Ricci S. Ingegneria dei sistemi ferroviari. Tecnologie, metodi ed applicazioni. EGAF	1
Sirong Y. Principles of Railway Location and Design. Academic Press	1
Stagni E. Meccanica della locomozione. Ed. Patron	1

Analizzando con attenzione i programmi degli insegnamenti emergono alcune tematiche ricorrenti:

- criteri di progetto degli elementi dell’armamento (rotaie, traverse, organi di attacco e di giunzione) e della sovrastruttura ferroviaria (massicciata, sub-ballast), con attenzione anche alle linee ad alta velocità;
- geometria del tracciato ferroviario e del binario, in termini planimetrici ed altimetrici;
- apparecchi di binario, in termini di tipologie e funzionamento;
- progetto del corpo stradale, con particolare riferimento a rilevati, trincee ed opere d’arte;
- manutenzione e diagnostica delle linee ferroviarie, in termini di strumenti, metodi e strategie per mantenere e rilevare in continuo la linea;
- stazioni ferroviarie, in termini di classificazione e tipologie.

Nell’appendice A sono riportate le schede riepilogative dei corsi esaminati, erogati sulle infrastrutture ferroviarie dalle sedi S.I.I.V. nell’ambito del SSD CEAR-03/A – “Strade, ferrovie e aeroporti”.

In aggiunta all’offerta formativa accademica ordinaria, si segnala anche la presenza di due Master universitari di secondo livello specificamente dedicati all’ingegneria ferroviaria, attivati presso l’Università degli Studi di Roma “La Sapienza” ed il Politecnico di Bari.

Il Master di II livello in “Ingegneria delle Infrastrutture e dei Sistemi Ferroviari”, attivo presso “La Sapienza”, è promosso in collaborazione con diversi partner tra cui Ferrovie dello Stato Italiane, Alstom, ATAC, Ferrotramviaria e Siemens Mobility, e si propone di *“realizzare un percorso formativo finalizzato ad un perfezionamento scientifico multidisciplinare nel settore dei trasporti ferroviari e dell’intera mobilità, al fine di consentire ai partecipanti di acquisire conoscenze potenzialmente spendibili per soddisfare le esigenze delle amministrazioni, delle società ferroviarie, delle società di ingegneria, dei centri di ricerca e delle imprese e industrie che operano nel settore”*.

Il Master universitario di II livello in “Progettazione e Gestione di Cantieri Ferroviari”, attivato presso il Politecnico di Bari, coinvolge – come riportato sul bando – *“come main partner il CIFI (Collegio degli Ingegneri Ferroviari Italiani) e, attraverso esso, il network dell’industria ferroviaria in termini di imprese e aziende leader del settore ferroviario associate al CIFI”*. Il percorso formativo si propone di sviluppare profili professionali altamente qualificati nel settore ferroviario, capaci di coniugare competenze trasversali — quali la

tecnica ferroviaria, la sicurezza integrata, il project management e la normativa sugli appalti — con competenze specialistiche orientate alla progettazione e alla gestione dei contratti relativi alle opere ferroviarie.

Entrambi i Master rappresentano un’offerta formativa d’eccellenza nel panorama nazionale, rafforzando ulteriormente il legame tra università e mondo produttivo nel settore ferroviario.

1.3 L'insegnamento delle ferrovie nelle Università Europee

Il presente paragrafo esamina l'offerta formativa universitaria erogata sulle infrastrutture ferroviarie nelle principali università europee.

Sono stati considerati, in particolare, i seguenti atenei (cfr. Fig. 1.16):

- Germania: RWTH Aachen University - Corso di Laurea Magistrale in Railway Systems Engineering;
- Grecia: Aristotle University of Thessaloniki - Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile;
- Inghilterra: Università di Nottingham - Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile;
- Olanda: Delft University of Technology - Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile e Geoscienze;
- Spagna: Università di Granada - Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile; Università Politecnica di Madrid - Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile e Ambientale
- Svezia: KTH Royal Institute of Technology - Corso di Laurea Magistrale in Railway Engineering;
- Francia: École des Ponts ParisTech, INSA Hauts-de-France e Université de Technologie de Compiègne (UTC) - Master in Ingegneria dei sistemi di trasporto ferroviario e urbano.

Per ciascuno di seguito si riportano i caratteri principali del corso di studio ed i programmi dei corsi sulle infrastrutture ferroviarie più significativi.

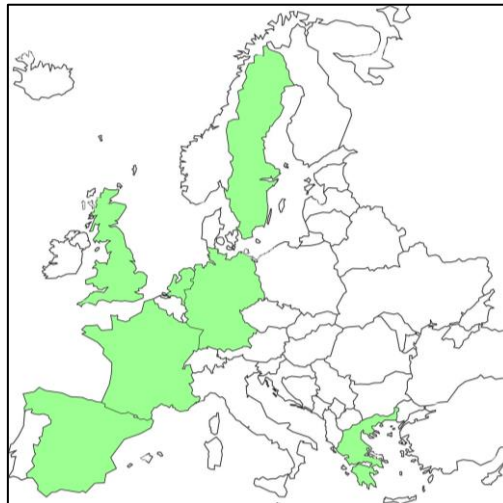


Fig. 1.16 Offerta formativa sulle infrastrutture ferroviarie nelle principali università europee

1.3.1 Germania: RWTH Aachen University - Corso di Laurea Magistrale in Railway Systems Engineering (<https://www.rse.rwth-aachen.de/>)

Come affermato sul sito web dell'ateneo tedesco *“Molte delle sfide odierne nel settore ferroviario richiedono competenze interdisciplinari ed internazionali. La nuova specializzazione in “Ingegneria dei Sistemi Ferroviari” per il corso di laurea magistrale in Ingegneria dei Trasporti e della Mobilità prepara gli studenti ad affrontare esattamente queste sfide. Questa specializzazione è uno dei primi programmi ad essere offerto completamente in inglese dalla Facoltà di Ingegneria Civile dell’Università di Aachen. Copre non solo gli aspetti infrastrutturali, ma anche l’ingegneria dei veicoli, le tecnologie di azionamento elettrico e le alimentazioni elettriche relative ai sistemi ferroviari, offrendo così un approccio integrato all’intero sistema ferroviario. Il carattere interdisciplinare del corso è realizzato grazie alla stretta collaborazione di tutti e tre gli istituti del Research Center Railways (RCR). L’Istituto di Scienze dei Trasporti e la Cattedra di Ingegneria Ferroviaria ed Economia dei Trasporti (VIA) si concentrano sugli aspetti dell’infrastruttura e dell’esercizio ferroviario. I contenuti relativi alla tecnologia dei veicoli ferroviari sono tenuti dall’Istituto di veicoli e sistemi di trasporto ferroviari (IFS). Infine, la cattedra e l’Istituto di Elettronica di Alimentazione ed Azionamenti Elettrici (ISEA) forniscono un contributo sugli aspetti relativi agli alimentatori ed agli azionamenti elettrici”*.

I requisiti di ammissione prevedono il conseguimento di una laurea triennale in ingegneria.

Di seguito, un elenco ed i contenuti dei corsi dedicati alle infrastrutture ferroviarie:

Ricerca operativa ferroviaria (5 ECTS - 45 ore di lezione + 105 ore di studio) – Curriculum Civile

Costruzione degli itinerari con metodi convenzionali. tempi di blocco e tempi minimi di percorrenza. studi di performance con modelli stocastici (modellazione della rete ferroviaria come sistema di unità di servizio, tempi di attesa programmati e non programmati, calcolo della capacità delle linee). studi sulle prestazioni con metodi simulati. progetto e dimensionamento degli elementi della rete. sistemi di gestione dell'esercizio (monitoraggio dei treni, risoluzione dei conflitti).

Principi di tecnologia dei veicoli ferroviari (6 ECTS - 60 ore di lezione + 120 ore di studio) – Curriculum Meccanico

Dinamica delle vibrazioni dei veicoli ferroviari (6 ECTS - 60 ore di lezione + 120 ore di studio) – Curriculum Meccanico

Sistemi ferroviari (6 ECTS - 60 ore di lezione + 120 ore di studio) – Curriculum Civile

Nozioni di base sui veicoli ferroviari. Elementi e dimensionamento della linea. Progetto delle stazioni ferroviarie. Ingegneria della sicurezza. Dimensionamento dei nodi. Costruzione degli orari. Nozioni di base sulla sovrastruttura ferroviaria. Nozioni di base sui metodi di costruzione dei binari. Nozioni di base sull'esercizio ferroviario e sugli itinerari. Calcolo dei tempi di marcia e di occupazione. Nozioni di base sul segnalamento. Dimensionamento e costruzione dei deviatori.

Sistemi di programmazione, esercizio e controllo ferroviario (6 ECTS - 45 ore di lezione + 135 ore di studio) – Curriculum Civile

Costruzione dell'itinerario. Diagrammi tempo/distanza/occupazione dei binari e tempi minimi di percorrenza. Valutazione della capacità con metodi probabilistici. Sistemi di controllo ferroviario (analisi del rischio, sistemi di controllo dei treni, sistema europeo di controllo dei treni (ETCS), sistemi radio, sistema europeo di gestione del traffico ferroviario (ERTMS)). Valutazione della capacità dei nodi e delle linee mediante modelli probabilistici e di simulazione.

Tecnologia di guida dei binari (6 ECTS - 60 ore di lezione + 120 ore di studio) – Curriculum Meccanico

Tecnologia applicata ai veicoli ferroviari (6 ECTS - 15 ore di lezione + 165 ore di studio) – Curriculum Meccanico

Azionamenti elettrici per la trazione ferroviaria (5 ECTS - 45 ore di lezione + 105 ore di studio) – Curriculum Elettrico

Controllo ferroviario, segnalamento e sicurezza (7 ECTS - 60 ore di lezione + 150 ore di studio) – Curriculum Civile

Controllo ferroviario, segnalamento e sicurezza. Sviluppo della tecnologia delle cabine di manovra (cabine di manovra meccaniche, cabine di manovra a

relè, cabine di manovra elettroniche). Apparecchiature di segnalamento. Rilevamento dell'occupazione dei binari. Sistemi di segnalamento. Sistemi tedeschi di protezione dei treni. Altri sistemi europei di protezione dei treni. Sistema europeo di controllo dei treni (ETCS). ETCS e capacità. Specifiche tecniche per l'interoperabilità nel settore del controllo dei treni, della protezione dei treni e del segnalamento. Stato dell'introduzione dell'ETCS nei diversi paesi. Protezione dei passaggi a livello.

Sistemi ferroviari elettrici (5 ECTS - 45 ore di lezione + 105 ore di studio) – Curriculum Civile

Sistemi di trazione. Tipologia delle macchine elettriche. Sistemi di cablaggio di controllo dell'azionamento. Tecnologie di conversione. Sistemi di batterie. Apparecchiature ad alta tensione. Freni. Guida del binario. Sospensioni. Panoramica delle tecnologie di frenatura. Pantografi. Interruttori ad alta tensione. Isolamento. Trasformatori. Treni metropolitani. Treni ad alta velocità. Sistemi a levitazione magnetica.

Integrità strutturale dei veicoli ferroviari (3 ECTS - 30 ore di lezione + 90 ore di studio) – Curriculum Meccanico

Ingegneria ferroviaria I (6 ECTS) – Curriculum Civile

Conoscenze di base dell'ingegneria dei binari ferroviari. Conoscenze di base dei metodi di costruzione dei binari. Conoscenze di base dell'ingegneria dei veicoli e della dinamica dei veicoli ferroviari. Principi di progetto delle linee ferroviarie.

Ingegneria ferroviaria II (3 ECTS) – Curriculum Civile

Criteri di progetto del tracciato e delle stazioni ferroviarie. Criteri di progetto dei passaggi a livello. Fondamenti della gestione dell'esercizio e della programmazione degli orari. Criteri di progetto dei deviatori.

Ingegneria ferroviaria III (8 ECTS) – Curriculum Civile

Controllo, segnalazione e sicurezza ferroviaria II (3 ECTS) + Ricerca operativa ferroviaria (5 ECTS).

Ingegneria ferroviaria IV (4 ECTS) – Curriculum Civile

Progettazione di sistemi ferroviari affidabili (3 ECTS - 30 ore di lezione + 60 ore di studio) – Laboratorio

Concetti di base di sicurezza, affidabilità e manutenibilità. Criteri per l'identificazione ed il trattamento dei rischi. Determinazione dei livelli di integrità appropriati per progettare sistemi ferroviari con un livello adeguato di sicurezza e protezione (analisi dei rischi). Test di affidabilità. Considerazioni sull'affidabilità durante l'esercizio, la manutenzione e il monitoraggio delle prestazioni dei sistemi ferroviari (verifica dei costi del ciclo di vita, gestione dell'obsolescenza, analisi degli incidenti, analisi dell'impatto).

Digitalizzazione nella tecnologia dei veicoli ferroviari (3 ECTS - 90 ore di lezione) – Laboratorio

Introduzione alla Sicurezza Funzionale. Il concetto di digitalizzazione della DB per la manutenzione dei veicoli. Digitalizzazione delle operazioni ferroviarie. ETCS e ATO, concetti tecnici e sfide di un'implementazione a livello nazionale. Il Digital Automatic Coupler, un progetto europeo per garantire il futuro del trasporto ferroviario di merci in Europa. Servizi digitali per le ferrovie. Monitoraggio digitale dei binari. Digital Twins per la manutenzione predittiva. Il laboratorio "Digitalizzazione nella tecnologia dei veicoli ferroviari" discute le tendenze attuali, le sfide e le prospettive della digitalizzazione delle ferrovie. È composto da lezioni, conferenze con ospiti esperti del settore e seminari, in cui gli studenti presentano e discutono le loro scoperte su un argomento scelto. Il manuale di riferimento è: Schnieder 2024. European Train Control System (ETCS).

*1.3.2 Grecia - Aristotle University of Thessaloniki - Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile
(<https://qa.auth.gr/en/class/1/600119016/M1>)*

Infrastrutture ferroviarie (4 ECTS)

Il corso di “Infrastrutture ferroviarie” si concentra sui sistemi ferroviari interurbani (alta velocità e velocità convenzionale) e principalmente sulle questioni di progettazione e costruzione. L'obiettivo è fornire agli studenti le conoscenze necessarie per comprendere i principi fondamentali della progettazione, della costruzione e dell'esercizio dei sistemi ferroviari, ma anche renderli in grado di affrontare i progetti ferroviari che incontreranno.

Il corso copre i seguenti temi: introduzione sulla ferrovia (la ferrovia come sistema di trasporto; evoluzione storica della ferrovia); La trazione ferroviaria (elementi di trazione, sistemi di trazione); Interazione ruota-rotaia (carichi del

traffico, studio della superficie di contatto ruota-rotaia, forze esercitate sul binario); Il binario (rotaie, traversine, organi di attacco, scambi e incroci); La sovrastruttura (strati di ballast, sub-ballast, sottofondo); Allineamento del binario (geometria dell'allineamento del binario, difetti del binario); Comportamento meccanico del binario (comportamento verticale, comportamento laterale); Strutture di ingegneria civile nei sistemi ferroviari (gallerie, ponti, ecc.); Impianti di binario (segnalamento, elettrificazione, passaggi a livello); Materiale rotabile; Comportamento del materiale rotabile sul binario (comportamento degli assi/dei carrelli, deragliamenti del veicolo); Treni ad alta velocità (problemi e soluzioni); Sistemi ferroviari urbani (metropolitane, tranvie) e interurbani; Manutenzione dei binari; I sistemi ferroviari in Grecia

Il manuale di riferimento è: Christos N. Pyrgidis (2016). *Railway Transportation Systems: Design, Construction and Operation*. CRC Press.

1.3.3 Inghilterra - Università di Nottingham - Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile (<https://uoncourses.org/module/CIVE4036>)

All'interno del percorso di laurea magistrale in Ingegneria Civile è possibile seguire il seguente corso dedicato alle infrastrutture ferroviarie:

Tecnologia Ferroviaria (10 ECTS)

Questo corso introduce i componenti dei binari ferroviari, convenzionali e non. Comprende l'analisi delle forze su un binario ferroviario e le conseguenti deflessioni, sollecitazioni ecc., una panoramica della ferrovia come sistema complessivo, compresi i problemi di costruzione, gli scambi e gli incroci, le modalità di degrado e la gestione della manutenzione, il segnalamento ed il controllo. Gli obiettivi formativi sono: comprendere i requisiti della progettazione dei tracciati ferroviari; fornire una visione dei processi di costruzione e manutenzione delle ferrovie; comprendere la progettazione, l'analisi e le prestazioni dei binari ferroviari; introdurre sistemi di binari alternativi per scopi diversi.

1.3.4 Olanda: Delft University of Technology - Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile e Geoscienze (Civil Engineering and Geosciences - TU Delft)

All'interno del percorso di laurea magistrale in Ingegneria Civile presso la Delft University of Technology è possibile seguire i seguenti corsi dedicati all'insegnamento dei principali aspetti relativi alle infrastrutture ferroviarie:

Ingegneria stradale e ferroviaria (15 ECTS)

Questo modulo affronta la progettazione di infrastrutture stradali e ferroviarie e la loro gestione. Inoltre, il modulo copre temi quali la resilienza in condizioni di cambiamento climatico, l'uso di materiali e tecniche di progettazione nuovi e più sostenibili, l'IoT avanzato, i metodi di monitoraggio e manutenzione basati sull'intelligenza artificiale per le infrastrutture stradali e ferroviarie, l'effetto delle nuove tecnologie sulla progettazione e la manutenzione delle infrastrutture stradali e ferroviarie, ad esempio i veicoli automatizzati/intelligenti e il truck platooning. Il modulo copre anche gli aspetti della gestione delle reti infrastrutturali stradali e ferroviarie, concentrandosi sulla relazione tra la gestione del traffico stradale e ferroviario, le prestazioni e la qualità della rete. In particolare, verranno analizzati i metodi per valutare la geometria e la sicurezza degli utenti, definendo i criteri di prestazione, il monitoraggio continuo delle prestazioni e le diverse tecniche di manutenzione. Il modulo consentirà agli studenti di valutare le condizioni dell'infrastruttura stradale/ferroviaria ed il loro effetto sul traffico, sulla capacità e sulle prestazioni nel tempo.

Gestione del traffico ferroviario (5 ECTS)

La programmazione degli itinerari ferroviari: Modelli di simulazione del traffico ferroviario microscopici e macroscopici; Tecniche di progettazione dell'itinerario e modelli di ottimizzazione; Valutazione dell'itinerario mediante simulazione microscopica; Esercizio dei treni ad alta efficienza energetica

Gestione del traffico ferroviario in tempo reale: Sistemi di assistenza alla guida; Gestione delle interruzioni; Analisi dei ritardi; Sistemi di gestione del traffico ferroviario; Individuazione e risoluzione dei conflitti; Simulazione delle strategie di gestione del traffico.

Il manuale di riferimento è: Esveld, C. (2001). Modern railway track, second edition. In Modern railway track, second edition (pp. 1-653). MRT productions.

1.3.5 Spagna: Università di Granada - Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile (<https://www.ugr.es/estudiantes/grados/grado-ingenieria-civil/ferrocarriles-construcciones-civiles>)

Ferrovie (6 ECTS)

Progettazione, pianificazione, costruzione, manutenzione delle linee ferroviarie. Implementazione di sistemi ferroviari interoperabili per le comunicazioni, il controllo del traffico e l'elettrificazione. Traversine in calcestruzzo. Organi di attacco elastici. Progettazione, costruzione e gestione delle diramazioni di accesso alle stazioni intermodali e alle aree industriali. Caratteristiche del materiale rotabile. Progettazione, costruzione, manutenzione ed esercizio di tram, ferrovie leggere, funicolari e funivie. Tecnologia dei binari saldati.

Il manuale di riferimento è: Calvo Poyo F. J. & Lloriente Gutierrez J. (2018). Ferrocarriles para la ingeniería civil. Avicam Technical Publishing House.

1.3.6 Spagna: Università Politecnica di Madrid - Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Civile e Ambientale (<https://caminos.upm.es/grado-de-ingenieria-civil-y-territorial/#1632380538163-9a9ac63a-698e>)

Ferrovie (4.5 ECTS)

Le ferrovie e i progetti ferroviari, il tracciato, traversine e organi di attacco, lunga rotaia saldata, ballast, sub-ballast, sottofondo, binari, la trazione ferroviaria, il segnalamento ferroviario, l'elettrificazione, il materiale rotabile, la manutenzione.

Il manuale di riferimento è: Calvo Poyo F. J. & Lloriente Gutierrez J. (2018). Ferrocarriles para la ingeniería civil. Avicam Technical Publishing House.

1.3.7 Svezia: KTH Royal Institute of Technology - Corso di Laurea Magistrale in Railway Engineering (<https://www.kth.se/en/studies/master/railway-engineering>)

Come affermato sul sito web dell'ateneo svedese: “La Laurea Magistrale in Ingegneria Ferroviaria del KTH Royal Institute of Technology esplora le ferrovie integrando l'ingegneria civile con l'ingegneria meccanica e l'ingegneria elettrica. I corsi si tengono sia al KTH Royal Institute of

Technology che alla University of Illinois at Urbana-Champaign. Lo scopo è quello di imparare a progettare veicoli, infrastrutture e sistemi di controllo per un trasporto sicuro, efficiente e sostenibile. Gli investimenti nelle infrastrutture ferroviarie stanno aumentando in tutto il mondo per decarbonizzare il trasporto di passeggeri e merci, generando un'ampia richiesta di ingegneri ferroviari esperti.”.

Il 1° Anno si svolge presso il KTH Royal Institute of Technology, mentre il 2° Anno presso la University of Illinois at Urbana-Champaign.

Di seguito, un elenco ed i contenuti dei corsi dedicati alle infrastrutture ferroviarie:

Trazione elettrica (6 ECTS)

Tecnologia dei veicoli ferroviari (7,5 ECTS)

Dinamica del veicolo ferroviario (8.0 ECTS)

Dinamica del veicolo ferroviario. Fondamenti dell'interazione veicolo-binario. Alcuni semplici modelli di veicolo e le relative equazioni del moto. Analisi degli autovalori, funzioni di trasferimento e altri tipi di analisi. Modelli di assali, telai di carrelli e carrozzerie. Geometria e guida degli assali e dei binari. Creep, forze di attrito, stabilità di marcia. Forze agenti sul binario. Sicurezza contro il deragliamento. Usura delle ruote e delle rotaie. Comfort di marcia. Esempi di interazione dinamica di diversi veicoli con il binario. Compito di progetto (lavoro al computer): simulazione dell'interazione dinamica tra veicolo ferroviario e binario. Visita guidata.

Sistema di segnalamento ferroviario (7,5 ECTS)

Principi generali del sistema di controllo ferroviario. Diversi tipi di sistemi ATP. Il sistema di segnalamento svedese. Capacità del traffico ferroviario. Itinerari. Sistemi di segnalamento per sistemi di trasporto di massa.

Progettazione di sistemi ferroviari con approcci problem-based (7,5 ECTS)

Obiettivi di sviluppo sostenibile. Stakeholder. Obiettivi di sostenibilità, sistema ferroviario, trasporti, innovazione, Design Thinking, risoluzione di problemi, interazione con le parti interessate.

Ingegneria ferroviaria ad alta velocità (7,5 ECTS)

Questo corso fornisce un'introduzione allo sviluppo, alla progettazione e alla costruzione di sistemi di trasporto passeggeri su rotaia ad alta velocità (HSR). Gli studenti apprenderanno le caratteristiche del sistema HSR e dei suoi sottosistemi, tra cui: i sistemi centrali (treni, alimentazione, segnali, comunicazione e controllo), il sistema dei binari e l'infrastruttura civile (opere in terra, ponti, viadotti e gallerie). Il corso copre anche la progettazione e la costruzione di base delle stazioni HSR e delle strutture di manutenzione del materiale rotabile.

Ingegneria dei binari ferroviari (8 ECTS)

L'obiettivo di questo corso è fornire allo studente la comprensione dei principi, dei concetti, delle pratiche e delle tecnologie di base dell'ingegneria ferroviaria. Il corso prevede anche lo sviluppo di un progetto completo di progetto dei binari in gruppo. Infine, è prevista un'escursione sul campo per osservare i binari ferroviari e impegnarsi in attività “pratiche” di costruzione e manutenzione dei binari. Il corso è rivolto a studenti universitari e laureati di livello superiore interessati alla progettazione, alla costruzione e alla manutenzione dei binari ferroviari e dei loro componenti.

Ingegneria del trasporto ferroviario (8 ECTS)

Il corso inizia con i fondamenti economici del trasporto ferroviario. Segue l'esame della progettazione del materiale rotabile ferroviario, degli ingranaggi e di altri componenti meccanici, della progettazione, del funzionamento e della dinamica del sistema di frenatura dei treni, nonché della progettazione, del funzionamento e della funzionalità delle locomotive. Il corso comprende l'analisi quantitativa della resistenza del treno, i requisiti di potenza ed energia, gli effetti dell'aerodinamica, della pendenza e della curvatura e il loro effetto su velocità, potenza e accelerazione. Vengono inoltre trattati la progettazione del sistema di binari, i componenti, le massicciate e la manutenzione necessari per supportare una circolazione sicura ed efficiente dei veicoli ferroviari. Il corso si conclude con un'introduzione al trasporto ferroviario passeggeri, all'alta velocità e alle sfide tecniche e operative legate all'aumento della velocità e della frequenza del servizio passeggeri sui corridoi ferroviari merci esistenti.

Progettazione e realizzazione di progetti ferroviari (7,5 ECTS)

Questo corso fornisce una comprensione completa e integrata del processo di pianificazione e progettazione di un progetto di ingegneria ferroviaria, dall'ideazione all'esercizio. Il corso si concentra su cinque elementi di un progetto ferroviario: analisi economica, pianificazione, progettazione,

costruzione e gestione. Gli studenti lavoreranno in gruppi per identificare, raccogliere e analizzare le informazioni necessarie per pianificare e gestire un nuovo progetto di costruzione ferroviaria. Sono previste escursioni sul campo per osservare e partecipare alle attività di manutenzione e costruzione dei binari ferroviari e una visita a un importante progetto di costruzione ferroviaria.

Segnalazione e controllo ferroviario (7,5 ECTS)

Questo corso tratta i sistemi di controllo e segnalazione del traffico ferroviario. Il corso inizia con un'analisi della resistenza del treno, della potenza, della velocità e del calcolo dell'accelerazione, per poi trattare i diagrammi della linea di corsa, la programmazione dei treni e il calcolo della distanza di arresto dei treni. Vengono introdotti i concetti di separazione temporale e spaziale dei treni per garantire un uso sicuro ed efficiente delle attrezzature e delle infrastrutture. Tra gli argomenti principali figurano l'autorità di movimento dei treni, i circuiti di binario e altri sistemi di monitoraggio della posizione dei treni, i sistemi di controllo dei treni, tra cui: segnali radio, segnali di via, segnali di cabina, controllo positivo dei treni (PTC) e problemi speciali di progettazione, funzionamento e controllo degli interblocchi. Viene introdotta l'analisi della capacità della linea e l'economia dei sistemi di controllo del traffico. È prevista un'escursione sul campo per osservare l'infrastruttura dei sistemi di segnalazione e un centro di controllo del traffico ferroviario.

Progetto in Ingegneria dei veicoli ferroviari (30 ECTS)

Il manuale di riferimento è: Hay 1982. Railroad Engineering – Part 1: Principles of Location and Operation.

1.3.8 *Francia - École des Ponts ParisTech, INSA Hauts-de-France e Université de Technologie de Compiègne (UTC) - Master in Ingegneria dei sistemi di trasporto ferroviario e urbano (<https://ecoledesponts.fr/en/advanced-master-railway-and-urban-transport-system-engineering>)*

Come riportato sul sito web del master francese: “*Il Mastère Spécialisé® in Railway and Urban Transport System Engineering è un programma avanzato di studio/lavoro offerto in collaborazione tra l'École des Ponts ParisTech, l'INSA Hauts-de-France e l'Université de Technologie de Compiègne (UTC). Questo corso è progettato per fornire una formazione completa nel settore dei trasporti ferroviari e urbani, integrando aspetti tecnici, economici, istituzionali e normativi sia a livello francese che europeo. Il programma si*

svolge in un formato "sandwich" di 15 mesi, che combina periodi di formazione teorica con esperienze pratiche.”.

Il curriculum comprende i seguenti moduli: Attori e istituzioni del settore ferroviario; Economia dei trasporti e analisi della domanda; Ingegneria civile, infrastrutture e manutenzione; Segnalamento, comando-controllo e sicurezza; Materiale rotabile; Trasporti urbani e regionali; Trasporto merci e logistica; Oltre ai moduli teorici, gli studenti partecipano a mini-dissertazioni, viaggi di studio e visite a siti e a un progetto finale di tesi con presentazione e discussione pubblica.

1.3.9 Offerta Formativa Europea in Ingegneria Ferroviaria: un Database di Riferimento

Un database di riferimento è stato sviluppato da Astonrail e raccoglie numerosi insegnamenti relativi al settore ferroviario, offrendo una visione d'insieme unica per studenti, docenti, professionisti ed istituzioni. Questo archivio permette di esplorare le principali tematiche trattate nei corsi universitari, le competenze sviluppate e la diffusione geografica delle discipline ferroviarie nel panorama accademico europeo. Il database rappresenta uno strumento utile non solo per l'analisi comparativa tra programmi didattici, ma anche per indirizzare riforme curriculari e percorsi di specializzazione coerenti con le esigenze del settore.

Il link seguente consente l'accesso diretto al database e può essere utilizzato come risorsa complementare per approfondire il delineato quadro Europeo relativo agli insegnamenti in ambito ferroviario:

https://astonrail.eu/dokuwiki/doku.php/astonrail_handbook:future_students:full_course_search

1.4 L'insegnamento delle ferrovie nelle università del resto del Mondo

Il presente paragrafo esamina l'offerta formativa universitaria erogata sulle infrastrutture ferroviarie nel resto del Mondo. Per una maggiore semplicità espositiva, l'offerta formativa universitaria sulle infrastrutture ferroviarie nel resto del Mondo è stata suddivisa per continente (Africa, America del nord e America del sud, Asia e Oceania) (cfr. Fig. 1.17).



Fig. 1.17 L'offerta formativa sulle infrastrutture ferroviarie nel resto del Mondo

Le tematiche relative alle infrastrutture ferroviarie trattate nell'offerta formativa universitaria nel resto del Mondo riguardano i fondamenti dell'infrastruttura ferroviaria, la dinamica ruota-binario, la progettazione geometrica e strutturale dei binari (con e senza ballast), i principi di progettazione, costruzione, gestione e manutenzione dell'infrastruttura ferroviaria, la modellazione dell'infrastruttura ferroviaria con CAD-FEM-MBS, le metodologie di ispezione e di controllo delle infrastrutture, le pratiche operative nella realizzazione e nella manutenzione delle infrastrutture ferroviarie, la progettazione, la gestione e la manutenzione dell'alimentazione elettrica, i sistemi di trasporto ferroviario, l'economia dei trasporti ferroviari, la pianificazione e la gestione del traffico ferroviario, l'ingegneria del materiale rotabile e la progettazione dei veicoli, la logistica ferroviaria, i sistemi di segnalamento, i sistemi di controllo della marcia dei treni, le telecomunicazioni, la sicurezza ferroviaria e la sua gestione, la gestione delle

emergenze. In alcuni casi vengono trattate anche la progettazione di ponti ferroviari e altre strutture, nonché la costruzione, la manutenzione e la gestione di infrastrutture ferroviarie speciali (tramvie, metropolitane, ecc.).

La didattica universitaria nel resto del Mondo viene erogata mediante lezioni frontali, lezioni in modalità telematica sincrona e asincrona (anche tramite piattaforme di apprendimento online), esercitazioni e strumenti applicativi (software di modellazione e simulazione, strumenti di progettazione assistita da computer), analisi di casi studio reali e simulazioni pratiche, normative e linee guida, e seminari con esperti del settore. Le risorse a disposizione degli studenti sono biblioteche specializzate, piattaforme di e-learning (video dimostrativi e accesso a simulazioni online, forum di discussione, ecc.), materiali forniti dalle università (normative, manuali tecnici, accesso a database tecnici, ecc.).

La Tab. 1.2 riporta per continente un quadro delle Università nel Mondo che contengono nella loro offerta didattica insegnamenti sulle infrastrutture ferroviarie e delle Università nel Mondo che contengono nella loro offerta didattica un intero corso (triennale o magistrale) dedicato all’Ingegneria Ferroviaria. In generale, le tematiche relative alle infrastrutture ferroviarie vengono trattate nelle Università di tutto il Mondo sia tramite singoli insegnamenti nei corsi di laurea triennale e magistrale in Ingegneria Civile, sia tramite corsi specialistici (corsi simili ai Master in Italia), sia tramite interi corsi di laurea (solitamente lauree magistrali).

Nel continente africano si trovano sia Università che contengono nella loro offerta didattica insegnamenti legati ai corsi di laurea triennale e magistrale in Ingegneria Civile (come quelli erogati dall’Università di Pretoria in Sudafrica), sia Università che offrono corsi di laurea triennali in Ingegneria ferroviaria (ad esempio, la Copperbelt University in Zambia e la Federal University of Transportation a Daura in Nigeria).

Anche nel continente asiatico si trovano Università statali cinesi con programmi di studio completamente dedicati all’Ingegneria ferroviaria (ad esempio, la Beijing Jiaotong University e la Southwest Jiaotong University). Singoli insegnamenti su infrastrutture ferroviarie vengono erogati da molte università. Ad esempio, la National University of Singapore offre corsi sia nella laurea triennale in Ingegneri delle Infrastrutture e Gestione dei Progetti, sia nella laurea magistrale in Ingegneria Civile con specializzazione in Digitalizzazione e Gestione delle Infrastrutture, sia nella laurea magistrale in Ingegneria Civile con specializzazione in Trasporti e Mobilità Urbana. In Asia è inoltre presente una “succursale” della Technical University of Munich

(*Technische Universität München Asia*), nella quale viene offerto un corso di laurea magistrale in Trasporti Ferroviari e Urbani (progettata per offrire insegnamenti che spaziano dall’ingegneria ferroviaria tradizionale agli aspetti complessi e interdisciplinari dei sistemi di trasporto e ferroviari.

Nel continente America del Nord (che comprende anche l’America centrale) è presente un’offerta formativa molto variegata. Vi sono percorsi di formazione ad hoc (molto spesso abilitanti ad una specifica mansione), come il “*Railway Training*” offerto dalla British Columbia Institute of Technology (in Canada) e il “*Railway Engineering*” offerto dalla University of South Carolina (negli Stati Uniti d’America). Alcune Università erogano anche corsi di tipo trasversale e aperto a tutte le tipologie di partecipanti (consulente, ingegnere, dipendente o manager di un’azienda, studente, ecc.), fornendo le competenze tecniche necessarie per contribuire in modo efficace alla gestione e alle attività accessorie nel campo dell’ingegneria ferroviaria. In generale questa tipologia di corso ha come titolo “*Introduction to Railroad Engineering and Operations*”. Esempi di questa tipologia di offerta didattica si trovano nella University of Wisconsin–Madison e nella Oklahoma State University (entrambe negli Stati Uniti d’America). Nell’America del nord si trovano corsi di laurea (triennale e magistrale) completamente dedicati all’ingegneria ferroviaria. Ad esempio: l’Ontario Tech University in Canada offre un corso di laurea triennale in Ingegneria Ferroviaria, la Penn State Altoona e la Morgan State University (Baltimora) negli Stati Uniti d’America offrono corsi di laurea triennali in ingegneria del trasporto ferroviario, l’University of Illinois a Urbana-Champaign (Stati Uniti d’America) offre (come anticipato nel paragrafo 1.3.7) un corso di laurea magistrale in Ingegneria ferroviaria insieme al Royal Institute of Technology (KTH, Svezia). Molte Università infine offrono insegnamenti nei vari corsi di laurea triennali e magistrali (prevalentemente in Ingegneria Civile). L’Università del Delaware (Stati Uniti d’America) ha nell’offerta didattica anche un master in “*Railroad Engineering and Safety*”.

Nell’America del sud sono presenti insegnamenti nei vari corsi di laurea triennali e magistrali (prevalentemente in Ingegneria Civile), ma i due esempi più importanti sul tema delle infrastrutture ferroviarie sono il corso di laurea magistrale in “*Ingeniería Ferroviaria*” presso l’Universidad Tecnológica Nacional in Argentina e in “*Engenharia Ferroviária e Metroviária*” presso l’Universidade Federal de Santa Catarina in Brasile.

L’ultimo continente è l’Oceania, dove si ritrovano esempi di tutte le tipologie di corsi fino ad ora illustrati. Ne sono esempi il corso di laurea magistrale in Ingegneria ferroviaria presso l’Engineering Institute of Technology in

Australia e il master in “*Track Infrastructure: Fundamentals for Railway Professionals*” presso la Monash University in Australia. Insegnamenti sulle tematiche ferroviarie si trovano in molte università nel continente (ad esempio nella Deakin University in Australia viene offerto il corso “*Railway Infrastructure Design and Management*”).

Tab. 1.2 Numero di Università nel Mondo con offerta didattica dedicata alle infrastrutture ferroviarie e numero di Università nel Mondo con corsi interamente dedicati alle infrastrutture ferroviarie (la ricerca è stata svolta tra i mesi di maggio e giugno 2025).

Continente	n. Università con offerta dedicata alle infrastrutture ferroviarie	n. Università con corsi dedicati solo alle infrastrutture ferroviarie
Africa	3	2
America del nord	10	4
America del sud	2	2
Asia	6	3
Oceania	3	1

Al fine di rendere ancora più efficiente il quadro dell’offerta didattica sulle infrastrutture ferroviarie nelle Università del Mondo, si riporta un elenco dei principali manuali e guide tecniche internazionali utilizzati per la progettazione, costruzione e manutenzione delle infrastrutture ferroviarie (adottati o riconosciuti a livello globale da università, aziende ferroviarie e enti di regolamentazione).

1. “**Manual for Railway Engineering**” (AREMA), editore “American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association” AREMA, (Stati Uniti d’America), lingua inglese, contenuti: geometria dei binari, sovrastruttura e sottostruttura, ponti, gallerie, drenaggio acque meteoriche, segnalamento e telecomunicazioni, manutenzione della via, utilizzo: standard di riferimento negli Stati Uniti d’America, in Canada e in molte università americane.

2. “**Codici UIC**”, editore: “Union Internationale des Chemins de fer” - UIC (Francia), lingua: multilingua (inglese, francese e tedesco), contenuti: codici per la progettazione dei binari, ponti, apparecchi del binario, carichi ammessi,

compatibilità infrastruttura-materiale rotabile, utilizzo: standard europeo ma usato anche in Africa, Asia e Sud America.

3. “**Network Rail Standards**”, editore: Network Rail (Regno Unito), lingua: inglese, contenuti: norme per la progettazione dell'infrastruttura ferroviaria (britannica), geometria, sovrastruttura, manutenzione, integrazione con sistemi elettrici/elettronici e segnalamento, utilizzo: principale riferimento nel Regno Unito (e adottato in alcune ex-colonie britanniche).

4. “**Indian Railway Works Manual**” (IRWM), editore: Ministro delle ferrovie indiano (India), lingua: inglese, contenuti: lavori civili su linee ferroviarie, costruzione e manutenzione della sovrastruttura, specifiche tecniche per materiali e procedure, utilizzo: India e altri Paesi che seguono standard indiani (ad esempio, Bangladesh e Sri Lanka).

5. “**Manual Técnico de Vías**”, editore: Ferrovías (Colombia) / Ministeri dei Trasporti in vari paesi sudamericani, lingua: spagnolo, contenuti: progettazione e costruzione della sovrastruttura, norme geometriche e manutenzione, norme regionali adattate al contesto andino e amazzonico, utilizzo: Colombia, Perù, Ecuador, Bolivia.

6. “**Australian Railway Standards**”, editore: Rail Industry Safety and Standards Board (RISSB, Australia), lingua: inglese, contenuti: norme per la progettazione e la manutenzione della sovrastruttura, valutazione del rischio, interoperabilità e sostenibilità, utilizzo: Australia, Nuova Zelanda e partner commerciali regionali.

7. “**Chinese Railway Design Code**” (TB standards), editore: Ministro dei trasporti (Cina), lingua: cinese (alcune versioni tradotte in inglese), contenuti: progettazione dell'infrastruttura per alta velocità, specifiche per fondazioni, massicciata, armamento, ponti e gallerie, utilizzo: Cina e paesi coinvolti nella Belt and Road Initiative.

8. “**U.S. Federal Railroad Administration Track Safety Standards**”, editore: Federal Railroad Administration (Stati Uniti d'America), lingua: inglese, contenuti: norme minime di sicurezza per la costruzione e la manutenzione dei binari, velocità massime, tecniche di ispezione di

manutenzione della sovrastruttura, utilizzo: Stati Uniti d’America, ma usato anche per comparazione normativa in studi accademici.

1.5 Confronto tra gli insegnamenti delle Università italiane, europee e del resto del Mondo

In generale, le tematiche e le modalità di erogazione della didattica sono le stesse, come è possibile desumere da quanto indicato nei precedenti paragrafi 1.2 (*“L’insegnamento delle ferrovie nei corsi delle lauree triennali e magistrali italiani”*), 1.3 (*“L’insegnamento delle ferrovie nelle Università Europee”*) e 1.4 (*“L’insegnamento delle ferrovie nelle università del resto del Mondo”*). La differenza principale tra gli insegnamenti erogati nelle Università italiane e nelle Università degli altri paesi del Mondo sono le note differenze tra gli standards ferroviari europei e di quelli degli altri paesi del Mondo. Infatti, esistono differenze tra alcuni standards geometrici e costruttivi/manutentivi per diverse ragioni: differenti condizioni climatiche (saldatura delle rotaie, tipologie di traverse, ecc.), differenti morfologie del territorio (aggregati per il ballast, tipologie costruttive, ecc.), carichi assiali diversi (dimensionamento, ecc.), sistemi di segnalamento e comando-controllo dei treni (voltaggio e frequenza della corrente elettrica, tipologia di fabbricazione del segnalamento, ecc.). Alcune di queste differenze sono inoltre strettamente legate a ragioni politiche piuttosto che a ragioni squisitamente tecniche.

1.6 Proposte per la didattica

1.6.1 Potenziare la formazione ferroviaria italiana: spunti dal modello europeo

Rispetto all’offerta formativa proposta dagli atenei italiani, nella quale i contenuti ferroviari sono generalmente inseriti all’interno di insegnamenti più ampi di “Strade, ferrovie e aeroporti” con un peso specifico ridotto (spesso 0,5–1 CFU su 9–12 CFU complessivi, erogati quasi esclusivamente in lingua italiana e con modalità prevalentemente teoriche/orali), i principali atenei europei propongono percorsi fortemente specialistici ed interdisciplinari in lingua inglese, con moduli dedicati alle infrastrutture ferroviarie e con un carico di ECTS sensibilmente più elevato. A titolo esemplificativo, si riportano i casi dell’RWTH Aachen University e del KTH Royal Institute of Technology in cui, per il curriculum civile, vengono erogati rispettivamente

50 ECTS e 61.5 ECTS in ambito ferroviario, comprendendo laboratori, simulazioni, visite di cantiere e progetti integrati.

Per rendere più competitiva l’offerta formativa italiana si potrebbero adottare le seguenti iniziative:

- incrementare il numero di CFU dedicati esclusivamente a tematiche ferroviarie, passando da singoli CFU a moduli da 6–9 CFU;
- introdurre attività pratiche e di laboratorio (simulazioni digitali, esercitazioni su Digital Twins, visite tecniche), già diffuse in Europa;
- aumentare l’offerta formativa erogata in lingua inglese per favorire l’internazionalizzazione e gli scambi Erasmus/industry placements;
- sviluppare collaborazioni con centri di ricerca e operatori di settore per progetti di tesi industriali e seminari specialistici.

Queste azioni consentirebbero di allineare la didattica italiana agli standard europei, rafforzando le competenze pratiche e la visibilità internazionale dei nostri atenei.

1.6.2 Potenziare la formazione ferroviaria italiana: spunti dalle Università del resto del Mondo

Guardando alle tipologie di offerta didattica, in Europa e nei restanti paesi del Mondo esse sono sostanzialmente uguali (insegnamenti, Master e corsi di laurea). Confrontando l’Italia con il resto del Mondo (Europa inclusa), si può notare come manchi un corso di laurea (triennale o magistrale) completamente dedicato alle infrastrutture ferroviarie. In Italia ciò è sopperito dalla presenza di un master perché il grado di specializzazione ad oggi richiesto non è tale da richiedere la presenza di un corso di laurea (triennale o magistrale) incentrato sulle infrastrutture ferroviarie. Tuttavia, il recente impulso dato dal Piano di Ripresa e Resilienza (PNRR) al settore delle infrastrutture ferroviarie sta spingendo le imprese che lavorano nel campo ferroviario a richiedere sempre più spesso laureati con un grado di specializzazione piuttosto elevato. Ciò potrebbe portare alla nascita di un corso di laurea magistrale in Ingegneria ferroviaria.

APPENDICE A

**Schede riepilogative dei corsi esaminati sulle infrastrutture
ferroviarie erogati dalle sedi S.I.I.V. nell’ambito del
SSD CEAR-03/A – “Strade, ferrovie e aeroporti”**

Università	Politecnico di Bari
Titolo del corso	Strade Ferrovie ed Aeroporti
Corso di Studi	Laurea Triennale in Ingegneria Civile
CFU totali \ CFU ferrovie	12 \ 1
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	No
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	Sì

Programma del corso:

- Generalità sulle infrastrutture ferroviarie: concetti base e differenze con infrastrutture stradali, vantaggi e svantaggi
- Veicolo ferroviario: la sala montata
- Sede ferroviaria: Armamento, Massicciata
- Scudatura
- Elementi del progetto planimetrico: rettifili, curve circolari, raggio minimo, relazione tra raggi, pendenze trasversali e velocità, curve di transizione (contraccollo e velocità di rollio)
- Elementi del progetto altimetrico (livellette e raccordi verticali)
- Intersezioni: scambi

Testi di riferimento:

Agostinacchio M., Ciampa D., Olita S., Strade Ferrovie Aeroporti. EPC Libri

Università	Politecnico di Bari
Titolo del corso	Costruzione di Strade, Ferrovie ed Aeroporti
Corso di Studi	Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
CFU totali \ CFU ferrovie	6 \ 1
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	No
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	No

Programma del corso:

- Generalità sulle infrastrutture ferroviarie: concetti base e differenze con infrastrutture stradali, vantaggi e svantaggi
- Veicolo ferroviario: la sala montata
- Sede ferroviaria: Armamento, Massicciata
- Segnalamento ferroviario
- Elementi del progetto planimetrico: rettifili, curve circolari, raggio minimo, relazione tra raggi, pendenze trasversali e velocità, curve di transizione (contraccolpo e velocità di rollio)
- Elementi del progetto altimetrico (livellette e raccordi verticali)
- Intersezioni: scambi

Testi di riferimento:

Agostinacchio M., Ciampa D., Olita S., Strade Ferrovie Aeroporti. EPC Libri

Università	Università di Bologna
Titolo del corso	Costruzione di strade, ferrovie ed aeroporti
Corso di Studi	Laurea Triennale in Ingegneria Civile
CFU totali \ CFU ferrovie	12 \ 1
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	No
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	Si

Programma del corso:

- strade: moto dei veicoli e stabilità in curva. Geometria stradale: andamento planimetrico, andamento altimetrico, definizione delle sezioni tipo, disegno delle sezioni trasversali e calcolo dei volumi, computo metrico e stima dei lavori. Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade. Solido stradale: rilevati e trincee. Caratterizzazione dei materiali stradali: terre e miscele di aggregati, leganti bituminosi, emulsioni bituminose, conglomerati bituminosi. Spinta delle terre. Muri di sostegno. Sovrastrutture stradali. Metodi di calcolo delle sovrastrutture stradali. Geosintetici.
- caratteristiche strutturali e funzionali delle pavimentazioni. Manutenzione delle pavimentazioni stradali. Sicurezza stradale e dispositivi di ritenuta.
- ferrovie: le reti italiana ed europea. Sovrastruttura ferroviaria: elementi compositivi dell'armamento con e senza massicciata, rotaie, organi d'attacco, traversine ballast sub-ballast e sottofondo. Gli apparecchi del binario, scambi o deviatori, e la lunga rotaia saldata. Le stazioni: ubicazione e tipologie. Manutenzione ferroviaria: rincalzatura, livellazione ed allineamento.
- aeroporti: Criteri di classificazione. Definizioni e caratteristiche geometriche degli elementi dell'area aeroportuale: taxiway, piazzali di sosta, piste di volo. Scelta dell'ubicazione dell'area aeroportuale, servitù aeroportuali e fattori che condizionano l'orientamento delle piste di volo. Sovrastrutture aeroportuali rigide e flessibili.

Testi di riferimento:

Dondi G., Lantieri C., Simone A., Vignali V., Costruzioni stradali - Aspetti progettuali e costruttivi, Ed. Hoepli

Università	Università di Bologna
Titolo del corso	Fundamentals of railway design
Corso di Studi	Laurea Magistrale in Civil Engineering
CFU totali \ CFU ferrovie	6 \ 6
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	ENG
Esercitazione	Si
Metodo di valutazione	Scritto
Didattica aggiuntiva	Si

Programma del corso:

- infrastruttura ferroviaria: veicoli ferroviari e moto di serpeggiamento. Sovrastruttura ferroviaria ed armamento (rotaie, traverse, organi di attacco e giunzione). Il binario: massicciata, sub-ballast, binari senza ballast. Termica del binario.
- manutenzione e diagnostica.
- geometria del tracciato e classificazione delle linee.
- alta velocità ferroviaria.
- progetto del corpo stradale ferroviario: rilevati e trincee. Sottopassi ferroviari e strutture di sostegno provvisorie.
- sistemi ferroviari urbani (tram e metropolitana): veicoli e loro movimento. Sovrastruttura e armamento specifici. Integrazione nel contesto urbano. Centri di mobilità. Progettazione e manutenzione delle linee urbane.

Testi di riferimento:

Tesoriere G., Strade, Ferrovie ed Aeroporti. UTET

Guerrieri M., Fundamentals of Railway Design. Springer Tracts in Civil Engineering

Sirong Y., Principles of Railway Location and Design. Academic Press

Università	Università di Bologna
Titolo del corso	Costruzioni ferroviarie M
Corso di Studi	Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
CFU totali \ CFU ferrovie	6 \ 6
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	Si
Metodo di valutazione	Scritto
Didattica aggiuntiva	Si

Programma del corso:

- l'infrastruttura ferroviaria: i veicoli ferroviari, il moto di serpeggiamento, la sovrastruttura ferroviaria, l'armamento (rotaie, traverse, organi di attacco, organi di giunzione), il binario, la massicciata, il sub-ballast, le sovrastrutture senza ballast, la termica del binario.
- il tracciato ferroviario: il moto dei veicoli ferroviari, le resistenze al moto, la dinamica del veicolo in curva, la classificazione delle linee ferroviarie, l'andamento plano-altimetrico di un tracciato ferroviario, lo scartamento, le curve di transizione, i raccordi altimetrici.
- gli apparecchi di binario.
- le stazioni ferroviarie.
- l'alta velocità ferroviaria.
- la manutenzione e la diagnostica ferroviaria.
- il progetto del corpo stradale: rilevati e trincee ferroviarie, transizioni tra rilevato ferroviario ed opera d'arte, sottopassi ferroviari ed apparecchiature di sostegno provvisorio della linea.
- i sistemi tramviari e metropolitani: i veicoli ed il loro moto, la sovrastruttura e l'armamento, l'inserimento nel contesto cittadino, il progetto della linea e la manutenzione.

Testi di riferimento:

- Bono G., Focacci C., Lanni S., La Sovrastruttura Ferroviaria. CIFI
- Bonnett C., Practical railway engineering. Ed. Imperial College Press
- Mayer L., Impianti ferroviari. Ed. CIFI

Università	Università della Calabria
Titolo del corso	Progettazione di Sistemi e Infrastrutture di Trasporto
Corso di Studi	Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
CFU totali \ CFU ferrovie	9 \ 1
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	Si
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	No

Programma del corso:

- Il trasporto ferroviario: la storia delle ferrovie, le tipologie di servizi offerti, le dotazioni infrastrutturali nazionali ed europee, la gestione del trasporto ferroviario nel quadro di riferimento europeo.
- L’armamento ferroviario: la massicciata, le rotaie, le traverse, il binario, lo scartamento, gli attacchi, le giunzioni. Il binario senza massicciata. La termica del binario e le lunghe rotaie saldate. Gli apparecchi di deviazione. La meccanica della locomozione ferroviaria: resistenze al moto, aderenza ed attrito, frenatura, sistemi di frenatura, gradi di frenatura.
- I sistemi di trazione: trazione a vapore, diesel, diesel elettrica, elettrica; sistemi di trazione innovativi. I veicoli per il trasporto dei passeggeri e delle merci. Il treno: composizione, pesi e dimensioni massime.
- Il tracciato ferroviario: l’andamento planimetrico: raggio di curvatura, rango, le curve di transito. L’andamento altimetrico: le pendenze ferroviarie, i raccordi verticali. I gradi di prestazione delle linee.
- La circolazione ferroviaria: sistemi di controllo della circolazione. Capacità delle linee e dei nodi. Metodi per il calcolo della capacità: deterministici, probabilistici, di simulazione.
- Gli impianti per il trasporto delle persone e delle merci: le stazioni passeggeri: classifica, elementi costitutivi, impianti, layout, dimensionamento. Gli impianti per il trasporto delle merci: classifica, elementi costitutivi, impianti, layout, dimensionamento. Le stazioni di smistamento: funzione, layout, impianti.
- La costruzione e la manutenzione delle linee ferroviarie: richiami sulle problematiche dell’ingegneria civile connesse alla progettazione e realizzazione del corpo stradale, delle opere d’arte minori (muri di sostegno, ponticelli, tombini) e maggiori (ponti, gallerie). I sistemi per il controllo delle caratteristiche geometriche e funzionali dell’armamento ferroviario. I criteri, le macchine ed i cantieri per la manutenzione dell’armamento.

Testi di riferimento:

Mayer L., Impianti ferroviari. Ed. CIFI

Ricci S., Ingegneria dei sistemi ferroviari. Tecnologie, metodi ed applicazioni. EGAF

Università	Università di Catania
Titolo del corso	Airport, Railway and Intermodal Infrastructures
Corso di Studi	Laurea Magistrale in Ingegneria Civile delle Acque e dei Trasporti
CFU totali \ CFU ferrovie	9 \ 4.5
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	ENG
Esercitazione	Si
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	No

Programma del corso:

- tracciati ferroviari: gestione del trasporto ferroviario, rete ferroviaria (gestori, operatori e controllori), specifiche tecniche di interoperabilità, iter progettuale.
- andamento plano-altimetrico: meccanica della locomozione, gradi di prestazione e prestazione, iscrizione in curva, svio, scartamento, calcolo del sopralzo, geometria del binario, raccordi di sopraelevazione, raccordi planimetrici, pendenze delle livellette e raccordi altimetrici, distanza dagli ostacoli, le linee per le alte velocità.
- progetto della sovrastruttura: il binario con massicciata (corpo stradale, ballast, traverse, organi di attacco e giunzione, rotaia, le lunghe rotaie saldate), il binario senza massicciata, dimensionamento della sovrastruttura (carichi, temperatura, calcolo rotaie, traverse e ballast), apparecchi del binario.
- stazioni: criteri per lo studio del piano di stazione, fasci di binari, relazioni con l'utenza.
- gestione e diagnostica: manutenzione ordinaria e straordinaria, classificazione difetti, parametri geometrici del binario, qualità del binario, strumenti di diagnostica.
- sicurezza: incidentalità, Agenzia Nazionale Sicurezza Ferroviaria, impianti e sistemi di segnalamento, gestione del rischio.

Testi di riferimento:

- Esveld C. Modern Railway Track. Ed. MRT productions
- Guerrieri M. Fundamentals of Railway Design. Springer Tracts in Civil Engineering

Università	Università La Sapienza
Titolo del corso	Infrastrutture Ferroviarie
Corso di Studi	Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
CFU totali \ CFU ferrovie	6 \ 6
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	Si
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	Si

Programma del corso:

- Introduzione: Nomenclatura. Caratteristiche del sistema ferroviario. Evoluzione storica dei sistemi ferroviari nel mondo e in Italia.
- Meccanica della locomozione: Richiami. Curve caratteristiche di trazione. Resistenze al moto. Contributo delle masse rotanti
- Geometria dei tracciati ferroviari: Definizioni di tracciato ferroviario e criteri di scelta. Richiami di geometria delle curve, delle superfici e dei solidi tridimensionali. Progettazione planimetrica e altimetrica. Richiami di cartografia e modelli digitali di terreno (DTM). Criteri di progetto geometrici, cinematici e dinamici. Condizioni geometriche per la circolazione in curva: intervallazione e interasse. I sistemi CAD, GIS e BIM per la progettazione delle infrastrutture ferroviarie. La normativa sui tracciati ferroviari.
- Gli apparecchi di binario: Scambi (deviatori) e intersezioni. Criteri di progetto.
- Caratteristiche costruttive e prestazionali dell'infrastruttura: La rotaia e gli organi di collegamento. Traverse e massicciata. Sottofondo (sub-ballast, supercompattato, ecc.).
- La progettazione dell'infrastruttura: Normativa sui lavori pubblici. Iter progettuale e relativi elaborati. Alcuni esempi di infrastrutture ferroviarie (interconnessioni, posti di movimento, stazioni)
- La sezione trasversale: elementi compositivi e tecniche costruttive. Corpo stradale in rilevato e trincea. Sezione trasversale su opera d'arte e in galleria. Materiali e tecniche costruttive
- Il dimensionamento della sovrastruttura ferroviaria e del corpo stradale: Analisi dei carichi. Caratteristiche meccaniche dei materiali. Dimensionamento massicciata, sub-ballast e sottofondo.

Testi di riferimento:

Slides del corso

Università	Università La Sapienza
Titolo del corso	Infrastrutture Viarie
Corso di Studi	Laurea Triennale in Ingegneria Civile
CFU totali \ CFU ferrovie	9 \ 0.5
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	Si
Metodo di valutazione	Scritto, Orale
Didattica aggiuntiva	No

Programma del corso:

- Aspetti tecnici dell'ingegneria delle infrastrutture in un contesto sociale, economico, ambientale e politico. Fattori che influenzano e guidano la pianificazione e il finanziamento delle infrastrutture. Natura interdipendente delle infrastrutture tra diversi settori.
- Rete e nodi: definizione e classificazione. Tipo di strada, accessibilità al territorio e mobilità veicolare. Elementi di sezione trasversale stradale. Sicurezza stradale. Strade e veicoli: caratteristiche e prestazioni del veicolo. Resistenze del veicolo. Equazione della trazione Traffico e sua relazione con le larghezze della strada.
- Elementi di progettazione geometrica. Planimetria: raggio minimo della curva, lunghezza minima rettifili tra curve composte o inverse, parametri della curva di transizione, distanza di visuale libera e di arresto per le curve curve planimetriche. Altimetria: pendenza massima, lunghezza massima livellette, visibilità altimetrica e criteri di verifica, raccordi concavi e convessi. Sezione trasversale: larghezza della carreggiata, elementi compositivi, sopraelevazione, allargamento delle curve orizzontali, banchine, elementi marginali. Legislazione stradale. Arredo urbano e altre strutture.
- Materiali stradali e dimensionamento della pavimentazione.
- Altre infrastrutture di trasporto: aeroporti e ferrovie.

Testi di riferimento:

Slides del corso

Università	Università Mediterranea - Reggio Calabria
Titolo del corso	Infrastrutture ferroviarie e infrastrutture aeroportuali ed eliportuali
Corso di Studi	Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
CFU totali \ CFU ferrovie	6 \ 6
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	Si
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	Si

Programma del corso:

- generalità sul trasporto ferroviario: cenni storici, sviluppo e consistenza della rete ferroviaria, i numeri della rete ferroviaria italiana, modello organizzativo del gruppo FS.
- la strada ferrata: corpo stradale e sovrastruttura: rilevati ferroviari, piattaforma ferroviaria, subballast, trincee, opere d'arte minori, rotaia, interazione veicolo rotaia, effetto differenziale, traverse, attacchi, ballast, organi di giunzione delle rotaie, schema di ripartizione dei carichi, termica del binario,; manutenzione della sovrastruttura.
- meccanica della locomozione: materiale rotabile, l'aderenza, le resistenze ordinarie al moto, la trazione ferroviaria, la frenatura, lo svio.
- andamento piano altimetrico di una linea ferroviaria: generalità, velocità di progetto, tracciato planimetrico dell'asse ferroviario, velocità massima in linea in funzione dei ranghi, andamento altimetrico
- i deviatori: generalità, schema dei deviatori, classificazione dei deviatori, disposizione dei deviatori, intersezioni e scambio “inglese”.
- le linee: consistenza delle linee, caratteristiche di esercizio delle linee.
- le stazioni: generalità, classificazione delle stazioni, binari delle stazioni, piani di stazione, tipologia delle stazioni, stazioni viaggiatori, stazioni merci.
- impianti per la trazione elettrica: generalità, tipologia di impianti T.E.
- impianti di segnalamento: generalità, sistemi di rilevamento automatico dello stato di occupazione del binario, sezioni di blocco, sistemi di controllo automatico della marcia del treno, impianti di segnalamento, cenni su modello di esercizio.

Testi di riferimento:

- Tesoriere G., Strade, Ferrovie ed Aeroporti. UTET, Torino
- Agostinacchio M., Ciampa D., Olita S., Strade Ferrovie Aeroporti. EPC Libri
- Policicchio F., Lineamenti di infrastrutture ferroviarie. Firenze University Press
- Esveld C. Modern Railway Track. Ed. MRT productions

Università	Università Mediterranea - Reggio Calabria
Titolo del corso	Fondamenti di ingegneria stradale e ferroviaria
Corso di Studi	Laurea in Ingegneria Meccanica
CFU totali \ CFU ferrovie	6 \ 3
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	No
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	Sì

Programma del corso:

- generalità sul trasporto ferroviario: cenni storici, sviluppo e consistenza della rete ferroviaria, i numeri della rete ferroviaria italiana, modello organizzativo del gruppo FS.
- la strada ferrata: corpo stradale e sovrastruttura, rilevati ferroviari, piattaforma ferroviaria, subballast, trincee, opere d'arte minori, rotaia, interazione veicolo rotaia, effetto differenziale, traverse, attacchi, ballast, organi di giunzione delle rotaie, schema di ripartizione dei carichi, termica del binario.
- meccanica della locomozione: materiale rotabile, l'aderenza, le resistenze ordinarie al moto, la trazione ferroviaria, la frenatura, lo svio.
- andamento piano altimetrico di una linea ferroviaria: generalità, velocità di progetto, tracciato planimetrico dell'asse ferroviario, velocità massima in linea in funzione dei ranghi, andamento altimetrico

Testi di riferimento:

- Tesoriere G., Strade, Ferrovie ed Aeroporti. UTET, Torino
- Agostinacchio M., Ciampa D., Olita S., Strade Ferrovie Aeroporti. EPC Libri
- Policicchio F., Lineamenti di infrastrutture ferroviarie. Firenze University Press
- Esveld C. Modern Railway Track. Ed. MRT productions

Università	Università di Messina
Titolo del corso	Infrastrutture Viarie
Corso di Studi	Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
CFU totali \ CFU ferrovie	9 \ 3
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	Si
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	Si

Programma del corso:

- Il rodiggio ferroviario. Le resistenze al moto. Grado di prestazione.
- Geometria del binario. Lo scartamento. Il livello trasversale. Intervia. Interasse del binario. Effetto differenziale: raggio minimo. Fenomeno dello svio. Il sopralzo in curva: criteri di progetto. Definizioni di velocità. Lo sghembo. Allineamento e livello longitudinale.
- La geometria del tracciato. Raccordi di transizione: la parabola cubica. Gli elementi geometrici del tracciato ferroviario. Le variabili dinamiche del moto. Criteri per la composizione del tracciato. Profilo longitudinale. Dispositivi del binario.
- Deviatori: tipologie. Intersezioni. Scambio in curva.
- La manutenzione ferroviaria. Definizioni delle fasi e criteri per l'individuazione delle strategie di intervento. Il programma Ecotrack. Funzioni di degrado. Treni diagnostici. Controllo qualità del binario. Organizzazione database per la gestione della manutenzione.
- Cenni sull'esercizio ferroviario. Indice di compattezza. Potenzialità di una linea ferroviaria.

Testi di riferimento:

Slides del corso

Università	Università di Messina
Titolo del corso	Costruzione di strade ferrovie e aeroporti
Corso di Studi	Laurea Triennale in Ingegneria Civile e dei Sistemi Edilizi
CFU totali \ CFU ferrovie	9 \ 1
Tipologia insegnamento	Affine/Integrativa
Lingua	IT
Esercitazione	Si
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	Si

Programma del corso:

- I sistemi di trasporto.
- Le infrastrutture di trasporto terrestre: strade e ferrovie.
- La normativa italiana stradale “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade: D.M. 05/11/2001”. Meccanica della locomozione terrestre. Il progetto del tracciato plano-altimetrico della strada.
- Le infrastrutture ferroviarie: la sede, i veicoli ferroviari, principali elementi di progettazione del tracciato. Problematiche costruttive del corpo stradale.
- Introduzione alle problematiche progettuali delle infrastrutture aeroportuali.

Testi di riferimento:

Agostinacchio M., Ciampa D., Olita S., Strade Ferrovie Aeroporti. EPC Libri

Università	Università degli Studi di Napoli Federico II
Titolo del corso	Costruzioni stradali e ferroviarie
Corso di Studi	Laurea Triennale in Ingegneria Gestionale delle Costruzioni
CFU totali \ CFU ferrovie	9 \ 1
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	Sì
Metodo di valutazione	Scritto, Orale
Didattica aggiuntiva	Sì

Programma del corso:

- la strada e la ferrovia nel territorio: concezione, progettazione e realizzazione di una strada e ferrovia; livelli di progettazione; legislazione generale e settoriale; classificazione.
- progettazione geometrica delle strade e ferrovie: interazione veicolo-guidatore-ambiente- strada/ferrovia; distanze di visibilità; criteri di progettazione geometrico-funzionale; andamento planimetrico dell’asse; andamento altimetrico dell’asse; coordinamento plano-altimetrico; sezione trasversale; introduzione al BIM.
- intersezioni stradali: classificazione delle intersezioni e criteri di scelta; tipologie di intersezioni a raso (tre e quattro bracci, rotatorie); zone di scambio; caratteristiche ed aspetti teorici fondamentali.
- materiali stradali e ferroviari: classificazione delle terre d’impiego stradale; comportamento meccanico dei materiali, dimensionamento e verifica delle sovrastrutture.

Testi di riferimento:

Mayer L., Impianti ferroviari. Ed. CIFI

Università	Università degli Studi di Napoli Federico II
Titolo del corso	Infrastructure-Building Information Modeling
Corso di Studi	Laurea Magistrale in Ingegneria Civile per l’Idraulica e i Trasporti
CFU totali \ CFU ferrovie	9 \ 2
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	ENG
Esercitazione	Si
Metodo di valutazione	Scritto, Orale
Didattica aggiuntiva	Si

Programma del corso:

- principi generali: terminologia di base e concetti fondamentali; opportunità e problematiche di utilizzo; flusso di lavoro; overview dei codici di calcolo I-BIM disponibili sul mercato.
- normativa di settore: normativa nazionale ed internazionale; modelli, elaborati e oggetti informativi per prodotti e processi; redazione di un modello informativo; figure professionali nel mondo BIM.
- modelli di base e principi di funzionamento: lavorare in un Common Data Environment; comprendere e gestire il piano di consegna delle informazioni; comprendere la gestione degli elaborati progettuali e i livelli di fabbisogno informativo.
- implementazione I-BIM per le infrastrutture stradali e ferroviarie: checklist di revisione del progetto; selezione e configurazione del CDE; qualità; scambio di dati.
- modellazione digitale del terreno: acquisizione ed elaborazione dei dati; modifica dei modelli digitali del terreno; creazione del modello digitale del terreno da dati LiDAR; creazione del modello digitale del terreno da nuvola di punti; georeferenziazione.
- modellatore stradale: tracciato plano-altimetrico; definizione delle sezioni tipo e dei vincoli progettuali; utilizzo delle civil cells; movimenti terra e computo dei materiali.
- gestione 4D e 5D: schedulazione delle attività di cantiere; clash detection; stima dei costi di progetto.

Testi di riferimento:

- Dell’Acqua G., BIM per infrastrutture. Il Building Information Modeling per le grandi opere lineari. EPC
- Bensalah M. et al., Railway Information Modeling RIM: The Track to Rail Modernization. Iste/Hermes Science Pub

Università	Università di Padova
Titolo del corso	Strade, Ferrovie ed Aeroporti
Corso di Studi	Laurea Triennale in Ingegneria Civile Laurea Professionalizzante in Tecnologie Digitali per l'Edilizia e il Territorio
CFU totali \ CFU ferrovie	6 \ 0.5
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	No
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	No

Programma del corso:

- inquadramento delle problematiche progettuali. Il progetto delle infrastrutture viarie e il quadro normativo. Tecniche e metodologie digitali per la progettazione delle infrastrutture.
- il traffico. La progettazione stradale. Normativa per la progettazione geometrica e funzionale di strade ed intersezioni. Il solido stradale: composizione, materiali, tecniche costruttive. Le pavimentazioni: composizione.
- le ferrovie. Classificazione delle linee e del traffico ferroviario. La piattaforma e l'armamento: composizione e materiali. Il tracciato planimetrico ed altimetrico: criteri progettuali.
- gli aeroporti: Classificazione. Area terminale, operativa e di manutenzione: caratteristiche fisiche. Dimensionamento delle piste. Segnaletica e impiantistica.

Testi di riferimento:

Tocchetti A., Infrastrutture ferroviarie. Roma: Aracne

Università	Università di Padova
Titolo del corso	Infrastrutture Ferroviarie ed Aeroportuali
Corso di Studi	Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
CFU totali \ CFU ferrovie	9 \ 4.5
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	Si
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	Si

Programma del corso:

- ferrovie: il sistema ferroviario in Italia e nel mondo, le normative, la gestione, la circolazione, il materiale mobile, gli impianti, le stazioni. La geometria dei tracciati ordinari e ad alta velocità. L’armamento ferroviario. Il dimensionamento della sovrastruttura (con applicazioni numeriche), la termica del binario. La manutenzione ordinaria e straordinaria delle linee.
- infrastrutture ferroviarie speciali: tramvie, metropolitane, metrobuses. sovrastrutture ed impianti.
- Aeroporti: l’aeroporto come sistema e la sua evoluzione, le normative (ICAO, EASA, ENAC), la gestione, la capacità e il traffico aereo. Meccanica del volo, gli aeromobili (caratteristiche costruttive e tipologie). Localizzazione degli aeroporti. Master plan aeroportuale. Caratteristiche fisiche e funzionali delle aree terminali, operative e di manutenzione (Annesso 14 ICAO, EASA CS, Regolamento ENAC). Le sovrastrutture: criteri di dimensionamento in relazione alla classificazione ACN/PCN, ACR/PCR. Catalogo pavimentazioni. Le opere idrauliche, la segnaletica, gli impianti. La manutenzione e la sicurezza del traffico aereo. Le aerostazioni (aree terminali passeggeri e merci, percorsi logistici operativi, smistamento bagagli, torri di controllo). Vincoli aeroportuali e valutazione del rischio. L’inquinamento acustico.
- infrastrutture aeroportuali speciali: eliporti, elisuperfici, infrastrutture STOL, VTOL, idroscali. Normativa, sovrastrutture ed impianti.

Testi di riferimento:

- Bono G., Focacci C., Lanni S., La Sovrastruttura Ferroviaria. CIFI
- Tocchetti A., Infrastrutture ferroviarie. Aracne

Università	Università di Padova
Titolo del corso	Sicurezza delle Infrastrutture di Trasporto
Corso di Studi	Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
CFU totali \ CFU ferrovie	6 \ 0.5
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	No
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	Si

Programma del corso:

- sicurezza delle infrastrutture stradali: dimensioni del fenomeno (cifre e statistiche), approccio scientifico alla sicurezza stradale (analisi di sicurezza, indicatori di incidentalità, raccolta e gestione dati, metodi di stima incidentalità attesa), quadro tecnico-normativo italiano, europeo e internazionale, gestione della sicurezza di infrastrutture stradali (analisi della rete esistente, ispezioni e individuazione contromisure, pianificazione, programmazione, attuazione e monitoraggio interventi, valutazione impatto sicurezza stradale e controllo progetti), controllori ed ispettori (compiti, designazione, formazione).
- elementi di ricostruzione della dinamica degli incidenti stradali: analisi del moto pre- e post-urto, modellazione della fase di urto, casi studio.
- sicurezza delle infrastrutture aeroportuali: safety nel dominio aeronautico, casi studio incidenti aeronautici.
- sicurezza delle infrastrutture ferroviarie: cenni.

Testi di riferimento:

Acquaro G., La sicurezza ferroviaria. Principi, approcci e metodi nelle norme nazionali ed europee. CIFI

Università	Università di Palermo
Titolo del corso	Smart mobility per città sostenibili
Corso di Studi	Laurea in Urban Design per la Città in Transizione
CFU totali \ CFU ferrovie	6 \ 0.5
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	No
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	Si

Programma del corso:

- Caratteristiche e requisiti della città sostenibile. Esempi notevoli di città sostenibili, di città green, a impatto climatico zero e di città circolari.
- Il ruolo della mobilità nella città: trend della mobilità sostenibile, condivisa e a zero-incidenti, modelli di trasporto alternativi, mobilità connessa, cooperante e automatizzata.
- Le infrastrutture per una mobilità sostenibile: reti stradali, criteri di progettazione funzionale delle strade in ambiente naturale e costruito, riferimenti normativi.
- Aspetti progettuali delle intersezioni stradali e buone pratiche. Valutazione ambientale, estetica, economica e funzionale delle intersezioni stradali urbane. Intersezioni intelligenti.
- Smart city e traffico sostenibile: gestione e monitoraggio del traffico, tecnologie ICT (Information and Communication Technologies) per la mobilità stradale sostenibile, big data nella transizione digitale della città.
- Interventi di urban design per la moderazione della velocità (traffic calming): interventi puntuali, interventi lungo corridoi, interventi coordinati, Zone 30, zone pedonali, nature-based solutions per l'ambiente urbano, piste ciclabili e micro-mobilità.
- Interventi per la sicurezza dei veicoli, dei pedoni e dei ciclisti. Valutazioni di efficacia dei trattamenti.
- Pavimentazione smart: Analisi del ciclo di vita e valutazione del costo del ciclo di vita nel progetto delle pavimentazioni stradali.
- Infrastrutture ferroviarie, nodi metropolitani, accessibilità marittima, intermodalità.

Testi di riferimento:

Santagata F.A. et al., Strade. Pearson

Università	Università di Palermo
Titolo del corso	Tecnica stradale, ferroviaria e aeroportuale
Corso di Studi	Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
CFU totali \ CFU ferrovie	9 \ 1
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	No
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	Si

Programma del corso:

- La geotecnica stradale. Caratteristiche identificative delle terre e delle rocce. Difficoltà di scavo. Classificazioni delle terre d’impiego stradale
- Caratterizzazione delle terre, classificazione e applicazioni progettuali
- Il costipamento delle terre. Studio Proctor di laboratorio. Il costipamento in cantiere: mezzi e modalità esecutive.
- I sottofondi stradali: requisiti, tecniche per strati di sottofondo, modelli di comportamento meccanico, valutazione della portanza mediante prove di carico con piastra, prove CBR, prove di modulo resiliente. Azione dell’acqua e del gelo nei sottofondi. Sistemi di drenaggio delle acque. Contenuto d’acqua per la valutazione della portanza di progetto dei sottofondi.
- I lavori di Movimento di Terra.
- Impiego di materie non convenzionali (rifiuti plastici, gomme da pneumatici in disuso etc) nella tecnica stradale: impiego negli strati del corpo stradale e della sovrastruttura.
- Sovrastrutture per strade, ferrovie e aeroporti. Requisiti richiesti e schemi tipologici per i differenti campi di impiego. Materiali per pavimentazioni flessibili e rigide
- Aggregati Lapidei. Caratteristiche (geometriche, fisico-chimiche, meccaniche) e requisiti in relazione all’impiego. Produzione e marcatura CE.
- Leganti bituminosi: Bitumi puri e modificati con polimeri, catrami, emulsioni bituminose, leganti speciali. Origine, produzione, struttura colloidale. Comportamento reologico e caratterizzazione dei bitumi mediante prove convenzionali e prove fondamentali.
- Miscele per sovrastrutture stradali, ferroviarie ed aeroportuali. Misti granulari. Misti cementati. Conglomerati bituminosi per strati di usura, collegamento e base. Conglomerati cementizi per pavimentazioni di strade ed aeroporti.
- Progetto e dimensionamento delle pavimentazioni stradali e aeroportuali.
- L’AASHO Road Test ed il metodo dell’AASHTO Guide, Catalogo italiano per il dimensionamento delle pavimentazioni stradali flessibili e rigide

Testi di riferimento:

Santagata F.A. et al., Strade. Pearson

Università	Università di Palermo
Titolo del corso	Smart road, railways and airport
Corso di Studi	Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
CFU totali \ CFU ferrovie	9 \ 1,5
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	ENG
Esercitazione	Si
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	Si

Programma del corso:

- Smart Roads: SMART solutions for Transport Infrastructure (SMARTI): visions, experiences and technologies. Road intersections and smart solutions. Smartening intersections.
- Airports and smart solutions: Airport infrastructure. Airports Planning. Airports Design. Airports Management
- Railways and smart solutions: Generality, Planning, Design and Management of railways.

Testi di riferimento:

Santagata F.A. (a cura di), AAVV. Strade. Pearson.

Benedetto A., Strade, ferrovie Aeroporti. UTET

Tesoriere G., Strade, Ferrovie, Aeroporti. UTET

Horonjeff R., McKelvet F., Planning and design of airports. McGraw-Hill.

Università	Università di Parma
Titolo del corso	Infrastrutture aeroportuali e ferroviarie
Corso di Studi	Laurea Magistrale in Ingegneria Civile e dei Sistemi Edilizi
CFU totali \ CFU ferrovie	9 \ 4.5
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	No
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	Si

Programma del corso:

- Storia delle ferrovie
- Classificazione delle linee ferroviarie
- Condizioni di moto del veicolo ferroviario
- Il tracciato ferroviario
- Andamento planimetrico della via
- Andamento altimetrico del tracciato ferroviario
- Note sul segnalamento
- Elementi dell’armamento ferroviario
- La massicciata ferroviaria
- Il sub-ballast e il corpo stradale
- I binari senza massicciata
- Gli apparecchi di comunicazione del binario
- Linee e stazioni
- Impianti del servizio trazione
- Costruzione grafica dell’orario ferroviario

Testi di riferimento:

Guerrieri M., Infrastrutture ferroviarie, metropolitane, tranviarie e per ferrovie speciali. Maggioli Editore,
 Bono G., Focacci C., Lanni S., La Sovrastruttura Ferroviaria. CIFI

Università	Università Roma Tre
Titolo del corso	Progettazione di infrastrutture ferroviarie
Corso di Studi	Laurea Magistrale in Ingegneria delle infrastrutture viarie e trasporti
CFU totali \ CFU ferrovie	6 \ 6
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	Sì
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	No

Programma del corso:

- la rete ferroviaria: la gestione e le relazioni con il territorio.
- la Sicurezza e l'interoperabilità ferroviaria. Riferimenti normativi italiani per la progettazione e per le procedure approvative.
- l'infrastruttura ferroviaria: gli elementi compositivi, principi fondamentali di funzionamento, classificazione delle linee ferroviarie, il progetto e l'esercizio.
- il progetto del tracciato ferroviario: gli input di progetto, elementi geometrici piano-altimetrici e loro dimensionamento in relazione alle prestazioni della linea.
- valutazione delle prestazioni dell'infrastruttura ferroviaria per gli interventi di manutenzione.
- nodi ferroviari e connessioni con altri sistemi di trasporto.
- cenni su trazione ferroviaria e sistemi di segnalamento e controllo.

Testi di riferimento:

Slides del corso

Università	Università del Salento
Titolo del corso	Costruzioni di Strade, Ferrovie e Aeroporti
Corso di Studi	Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
CFU totali \ CFU ferrovie	9 \ 0,5
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	No
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	No

Programma del corso:

- progetto geometrico delle strade: introduzione al D.M. 05.11.2001 “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade”. Reti stradali e standard geometrici. Principali elaborati progettuali. Criteri generali di progettazione stradale e inserimento dell'infrastruttura nel territorio: le interferenze, le opere d'arte. Progetto plano-altimetrico secondo il D.M. 05.11.2001. Verifiche normative: diagramma delle velocità, verifiche di visibilità. Progetto delle intersezioni secondo il D.M. 19.04.2006.
- corpo stradale e sovrastrutture: geotecnica stradale: richiami sulle proprietà delle terre, prove di laboratorio. Costruzione del rilevato stradale. Cenni sulle opere di sostegno. Pavimentazioni stradali. Tipologie di pavimentazioni. Materiali stradali (aggregati e leganti). Prove di laboratorio. Mix design e progetto delle pavimentazioni. Strati delle pavimentazioni stradali. Cantiere stradale: le figure interessate. Cenni su macchine e organizzazione del cantiere.
- elementi di sicurezza e sostenibilità. Elementi di sicurezza stradale. Elementi di infrastrutture per la mobilità sostenibile: percorsi ciclabili e pedonali.
- ferrovie: definizioni, concetti di base, progettazione e costruzione delle linee ferroviarie.
- Aeroporti: definizioni, concetti di base, progettazione e costruzione delle piste aeroportuali.

Testi di riferimento:

Benedetto A., Strade Ferrovie Aeroporti. UTET

Università	Politecnico di Torino
Titolo del corso	Strade, Ferrovie, Aeroporti
Corso di Studi	Laurea Triennale in Ingegneria Civile
CFU totali \ CFU ferrovie	10 \ 1
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	Si
Metodo di valutazione	Scritto, Orale
Didattica aggiuntiva	No

Programma del corso:

- tipologie di infrastrutture viarie e loro caratteristiche tecniche generali.
- organizzazione delle reti infrastrutturali, identificazione della domanda di mobilità, quantificazione e analisi dell’offerta in termini di capacità e qualità del servizio.
- caratteristiche del sistema guidatore-veicolo-strada-ambiente e modalità di interazione (pilota-velivolo-pista-ambiente per l’ambito aeroportuale).
- fondamenti di progettazione geometrica.
- fondamenti di analisi strutturale delle sovrastrutture.
- proprietà fisiche e modelli costitutivi dei materiali da costruzione per le infrastrutture (legati, stabilizzati e sciolti).
- cenni storici e principi base delle infrastrutture viarie ferrovie. progettazione geometrica, prestazioni e capacità delle linee ferroviarie.

Testi di riferimento:

Bono G., Focacci C., Lanni S., La Sovrastruttura Ferroviaria. CIFI

Università	Politecnico di Torino
Titolo del corso	Construction of transportation infrastructures
Corso di Studi	Laurea Magistrale in Ingegneria Civile e Civil Engineering
CFU totali \ CFU ferrovie	8 \ 0.75
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	ENG
Esercitazione	No
Metodo di valutazione	Scritto, orale
Didattica aggiuntiva	No

Programma del corso:

- general overview of transportation infrastructures and related design and construction processes.
- principles of quality assurance and quality control.
- soils: classification, compaction, mechanical properties.
- earthworks: embankment construction, equipment, advanced testing and modelling, soil stabilization.
- materials for the construction of transportation infrastructures: aggregates (classification, physical and mechanical properties), granular mixtures (unbound and cement-stabilized mixtures), bituminous binders (classification, empirical tests, rational tests, viscoelasticity, bituminous emulsion), bituminous and cementitious mixtures (volumetrics, compaction, types of mixtures, mix-design), recycled and innovative materials for transportation infrastructures.
- road and airport pavements: types, structural response, design principles, distress phenomena, surface characteristics, construction techniques, field tests, maintenance.
- railway tracks: components, equipment and construction, thermal behaviour.

Testi di riferimento:

Profidillis V.A., Railway management and engineering. Ashgate Publishing Company

Università	Politecnico di Torino
Titolo del corso	Infrastrutture viarie
Corso di Studi	Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
CFU totali \ CFU ferrovie	8 \ 0.75
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	No
Metodo di valutazione	Scritto, Orale
Didattica aggiuntiva	No

Programma del corso:

- progettazione geometrica delle strade: richiami sui criteri di dimensionamento plano-altimetrici dell'asse stradale con riferimento alla norma tecnica italiana, verifiche di tracciato, sezioni trasversali, barriere di sicurezza.
- intersezioni stradali: tipologie, riferimenti normativi.
- cenni sulla geometria del binario: dinamica del convoglio in curva, modelli di esercizio, curve di transizione, raccordi planimetrici e altimetrico.
- costruzione del corpo stradale: capitolato speciale d'appalto, classificazione dei terreni, costipamento, costruzione del corpo stradale, mezzi d'opera.
- sovrastrutture stradali: tipologie, aggregati, bitumi, miscele bituminose, misti granulari non legati e legati, costruzione della sovrastruttura, controlli in corso d'opera e sul manufatto finito, dimensionamento semi-empirico delle pavimentazioni flessibili.
- sovrastrutture ferroviarie: elementi costitutivi dell'armamento ferroviario, termica del binario, binario giuntato e lunga rotaia saldata, regolazione del binario in LRS, controlli sul binario.

Testi di riferimento:

Bono G., Focacci C., Lanni S., La Sovrastruttura Ferroviaria. CIFI

Università	Politecnico di Torino
Titolo del corso	Transportation Infrastructures
Corso di Studi	Laurea Magistrale in Civil Engineering
CFU totali \ CFU ferrovie	8 \ 0.75
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	ENG
Esercitazione	No
Metodo di valutazione	Scritto, Orale
Didattica aggiuntiva	No

Programma del corso:

- fundamentals of geometric design of roads: basic concepts of horizontal and vertical alignment, cross-sections, superelevation, safety barriers and other minor elements.
- intersections: fundamentals of geometric design of railways (curve equilibrium of convoy, transition curves, horizontal and vertical alignment).
- earthworks: technical specifications, soil classification, compaction, embankments, equipment, surface drainage systems.
- pavement: pavement types, materials and distresses, mechanics of materials, aggregates, foundation layers, bituminous binders and emulsions, bituminous mixtures, equipment for flexible pavement construction, control of pavement works, AASHTO method for the design of flexible pavements.
- railways: track components, track construction, thermal behavior of tracks, track control.

Testi di riferimento:

Bono G., Focacci C., Lanni S., La Sovrastruttura Ferroviaria. CIFI

Università	Politecnico di Torino
Titolo del corso	Design of Transportation Infrastructures
Corso di Studi	Laurea Magistrale in Ingegneria Civile e Civil Engineering
CFU totali \ CFU ferrovie	6 \ 1.5
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	ENG
Esercitazione	No
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	No

Programma del corso:

- introduction to transportation infrastructures in the world.
- aspects in common in the design of transportation infrastructures: computer-aided design, terrain model formation, horizontal and vertical alignment, transition curves, design levels, quantity computation and cost estimation.
- roads: principles and application of functional design, geometric design rules, horizontal/vertical coordination, safety and consistency analysis, roadside hazards and protection, intersections and interchanges.
- railways: technical characteristics of railways, vehicle/railway interaction, design principles of existing and planned lines, track layout, switches and crossings.
- airports: airport organization, aircraft performance, aircraft/runway interaction, runway design, taxiway design.

Testi di riferimento:

Profidillis V.A., Railway management and engineering. Ashgate Publishing Company

Università	Politecnico di Torino
Titolo del corso	Pavement and track engineering
Corso di Studi	Laurea Magistrale in Ingegneria Civile e Civil Engineering
CFU totali \ CFU ferrovie	8 \ 1.3
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	ENG
Esercitazione	Si
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	No

Programma del corso:

- introductory concepts to pavement and track engineering.
- structural analysis of flexible and rigid pavements.
- structural analysis of railway tracks.
- distresses and damage in flexible and rigid pavements.
- rail defects and railway track distresses.
- structural and functional design of flexible and rigid pavements for roads and airports.
- monitoring and maintenance of pavements and tracks.

Testi di riferimento:

Esvelde C., Modern Railway Track. Ed. MRT productions

Università	Politecnico di Torino
Titolo del corso	Metodi e tecnologie per la manutenzione delle infrastrutture viarie
Corso di Studi	Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
CFU totali \ CFU ferrovie	6 \ 1.8
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	No
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	No

Programma del corso:

- concetti generali: tipi di manutenzione e attività manutentive. Riferimenti normativi sulla manutenzione (UNI 10147, 13306). Il piano di manutenzione dell'opera. Indicatori di stato e curve di decadimento. LCCA come strumento di supporto per la definizione delle strategie manutentive.
- pavimentazioni stradali: Pavement management system (PMS): struttura e finalità. Raccolta dati, classificazione e gestione del database (a livello di rete e di progetto) Metodi di rilievo e valutazione delle prestazioni delle pavimentazioni. Parametri di controllo e indicatori di stato. Fenomeni di degrado e catalogazione dei dissesti. Modelli predittivi e criteri per la definizione delle priorità di intervento. Tecniche e tecnologie degli interventi manutentivi e riabilitativi. Manutenzione invernale. Pavimentazioni e giunti da ponte.
- barriere di sicurezza: richiami sulle tipologie, la classificazione e l'omologazione dei sistemi di ritenuta. Ispezioni per la valutazione dello stato di conservazione delle barriere. Interventi di ripristino/sostituzione di elementi danneggiati e installazione di nuovi dispositivi.
- segnaletica orizzontale e verticale: visibilità e leggibilità. Materiali e loro caratteristiche. Interventi di ripasso e modifica della segnaletica esistente.
- armamento ferroviario: standard di qualità geometrica del binario e parametri di dinamica di marcia. Diagnostica mobile (treni diagnostici). Descrizione della qualità geometrica del binario. Classificazione dei difetti di geometria e criteri di intervento. Interventi di rinalzata e livellamento del binario. Risanamenti puntuali. Rinnovo delle rotaie e delle traverse. Apparecchi del binario. Controllo delle grandezze caratteristiche dei deviatori e strumenti di misura. Rinnovo dei deviatori.

Testi di riferimento:

Proffidillis V.A., Railway management and engineering. Ashgate Publishing

Università	Politecnico di Torino
Titolo del corso	Management and Safety of Transportation Infrastructures
Corso di Studi	Laurea Magistrale in Ingegneria Civile e Civil Engineering
CFU totali \ CFU ferrovie	6 \ 1.8
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	ENG
Esercitazione	Si
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	No

Programma del corso:

- introduction on transportation asset management.
- Transportation Asset Management: life-cycle asset management. Fundamentals of descriptive and inference statistics, sample size and data collection methods, basic of financial mathematics. Key performance measures, performance monitoring, managing risk, investments, resource allocation.
- fundamentals of TI project evaluation.
- data collection, treatment, and modelling: inventory of TI asset; data for pavement management, maintenance, congestion and level of service, safety analysis; performance modelling of TI components; regression analysis of road and railway alignment.
- project cost analysis: project documents and drawings (cross sections) for cost analysis; parametric vs. analytic cost analysis based on project stage; elementary and composite unit costs; cost list formation. parametric estimation of construction costs; analytic estimation of construction costs; economic analysis and decision for TI asset improvements.
- active/passive safety systems for roads.
- safety systems for railways and airports.
- safety analysis and predictions: crash definition and safety performance measurements; contributing (road and human) factors to crash occurrence; general descriptive statistics; spatial data analysis identification of road crash hot spots; safety performance functions (SPF) for road elements and intersections; crash modification factors (CMF) for specific safety treatment/countermeasures; calibration of SPF and CMF from crash data; surrogate safety measurements: observational and experimental assessment.
- safety improvements: screening, diagnosis, countermeasures, economic appraisal, prioritization, safety effectiveness evaluation; safety evaluation of road projects and alternatives; intersections improvements and VRU protection; speed management.

Testi di riferimento:

Profidillis V.A., Railway management and engineering. Ashgate Publishing

Università	Università di Trento
Titolo del corso	Infrastrutture Viarie
Corso di Studi	Laurea Triennale in Ingegneria Civile
CFU totali \ CFU ferrovie	6 \ 1
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	No
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	No

Programma del corso:

- classificazione delle linee ferroviarie,
- elementi di progettazione delle linee e della sovrastruttura,
- le tranvie e le ferrovie urbane,

Testi di riferimento:

dispense del docente

Università	Università di Trento
Titolo del corso	Costruzioni di infrastrutture stradali e ferroviarie con Laboratorio
Corso di Studi	Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
CFU totali \ CFU ferrovie	10 \ 3
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	No
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	No

Programma del corso:

- Il progetto di tracciato delle ferrovie ordinarie e ad alta velocità
- La sovrastruttura,
- Interazione ruota-rotaia e analisi del deragliamento,
- Introduzione alla progettazione della sovrastruttura,
- Degrado e monitoraggio della sovrastruttura,
- Scambi e incroci,
- Linee Ferroviarie e Stazioni
- I ponti ferroviari,
- Gallerie Ferroviarie,
- Ferrovie ad alta velocità, sistemi Maglev e Hyperloop,
- Sistemi ferroviari metropolitani,
- Sistemi tranviari,
- People Mover, monorotaie e ferrovie a cremagliera

Testi di riferimento:

Guerrieri M., Infrastrutture ferroviarie, metropolitane, tranviarie e per ferrovie speciali. Maggioli Editore

Università	Università di Trieste
Titolo del corso	Strade Ferrovie e Aeroporti
Corso di Studi	Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
CFU totali \ CFU ferrovie	9 \ 2
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	Si
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	No

Programma del corso:

- l'infrastruttura ferroviaria e i veicoli ferroviari: evoluzione storica delle infrastrutture e del trasporto ferroviario, dotazione infrastrutturale e sicurezza della rete ferroviaria Italiana, normative nel settore ferroviario, corpo stradale, massicciata, traverse, rotaie, gli impianti ferroviari (cenni), classificazione delle linee ferroviarie, gradi di prestazione di una linea ferroviaria, grado di tortuosità, sezioni ferroviarie tipo, dimensioni e prestazioni dei veicoli, resistenze al moto, equazione della trazione, condizione di rotolamento di una ruota, aderenza, trazione ferroviaria.
- geometria dell'asse ferroviario: rettifili, curve a raggio costante, raggi minimi, sopraelevazione della rotaia esterna in curva, curve a raggio variabile, raccordi di sopraelevazione, velocità caratteristiche, pendenze longitudinali, raccordi verticali.

Testi di riferimento:

- Agostinacchio M., Ciampa D., Olita S., Strade Ferrovie Aeroporti. EPC Libri
- Bono G., Focacci C., Lanni S., La Sovrastruttura Ferroviaria. CIFI

Università	Università di Trieste
Titolo del corso	Trasporti Ferroviari
Corso di Studi	Laurea Magistrale in Ingegneria Civile
CFU totali \ CFU ferrovie	6 \ 6
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	Si
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	No

Programma del corso:

- Infrastruttura ferroviaria in linea e in stazione.
- Descrizione dei veicoli ferroviari.
- Segnalamento e sicurezza.
- Tecnologie abilitanti.
- Elementi della circolazione ferroviaria.
- Costruzione di un orario e stima della capacità.

Testi di riferimento:

Mayer L., Impianti ferroviari. Ed. CIFI

Università	Università di Udine
Titolo del corso	Costruzione di Strade, Ferrovie, Aeroporti
Corso di Studi	Laurea in Ingegneria Civile e Ambientale
CFU totali \ CFU ferrovie	6 \ 2
Tipologia insegnamento	Caratterizzante
Lingua	IT
Esercitazione	No
Metodo di valutazione	Orale
Didattica aggiuntiva	Sì

Programma del corso:

- strade: classificazione tecnico-funzionale ed amministrativa. Parametrizzazione del traffico. Nozioni di meccanica della locomozione. Elementi compositivi e di arredo della piattaforma. Geometria dei tracciati stradali. Norme geometriche e funzionali per la progettazione e costruzione di strade. Le pavimentazioni stradali: composizione, materiali, tecniche costruttive e criteri di dimensionamento.
- ferrovie: la sede ferroviaria, le dimensioni caratteristiche, materiali e prove sui materiali, ballast, sottoballast, traverse, rotaie ed organi di collegamento, acciai per rotaia, geometria dei tracciati ferroviari.
- aeroporti: area terminale e di manutenzione. Le infrastrutture e le sovrastrutture.

Testi di riferimento:

- Tesoriere G., Strade, Ferrovie ed Aeroporti. UTET
- Santagata F.A. (a cura di), AAVV. Strade. Pearson

2 Le principali tematiche di ricerca per le “Infrastrutture Ferroviarie”

2.1 Premessa

Il tema ferroviario rappresenta un ambito complesso e multidisciplinare, che coinvolge numerosi settori tecnici e scientifici. In questo contesto, la produzione scientifica della Società Italiana di Infrastrutture Viarie (S.I.I.V.) si è dimostrata particolarmente prolifica nel corso degli anni, offrendo un contributo significativo all'avanzamento della ricerca in ambito ferroviario. Le indagini condotte si sono sviluppate lungo i principali assi tematici del settore, mantenendosi in linea con le finalità e gli obiettivi propri del settore scientifico-disciplinare CEAR-03/A "Strade, Ferrovie e Aeroporti".

A tal fine, è stato effettuato un censimento sistematico delle pubblicazioni a carattere ferroviario prodotte dalle 29 sedi universitarie italiane affiliate alla S.I.I.V. Tale attività ha permesso di restituire una mappatura aggiornata della produzione scientifica nazionale nel settore, offrendo uno spaccato delle attuali direttrici di ricerca. Di tutte le sedi interpellate, 8 non hanno risposto alla call, e 6 hanno risposto dicendo di non avere produzione scientifica a riguardo. Le restanti 15 sedi hanno risposto alla call del Gruppo di Lavoro evidenziando la presenza di almeno 1 pubblicazione per sede.



Fig. 2.1 Sedi universitarie associate alla S.I.I.V. e rispettivo output relativo alle risposte alla call del Gruppo di Lavoro

Il censimento dei prodotti della ricerca in ambito ferroviario ha infatti portato alla raccolta di 215 pubblicazioni, di cui il 29% pubblicate negli ultimi cinque anni (dunque dal 2011), a testimonianza della recente vitalità della ricerca italiana in questo ambito. Infatti, più di un quarto della ricerca in questo settore ricade nell'ultimo quinquennio.

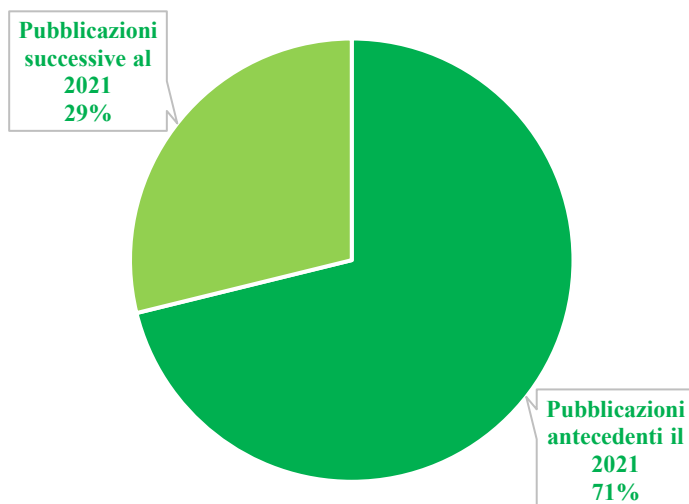


Fig. 2.2 Distribuzioni dei prodotti di ricerca prima e dopo il 2021

L'analisi dei contenuti delle pubblicazioni ha consentito di identificarne le principali linee tematiche, aggregando i contributi in quattro macroaree di ricerca:

1. Sede ferroviaria e materiali;
2. Geometria del binario, diagnostica e monitoraggio;
3. Sostenibilità ambientale e sicurezza operativa;
4. Building Information Modeling (BIM) e transizione digitale in ambito ferroviario

Tali aree tematiche sono state affiancate da un'analisi del contesto normativo di riferimento, al fine di valutare la copertura regolamentare dei diversi ambiti trattati e il grado di allineamento tra la ricerca scientifica e gli standard tecnici vigenti.

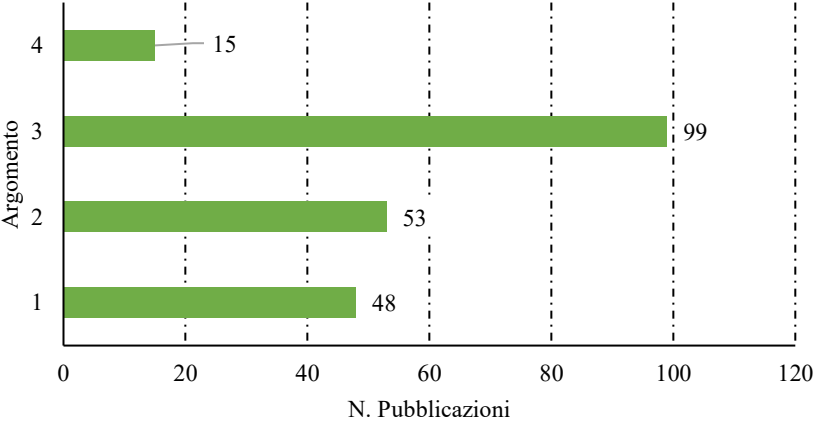


Fig. 2.3 Numero dei prodotti di ricerca per argomento

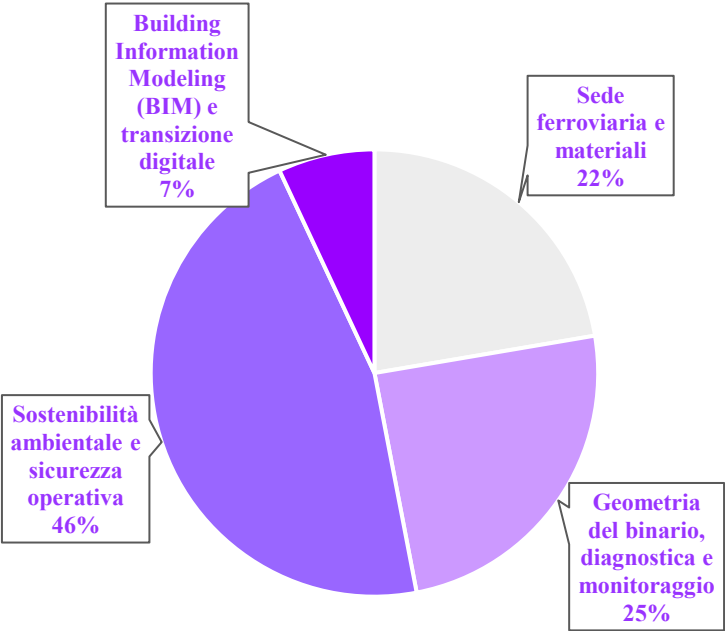


Fig. 2.4 Distribuzioni percentuale dei prodotti di ricerca per area tematica

Nell’ambito di queste tematiche, si è visto che le pubblicazioni sono ripartite nella seguente maniera. La Sede ferroviaria e la geometria del binario hanno un numero di ricerche quasi equamente ripartito (22% la prima e 25% la seconda). Il tema della Sostenibilità ambientale e della sicurezza operativa è quello che ha raccolto il maggior numero di contributi (46%) specialmente grazie al tema del Life Cycle Assessment, al segnalamento e ai modelli Risk-based. Invece, la tematica BIM e transizione digitale, essendo un tema di recente sviluppo, è rappresentato solo nel 7% dei lavori censiti. L’esiguità dei contributi in questo ambito è giustificata dalla novità dell’argomento, tanto è vero che solo 4 pubblicazioni di 15 sono antecedenti al 2020, con la pubblicazione più vecchia in questo ambito che risale al 2015.

Oltre alla classificazione tematica, le pubblicazioni sono state analizzate anche in funzione della tipologia e della destinazione editoriale. È emersa una significativa presenza di contributi su riviste scientifiche di rilievo internazionale, oltre che in atti di convegno e proceedings. Parallelamente, è risultata rilevante la produzione destinata a riviste tecniche nazionali di settore, quali Ingegneria Ferroviaria, Trasporti & Cultura e le pubblicazioni editate da Rete Ferroviaria Italiana (RFI). Ciò testimonia l'importanza attribuita non solo alla dimensione teorica della ricerca, ma anche alla sua applicabilità pratica e alla ricaduta sul mondo professionale e industriale.

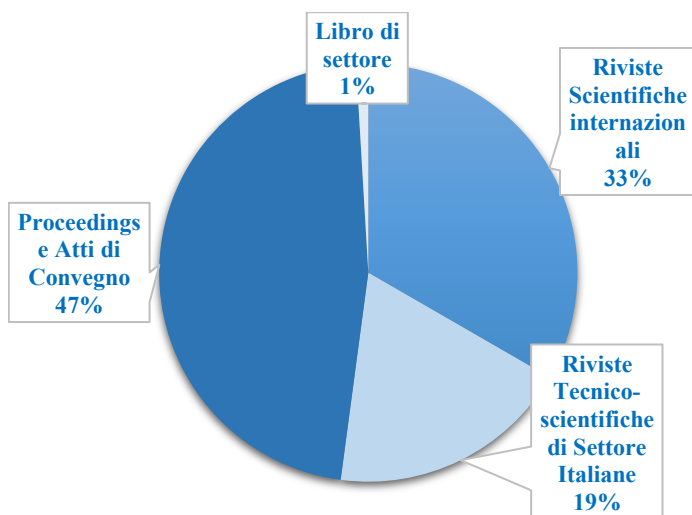


Fig. 2.5 Distribuzioni dei prodotti di ricerca per collocazione editoriale

Infine, un'ulteriore osservazione è emersa analizzando l'evoluzione temporale delle pubblicazioni: è evidente un picco di attività negli ultimi dieci anni, segno di un rinnovato interesse scientifico verso il settore ferroviario, favorito anche da nuovi filoni di ricerca legati alla sostenibilità, alla digitalizzazione e all'intermodalità nei trasporti.

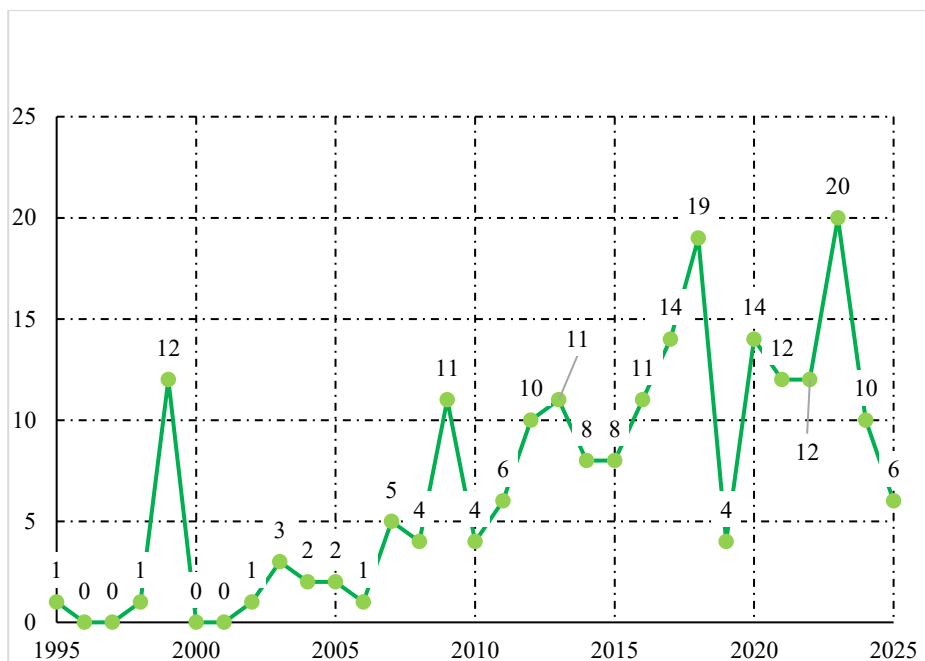


Fig. 2.6 Andamento temporale delle pubblicazioni

Un altro elemento fondamentale per la valutazione della ricerca in ambito ferroviario, intesa in senso lato, è quello relativo all'attivazione di progetti di ricerca in sinergia tra Università, Università ed Enti di ricerca o Enti nazionali o privati.

A tal uopo, si è fatto un censimento anche dei progetti di ricerca attivi o terminati recentemente, in ambito ferroviario nelle varie sedi S.I.I.V. Questo censimento ha portato alla raccolta dei seguenti contributi:

- Università di Reggio Calabria attiva sul progetto MOST - Spoke 4 (2022-2025) WP1 (Increase of capacity of railway transport), Task 1.4: Sustainable development of corridors

- Università di Trento ha fatto parte come Componente del gruppo di ricerca del Progetto “SafeMobility-C19”, Bando COVID19 UniTN (2020)
- Politecnico di Torino ha partecipato al progetto di ricerca *Ri-REVERSE - Conversione di linee ferroviarie in disuso in ciclovie: sviluppo di un dimostratore di sovrastruttura ciclabile REVERSiBile in plastica e gomma Riciclate vincolato all’armamento ferroviario.*
- Università di Bologna ha portato avanti delle ricerche anche in sinergia con il gruppo Alstom, come evidente dai seguenti progetti:
 - Contratto di ricerca della durata di 24 mesi con Progress Rail Signaling S.p.A. nell’ambito del progetto E3P – “ECM ERTMS Evolution Program”. Le attività riguardano simulazioni di performance della linea finalizzate all’analisi dell’headway per ottimizzare le dimensioni delle sezioni di blocco, con diverse soluzioni di segnalamento (ERTMS, CBTC, blocco mobile o fisso, blocco misto).
 - Contratto di ricerca della durata di 12 mesi con Alstom sul tema della valutazione delle modalità di carico e dei danni potenziali provocati sul sistema “Eurobalise”.
 - Contratto di ricerca della durata di 36 mesi con Alstom sul tema dello sviluppo dei sistemi di segnalamento ferroviario per consentire l’aumento della capacità di una linea o di un nodo, mantenendo la compatibilità con i sistemi tradizionali esistenti.
- Università di Roma Tre ha portato avanti diversi progetti di ricerca con la European Space Agency e nell’ambito PRIN, come di seguito riportato:
 - European Space Agency (ESA)-approved project “STRAIN: Sensing Transport Infrastructures” (EOhops proposal ID 46829). Year 2020
 - European Space Agency (ESA)-approved project “MOBI: Monitoring Bridges and Infrastructure Networks” (EOhops proposal ID 52479). Year 2020
 - Research Project of National Interest “EXTRA TN”, (PRIN 2017), Prot. 20179BP4SM, funded by the Italian Ministry of Education, University and Research
- L’Università di Parma sta contribuendo alla ricerca nell’ambito del progetto MOST – Spoke 4 nei seguenti WP:
 - WP1 (Increase of capacity of railway transport), Task 1.3: Resilient and sustainable railway infrastructure

- WP 3 (Digitization of railway transport), Task 3.1: Learning formal models for predictive maintenance
- WP 3 (Digitization of railway transport), Task 3.3: Wayside monitoring systems for rolling stock and infrastructure

Dai progetti di ricerca censiti si evidenzia una notevole varietà di argomenti e collaborazioni volta non solo al conseguimento di uno sviluppo metodologico, ma anche tecnico e tecnologico, in linea con i desiderata del mondo delle imprese e aziende ferroviarie.

A latere di questo censimento, si è poi fatta un’indagine sui convegni della S.I.I.V. che presentavano esplicitamente il tema ferroviario come topic di una delle sessioni di discussione. Tra questi si evidenziano il *IX Convegno S.I.I.V. di Cagliari 1999* e il *Convegno di Bari 2005 “3th International S.I.I.V. Congress S.I.I.V. 2005 | People, Land, Environment and Transport Infrastructures. Reliability and Development”*, con pubblicazioni dedicate al tema, prodotte dai ricercatori afferenti alla S.I.I.V. (oltre che un nutrito contributo di pubblicazioni in ambito ferroviario da parte di ricercatori internazionali al *Convegno di Bari 2005*). Tra questi due eventi, da segnalare anche il *“XIII Convegno Nazionale S.I.I.V. 2003 | Strade, Ferrovie, Aeroporti”* di Padova. Successivamente, nel 2007 si è tenuto un altro convegno con un’intera sessione dedicata alle ferrovie, il *“4th International S.I.I.V. Congress S.I.I.V. 2007 | Advances in Transport Infrastructures and Stakeholders Expectations”* di Palermo. A Napoli, nel 2013, in collaborazione con AIIT e CIFI si è tenuto un convegno S.I.I.V. interamente dedicato esclusivamente al tema ferroviario: *“XIX Convegno Nazionale S.I.I.V. 2013 | Tecnologie Innovative per le Infrastrutture Ferroviarie”*.

Dal censimento effettuato, si è anche avuta evidenza di tre Summer School S.I.I.V. con almeno una sessione interamente dedicata al tema ferroviario. Trattasi della S.I.I.V. Summer School (2015) – “Management and Maintenance of Civil Infrastructures”; della XIX International S.I.I.V. Summer School (2023) - “Transportation Infrastructures towards Green Transition” e della XXI International S.I.I.V. Summer School (2025) - “Transportation Infrastructures: pointing to the future”; le prime due svoltesi rispettivamente a Roma e a Perugia, e la terza a Bari. Valutando tutte le Summer School S.I.I.V. tenutesi nel corso della storia dell'associazione, altre quattro (III, VII, XIII e XV Summer School) potrebbero aver trattato il tema ferroviario essendo incentrate su tutte le infrastrutture viarie in maniera più generale. Tuttavia, al momento, non si ha un riscontro effettivo.



Fig. 2.7 Convegni e Summer School S.I.I.V. a Tema Ferroviario

In sintesi, il presente lavoro si propone di offrire un quadro organico e strutturato della produzione scientifica ferroviaria nell'ambito della S.I.I.V., restituendo una fotografia aggiornata dello stato dell'arte e suggerendo spunti per lo sviluppo futuro della ricerca. L'integrazione tra analisi tematica, inquadramento normativo e valutazione editoriale consente di cogliere le principali direttrici evolutive del settore e di promuovere una riflessione critica sui percorsi di innovazione e trasferimento tecnologico in ambito ferroviario.

2.2 Sede ferroviaria e materiali

La sede ferroviaria, intesa come l'area in cui si svolge la circolazione, comprende la sovrastruttura ferroviaria e il corpo stradale, ed è, insieme ai relativi materiali che ne determinano le caratteristiche prestazionali, funzionali e manutentive, parte integrante dell'infrastruttura ferroviaria nel suo complesso. In virtù di ciò, lo studio e la ricerca riguardo la sede ferroviarie e i relativi materiali richiede un approccio integrato e multidisciplinare che coinvolge tanti settori dell'ingegneria civile, dalla geotecnica alla meccanica dei materiali, dalla progettazione strutturale fino all'ingegneria ambientale e dei trasporti. Nel prosieguo, a partire da un inquadramento tecnico, viene fornita una panoramica critica sulla produzione scientifica italiana più recente, con particolare attenzione alle ricerche sviluppate nell'ambito della Società Italiana di Infrastrutture Viarie (S.I.I.V.).

Il contesto normativo

La sede ferroviaria rappresenta il nucleo portante dell'intero sistema infrastrutturale su cui si articola la mobilità su rotaia. Essa costituisce la piattaforma fisica e strutturale su cui poggiano e si sviluppano tutti gli elementi che compongono il binario, fungendo da interfaccia tra le azioni dinamiche indotte dal traffico ferroviario e la risposta meccanica del terreno.

La sua efficacia si misura in termini di capacità di garantire il mantenimento della geometria del binario, la trasmissione corretta dei carichi verticali e laterali e la resistenza a sollecitazioni ripetute e variabili nel tempo. La sede include l'insieme delle componenti fisiche costituite dal corpo stradale (sub-ballast, rilevati, trincee), dalla sovrastruttura (armamento e ballast), nonché dagli eventuali sistemi di drenaggio e rinforzo. Il suo corretto funzionamento è imprescindibile per assicurare la sicurezza del trasporto ferroviario, l'efficienza gestionale della linea e la continuità operativa dei servizi di trasporto. Dal punto di vista normativo, la disciplina tecnica è regolata da un insieme articolato di documenti, tra cui le Norme di Rete Ferroviaria Italiana (RFI)¹, le Specifiche Tecniche di Interoperabilità (STI)², le Linee Guida ANSFISA³ e i Capitolati Speciali d'Appalto⁴.

Le Norme RFI rappresentano il riferimento primario per la progettazione e la realizzazione delle infrastrutture ferroviarie nazionali. In particolare, la Parte II del Manuale di Progettazione delle Opere Civili raccoglie in forma organica le specifiche di settore aggiornate, offrendo un quadro normativo coerente con le direttive nazionali ed europee. La Sezione III della Parte II, dedicata al "Corpo Stradale", contiene le disposizioni progettuali relative alla piattaforma ferroviaria, consolidando e aggiornando le esperienze maturate nel tempo. All'interno del Capitolato Tecnico, la Parte II stabilisce i requisiti dei materiali da impiegare nella costruzione della sede, distinguendo per tipologia e funzione: la Sezione 05 tratta le opere in terra e gli scavi, definendone caratteristiche granulometriche e di compattazione; la Sezione 13 è dedicata al sub-ballast, di cui vengono specificati materiali, le proprietà meccaniche e le relative prestazioni; la Sezione 17 fornisce le prescrizioni tecniche relative alla granulometria e resistenza degli aggregati della massicciata.

Le Specifiche Tecniche di Interoperabilità (STI), elaborate a livello europeo, contribuiscono all'armonizzazione del sistema ferroviario nel rispetto dei principi di sicurezza e compatibilità tra infrastrutture, materiale rotabile e segnalamento. In questa ottica forniscono standard di omogeneizzazione delle linee in Europa.

Tornando alle normative italiane, le Linee Guida ANSFISA completano il quadro regolatorio introducendo criteri per la gestione del rischio, della manutenzione e della resilienza delle infrastrutture, incoraggiando un approccio orientato alla sicurezza strutturale e operativa lungo tutto il ciclo di

¹ <https://www.rfi.it/it/Sicurezza-e-tecnologie/norme-di-esercizio.html>

² <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/ALL/?uri=CELEX:32014R1299>

³ <https://www.ansfisa.gov.it/linee-guida-in-vigore>

⁴ <https://condivisionext.rfi.it/mimse/SitePages/Pagina%20iniziale.aspx>

vita dell'opera. Le moderne sfide legate alla transizione ecologica, alla resilienza delle infrastrutture e alla competitività del trasporto ferroviario rispetto ad altre modalità, impongono alla ricerca in questo settore una riflessione critica e una revisione delle soluzioni progettuali tradizionali, introducendo materiali innovativi, approcci di valutazione basati sul ciclo di vita e nuove metodologie di monitoraggio e manutenzione predittiva.

2.2.1 Lo stato dell'arte nazionale e internazionale

La ricerca nazionale ha prodotto, negli ultimi decenni, un ampio numero di studi riguardanti la caratterizzazione e il miglioramento della sede ferroviaria, con un'attenzione particolare ai materiali innovativi e sostenibili.

La sovrastruttura ferroviaria

Tra le principali componenti dell'infrastruttura ferroviaria, l'armamento svolge un ruolo centrale nel garantire le prestazioni statiche e dinamiche del binario, influenzando direttamente sicurezza, durabilità e sostenibilità dell'intero sistema. In quest'ambito, crescente attenzione è stata rivolta alla valutazione degli impatti ambientali associati alla produzione e gestione delle sue vita delle componenti della sede, tra cui le traverse in calcestruzzo precompresso, ha evidenziato come l'impiego di materiali riciclati, in sostituzione di cementi tradizionali ad alta intensità energetica, e l'adozione del trasporto ferroviario per la logistica dei manufatti possano ridurre in modo significativo il consumo di energia non rinnovabile, le emissioni climalteranti e l'impatto sull'ozono. Studi recenti hanno applicato metodologie di LCA, evidenziando come la fase di produzione delle traverse in calcestruzzo armato precompresso incida in modo preponderante sull'impronta ambientale, generando fino al 79% delle emissioni totali nel processo esecutivo di una rete ferroviaria, i cui impatti principali sono attribuibili all'impiego di cemento e acciaio. Per ridurre questa incidenza negativa sull'ambiente, sono state proposte diverse strategie di mitigazione che comprendono l'impiego di materiali riciclati, l'utilizzo di cementi alternativi ottenuti da combustibili solidi secondari, e la sostituzione del trasporto su gomma con quello ferroviario per la logistica delle traverse. Tali misure consentono una riduzione fino al 18% delle emissioni di gas serra, una diminuzione del 30% nel consumo di energia non rinnovabile, e un taglio del 50% nel potenziale di riduzione dell'ozono. Tali risultati sottolineano l'importanza di un approccio sistemico e sostenibile anche nella progettazione e gestione delle componenti puntuali dell'infrastruttura, come le traverse, al fine di migliorare l'efficienza ambientale complessiva del sistema ferroviario [1]. Inoltre, la ricerca sulle traversine ha portato alla valutazione e all'eventuale adozione di traverse

monoblocco innovative, come i modelli EGA® e HP-BB®, progettate per migliorare la distribuzione dei carichi e la durabilità della sovrastruttura. Caratterizzate da geometrie ottimizzate e materiali ad alte prestazioni, queste traverse garantiscono maggiore stabilità trasversale e ridotte deformazioni permanenti, offrendo un’evoluzione tecnologica efficace all’interno degli schemi a ballast tradizionali [2].

Anche il ballast, elemento chiave della sovrastruttura tradizionale, è stato oggetto di numerosi studi finalizzati al miglioramento delle sue prestazioni meccaniche e della sua sostenibilità nel tempo. Già in studi pionieristici, come quello di Colonna [3], era stata sottolineata l’importanza della composizione granulometrica e dell’impiego di materiali alternativi per il miglioramento prestazionale del ballast. L’impiego del ballast stabilizzato con emulsioni bituminose ha dimostrato la capacità di ridurre l’insorgenza di difetti geometrici legati alla deformazione del ballast, migliorare la coesione tra gli aggregati e limitare la contaminazione delle particelle fini. Tali proprietà risultano particolarmente vantaggiose per la conservazione della geometria del binario e la riduzione della frequenza degli interventi manutentivi [4, 5]. Le analisi condotte in ottica LCA e LCC hanno confermato la sostenibilità economica e ambientale di tale soluzione rispetto alle configurazioni tradizionali, evidenziando una riduzione significativa degli impatti ambientali legati al ciclo di vita, soprattutto in relazione ai costi di rinnovo e ai consumi energetici. Studi recenti hanno inoltre evidenziato come l’applicazione del ballast stabilizzato consenta di allungare significativamente gli intervalli tra le operazioni di manutenzione ordinaria e straordinaria, grazie a un minore degrado e assestamento del materiale, permettendo così una strategia manutentiva più efficiente e meno costosa nel tempo [6, 7].

I sistemi innovativi ballastless

Oltre ai tradizionali sistemi con ballast, la ricerca si è progressivamente orientata anche verso soluzioni ballastless, che rappresentano un’evoluzione tecnologica della sovrastruttura ferroviaria, mirata a incrementare la durabilità, ridurre i costi manutentivi e migliorare le prestazioni complessive dell’infrastruttura. Questi sistemi, basati su una soletta rigida in calcestruzzo armato o precompresso su cui vengono fissati i binari, si presentano come un’alternativa innovativa ai tradizionali tracciati con ballast tradizionale.

Gli studi condotti evidenziano come le strutture ballastless offrano una stabilità geometrica e strutturale superiore nel corso del tempo, grazie all’eliminazione degli assestamenti e cedimenti tipici del materiale granulare. Questa caratteristica si traduce in una maggiore precisione nella manutenzione del profilo e della planarità della sede ferroviaria, fattori fondamentali per la

sicurezza e la qualità del servizio nei sistemi ad alta velocità. Inoltre, tali sistemi assicurano una maggiore resistenza alle sollecitazioni orizzontali grazie all’ancoraggio diretto del binario alla soletta rigida, contrastando efficacemente fenomeni di spostamento trasversale e migliorando la stabilità laterale del tracciato. Questa configurazione consente di ridurre significativamente la necessità di interventi manutentivi e di prolungare la vita utile dell’infrastruttura, che può raggiungere i 50-60 anni.

Dal punto di vista economico, le analisi basate sul Life Cycle Costing (LCC) evidenziano che, sebbene l’investimento iniziale per le soluzioni ballastless sia più elevato rispetto a quello per i tracciati con ballast, i costi complessivi di gestione, manutenzione e rinnovo si riducono sensibilmente nel lungo periodo. Questo consente di raggiungere un punto di pareggio economico o addirittura un risparmio totale nel ciclo di vita della linea, soprattutto in scenari di traffico intenso e misto. Le valutazioni considerano inoltre gli impatti ambientali, rilevando come l’impronta ecologica di questi sistemi, pur più marcata in fase di costruzione, possa essere compensata dalla minore frequenza degli interventi manutentivi. Tuttavia, alcune limitazioni rimangono, quali il maggior costo iniziale per la realizzazione di tali soluzioni, la rigidità strutturale che può amplificare la trasmissione di vibrazioni e rumore, e le maggiori complessità progettuali e realizzative. L’impiego di tali sistemi può anche consentire un’ottimizzazione dell’andamento del tracciato ferroviario, riducendo le dimensioni delle sezioni trasversali e alleggerendo i vincoli geometrici, portando a una riduzione complessiva dei costi di progetto fino al 10-20% [8–10]. Da tali contributi si evince come la letteratura recente supporta l’adozione delle soluzioni ballastless come una tecnologia chiave per il futuro delle infrastrutture ferroviarie, in grado di conciliare elevate prestazioni tecniche con sostenibilità economica e ambientale, purché si valutino attentamente i contesti applicativi e le strategie di gestione a lungo termine [11].

Il corpo stradale – sub-ballast

La crescente complessità e le nuove sfide di resilienza delle infrastrutture ferroviarie, soprattutto in vista dell’aumento del traffico, richiedono soluzioni ingegneristiche capaci di estendere la durata di servizio e ridurre l’impatto economico e ambientale degli interventi manutentivi. In questo contesto, la ricerca nazionale ha investito molto nello studio dei sub-ballast, riconoscendone un ruolo fondamentale dal punto di vista funzionale nel garantire stabilità meccanica, drenaggio efficiente e protezione degli strati inferiori della sede ferroviaria. In questo modo, il sub-ballast contribuisce a migliorare la durabilità complessiva e la sicurezza delle linee. Il sub-ballast è

tipicamente definito come lo strato superiore del rilevato ferroviario, e la sua corretta compattazione e finitura sono essenziali per garantire una superficie regolare e uniformità di appoggio per il ballast, oltre a fornire una capacità portante adeguata, stabilità alle variazioni stagionali di temperatura e uno smaltimento efficace delle acque meteoriche.

Tradizionalmente, per le linee ferroviarie ordinarie, il sub-ballast è costituito da aggregati asciutti disposti in configurazioni a mono-strato, con una miscela di aggregati grossolani e medi integrati con sabbia fine. Negli ultimi decenni, i mix granulari di sub-ballast sono stati progressivamente stabilizzati a mezzo di leganti idraulici, favorendo così la riduzione degli spessori necessari e limitando i difetti geometrici e i costi manutentivi. Tra i leganti, si è anche testato il bitume, adottato per similitudine con la tecnologia delle pavimentazioni stradali, che ha trovato graduale diffusione in Europa dagli anni '70, e con le prime applicazioni pilota in Italia sulla linea ad alta velocità “Direttissima Roma – Firenze”. A partire dagli anni 2000, con la realizzazione diffusa di linee ferroviarie ad alta velocità e alta capacità, questa soluzione è diventata lo standard costruttivo attualmente impiegato in Italia [12]. L'integrazione di materiali riciclati come il fresato d'asfalto (RAP) e il polverino di gomma (CR) nelle miscele bituminose per sub-ballast ha evidenziato un miglioramento delle proprietà meccaniche, come la rigidità dinamica e la resistenza a fatica, oltre a una significativa riduzione degli impatti ambientali legati alla produzione. L'impiego di RAP e CR consente di ridurre la quantità di materiali vergini utilizzati, di limitare il conferimento in discarica di materiali di risulta e di contenere le emissioni legate ai processi industriali di produzione delle miscele, in linea con i principi dell'economia circolare promossi dal Green Deal europeo [13]. Numerosi studi hanno approfondito le caratteristiche prestazionali del sub-ballast, evidenziandone l'importanza per la stabilità meccanica e la durabilità della sede ferroviaria. Praticò et al. (2009) hanno messo in luce, attraverso test di densità, il legame tra compattazione e performance dei materiali bituminosi utilizzati nel sub-ballast, sottolineando come la densità influenzi significativamente le proprietà [14]. Successivamente, gli stessi autori hanno analizzato in dettaglio la relazione tra densità e comportamento delle miscele bituminose calde (HMA) impiegate nel sub-ballast, confermando l'importanza di una corretta lavorazione e posa per assicurare elevate prestazioni nel tempo.

Dal punto di vista della sostenibilità ambientale e dell'efficienza economica, Bressi et al. (2018) hanno condotto una valutazione del ciclo di vita di diverse miscele bituminose per sub-ballast, includendo i già citati materiali riciclati [15]. I risultati hanno mostrato come l'uso di materiali rigenerati possa ridurre significativamente l'impatto ambientale delle opere, promuovendo così

soluzioni più sostenibili senza compromettere le prestazioni. L'impiego del polverino di gomma, in termini di mitigazione delle vibrazioni generate dal traffico ferroviario, si è dimostrato vantaggioso evidenziando un'efficace riduzione delle vibrazioni trasmesse, confermata da misurazioni effettuate lungo una tratta sperimentale della linea ad alta velocità Torino-Milano [16]. Parallelamente, Cantisani et al. (2011) hanno analizzato l'influenza dei vari elementi costituenti il corpo stradale, analizzando la generazione e la propagazione delle vibrazioni, proponendo un modello bidimensionale a masse concentrate che include anche lo strato di sub-ballast supercompattato, utile per valutare e ottimizzare le prestazioni antivibranti della sede. Il comportamento viscoelastico degli strati della sede ferroviaria è stato studiato mediante modelli predittivi che integrano caratteristiche meccaniche dei materiali, carichi di traffico e condizioni climatiche. Tali modelli consentono una stima accurata della vita utile dell'infrastruttura e supportano una pianificazione manutentiva più efficace e sostenibile, favorendo un approccio ingegneristico basato sulle prestazioni e sull'ottimizzazione delle risorse [17].

Rinforzo e stabilizzazione del corpo stradale: Jet Grouting e geosintetici

Nel contesto del miglioramento delle prestazioni del corpo stradale, la ricerca ha approfondito anche le tecniche per la stabilizzazione e il rinforzo dei terreni di scarsa portanza mediante il Jet Grouting, al fine di aumentare la sicurezza e la durabilità delle opere [18–20]. Inoltre, estendendo l'applicazione del Jet Grouting ai micropali jet-grouted si è osservata una efficace e conveniente stabilizzazione del rilevato ferroviario, riducendo significativamente le deformazioni verticali del terreno, senza alterare la distribuzione delle sollecitazioni nella struttura. Questi risultati sono confermati da analisi numeriche condotte tramite il metodo agli elementi finiti su modelli di binario in esercizio [21].

Un ruolo di crescente importanza è stato anche riconosciuto ai geosintetici, in particolare alle geogriglie, impiegati come elementi di rinforzo capaci di migliorare le prestazioni strutturali (contenimento degli spostamenti verticali della sovrastruttura e miglioramento della ripartizione dei carichi ciclici) della sede ferroviaria e di contribuire alla sostenibilità del sistema. L'inserimento di questi materiali tra gli strati della sede, in particolare tra sub-ballast e sottofondo, consente di aumentare la resistenza al taglio dell'interfaccia e di ridurre la deformabilità verticale dell'intero pacchetto strutturale. Studi numerici basati su modelli agli elementi finiti hanno evidenziato che le geogriglie rinforzano i sottofondi deboli, migliorando la stabilità complessiva della sede ferroviaria, riducendo gli assestamenti e mitigando gli effetti di erosione e degrado. Questi materiali agiscono come elementi di rinforzo,

distribuendo in modo più uniforme i carichi ciclici trasmessi dal traffico ferroviario e ritardando i processi di degrado della sovrastruttura, con conseguente aumento della durabilità e affidabilità dell'infrastruttura nel tempo. L'effetto positivo del rinforzo con geosintetici si manifesta in modo particolare in condizioni di sottofondo a bassa portanza, dove la loro presenza consente una significativa riduzione delle deformazioni verticali e un miglioramento delle prestazioni strutturali. Ciò contribuisce all'allungamento della vita utile residua della linea ferroviaria, riducendo la necessità di interventi manutentivi frequenti e costosi [22, 23].

Rilevamento e diagnostica del degrado dei materiali della sede ferroviaria

Nell'ambito dello studio dei materiali costituenti la sede ferroviaria, in particolare del ballast, si è progressivamente affermata l'esigenza di disporre di strumenti in grado di rilevarne in modo continuo e non distruttivo lo stato fisico e prestazionale. In questo contesto, la Ground Penetrating Radar (GPR) si è imposta come tecnica diagnostica di riferimento, grazie alla sua capacità di fornire informazioni dettagliate sulla composizione, la granulometria e le condizioni di degrado del ballast. Negli ultimi anni, numerosi contributi scientifici hanno approfondito l'uso del GPR attraverso indagini sperimentali, simulazioni numeriche e approcci integrati, delineando un quadro metodologico maturo per l'impiego sistematico di questa tecnologia nella manutenzione predittiva dell'infrastruttura. Uno dei primi passi fondamentali è rappresentato dalla caratterizzazione elettromagnetica del ballast in condizioni controllate di laboratorio. Tosti et al. (2016) hanno mostrato come parametri quali la disposizione dei pietrischi, la frequenza centrale delle antenne e il tipo di sistema radar impiegato influenzino in modo significativo la permittività dielettrica relativa misurata. Questo ha implicazioni dirette sulla lettura e interpretazione delle riflessioni radar nei tracciati acquisiti in campo, suggerendo la necessità di una taratura accurata delle misure rispetto al contesto specifico. Successivamente, gli studi di Brancadoro et al. (2017) hanno evidenziato come la distribuzione granulometrica del ballast possa essere stimata in modo indiretto attraverso l'analisi del segnale GPR, validata con tecniche di image analysis e simulazioni FDTD (Finite Difference Time Domain) condotte con il software gprMax. È stata infatti identificata una correlazione fra la frequenza di picco dello spettro riflesso e il diametro equivalente degli aggregati [24]. Tali approcci, sviluppati in ambiente di laboratorio, aprono nuove prospettive per il monitoraggio in situ della degradazione granulometrica (segregazione, impaccamento, contaminazione da fine). Parallelamente, Tosti et al. (2017) hanno dimostrato come la riflessione del segnale radar possa essere utilizzata, insieme alle simulazioni

FDTD, per stimare le proprietà dielettriche degli strati infrastrutturali in ambito stradale e ferroviario. Il confronto tra le risposte simulate e quelle acquisite ha permesso di affinare i modelli interpretativi, aumentando l'affidabilità delle analisi di campo [25]. Un ulteriore passo avanti nella modellazione numerica è stato compiuto da Brancadoro et al. (2017) e Benedetto et al. (2016), i quali hanno implementato un modello tridimensionale della massicciata generato con approccio Random Sequential Adsorption (RSA), in grado di riprodurre la geometria e il grado di compattazione realistico del ballast. Il modello è stato calibrato rispetto a materiali contaminati (come suoli fini classificati A4 secondo AASHTO) per simulare condizioni di degrado e fouling [26, 27]. La possibilità di confrontare segnali sintetici e reali ha permesso la validazione sperimentale dei modelli e la creazione di un archivio virtuale di casi di studio difficilmente replicabili su scala reale. In questa direzione si inserisce anche il contributo di Guerrieri e Parla (2013), che propongono una procedura ad alta efficienza per la determinazione della granulometria del ballast tramite metodi di riconoscimento delle immagini, evidenziando ulteriormente il potenziale delle tecniche non distruttive nella caratterizzazione avanzata dei materiali della sede ferroviaria [28]. Queste ricerche dimostrano come l'integrazione tra indagini radar, modellazione numerica e tecniche di analisi avanzata stia delineando nuovi standard per la diagnostica del ballast, rendendoli strumenti strategici per la manutenzione predittiva e la gestione evoluta dell'infrastruttura ferroviaria [24, 25, 29].

Contemporaneamente all'evoluzione delle tecnologie diagnostiche, numerosi studi hanno affrontato il tema del degrado della sede ferroviaria in relazione all'esercizio e alle condizioni ambientali, con l'obiettivo di supportare strategie di manutenzione predittiva fondate su modelli prestazionali. Di Mascio, Loprencipe e Moretti (2013) hanno proposto una metodologia di calcolo per valutare il degrado strutturale del corpo stradale ferroviario in funzione del traffico e delle condizioni climatiche prevalenti. Tale approccio consente di stimare l'evoluzione delle prestazioni nel tempo, permettendo al gestore infrastrutturale di pianificare interventi manutentivi coerenti con il livello di servizio desiderato e le risorse disponibili [30]. In una visione prospettica, Loprencipe, Di Mascio e Ranzo (2009) hanno invece discusso le caratteristiche e le prestazioni attese per le sovrastrutture ferroviarie del futuro, evidenziando come soluzioni innovative, in particolare nei casi in cui la configurazione progettuale lo consenta, possano offrire vantaggi significativi rispetto ai sistemi tradizionali con ballast [31]. Tali visioni si allineano all'attuale orientamento verso infrastrutture resilienti e durevoli,

capaci di rispondere con efficacia alle crescenti esigenze di mobilità e sostenibilità.

Evoluzione infrastrutturale e innovazioni progettuali

Dal punto di vista dell'evoluzione infrastrutturale, diversi contributi tecnico-divulgativi hanno approfondito casi di studio significativi nel panorama nazionale, con implicazioni rilevanti anche per la progettazione e la gestione della sede ferroviaria. Tra questi, i lavori di Pasetto (2007) e Giacomello (2017) hanno descritto progetti strategici come il Tunnel del Brennero e il Terzo Valico dei Giovi, inseriti nei corridoi TEN-T europei e concepiti secondo i più recenti standard costruttivi [32, 33]. In particolare, Giacomello (2017) ha illustrato come il Terzo Valico, attraverso soluzioni geometriche ottimizzate e sistemi avanzati di controllo e segnalamento, miri a superare i limiti prestazionali delle linee esistenti, potenziando la capacità di traffico lungo l'asse Milano-Genova. Ulteriori approfondimenti progettuali emergono dagli studi dedicati al riutilizzo di tracciati ferroviari dismessi e allo sviluppo di nuove linee in aree di pregio ambientale. Pasetto, Pasquini, Baliello e Giacomello (2017) hanno analizzato la fattibilità tecnica ed economica di una nuova linea ferroviaria nelle Dolomiti venete, ipotizzando un collegamento tra Calalzo, Cortina e Dobbiaco [34]. Il progetto, pensato per incentivare il traffico passeggeri e rilanciare l'economia turistica dell'area, è stato valutato anche dal punto di vista dell'impatto ambientale, tenendo conto della sensibilità del territorio attraversato (sito UNESCO) e della necessità di integrazione tra trasporto ferroviario e stradale.

La ricerca internazionale

Anche a livello internazionale, numerosi studi si sono concentrati sull'evoluzione della sede ferroviaria e dei materiali costruttivi, con particolare attenzione alla sostenibilità, alla durabilità e all'ottimizzazione delle prestazioni funzionali. Le principali linee di ricerca si sono focalizzate sulla caratterizzazione avanzata dei materiali, sull'innovazione delle soluzioni costruttive e sull'impiego di metodologie diagnostiche e modelli predittivi, con l'obiettivo di ridurre le emissioni di gas serra associate alla costruzione e manutenzione dell'infrastruttura. Il binario su ballast, pur essendo la soluzione più diffusa per via dei costi contenuti e della buona efficienza strutturale, presenta criticità legate all'assestamento naturale del materiale, che comporta interventi manutentivi frequenti e onerosi, con significativi impatti economici e ambientali. In risposta a queste problematiche, il ballast stabilizzato con bitume (BSB) è stato proposto come alternativa innovativa e a costi contenuti, in grado di migliorare la stabilità riducendone gli intervalli manutentivi.

Questa tecnica prevede l'applicazione di emulsione bituminosa su porzioni selezionate del ballast soggette alle maggiori sollecitazioni, migliorando la coesione del materiale e rallentandone la degradazione. Il BSB può essere impiegato sia nel rinforzo delle massicciate esistenti, riducendo la necessità di manutenzioni frequenti, sia nella costruzione di nuovi binari, aumentando la durabilità e riducendo l'impatto ambientale complessivo. Questa tecnologia, semplice da applicare sia in fase di manutenzione che di costruzione, rappresenta un importante passo avanti per migliorare la sostenibilità delle infrastrutture ferroviarie [35, 36].

Anche a livello internazionale, il sub-ballast in conglomerato bituminoso ha assunto un ruolo sempre più rilevante come soluzione tecnologica avanzata per migliorare la durabilità e la funzionalità delle infrastrutture ferroviarie, soprattutto nelle linee ad alta velocità e alta capacità. Questa tipologia di sub-ballast, derivata dalle tecniche consolidate nel settore stradale, viene adottata per garantire una migliore resistenza meccanica, una maggiore capacità di distribuzione dei carichi e una efficace protezione dalle infiltrazioni d'acqua, aspetti fondamentali per ridurre il degrado del rilevato e limitare gli interventi manutentivi. In ambito europeo, l'impiego di leganti bituminosi ha registrato una crescita significativa, estendendosi a diverse applicazioni nel settore ferroviario. L'adozione del sub-ballast bituminoso si colloca all'interno di una più ampia strategia di utilizzo di materiali a base di asfalto per migliorare le prestazioni delle infrastrutture, in linea con esperienze consolidate a livello internazionale. In particolare, negli Stati Uniti e in Giappone, soluzioni come l'“Asphalt Underlayment Layer” (AUL) sono state introdotte con successo per incrementare la durabilità e l'affidabilità delle linee ferroviarie ad alta velocità e alta capacità. In Svizzera, l'impiego dell'asfalto per il sub-ballast è generalmente limitato a strati impermeabili, con l'obiettivo di inibire la crescita della vegetazione, utilizzando però spessori più ridotti rispetto ad altri paesi. In Germania, i conglomerati bituminosi sono impiegati prevalentemente nella preparazione del sottofondo e nella realizzazione di strati base per soluzioni ballastless, che rappresentano la tecnologia preferita localmente. Tra i sistemi più noti si annoverano Getrac, ATD, SATO e Walter, i quali differiscono per composizione, funzione e modalità di applicazione, rispondendo a diversi requisiti strutturali, di stabilità e drenaggio. Nel Regno Unito, l'uso di conglomerati bituminosi per il sub-ballast e la stabilizzazione del ballast è ampiamente diffuso, così come in Cina, dove il bitume viene utilizzato sia per stabilizzare il ballast, sia come strato di emulsione adesiva tra la soletta in calcestruzzo e il binario, contribuendo a migliorare la coesione e la durabilità dell'infrastruttura [37–41].

Il Ground Penetrating Radar si è affermato anche a livello internazionale come una delle tecnologie non distruttive più efficaci per la valutazione dello stato della sovrastruttura ferroviaria, in particolare per l'analisi delle condizioni del ballast. L'interesse crescente verso l'utilizzo del GPR deriva dalla sua capacità di rilevare fenomeni di degrado quali il fouling, ovvero l'inquinamento del ballast con materiali fini provenienti dalla frantumazione dei granuli stessi, da contaminazioni esterne (es. polveri provocate dal transito dei treni), o da intrusione di materiale fine dal sottofondo. Il fouling riduce sensibilmente la capacità drenante e la resistenza al carico del ballast, specialmente in presenza di elevati contenuti d'acqua, con effetti negativi sulla stabilità geometrica del binario, fenomeni di pumping, deformazioni permanenti e instabilità laterale. La Federal Railroad Administration (FRA) negli Stati Uniti ha avviato diversi programmi di ricerca per perfezionare l'uso del GPR in ambito ferroviario, concentrandosi in particolare sulla correlazione tra i segnali radar e le caratteristiche geotecniche del ballast (densità, umidità, curva granulometrica e percentuale di fouling). A supporto delle indagini non distruttive, sono frequentemente impiegati test in sito quali il Dynamic Cone Penetrometer (DCP) automatico e il penetrometro dinamico a energia variabile PANDA, che consentono di stimare il modulo elastico e la capacità portante dei materiali lungo il profilo di profondità [42–44]. A livello internazionale, le ricerche sulle soluzioni ferroviarie ballastless trovano maggior riscontro nell'applicazione pratica rispetto al contesto italiano, con una diffusione significativa in paesi come Cina, Germania, Giappone e Francia, dove l'adozione di sistemi ballastless è strettamente legata allo sviluppo e all'esercizio delle linee ad alta velocità e alta capacità. In Cina, sistemi come il CRTS-II sono largamente utilizzati lungo le principali direttrici ad alta velocità, mentre in Germania il sistema Rheda 2000 rappresenta uno standard consolidato nelle nuove infrastrutture. In Giappone, i binari ballastless sono stati implementati sin dagli anni '60 lungo le linee Shinkansen, con soluzioni che privilegiano la durabilità e la resistenza sismica. Anche in Francia, la rete TGV ha visto l'impiego crescente di soluzioni ballastless, soprattutto in contesti urbani, gallerie e punti critici dove la manutenzione del ballast risulta complessa o onerosa [45, 46].

2.2.2 *Il contributo alla ricerca*

L'analisi dei contributi scientifici raccolti nel presente documento evidenzia il ruolo centrale che la ricerca accademica ha svolto nello studio e nell'innovazione della sede ferroviaria e dei suoi materiali costituenti. Le ricerche si collocano in un panorama metodologico e applicativo di elevato rigore, capace di affrontare in chiave multidisciplinare le sfide poste dalla

crescente domanda di efficienza, durabilità e sostenibilità del trasporto ferroviario. In particolare, numerosi studi hanno contribuito a ridefinire le strategie progettuali e manutentive della sede ferroviaria, con un’attenzione marcata verso soluzioni costruttive innovative. La produzione scientifica, partendo dall’analisi delle normative vigenti, fornisce un contributo concreto al loro aggiornamento e alla loro armonizzazione con i più recenti standard internazionali. In questo ambito, le ricerche hanno supportato un’evoluzione della disciplina tecnica, proponendo approcci di tipo prestazionale e valutazioni LCA/LCC, che permettono di estendere l’orizzonte progettuale oltre i limiti delle prescrizioni prescrittive. Non meno rilevante è stato il contributo nell’ambito dell’adozione di materiali riciclati e innovativi (RAP, CR) nei conglomerati bituminosi per sub-ballast, che ha aperto nuove prospettive nell’ottica dell’economia circolare e del contenimento dell’impronta ambientale delle infrastrutture ferroviarie. Questi studi, basati su prove sperimentali in laboratorio e in situ, hanno dimostrato l’efficacia delle soluzioni proposte, anche attraverso modellazioni numeriche avanzate. In definitiva, la ricerca italiana si pone in linea con le migliori esperienze europee, contribuendo in modo significativo alla transizione verso un paradigma infrastrutturale ferroviario più resiliente, efficiente e sostenibile. Le conoscenze prodotte non solo arricchiscono il patrimonio scientifico del settore, ma risultano anche immediatamente trasferibili alle pratiche progettuali e gestionali, rafforzando il legame tra accademia, gestori ferroviari e pubblica amministrazione.

2.2.3 *Criticità e sviluppi futuri*

L’analisi dei contenuti trattati ha evidenziato, oltre ai significativi progressi nel campo della sede ferroviaria e dei materiali associati, anche alcune criticità metodologiche e applicative ancora presenti. Queste sfide rappresentano importanti opportunità per sviluppi futuri, orientati a migliorare la standardizzazione delle prove e dei criteri prestazionali, a potenziare l’integrazione tra tecnologie di monitoraggio e modellazione, e a favorire un più efficace trasferimento delle innovazioni digitali e sostenibili nella pratica operativa ferroviaria. In particolare, il consolidamento dell’impiego di materiali riciclati, come RAP e polverino di gomma, nei sub-ballast bituminosi rappresenta un ambito promettente. Per supportare una diffusione più ampia e sistematica, è necessario definire e standardizzare metodologie di caratterizzazione e procedure applicative condivise, tenendo conto delle diverse condizioni operative. Ulteriori sviluppi riguardano l’integrazione tra dati sperimentali e modelli predittivi, opportunamente calibrati su condizioni di esercizio reali, al fine di ottimizzare la gestione e la manutenzione della

sede ferroviaria. In questo contesto, si prevede un consolidamento nell'impiego di tecniche non invasive di indagine, come georadar, che permettono di monitorare con precisione e continuità lo stato dei materiali e delle strutture senza interferire con il traffico ferroviario, migliorando così la tempestività e l'efficacia degli interventi manutentivi. A fianco di queste prospettive, l'evoluzione della sede ferroviaria passa anche attraverso l'introduzione di soluzioni costruttive avanzate, come l'impiego di geosintetici, l'adozione di traverse innovative e di sistemi ballastless, che aprono nuovi scenari applicativi. Per supportarne un'adozione efficace e su larga scala, è necessario definire protocolli metodologici specifici per il loro impiego, monitoraggio e valutazione nel tempo, integrando anche analisi di tipo LCA per quantificare in modo oggettivo i benefici ambientali lungo l'intero ciclo di vita. Ciò consente di garantirne la piena integrazione nei processi progettuali e manutentivi, in un'ottica di sostenibilità e ottimizzazione delle risorse. In prospettiva, l'attenzione sarà focalizzata su approcci integrati che combinino sostenibilità ambientale, prestazioni strutturali e resilienza, sviluppando criteri progettuali multidimensionali in linea con le politiche europee di economia circolare e decarbonizzazione.

2.2.4 Bibliografia

1. Del Serrone, G., Riccio, G., Moretti, L.: Cradle-to-cradle life cycle assessment of railway prestressed concrete sleepers: A state-of-the-art review and strategies for reducing environmental impacts. *Resour Conserv Recycl.* 214, 108020 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108020>.
2. Guerrieri, M., Ticali, D.: Ballasted track superstructures: performances of innovative railway sleepers. In: Pombo, J. (ed.) *Proceedings of the First International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance* (2012).
3. Colonna, P.: Studio su alcune caratteristiche dei materiali per ballast, con particolare riferimento alla composizione granulometrica ed all'uso di scorie siderurgiche. *Ingegneria Ferroviaria*. (1983).
4. Giunta, M., Bressi, S., Losa, M.: Sustainability in Railway Construction: LCA–LCC Based Assessment of Alternative Solutions for Track-Bed. In: *2020 Joint Rail Conference*. American Society of Mechanical Engineers (2020). <https://doi.org/10.1115/JRC2020-8008>.
5. Bressi, S., D'Angelo, G., Santos, J., Giunta, M.: Environmental performance analysis of bitumen stabilized ballast for railway track-bed using life-cycle assessment. *Constr Build Mater.* 188, 1050–1064 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.175>.
6. D'Angelo, G., Bressi, S., Giunta, M., Lo Presti, D., Thom, N.: Novel performance-based technique for predicting maintenance strategy of bitumen

- stabilised ballast. *Constr Build Mater.* 161, 1–8 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.115>.
7. Giunta, M., Bressi, S., D’Angelo, G.: Life cycle cost assessment of bitumen stabilised ballast: A novel maintenance strategy for railway track-bed. *Constr Build Mater.* 172, 751–759 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.020>.
 8. Giunta, M., Praticò, F.G.: Design and maintenance of high-speed rail tracks: A comparison between ballasted and ballast-less solutions based on life cycle cost analysis. In: *Transport Infrastructure and Systems* (2017).
 9. Praticò, F.G., Giunta, M.: LCC-Based Appraisal of Ballasted and Slab Tracks: Limits and Potential. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering.* 13, 475–499 (2018). <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2018-13.429>.
 10. Biancardo, S.A., Avella, F., Di Lisa, E., Chen, X., Abbondati, F., Dell’Acqua, G.: Multiobjective Railway Alignment Optimization Using Ballastless Track and Reduced Cross-Section in Tunnel. *Sustainability.* 13, 10672 (2021). <https://doi.org/10.3390/su131910672>.
 11. Praticò, F.G., Giunta, M.: LCC-based appraisal of ballasted and slab tracks: limits and potential. *The Baltic journal of road and bridge engineering .* 13, 475–499 (2018).
 12. La Placa, A., Autelitano, F., Neduzha, L., Tiutkin, O., Giuliani, F.: Roles and functions of asphalt sub-ballast in the modern maintenance of the European railways. *International Journal of Transportation Science and Technology.* (2025). <https://doi.org/10.1016/J.IJTST.2024.12.003>.
 13. Fiore, N., Bruno, S., Del Serrone, G., Iacobini, F., Giorgi, G., Rinaldi, A., Moretti, L., Duranti, G.M., Peluso, P., Vita, L., D’Andrea, A.: Experimental Analysis of Hot-Mix Asphalt (HMA) Mixtures with Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in Railway Sub-Ballast. *Materials* 2023, Vol. 16, Page 1335. 16, 1335 (2023). <https://doi.org/10.3390/MA16041335>.
 14. Praticò, F.G., Ammendola, R., Moro, A., Dattola, V.: Joint density and related performance in HMA subballast. In: *VI and VII international conference of stochastic geometry, convex bodies, empirical measure & applications to mechanics and engineering of train-transport.* , Palermo (2008).
 15. Bressi, S., Santos, J., Giunta, M., Pistonesi, L., Lo Presti, D.: A comparative life-cycle assessment of asphalt mixtures for railway sub-ballast containing alternative materials. *Resour Conserv Recycl.* 137, 76–88 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.028>.
 16. D’Andrea, A., Loprencipe, G., Xhixha, E.: Vibration Induced by Rail Traffic: Evaluation of Attenuation Properties in a Bituminous Sub-ballast Layer. *Procedia Soc Behav Sci.* 53, 245–255 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.877>.
 17. Di Mascio, P., Loprencipe, G., Maggioni, F.: Modellazione del comportamento visco-elastico degli strati della sede ferroviaria. *Ingegneria Ferroviaria.* (2014).
 18. Greco, A., Praticò, F.G., Miceli, G.: Miglioramento delle caratteristiche meccaniche dei terreni di insufficiente portanza nella realizzazione di infrastrutture

ferroviarie e stradali– Indagine sperimentale sull'utilizzo della tecnologia del Jet Grouting. *La Tecnica professionale*. (1998).

19. Celauro, B., Bevilacqua, A., Bosco, D.L., Celauro, C.: Design procedures for soil-lime stabilization for road and railway embankments. Part 1-review of design methods. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. 53, 754–763 (2012).

20. Celauro, B., Bevilacqua, A., Bosco, D.L., Celauro, C.: Design Procedures for Soil-Lime Stabilization for Road and Railway Embankments. Part 2-Experimental Validation. *Procedia-Social and Behavioral Science*. 53, 568–579 (2012).

21. Tiutkin, O., Autelitano, F., Giuliani, F., Neduzha, L.: Stress-strain behavior of railway embankments stabilized with grouted micropiles. *Alexandria Engineering Journal*. 102, 75–81 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.05.088>.

22. Leonardi, G.: Analysis of railway tracks reinforced with geogrids. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. (2021).

23. Leonardi, G., Palamara, R., Mannarella, E.: Numerical modeling of a reinforced railway superstructure. Presented at the (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0170479>.

24. Brancadoro, M.G., Ciampoli, L.B., Ferrante, C., Benedetto, A., Tosti, F., Alani, A.M.: An Investigation into the railway ballast grading using GPR and image analysis. In: 2017 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). pp. 1–4. IEEE (2017). <https://doi.org/10.1109/IWAGPR.2017.7996043>.

25. Tosti, F., Benedetto, A., Calvi, A., Ciampoli, L.B.: Laboratory investigations for the electromagnetic characterization of railway ballast through GPR. In: 2016 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). pp. 1–6. IEEE (2016). <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2016.7572605>.

26. Benedetto, A., Tosti, F., Ciampoli, L.B., Pajewski, L., Pirrone, D., Umiliaco, A., Brancadoro, M.G.: A simulation-based approach for railway applications using GPR. In: 2016 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR). pp. 1–6. IEEE (2016). <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2016.7572609>.

27. Brancadoro, M., Tosti, F., Bianchini, L., Pajewski, L., Pirrone, D., Benedetto, A.: How to create a full-wave GPR model of a 3D domain of railway track bed? In: Al-Qadi, I.L., Scarpas, A.T., and Loizos, A. (eds.) 10th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, BCRR 2017. pp. 1603–1607 (2018).

28. Guerrieri, M., Parla, G.: A New High-Efficiency Procedure for Aggregate Gradation Determination of the Railway Ballast by Means Image Recognition Method. *Archives of Civil Engineering*. 59, 469–482 (2013). <https://doi.org/10.2478/ace-2013-0025>.

29. Tosti, F., Alani, A.M., Benedetto, A., Bianchini Ciampoli, L., Brancadoro, M.G., Pajewski, L.: A comparative investigation of the pavement layer dielectrics by FDTD modelling and reflection amplitude GPR data. In: Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (2017).

30. Di Mascio, P., Loprencipe, G., Moretti, L.: Valutazione del degrado della sede ferroviaria in funzione del traffico. In: Aracne Editrice S.r.l. (ed.) *Sicurezza ed*

- Esercizio Ferroviario - Tecnologie e Regolamentazione per la Competizione. pp. 141–152. Aracne Editrice S.r.l., Roma (2013).
31. Loprencipe, G., Di Mascio, P., Ranzo, A.: Caratteristiche e prestazioni attese per le sovrastrutture ferroviarie del futuro. In: Aracne Editrice S.r.l. (ed.) *Sicurezza ed esercizio ferroviario: sviluppi attuali e prospettive della ricerca*. pp. 219–230. Aracne Editrice S.r.l., Roma (2009).
 32. Pasetto, M.: Il Tunnel del Brennero. In: Facchinelli, L. (ed.) *Trasporti & Cultura*. pp. 8–19. Venezia (2007).
 33. Giacomello, G.: Collegamenti transalpini nella regione Liguria: il Terzo Valico dei Giovi e il nodo di Genova. In: Facchinelli, L. (ed.) *Trasporti & Cultura*. pp. 35–41. Venezia (2017).
 34. Pasetto, M., Pasquini, E., Baliello, A., Giacomello, G.: Riutilizzo di tracciati ferroviari alpini dismessi. In: Facchinelli, L. (ed.) *Trasporti & Cultura*. pp. 73–79. , Venezia (2017).
 35. d’Angelo, G., Sol-Sánchez, M., Moreno-Navarro, F., Lo Presti, D., Thom, N.: Use of bitumen-stabilised ballast for improving railway trackbed conventional maintenance. *Géotechnique*. 68, 518–527 (2018). <https://doi.org/10.1680/jgeot.17.P.022>.
 36. Barbieri, D.M., Tangerås, M., Kassa, E., Hoff, I., Liu, Z., Wang, F.: Railway ballast stabilising agents: Comparison of mechanical properties. *Constr Build Mater*. 252, 119041 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119041>.
 37. Prasad, K.V.S., Hussaini, S.K.K.: Review of different stabilization techniques adapted in ballasted tracks. *Constr Build Mater*. 340, 127747 (2022). <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127747>.
 38. Umar, H.A., Zeng, X., Lan, X., Zhu, H., Li, Y., Zhao, H., Liu, H.: A Review on Cement Asphalt Emulsion Mortar Composites, Structural Development, and Performances. *Materials*. 14, (2021). <https://doi.org/10.3390/MA14123422>.
 39. Ramirez Cardona, D., Di Benedetto, H., Sauzeat, C., Calon, N., Saussine, G.: Use of a bituminous mixture layer in high-speed line trackbeds. *Constr Build Mater*. 125, 398–407 (2016). <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.07.118>.
 40. Teixeira, P.F., López-Pita, A.: Viability of using a bituminous sub-ballast layer on high-speed ballasted tracks. In: Horvli, I. (ed.) *Seventh International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*. , Trondheim (2005).
 41. Veit, P.: Wirtschaftliche Bewertung von Strategien im Bereich Fahrweg [Economic evaluation of strategies in respect of the track]. *ETR. Eisenbahntechnische Rundschau*. 49, 313–320 (2000).
 42. Kim, Y., Wiggins, R., Byun, Y.-H., Qamhia, I.I.A., Tutumluer, E., Beasley, J., Cisko, A., Kashani, H., Langlois, R., Harrell, M.J.: Characterization of Degraded Ballast Strength: A Field Application of Ground Penetrating Radar and Dynamic Cone Penetration. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2679, 1462–1474 (2025). <https://doi.org/10.1177/03611981241270164>.

43. Kang, M., Wang, H., Qamhia, I.I.A., Tutumluer, E., Haddani, Y., Bankston, A.: Degraded Ballast Stiffness Characterization Using Bender Element Field Sensor and PANDA ® Penetrometer. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.* 2677, 428–438 (2023). <https://doi.org/10.1177/03611981231156936>.
44. Indraratna, B., Nimbalkar, S., Coop, M., Sloan, S.W.: A constitutive model for coal-fouled ballast capturing the effects of particle degradation. *Comput Geotech.* 61, 96–107 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2014.05.003>.
45. Zhang, T., Zhang, Z., Tian, H., Lu, C., Wang, W., Song, W., Liu, X.: Analysis of the shear failure between track slab and CA mortar layer caused by thermal effect for ballastless track. *Case Studies in Construction Materials.* 22, e04266 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04266>.
46. Song, L., Liu, H., Cui, C., Yu, Z., Li, Z.: Thermal deformation and interfacial separation of a CRTS II slab ballastless track multilayer structure used in high-speed railways based on meteorological data. *Constr Build Mater.* 237, 117528 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117528>.

2.3 Geometria del binario, diagnostica e monitoraggio

La geometria del binario, unitamente alla diagnostica e al monitoraggio dell'infrastruttura ferroviaria, costituisce un ambito fondamentale per garantire la sicurezza, la regolarità e la sostenibilità dell'esercizio ferroviario. Le caratteristiche geometriche del tracciato, come l'allineamento plano-altimetrico, la sopraelevazione, il raggio di curvatura e la continuità del binario, influiscono direttamente sulla dinamica dei veicoli, sul comfort dei passeggeri, sulla generazione di rumore e vibrazioni, nonché sull'usura dei componenti infrastrutturali e rotabili.

Il degrado progressivo della geometria del binario, determinato da fattori quali traffico intenso, condizioni ambientali e interventi manutentivi non ottimali, può compromettere seriamente le prestazioni dell'infrastruttura. In tale contesto, la diagnostica e il monitoraggio assumono un ruolo centrale, poiché consentono l'individuazione tempestiva di difetti e irregolarità, favorendo un approccio manutentivo preventivo e predittivo.

L'evoluzione tecnologica ha profondamente trasformato le modalità di monitoraggio, passando da ispezioni visive periodiche a sistemi automatizzati ad alta frequenza, basati su tecnologie non distruttive (NDT), telerilevamento da satellite, sensori in fibra ottica, accelerometri, image processing, e più recentemente, digital twin e intelligenza artificiale. Un altro strumento estremamente funzionale e diffuso è quello del drone, che con limitati costi d'utilizzo, riesce a ottimizzare e velocizzare i processi di monitoraggio e rilievo dei difetti infrastrutturali, specialmente se accoppiato a tecniche di machine learning. Questa transizione permette oggi una valutazione continua

e spesso in real-time dello stato dell’infrastruttura, aumentando l’efficienza delle strategie manutentive e contribuendo a ridurre i costi e l’impatto ambientale.

L’integrazione tra modelli predittivi e dati provenienti da sensori, l’adozione di criteri RAMS-LCC (Reliability, Availability, Maintainability, Safety - Life Cycle Cost), nonché l’impiego di sistemi di bordo per il monitoraggio dinamico, aprono nuove prospettive per la gestione sostenibile delle reti ferroviarie.

2.3.1 Lo stato dell’arte nazionale e internazionale

La ricerca italiana in ambito ferroviario ha sviluppato negli ultimi anni numerosi contributi scientifici sul tema della geometria del binario, del degrado infrastrutturale e delle tecniche di diagnostica e monitoraggio per poterlo prevenire, allineandosi con i principali orientamenti internazionali ma anche evidenziando specificità metodologiche e applicative.

In questo paragrafo, il materiale è stato organizzato secondo le tre principali linee tematiche precedentemente indicate: geometria del binario, degrado dell’infrastruttura e tecniche di diagnostica e monitoraggio. Per ciascuna di esse, è stata redatta una sintesi a partire dai contributi degli autori italiani appartenenti alle sedi universitarie associate S.I.I.V. (Società Italiana Infrastrutture Viarie).

Geometria del binario

Le caratteristiche geometriche del binario influenzano in modo diretto la sicurezza, il comfort e l’efficienza delle linee ferroviarie, nonché i costi di manutenzione associati. Le ricerche delle sedi italiane S.I.I.V. hanno sino ad ora affrontato il tema sia sul piano normativo e progettuale, sia su quello del rilevamento e monitoraggio delle irregolarità geometriche.

Dal punto di vista normativo e regolatorio, il lavoro di Cantisani et al. (2015) [1] ha analizzato i parametri geometrici di tracciato ferroviario in relazione ai limiti di interoperabilità tra normative nazionali ed europee, evidenziando le criticità introdotte dal Regolamento (UE) n. 1299/2014 per le nuove linee. Un’analoga attenzione agli sviluppi normativi si ritrova nello studio di Bagherin et al. (2016), che applica i nuovi indirizzi RFI per il controllo delle geometrie negli apparecchi del binario, mostrando come il concetto di livelli di qualità, già utilizzato per la linea ferroviaria, possa essere esteso ai deviatori con indiscussi benefici in fase di manutenzione [2].

Concentrandosi più propriamente sulla progettazione geometrica, Biancardo et al. (2021) hanno sviluppato un’ottimizzazione multi-obiettivo del tracciato in contesti montuosi, esplorando soluzioni innovative come la sovrastruttura

ballastless e sezioni ridotte in galleria. Questi approcci consentono una riduzione dei costi e dell’impatto ambientale, e sono in linea con i criteri di sostenibilità promossi a livello internazionale [3].

Sempre relativamente alla progettazione geometrica, Berardi et al. (2011) hanno proposto un’analisi delle variazioni della curvatura e della sopraelevazione lungo i raccordi di transizione delle curve ferroviarie al fine di ottimizzare le azioni trasmesse dal treno e il comfort dei passeggeri. Sono state provate diverse leggi di variazione, non solo quelle lineari adottate in Italia. Sono stati valutati quei raccordi di sopraelevazione che prevedono uno sghebo con variazione contemporanea (di segno opposto) della quota di entrambe le rotaie, che sono risultati essere ottimali per migliorare, in alcune condizioni di esercizio, sia il moto del veicolo che il comfort dei passeggeri [4]. Tuttavia, si ritiene altamente pressante la necessità di fornire una risposta esaustiva ed univoca al problema della curva di transizione ferroviaria. In questo ambito, la ricerca si è portata avanti sia per quel che riguarda la ricerca dell’equazione intrinseca che migliori la regolarità del moto dei rotabili [5] sia per quel che riguarda l’analisi effettiva del moto dei rotabili in presenza di curva parabolica [6]. Anche nell’ambito della ricerca di innovazioni tecnologiche, si è parlato di curve ferroviarie, di modo da trovare adeguati sistemi di tracciamento e di controllo delle stesse [7]. Il problema della geometria è stato analizzato anche da Calvi et al., (2020), nell’ambito delle simulazioni di guida nel passaggio da guida automatica a manuale per poter valutare le performance di guida [8].

Spostando il focus sulle linee ad alta velocità, il contributo di Montepara e Giuliani (2002) resta centrale [9]. Infatti, questo analizza le problematiche legate alla poligonale d’asse nelle linee ad alta velocità, evidenziando come la geometria planimetrica possa condizionare la dinamica del veicolo, soprattutto per gli elementi di raccordo. Anche Colonna & Pisciotta (1995) hanno investigato il problema dell’alta velocità ferroviaria al fine di definire criteri di scelta strategica e ottimale della geometria dei raccordi plano-altimetrici, chiaramente differenti dalle linee tradizionali [10].

Nel campo della misura e diagnosi delle irregolarità geometriche, Chiacchiari & Loprencipe (2015) hanno proposto l’utilizzo di tecniche di analisi del profilo simili a quelle stradali, applicate al sistema tramviario urbano [11], cercando di valutare soglie di accettabilità in relazione al sistema tramviario [12]. Un ulteriore approfondimento sulle geometrie in ambito urbano è fornito da Chiacchiari & Loprencipe (2015), che analizzano, tramite un caso studio sul Comune di Roma, i costi di manutenzione delle linee tranviarie nell’ambito di un PPP (partenariato pubblico privato), simulando scenari in funzione di standard prestazionali legati alle irregolarità geometriche della rotaia [11].

Guerrieri et al. [13,14] hanno validato l'efficacia di tecniche monoscopiche e stereoscopiche di image processing per la stima dell'usura della rotaia. Entrambi i contributi si integrano con le pratiche tradizionali di auscultazione, offrendo soluzioni migliorative che coniugano un'alta risoluzione e un basso costo.

Infine, Giunta e Leonardi (2024) hanno affrontato l'identificazione dei difetti geometrici isolati tramite una metodologia data-driven applicata a tratti della linea Salerno–Reggio Calabria [15]. Il loro approccio considera parametri geometrici come scartamento, allineamento, livello longitudinale, livello trasversale e sghembo, in relazione a traffico e manutenzioni pregresse, permettendo di localizzare i difetti in modo predittivo.

Degrado dell'infrastruttura ferroviaria

Il degrado dell'infrastruttura ferroviaria rappresenta un fenomeno complesso e multidimensionale, influenzato da fattori statici e dinamici quali i carichi per asse, le velocità, le condizioni ambientali, la composizione dei materiali e le pratiche manutentive adottate. Svariati gli studi delle sedi S.I.I.V dedicati a questo argomento, volti alla comprensione dei meccanismi di degrado e alla proposta di soluzioni orientate alla previsione e mitigazione del fenomeno.

Giunta e Leonardi [15,16] hanno sviluppato metodologie data-driven per stimare la velocità di degrado in funzione di parametri geometrici e operativi, tra cui traffico, velocità di esercizio e interventi manutentivi pregressi. Tali approcci sono stati validati su tratte reali della linea Rosarno–Palmi e Salerno–Reggio Calabria, dimostrando l'efficacia di una diagnostica mirata per interventi tempestivi e sostenibili. In chiave ambientale, gli stessi autori evidenziano come una pianificazione razionale della manutenzione possa ridurre l'impatto ambientale, in termini di consumo di risorse ed emissioni associate alle operazioni correttive.

Buonsanti et al., [17,18] hanno proposto un sistema di monitoraggio non invasivo del binario a proponendo l'uso dei campi magnetici rotanti. Un problema ancora persistente è quello del rilievo del degrado in termini di particolari orientamenti delle fratture e in caso di complessità geometrica della struttura. Una metodologia agli elementi finiti (FEM) è stata testata per fornire rapide e precise informazioni sull'integrità della struttura.

Una prospettiva integrata tra aspetti strutturali ed economici è esplorata anche da Praticò e Giunta (2017), che combinano l'approccio RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Safety) con il Life Cycle Cost (LCC), al fine di valutare in maniera olistica il problema ferroviario, includendo anche i costi ambientali associati al ciclo di vita dell'opera [19]. Questo studio, che si pone

in stretta continuità con il [20], mira a supportare le decisioni progettuali e manutentive.

Particolarmente rilevanti sono gli studi sui giunti isolati (IRJ), considerati elementi critici per la loro tendenza al deterioramento. La Placa et al. [21,22] e Bianchi et al. [23,24] analizzano il comportamento meccanico dei giunti mediante analisi FEM e misure dei loro gap spaziali, valutando mediante tecnologie avanzate come sensori a fibra ottica e modelli digital twin per il monitoraggio predittivo lo stato di avanzamento del degrado e della perdita di funzionalità dei giunti.

Anche lo studio in fase di pubblicazione di La Placa et al. [25] approfondisce l’influenza del posizionamento del giunto (sospeso o supportato) sulla risposta meccanica del binario, simulando il degrado progressivo tramite variazione del precarico. Tale analisi è essenziale per definire soglie di intervento più accurate e procedure di manutenzione mirate e ottimizzate.

Marchetta et al. (2023), in uno studio condotto su linee a scartamento ridotto, evidenziano come l’applicazione di strategie manutentive proprie delle linee standard possa portare a un uso non ottimale delle risorse. L’analisi dei dati di geometria di un’infrastruttura locale italiana dimostra che le peculiarità geometriche e operative dello scartamento ridotto influenzano significativamente il processo di degrado e richiedono strategie dedicate [26]. Infine, Di Vincenzo e Guerrieri (2005) mostrano le principali cause di ammaloramento della sovrastruttura sulla tratta Palermo–Messina, sottolineando l’efficacia delle tecnologie diagnostiche ad alto rendimento per la rilevazione precoce dei difetti geometrici e strutturali, applicabili per prevenire tali fenomeni [27].

Tecniche di monitoraggio

Il monitoraggio delle infrastrutture ferroviarie ha conosciuto una significativa evoluzione, con il passaggio da tecniche ispettive tradizionali a soluzioni automatizzate, continue e predittive. La ricerca scientifica portata avanti dalle sedi S.I.I.V. ha contribuito in modo rilevante allo sviluppo di alcune tecniche e metodologie di monitoraggio innovative.

Nel campo delle tecnologie NDT (Non-Destructive Testing), sono particolarmente rilevanti gli studi sull’impiego di sensori per il monitoraggio dei giunti isolati. La Placa et al. [21,22] e Bianchi et al. [23] propongono l’uso di sensori a fibra ottica e sensori di spostamento per il rilevamento continuo della variazione del gap nei giunti IRJ, individuando segnali precoci di degrado strutturale. Questi sistemi, grazie anche all’utilizzo di modelli statistici e predittivi, permettono un approccio di manutenzione mirata, riducendo l’impatto dei guasti improvvisi.

Parallelamente, Bianchi et al. [24] introducono una strategia basata su digital twin e classificatori AI, in grado di correlare parametri strutturali misurati (gap e spostamento verticale) con lo stato di precarico dei bulloni, migliorando significativamente l'affidabilità della diagnosi.

Per quanto riguarda l'analisi da remoto, i contributi del gruppo di ricerca di Roma Tre (Tosti, Gagliardi, D'Amico et al.) sono svariati. In primo luogo, è stato analizzato il peggioramento del degrado a seguito di maggiori frequenze operative, maggiori carichi e alta velocità (Artagan et al., 2020, [28]). Questo degrado ha conseguenze altissime su più fronti ed è figlio di un approccio tradizionale improntato su strategie di investimenti per interventi ad alta priorità e per la sicurezza, di tipo reattivo. Lo studio in esame propone un cambio verso approcci proattivi che limitino il degrado, intervenendo anche su elementi non prioritari, ma in maniera continua. Il metodo proposto è basato su metodologie NDT sia da sole che combinate per controlli di qualità.

Altri studi dello stesso gruppo di ricerca, propongono tecniche non distruttive integrando tecniche di remote sensing satellitare con tecniche di rilevamento a terra. Più precisamente, Bianchini Ciampoli et al. (2020) [29], hanno proposto l'integrazione di metodo InSAR con rilievi georadar (GPR) mostrando risultati su tratte ferroviarie esistenti, oltre che una panoramica su come si effettua la fusione dei dati integrando queste tecnologie (Progetto STRAIN della European Space Agency). Ferrante et al. (2021) hanno mostrato come la combinazione di GPR e InSAR per il monitoraggio delle infrastrutture ferroviarie sia efficace, riportando sia casi studio in laboratorio che su infrastrutture esistenti a livello di rete e di singolo elemento [30]. Combinando le due metodologie di monitoraggio è efficacemente individuata la sezione critica e, inoltre, si può proporre una strategia di monitoraggio proattiva.

Gagliardi et al. (2023) [31], nell'ambito del progetto di ricerca nazionale PRIN 2017 – EXTRA TN e progetto regionale MLAZIO, sono partiti dalle tecniche NDT, valutandone le limitazioni in termini di tempistiche e implementazione per affidabili sistemi di monitoraggio infrastrutturali, per poi proporre una combinazione di tecniche NDT e tecniche Multi-Temporali InSAR (MT-InSAR). In questa maniera, con altissima frequenza temporale di investigazione ed elevata copertura areale si possono ottenere ottimi risultati per il monitoraggio infrastrutturale. Tosti et al. (2021) [32] hanno proposto un'indagine simile fornendo una review delle applicazioni di queste metodologie MT-InSAR e NDT, valutando le sfide che esse portavano nel mondo ingegneristico e le prospettive future di impiego (nell'ambito del progetto PRIN 2017 – EXTRA TN).

Una valutazione applicativa della bontà della combinazione di queste metodologie (InSar e tecniche di monitoraggio a terra non distruttive, come laser scanner, accelerometri, GPR) è stata testata usando il COSMO-SkyMed (CSK) ad alta risoluzione, fornito dall'agenzia spaziale italiana, per il monitoraggio di un ponte ferroviario a Rochester (Kent, UK). Si è dimostrato che questa combinazione di tecniche di monitoraggio sia efficace nel rilevare con precisione i difetti e i degradi infrastrutturali ed è anche più economica delle tecniche di monitoraggio tradizionali (Gagliardi et al., [33,34]).

Inoltre, Calvi & D'Amico (2019) hanno effettuato e dimostrato l'importanza di tecniche GPR per il monitoraggio anche del ballast [35]. Nel campo delle tecniche non distruttive (NDT), specialmente valutando l'integrazione di GPR con ulteriori e più spinte metodologie di sensing da remoto, o comparando i risultati di monitoraggio ottenuti da GPR e altre metodologie, numerosi sono stati gli studi sviluppati da UniRoma 3 negli ultimi anni [36-42]. Calvi et al. [5] dimostrano la validità della transizione da metodologie reattive a pianificazioni predittive tramite GPR e InSAR applicate a livello di rete infrastrutturale, proponendo un caso studio su una tratta attiva in Puglia. Sempre sulla stessa scia, D'Amico et al. (2020) confermano l'utilità e i miglioramenti apportati della fusione dati da InSAR e GPR per monitoraggi più completi dopo aver effettuato un caso studio su una campata di un ponte ferroviario in Puglia [43]. Il GPR è stato usato per ottenere informazioni strutturali ed eventuali problematiche costruttive. L'InSAR, invece è stato usato per monitorare le subsidenze a livello della spalla ferroviaria (nella transizione tra rilevato e ponte).

Il GPR viene utilizzato, dunque, anche per la validazione di modelli computerizzati della struttura ferroviaria [44]

Altre sedi S.I.I.V. si sono occupate di monitoraggio e proposizione di nuove tecniche.

Valutando il contesto urbano, Chiacchiari e Loprencipe (2015) [11] applicano soglie di accettabilità ai sistemi tramviari, utilizzando strumentazione come il Corrugation Analysis Trolley per rilevare lo stato di irregolarità. Questo tipo di studi è stato poi approfondito con la valutazione della rugosità e del conseguente disturbo sonoro sulle tramvie [45]. Inoltre, Pissardini et al. [46, 47] testano l'impiego di sensori a basso costo sui convogli per valutare comfort e qualità del binario, validando i risultati rispetto alla geometria del tracciato e dimostrandone la coerenza.

Anche l'analisi digitale delle immagini, come dimostrato da Guerrieri et al. (2018), consente un monitoraggio continuo dello stato della via, riducendo i costi di ispezione e migliorando l'affidabilità delle diagnosi strutturali [48].

Infine, Foria et al. [49,50] propongono un sistema automatizzato per l'ispezione dei tunnel ferroviari storici tramite mappatura mobile e AI, in grado di restituire dati digitalizzati e facilmente integrabili in ambienti di modellazione e ispezione virtuale, preservando strutture delicate e difficilmente accessibili.

Studi, invece, molto più vetusti si erano concentrato sull'uso di FWD [51] per determinare i parametri della struttura ferroviaria o su modelli di controllo e previsioni del rumore ferroviario [52].

Una strategia che si sta sempre più diffondendo nel mondo ferroviario e non, per la diagnosi delle problematiche dell'infrastruttura è quella che prevede l'uso del drone. Con voli mirati e una raccolta di immagini ad elevata qualità ed estensione spaziale, è possibile poi ottenere una ricognizione dello stato dell'arte dell'infrastruttura, individuando le aree a rischio. A questo proposito, gli studi di Giunta et al. [53,54], nell'ambito del Progetto MOST Centro Nazionale per la mobilità sostenibile Spoke 4 Rail, sono un esempio significativo dell'efficacia di questa tecnica, anche per un rapporto costi benefici, estremamente sbilanciato dal lato benefici.

Nel complesso, i contributi esaminati evidenziano un'elevata maturità tecnologica della ricerca nazionale nel settore del monitoraggio ferroviario, favorendo la transizione verso modelli predittivi integrati con i sistemi di gestione infrastrutturale.

Ricerca internazionale

La ricerca nazionale è in linea con i contributi che si sono sviluppati a livello internazionale per le tematiche sin qui trattate: geometria del binario, degrado dell'infrastruttura e le tecniche di monitoraggio.

In ambito diagnostico (tecniche di monitoraggio), numerosi contributi si sono concentrati sui giunti isolati (IRJ).

Il monitoraggio strumentale continuo dei giunti isolati (IRJ) consentirebbe di identificare gli ammaloramenti e il degrado in anticipo e in momenti specifici della loro evoluzione, rendendo così possibile determinare per tempo i parametri chiave per prevenire danni gravi alle infrastrutture ferroviarie [55]. L'isolamento elettrico corretto rappresenta un parametro facilmente monitorabile, poiché qualsiasi passaggio di corrente tra le due sezioni di binario separate dal giunto isolato genererebbe allarmi rilevabili dal sistema di controllo del traffico ferroviario. Il manuale Communications & Signals (C&S) dell'American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA) propone alcune tecniche per prevenire la perdita, continua o intermittente, della resistenza elettrica tra due segmenti adiacenti di rotaia [56].

A tal proposito, oltre la verifica del corretto isolamento termico, alcune delle tecniche attualmente utilizzate per il monitoraggio automatico dei giunti isolati (IRJ) valutano la misurazione dell'accelerazione sulla cassa d'assile [57], che consente di mettere in relazione la forza di contatto tra le ruote del treno e la rotaia con lo stato del giunto. In questo modo possono essere valutate anche deformazioni plastiche del giunto, microfessure o l'allentamento dei bulloni. Le accelerazioni verticali sulla cassa d'assile sono infatti sensibili alla risposta dinamica dell'assile rispetto a piccoli difetti [58], come le depressioni sulla superficie superiore della rotaia (es. squats), saldature con finitura scadente e giunti isolati. Tra le variazioni misurabili, importante è lo spostamento longitudinale delle rotaie adiacenti in un IRJ (gap). Queste variazioni di gap dovute a fenomeni termici sono misurabili tramite estensimetri applicati sulla piastra del giunto [59] o mediante sensori a fibra ottica, caratterizzati da maggiore stabilità, precisione, durabilità, ecc. [60]. Nel caso in cui avvenga il distacco dello strato adesivo con conseguente usura dello strato isolante, il giunto non riuscirebbe ad esibire più comportamenti isolanti. Si può rilevare tale anomalia tramite indagini ultrasoniche, grazie alla riduzione graduale del coefficiente di riflessione [60].

Contemporaneamente, lo sviluppo delle tecnologie data-driven ha rivoluzionato il panorama della manutenzione ferroviaria. Xie et al. [61] mappa l'evoluzione dei modelli predittivi per la manutenzione ferroviaria, evidenziando come il 74% degli studi recenti impieghi tecniche di intelligenza artificiale, tra cui reti neurali convoluzionali (CNN), LSTM, RNN e modelli ensemble. Faghih-Roohi et al. [62] applicano CNN per rilevare difetti da immagini, mentre [58] dimostra l'efficacia dell'uso di accelerometri per l'identificazione dei guasti nei giunti mediante l'applicazione di CNN. Altri studi significativi includono l'applicazione di modelli di deep learning come il ResNet-50, con un'accuratezza pari al 94%, per il rilevamento di morsetti mancanti nei sistemi di ancoraggio dei binari [63]. Zhang et al. [64] identificano 6 macrocategorie di guasto a seguito di combinazione di modelli fisici e reti CNN per il monitoraggio delle traverse sospese. Sempre utilizzando tecniche innovative, mediante l'utilizzo di modelli ad albero decisionale, Allah Bukhsh et al. [65] sono riusciti a definire la pianificazione automatica degli interventi di manutenzione sugli scambi. Combinando il monitoraggio termico con tecniche ML, Stypułkowski et al. [66] ha monitorato gli scambi, prevenendo guasti in condizioni climatiche critiche. Modelli avanzati come TrackNet [67] e quelli basati su segmentazione semantica [68] mostrano risultati eccellenti nel riconoscimento di difetti non solo superficiali per binari tradizionali ma anche su binario ballastless.

L'efficacia dell'integrazione tra sensori fissi (FBG, MEMS, fibre ottiche) e modelli digitali, come i Digital Twin, è testimoniata dalla transizione in atto verso strategie predittive e sostenibili. In ambito strutturale, gli studi di Perkins [69] e non solo [70-74] mostrano l'importanza dell'utilizzo di geogriglie per ridurre le deformazioni permanenti del ballast, come confermano simulazioni numeriche FEM e DEM su larga scala.

Tutte queste ricerche dimostrano l'efficacia delle tecniche data-driven e l'integrazione con sensori fissi (es. FBG, MEMS, fibre ottiche) nel rilevamento precoce di difetti geometrici, strutturali e funzionali del binario. L'evoluzione tecnologica consente oggi di passare da strategie ispettive discontinue a sistemi predittivi integrati, supportati da Big Data e Digital Twin, con l'obiettivo di una manutenzione più tempestiva, mirata ed economicamente sostenibile.

Anche il monitoraggio a bordo treno ha ricevuto importanti contributi: Weston et al. [75] dopo aver effettuato una indagine sui metodi di monitoraggio a bordo treno, hanno evidenziato come l'efficacia dei sensori low-cost sia bassa in termini di precisione, ma combinando questi sistemi a dispositivi mobili si potrà aumentare la potenzialità del monitoraggio. A tal proposito, Seraj et al. [76] e Paixão et al. [77] esplorano l'uso di smartphone per il monitoraggio collaborativo delle condizioni del binario, come poi ripreso nello sviluppo di piattaforme low-cost in Italia e in Brasile.

Nielsen et al. [78] promuovono l'impiego di tecniche senza contatto per un monitoraggio dinamico ad alta produttività, passando da tecniche ispettive manuali a sistemi automatici a bordo treno. Thompson [79] aveva collegato le irregolarità del binario con i livelli di rumore e di vibrazione, suggerendo soglie per la manutenzione oltre che una valutazione dell'impatto acustico. Nel contesto della diagnostica in galleria, Mili et al. [80] introducono strategie di gestione del rischio e rilievo tridimensionale, poi riprese da [50] con l'ausilio dell'AI. Un ulteriore contributo, in questo ambito, è quello di Stow & Andersson [81] che è diventato un benchmark per le tecniche di misura tramite treni diagnostici, mettendo in luce vantaggi e limiti rispetto ai metodi mobili innovativi.

Sul piano normativo e pianificatorio, Tzanakakis [82] propone una classificazione del ciclo di vita dell'infrastruttura ferroviaria in fasi (giovinezza, vita intermedia, vecchiaia), utile per definire le strategie di manutenzione. Selig e Waters [83] invece sono stati i pionieri nella classificazione delle componenti strutturali della ferrovia e nella descrizione del comportamento del ballast, come base per molte applicazioni GPR oggi adottate nei sistemi NDT.

Tecnologie di rilievo avanzate come SAR e LIDAR, rispettivamente per la mappatura del terreno e la valutazione tridimensionale di strutture, sono state validate da Liu et al. [84], per il monitoraggio di ponti e infrastrutture ferroviarie. Sempre relativamente a questo tema, Burrow et al. [85] hanno compreso, mediante monitoraggio congiunto GPR-InSAR come rilevare i cedimenti differenziali nei punti di transizione ponte-rilevato. Infine, Güler [86] propone modelli di segmentazione del binario e algoritmi genetici per la manutenzione basata su dati e standard europei (EN, UIC), mentre Lidén [87] e Peralta et al. [88] sviluppano modelli di degrado e recupero predittivi per la programmazione ottimizzata degli interventi manutentivi al fine di migliorare le condizioni geometriche del binario.

2.3.2 *Contributo alla ricerca*

L'analisi dei contributi raccolti nel presente capitolo mette in evidenza il rilevante apporto scientifico che le sedi S.I.I.V. hanno fornito nell'ambito della geometria del binario, della diagnostica e del monitoraggio ferroviario. I risultati ottenuti testimoniano una piena adesione agli indirizzi del settore CEAR-03/A, con una capacità di coniugare rigore metodologico, innovazione tecnologica e applicabilità operativa. In particolare, gli studi sono stati in linea con le tendenze non solo scientifiche internazionali ma anche tecniche ed operative nazionali.

In particolare, gli studi sulla geometria del binario si sono distinti per l'attenzione ai parametri normativi, alle strategie progettuali ottimizzate in contesti complessi, e alla modellazione delle curve di raccordo. Questi studi sono tesi all'ottimizzazione della geometria per garantire sicurezza e comfort o garantire l'interoperabilità.

Sul fronte del monitoraggio, sono stati sviluppati metodi innovativi che includono sia tecnologie a terra, sia sistemi a bordo, fino all'adozione di tecniche satellitari e sensori avanzati.

Tali studi si pongono in linea con i migliori standard internazionali, che vedono la tendenza nell'affidarsi a tecnologie sempre più spinte, anche nell'ambito del machine learning, e nell'integrazione tra sensori intelligenti, data analytics e manutenzione predittiva i principali strumenti per la gestione moderna dell'infrastruttura ferroviaria. Le ricerche italiane si distinguono anche per l'attenzione alla sostenibilità e all'interoperabilità, proponendo soluzioni di impatto e rilievo, oltre che trasferibili in diversi contesti e casi studio. Il contributo scientifico della comunità S.I.I.V. ha dunque alimentato un progresso significativo in termini di conoscenze, strumenti e prospettive future, con un occhio rivolto all'applicabilità reale delle ricerche proposte. Il contributo scientifico è stato un sinolo con quello tecnico, tecnologico e

applicativo, rendendo le ricerche sviluppate di grande rilievo per una transizione verso un paradigma infrastrutturale più efficiente, sicuro e digitale.

2.3.3 *Criticità e sviluppi futuri*

L'analisi dei contributi raccolti ha permesso di individuare, accanto ai progressi raggiunti, alcune criticità strutturali e metodologiche ancora presenti nella ricerca ferroviaria, che rappresentano opportunità per lo sviluppo futuro. Una prima area di criticità riguarda la standardizzazione delle metriche e dei protocolli di valutazione. Sebbene siano stati introdotti metodi innovativi per la misura delle irregolarità geometriche e del degrado, la mancanza di criteri condivisi a livello nazionale e internazionale rende complessa l'integrazione dei dati e il confronto tra linee diverse. Tale mancanza si riflette anche nella difficoltà di definire soglie di accettabilità univoche, soprattutto nei sistemi tranviari urbani.

Un secondo limite è la frammentazione tra le tecnologie di monitoraggio. La piena interoperabilità tra sensori, modelli predittivi e sistemi di gestione infrastrutturale necessita di ulteriori sviluppi, soprattutto in termini di scalabilità e trasferibilità delle soluzioni.

Anche la validazione dei modelli predittivi rappresenta una sfida: molti studi, pur fondati su dati reali, si concentrano su tratte limitate o condizioni specifiche, riducendo la generalizzabilità dei risultati. Servono dunque sperimentazioni su scala più ampia, che coinvolgano linee con caratteristiche diverse per estensione, traffico e configurazione infrastrutturale.

Dal punto di vista applicativo, si osserva la necessità di rafforzare il legame tra ricerca e pratica operativa in ambito AI. In particolare, le tecnologie basate su AI e digital twin, pur promettenti, richiedono una maggiore integrazione con i processi decisionali delle imprese ferroviarie, affinché le soluzioni sviluppate in ambito accademico possano essere effettivamente adottate nella gestione quotidiana.

In prospettiva, sarebbe necessario sviluppare argomenti come l'integrazione sistematica tra osservazione da satellite e sensori in situ o la definizione di nuove metriche di performance basate su criteri di sostenibilità ambientale e resilienza infrastrutturale.

L'evoluzione tecnologica e metodologica osservata negli ultimi anni costituisce quindi una base solida per affrontare queste sfide e promuovere una trasformazione strutturale nel modo in cui le infrastrutture ferroviarie vengono progettate, monitorate e mantenute.

2.3.4 Bibliografia

1. Cantisani, G., Loprencipe, G., Puzzo, L.: Parametri di riferimento per la definizione della geometria dei tracciati ferroviari: limiti di interoperabilità e normativi. *Atti del IV Convegno Nazionale Sicurezza ed Esercizio Ferroviario. Soluzioni e Strategie per lo Sviluppo del Trasporto Ferroviario*. 259–268 (2015).
2. Baglieri, O., Santagata, E., Laterza, P.Z., Lisi, S.: Studio sull’evoluzione delle grandezze caratteristiche degli apparecchi del binario: applicazione dei nuovi indirizzi normativi di RFI | IF ingegneria ferroviaria. *Ingegneria Ferroviaria*. 661 (2016).
3. Biancardo, S.A., Avella, F., Di Lisa, E., Chen, X., Abbondati, F., Dell’acqua, G.: Multiobjective railway alignment optimization using ballastless track and reduced cross-section in tunnel. *Sustainability (Switzerland)*. 13, (2021). <https://doi.org/10.3390/SU131910672>.
4. Berardi, G., Di Mascio, P., Loprencipe, G.: Curve di raccordo per migliorare il comfort di marcia. In: *Innovazione e Nuove Sfide nei Sistemi Ferroviari*. pp. 105–114. Roma (2011).
5. Birdin, M., Stefanutti, M.: Ricerca dell’equazione intrinseca di una curva di transizione ferroviaria per la regolarità del moto dei rotabili. In: *IX Convegno Nazionale S.I.I.V. “Pianificazione e gestione di infrastrutture ferroviarie e aeroportuali”*. pp. 39–51. Cagliari (1999).
6. Bordin, M., Stefanutti, M.: Analisi del moto dei rotabili lungo le curve di transizione ferroviarie realizzate con la parabola cubica. In: *IX Convegno Nazionale S.I.I.V. “Pianificazione e gestione di infrastrutture ferroviarie e aeroportuali”*. pp. 26–38. Cagliari (1999).
7. Aquilino, E., Colonna, P., Tragni, O.: Le innovazioni tecnologiche nei metodi di tracciamento e controllo delle curve ferroviarie. In: *IX Convegno Nazionale S.I.I.V. “Pianificazione e gestione di infrastrutture ferroviarie e aeroportuali”*. pp. 1–18. Cagliari (1999).
8. Calvi, A., D’Amico, F., Ciampoli, L.B., Ferrante, C.: Evaluation of driving performance after a transition from automated to manual control: A driving simulator study. *Transportation Research Procedia*. 45, 755–762 (2020). <https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2020.02.101>.
9. Montepara, A., Giuliani, F.: Problematiche geometriche della poligonale d’asse delle linee A.V. *Ingegneria Ferroviaria*. (2002).
10. Colonna, P., Pisciotta, M.: L’alta velocità ferroviaria: contributo per la razionalizzazione dei criteri di scelta strategica e per la definizione ottimale della geometria dei raccordi piano-altimetrici. *Vie & Trasporti*. (1995).
11. Chiacchiari, L., Loprencipe, G.: Measurement methods and analysis tools for rail irregularities: a case study for urban tram track. *Journal of Modern Transportation*. 23, 137–147 (2015). <https://doi.org/10.1007/S40534-015-0070-6>.
12. Loprencipe, G., Chiacchiari, L.: Misura e valutazione dell’irregolarità delle rotaie nei sistemi ferroviari urbani. In: *III Convegno Nazionale Sicurezza ed Esercizio Ferroviario SEF13 – Tecnologie e Regolamentazione per la Competizione*. pp. 233–244. Roma (2013).

13. Guerrieri, M., Parla, G., Ticali, D., Corriere, F.: Tramway Track: A New Approach for Measuring the Transverse Profile of Worn-Out Rails. *AASRI Procedia*. 3, 451–456 (2012). <https://doi.org/10.1016/J.AASRI.2012.11.071>.
14. Guerrieri, M., Corriere, F., Parla, G., Ticali, D.: Determinazione dell’usura di rotaie tranviarie mediante analisi delle immagini con tecniche mono e stereoscopiche. *Gli speciali di Ferpress.it*. (2024).
15. Giunta, M., Leonardi, G.: Data-driven track geometry defects localization and strategies for preventive maintenance: a case study. *Transportation Research Procedia*. 90, 234–241 (2025). <https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2025.06.063>.
16. Giunta, M., Leonardi, G., Vitale, A.: Environmental management of rail track maintenance based on track degradation rate. In: *Proceedings of The 5th Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration (EMCEI-2023)*. Rende (Cosenza) (2023).
17. Buonsanti, M., Cacciola, M., Cirianni, F., Leonardi, G., Megali, G.: Experimental and computational materials defects investigation. *Proceedings - 8th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, EUROSIM 2013*. 167–172 (2015). <https://doi.org/10.1109/EUROSIM.2013.39>.
18. Buonsanti, M., Leonardi, G., Megali, G., Scopelliti, F.: Rotating electromagnetic system for railway track crack detection. *Adv Mat Res*. 875–877, 401–405 (2014). <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.875-877.401>.
19. Praticò, F.G., Giunta, M.: An integrative approach RAMS-LCC to support decision on design and maintenance of rail track. *10th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2017*. (2017). <https://doi.org/10.3846/ENVIRO.2017.144>.
20. Praticò, F.G., Giunta, M.: Assessing The Sustainability Of Design And Maintenance Strategies For Rail Track By Means Of Life Cycle Cost Analysis. *WIT Transactions on The Built Environment*. 162, 251–262 (2016). <https://doi.org/10.2495/CR160231>.
21. La Placa, A., Freddi, F., Giuliani, F.: Bonded insulated rail joint monitoring using gap opening variation with fibre optic sensors: analytical validation and limits. *Transportation Research Procedia*. 74, 1007–1014 (2023). <https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2023.11.237>.
22. La Placa, A., Freddi, F., Giuliani, F.: Monitoring of Insulated Rail Joints Based on Gap Value Measurement. *Urban Rail Transit*. 10, 28–41 (2024). <https://doi.org/10.1007/S40864-023-00206-0>.
23. Bianchi, G., Fanelli, C., Freddi, F., Giuliani, F., La Placa, A.: Systematic review railway infrastructure monitoring: From classic techniques to predictive maintenance. *Advances in Mechanical Engineering*. 17, (2025). <https://doi.org/10.1177/16878132241285631>.
24. Bianchi, G., Freddi, F., Giuliani, F., La Placa, A.: Implementation of an AI-based predictive structural health monitoring strategy for bonded insulated rail joints using digital twins under varied bolt conditions. *Railway Engineering Science*. (2025). <https://doi.org/10.1007/S40534-024-00371-3>.

25. La Placa, A., Benelli, F., Bianchi, G., Freddi, F., Giuliani, F.: Behaviour of supported and unsupported insulated rail joint under different preload conditions. *Transportation Research Procedia*. 90, 991–998 (2025). <https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2025.06.013>.
26. Marchetta, V., Di Graziano, A., Soleimanmeigouni, I., Ahmadi, A.: Railway degradation behaviour analysis in narrow-gauge railways: A local-railway case study. *Proc Inst Mech Eng F J Rail Rapid Transit*. 237, 818–831 (2023). <https://doi.org/10.1177/09544097221136912>.
27. Di Vincenzo, D., Guerrieri, M.: Gestione e diagnostica della sovrastruttura ferroviaria. un caso studio: la linea Palermo - Messina. *ARGOMENTI*. 7, 47–77 (2019).
28. Artagan, S.S., Bianchini Ciampoli, L., D’Amico, F., Calvi, A., Tosti, F.: Non-destructive Assessment and Health Monitoring of Railway Infrastructures. *Surv Geophys*. 41, 447–483 (2020). <https://doi.org/10.1007/S10712-019-09544-W>.
29. Bianchini Ciampoli, L., Gagliardi, V., Clementini, C., Latini, D., Del Frate, F., Benedetto, A.: Transport Infrastructure Monitoring by InSAR and GPR Data Fusion. *Surv Geophys*. 41, 371–394 (2020). <https://doi.org/10.1007/S10712-019-09563-7/FIGURES/4>.
30. Ferrante, C., Bianchini Ciampoli, L., Benedetto, A., Alani, A.M., Tosti, F.: Non-destructive technologies for sustainable assessment and monitoring of railway infrastructure: a focus on GPR and InSAR methods. *Environ Earth Sci*. 80, (2021). <https://doi.org/10.1007/S12665-021-10068-Z>.
31. Gagliardi, V., Tosti, F., Bianchini Ciampoli, L., Battagliere, M.L., D’Amato, L., Alani, A.M., Benedetto, A.: Satellite Remote Sensing and Non-Destructive Testing Methods for Transport Infrastructure Monitoring: Advances, Challenges and Perspectives. *Remote Sens (Basel)*. 15, (2023). <https://doi.org/10.3390/RS15020418>.
32. Tosti, F., Gagliardi, V., Ciampoli, L.B., Benedetto, A., Threader, S., Alani, A.M.: Integration of Remote Sensing and Ground-Based Non-Destructive Methods in Transport Infrastructure Monitoring: Advances, Challenges and Perspectives. 2021 IEEE Asia-Pacific Conference on Geoscience, Electronics and Remote Sensing Technology, AGERS 2021 - Proceeding. 1–7 (2021). <https://doi.org/10.1109/AGERS53903.2021.9617280>.
33. Gagliardi, V., Ciampoli, L.B., D’Amico, F., Alani, A.M., Tosti, F., Benedetto, A.: Multi-temporal SAR interferometry for structural assessment of bridges: The rochester bridge case study. *Airfield and Highway Pavements 2021: Pavement Materials and Sustainability - Selected Papers from the International Airfield and Highway Pavements Conference 2021*. 308–319 (2021). <https://doi.org/10.1061/9780784483510.028>.
34. Gagliardi, V., Tosti, F., Ciampoli, L.B., Battagliere, M.L., Tapete, D., D’Amico, F., Threader, S., Alani, A.M., Benedetto, A.: Spaceborne Remote Sensing for Transport Infrastructure Monitoring: A Case Study of the Rochester Bridge, UK. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 2022-July, 4762–4765 (2022). <https://doi.org/10.1109/IGARSS46834.2022.9883719>.

35. Ciampoli, L.B., Calvi, A., D’Amico, F.: Railway ballast monitoring by GPR: A test-site investigation. *Remote Sens (Basel)*. 11, (2019). <https://doi.org/10.3390/RS11202381>.
36. Tosti, F., Bianchini Ciampoli, L., Calvi, A., Alani, A.M., Benedetto, A.: An investigation into the railway ballast dielectric properties using different GPR antennas and frequency systems. *NDT and E International*. 93, 131–140 (2018). <https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2017.10.003>.
37. Benedetto, A., Tosti, F., Bianchini Ciampoli, L., Calvi, A., Brancadoro, M.G., Alani, A.M.: Railway ballast condition assessment using ground-penetrating radar – An experimental, numerical simulation and modelling development. *Constr Build Mater*. 140, 508–520 (2017). <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.02.110>.
38. Ciampoli, L.B., Calvi, A., D’Amico, F., Tosti, F.: GPR Data Collection and Processing Strategies for Railway Ballast Evaluation. 2020 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing, TSP 2020. 426–429 (2020). <https://doi.org/10.1109/TSP49548.2020.9163588>.
39. Bianchini Ciampoli, L., Artagan, S.S., Tosti, F., Calvi, A., Alani, A., Benedetto, A.: A GPR spectral-based filtering for minimisation of concrete sleepers effects in railway ballast investigations. (2018).
40. Bianchini Ciampoli, L., Gagliardi, V., D’Amico, F., Clementini, C., Latini, D., Benedetto, A.: Quality assessment in railway ballast by integration of NDT methods and remote sensing techniques: a study case in Salerno, Southern Italy. *EGUGA. EGU22-2712* (2022). <https://doi.org/10.5194/EGUSPHERE-EGU22-2712>.
41. Bianchini Ciampoli, L., Artagan, S.S., Tosti, F., Gagliardi, V., Alani, A.M., Benedetto, A.: A comparative investigation of the effects of concrete sleepers on the GPR signal for the assessment of railway ballast. 2018 17th International Conference on Ground Penetrating Radar, GPR 2018. (2018). <https://doi.org/10.1109/ICGPR.2018.8441588>.
42. Bianchini Ciampoli, L., Tosti, F., Brancadoro, M.G., D’Amico, F., Alani, A.M., Benedetto, A.: A spectral analysis of ground-penetrating radar data for the assessment of the railway ballast geometric properties. *NDT and E International*. 90, 39–47 (2017). <https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2017.05.005>.
43. D’Amico, F., Gagliardi, V., Bianchini Ciampoli, L., Tosti, F.: Integration of InSAR and GPR techniques for monitoring transition areas in railway bridges. *NDT and E International*. 115, (2020). <https://doi.org/10.1016/J.NDTEINT.2020.102291>.
44. Benedetto, A., Bianchini Ciampoli, L., Brancadoro, M.G., Alani, A.M., Tosti, F.: A Computer-Aided Model for the Simulation of Railway Ballast by Random Sequential Adsorption Process. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 33, 243–257 (2018). <https://doi.org/10.1111/MICE.12342>.
45. Chiacchiari, L., Thompson, D.J., Squicciarini, G., Ntsios, E., Loprencipe, G.: Rail roughness and rolling noise in tramways. *J Phys Conf Ser*. 744, (2016). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/744/1/012147>.
46. de Oliveira, R.H., Loprencipe, G., Vaz de Almeida Filho, F.G., de Sousa Pissardini, R.: Experimental investigation on the use of multiple very low-cost

- inertial-based devices for comfort assessment and rail track monitoring. *Measurement (Lond)*. 199, (2022). <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2022.111549>.
47. Henrique De Oliveira, R., Vaz, F., Filho, A., De, R., Pissardini, S., Loprencipe, G.: Monitoramento do Conforto e da Qualidade Viária Baseado em Sensores de Baixo Custo: Investigação Exploratória no Transporte Ferroviário. 1, 2022, (2025).
48. Guerrieri, M., Parla, G., Celauro, C.: Digital image analysis technique for measuring railway track defects and ballast gradation. *Measurement (Lond)*. 113, 137–147 (2018). <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2017.08.040>.
49. Foria, F., Calicchio, M., Moretti, L., Loprencipe, G.: Multidimensional mobile mapping and integrated approach for the digitalisation of underground transport infrastructure. *Acta Polytechnica*. 63, 111–122 (2023). <https://doi.org/10.14311/AP.2023.63.0111>.
50. Foria, F., Miceli, G., Calicchio, M.: Digital transformation in the visual inspection of heritage railways tunnels: Technology, artificial intelligence and methodology. *Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites III - Proceedings of the 3rd International Issmge TC301 Symposium*, 2022. 337–348 (2022). <https://doi.org/10.1201/9781003308867-20>.
51. Caroti, L., Lancieri, F., M., Losa.: L'utilizzazione del FWD per la determinazione dei parametri meccanici della massicciata e della piattaforma. In: *Atti del IX Convegno Nazionale S.I.I.V." Pianificazione e gestione di infrastrutture ferroviarie e aeroportuali"*. p. 76. Cagliari (1999).
52. Colagrande, S.: Considerazioni sui modelli di previsione del rumore da traffico ferroviario. In: *Atti del IX Convegno Nazionale S.I.I.V." Pianificazione e gestione di infrastrutture ferroviarie e aeroportuali"*. pp. 83–90. Cagliari (1999).
53. Giunta, M., Barrile, V., Leonardi, G., Genovese, E.: Comprehensive Railway Track Monitoring Using Unmanned Aerial Systems (UASs) and Building Information Modeling (BIM). *Lecture Notes in Computer Science*. 15894 LNCS, 407–419 (2026). https://doi.org/10.1007/978-3-031-97648-3_27.
54. Giunta, M., Barrile, V., Genovese, E.: Using UAV imagery for Railway Track Monitoring: Focus on Ballast Assessment and Preventive Maintenance. In: *Proceedings of 7th Euro-mediterranean conference for environmental integration (EMCEI 2025)*. Reggio Calabria (2025).
55. Talib, N.H., Hasnan, K. Bin, Nawawi, A. Bin, Abdullah, H.B., Elewe, A.M.: Monitoring Large-Scale Rail Transit Systems Based on an Analytic Hierarchy Process/Gradient-Based Cuckoo Search Algorithm (GBCS) Scheme. *Urban Rail Transit*. 6, 132–144 (2020). <https://doi.org/10.1007/S40864-020-00126-3>.
56. American Railway Engineering and Maintenance of way Association: *Communications & Signals Manual, Part 8.6.35*, (2000).
57. Molodova, M., Oregui, M., Núñez, A., Li, Z., Dollevoet, R.: Health condition monitoring of insulated joints based on axle box acceleration measurements. *Eng Struct*. 123, 225–235 (2016). <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2016.05.018>.
58. Sun, Y., Liu, Y., Yang, C.: Railway joint detection using deep convolutional neural networks. *IEEE International Conference on Automation Science and*

- Engineering. 2019-August, 235–240 (2019).
<https://doi.org/10.1109/COASE.2019.8843245>.
59. Sun, Y.Q., Spiryagin, M., Wu, Q., Cole, C., Ma, W.H.: Feasibility in assessing the dipped rail joint defects through dynamic response of heavy haul locomotive. *Journal of Modern Transportation*. 26, 96–106 (2018).
<https://doi.org/10.1007/S40534-018-0159-9>.
60. Stephen, J.T., Hardwick, C., Beaty, P., Lewis, R., Marshall, M.B.: Ultrasonic monitoring of insulated block joints. *Proc Inst Mech Eng F J Rail Rapid Transit*. 233, 251–261 (2019). <https://doi.org/10.1177/0954409718791396>.
61. Xie, J., Huang, J., Zeng, C., Jiang, S.H., Podlich, N.: Systematic literature review on data-driven models for predictive maintenance of railway track: Implications in geotechnical engineering. *Geosciences (Switzerland)*. 10, 1–24 (2020). <https://doi.org/10.3390/GEOSCIENCES10110425>.
62. Faghih-Roohi, S., Hajizadeh, S., Nunez, A., Babuska, R., De Schutter, B.: Deep convolutional neural networks for detection of rail surface defects. *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks*. 2016-October, 2584–2589 (2016). <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2016.7727522>.
63. Chandran, P., Asber, J., Thiery, F., Odelius, J., Rantatalo, M.: An investigation of railway fastener detection using image processing and augmented deep learning. *Sustainability (Switzerland)*. 13, (2021).
<https://doi.org/10.3390/SU132112051>.
64. Zhang, D., Xu, P., Tian, Y., Zhong, C., Zhang, X.: Ballasted Track Behaviour Induced by Absent Sleeper Support and its Detection Based on a Convolutional Neural Network Using Track Data. *Urban Rail Transit*. 9, 92–109 (2023).
<https://doi.org/10.1007/S40864-023-00187-0>.
65. Allah Bukhsh, Z., Saeed, A., Stipanovic, I., Doree, A.G.: Predictive maintenance using tree-based classification techniques: A case of railway switches. *Transp Res Part C Emerg Technol*. 101, 35–54 (2019).
<https://doi.org/10.1016/J.TRC.2019.02.001>.
66. Stypułkowski, K., Gołda, P., Lewczuk, K., Tomaszewska, J.: Monitoring system for railway infrastructure elements based on thermal imaging analysis. *Sensors*. 21, (2021). <https://doi.org/10.3390/S21113819>.
67. Ye, W., Ren, J., Li, C., Liu, W., Zhang, Z., Lu, C.: Intelligent Detection of Surface Defects in High-Speed Railway Ballastless Track Based on Self-Attention and Transfer Learning. *Struct Control Health Monit*. 2024, (2024).
<https://doi.org/10.1155/2024/2967927>.
68. Min, Y., Li, J., Li, Y.: Rail Surface Defect Detection Based on Improved UPerNet and Connected Component Analysis. *Computers, Materials and Continua*. 77, 941–962 (2023). <https://doi.org/10.32604/CMC.2023.041182>.
69. Perkins, S.W., Montana State University (Bozeman, Mont.). D. of C.E.: *Geosynthetic Reinforcement of Flexible Pavements: Laboratory Based Pavement Test Sections*. (1999). <https://doi.org/10.21949/1518204>.
70. Bathurst, R.J., Raymond, G.P.: *Geogrid reinforcement of ballasted track*. *Transp Res Rec*. (1987).

71. Matharu, M.S.: Geogrids cut ballast settlement rate on soft substructures. *Railway Gazette International*. (1994).
72. Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., Nimbalkar, S.: Use of Geosynthetics in Railways Including Geocomposites and Vertical Drains. 4733–4742 (2011). [https://doi.org/10.1061/41165\(397\)484](https://doi.org/10.1061/41165(397)484).
73. Tutumluer, E., Qian, Y., Hashash, Y.M.A., Ghaboussi, J., Davis, D.D.: Discrete element Modelling of ballasted track deformation Behaviour. *International Journal of Rail Transportation*. 1, 57–73 (2013). <https://doi.org/10.1080/23248378.2013.788361>.
74. Ngo, N.T., Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C.: DEM simulation of the behaviour of geogrid stabilised ballast fouled with coal. *Comput Geotech*. 55, 224–231 (2014). <https://doi.org/10.1016/J.COMPGEO.2013.09.008>.
75. Weston, P., Roberts, C., Yeo, G., Stewart, E.: Perspectives on railway track geometry condition monitoring from in-service railway vehicles. *Vehicle System Dynamics*. 53, 1063–1091 (2015). <https://doi.org/10.1080/00423114.2015.1034730>.
76. Seraj, F., Meratnia, N., Havinga, P.J.M.: RoVi: Continuous transport infrastructure monitoring framework for preventive maintenance. 2017 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, PerCom 2017. 217–226 (2017). <https://doi.org/10.1109/PERCOM.2017.7917868>.
77. Paixão, A., Fortunato, E., Calçada, R.: Smartphone’s Sensing Capabilities for On-Board Railway Track Monitoring: Structural Performance and Geometrical Degradation Assessment. *Advances in Civil Engineering*. 2019, (2019). <https://doi.org/10.1155/2019/1729153>.
78. Nielsen, J., Berggren, E.G., Lölgen, T., Müller, R., Stallaert, B., Pesqueux, L.: Overview of Methods for Measurement of Track Irregularities for Ground-Borne Vibration – Deliverable D2.5. (2013).
79. Thompson, D.J.: On the relationship between wheel and rail surface roughness and rolling noise. *J Sound Vib*. 193, 149–160 (1996). <https://doi.org/10.1006/JSVI.1996.0254>.
80. Mili, M., Chille, F., Thuad, C.: Comparison of international repair works practices in railway tunnels. In: 16th International Congress AFTES 2021 (2021).
81. Stow, J., Andersson, E.: Field testing and instrumentation of railway vehicles. *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*. 423–456 (2006). <https://doi.org/10.1201/9780849333217.CH13>.
82. Tzanakakis, K.: The Railway Track and Its Long Term Behaviour. 2, (2013). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36051-0>.
83. Selig, E.T., Waters, J.M.: Track geotechnology and substructure management. Emerald Publishing Limited (1994). <https://doi.org/10.1680/TGASM.20139>.
84. Liu, W., Chen, S., Hauser, E.: LiDAR-based bridge structure defect detection. *Exp Tech*. 35, 27–34 (2011). <https://doi.org/10.1111/J.1747-1567.2010.00644.X>.

85. Burrow, M.P.N., Bowness, D., Ghataora, G.S.: A comparison of railway track foundation design methods. *Proc Inst Mech Eng F J Rail Rapid Transit.* 221, 1–12 (2007). <https://doi.org/10.1243/09544097JRRT58>.
86. Guler, H.: Optimisation of railway track maintenance and renewal works by genetic algorithms. *Gradjevinar.* 68, 979–993 (2016). <https://doi.org/10.14256/JCE.1458.2015>.
87. Lidén, T.: Railway infrastructure maintenance - A survey of planning problems and conducted research. *Transportation Research Procedia.* 10, 574–583 (2015). <https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2015.09.011>.
88. Peralta, D., Bergmeir, C., Krone, M., Galende, M., Menéndez, M., Sainz-Palmero, G.I., Martinez Bertrand, C., Klawonn, F., Benitez, J.M.: Multiobjective Optimization for Railway Maintenance Plans. *Journal of Computing in Civil Engineering.* 32, (2018). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000757](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000757).

2.4 Sostenibilità ambientale e sicurezza operativa

Nel panorama delle sfide contemporanee, due esigenze fondamentali si impongono con crescente urgenza nelle agende politiche, economiche e sociali: la tutela dell’ambiente e la sicurezza nei trasporti. Il settore ferroviario, storicamente riconosciuto per la sua efficienza energetica e per la capacità di trasportare grandi volumi di passeggeri e merci con un impatto ambientale contenuto, si colloca al centro di questo doppio imperativo. In particolare, la promozione del trasporto ferroviario come alternativa sostenibile alla mobilità su gomma o al trasporto aereo si intreccia in modo indissolubile anche con la necessità di garantire alti livelli di sicurezza infrastrutturale, operativa e tecnologica [1]

Quello ferroviario è uno dei modi di trasporto a più basso impatto ambientale in termini di emissioni di gas serra per passeggero-chilometro e tonnellata-chilometro, soprattutto se alimentato da fonti rinnovabili o elettriche [2]. La strategia europea per la decarbonizzazione dei trasporti riconosce esplicitamente il ruolo strategico della ferrovia nel raggiungimento degli obiettivi del Green Deal europeo, che prevede la riduzione del 90% delle emissioni di CO₂ entro il 2050 [3].

Tuttavia, questa transizione non può avvenire senza un’attenta considerazione delle condizioni di sicurezza operativa: la percezione di sicurezza da parte degli utenti è infatti una condizione necessaria affinché il trasporto ferroviario sia effettivamente competitivo e attraente rispetto ad altre modalità di trasporto. Nonostante i numerosi progressi tecnologici e normativi, gli incidenti ferroviari continuano a verificarsi, talvolta con conseguenze tragiche non solo in termini di vite umane, ma anche sul piano ambientale. Eventi come il disastro ferroviario di Viareggio del 2009 dove lo sversamento e

l'esplosione di GPL causarono vittime e danni ambientali significativi – dimostrano come la sicurezza e la protezione dell'ambiente siano strettamente collegate [4]. Anche incidenti apparentemente minori possono comportare fuoriuscite di sostanze pericolose, contaminazione del suolo o danni a ecosistemi vulnerabili. In questa prospettiva, la sicurezza ferroviaria non si limita alla sola prevenzione degli incidenti, ma comprende anche una gestione strutturata ed efficiente delle emergenze, nonché l'adozione di misure volte alla mitigazione degli impatti ambientali connessi a eventuali eventi critici.

Parallelamente, le tecnologie finalizzate al miglioramento della sicurezza – come il sistema ERTMS (European Rail Traffic Management System), il monitoraggio in tempo reale delle condizioni dei binari e dei convogli, e l'impiego di sensori predittivi – contribuiscono anche a ottimizzare l'efficienza energetica e a ridurre l'impatto ambientale delle operazioni ferroviarie. Un traffico ferroviario più fluido, con minori interruzioni e rallentamenti, implica una riduzione del consumo di energia e delle emissioni correlate [5]. Inoltre, la digitalizzazione delle infrastrutture consente una gestione intelligente della rete, integrando considerazioni ambientali nella pianificazione dei percorsi, nella manutenzione predittiva e nel controllo dei flussi di merci pericolose.

Va anche considerato che la progettazione di infrastrutture ferroviarie sicure e sostenibili implica un approccio sistemico: l'interazione tra ambiente, territorio e rete ferroviaria richiede una valutazione accurata anche del rischio idrogeologico, della resilienza al cambiamento climatico (ad esempio rispetto a frane, allagamenti, incendi), nonché dell'impatto acustico e paesaggistico.

Inoltre, l'adozione di combustibili alternativi e tecnologie pulite – come l'idrogeno, i biocarburanti o i sistemi di trazione elettrica alimentati da fonti rinnovabili – deve essere accompagnata da standard elevati di sicurezza. I nuovi sistemi energetici introducono infatti rischi specifici che devono essere gestiti con competenze specialistiche e normative adeguate. Ad esempio, l'uso dell'idrogeno impone criteri stringenti di progettazione e manutenzione per prevenire fughe o esplosioni, che avrebbero un impatto devastante sia per le persone che per l'ambiente [6].

Dal punto di vista normativo, l'Unione Europea ha costruito nel tempo un quadro regolatorio articolato che mira a coniugare sicurezza, interoperabilità e sostenibilità del sistema ferroviario. Le direttive del cosiddetto “quarto pacchetto ferroviario” e i regolamenti della European Union Agency for Railways (ERA) promuovono l'adozione di standard comuni tra gli Stati membri, favorendo l'innovazione e la competitività del trasporto ferroviario. In particolare, le linee guida sull'analisi del rischio ambientale e sulla gestione

delle emergenze contribuiscono a ridurre la vulnerabilità del sistema anche in scenari climatici estremi, sempre più frequenti [7].

In sintesi, la sicurezza e la sostenibilità ambientale in ambito ferroviario sono due facce della stessa medaglia. Un sistema sicuro è anche più sostenibile, perché riduce il rischio di danni ambientali, favorisce l'efficienza operativa e aumenta la fiducia dei cittadini verso una mobilità più verde. Allo stesso tempo, un sistema sostenibile è più sicuro, perché nasce da una pianificazione attenta, da tecnologie evolute e da una governance orientata alla resilienza.

Quadro normativo e regolatorio nazionale e internazionale

La regolamentazione del trasporto ferroviario rappresenta una delle chiavi per coniugare sicurezza operativa e tutela ambientale. A livello europeo e nazionale, negli ultimi anni si è assistito a una crescente convergenza normativa volta a costruire un sistema ferroviario più sicuro, interoperabile e coerente con gli obiettivi della transizione ecologica. Il quadro normativo si articola su due livelli principali: quello europeo/internazionale e quello nazionale, entrambi strettamente integrati.

In ambito europeo, uno degli strumenti più rilevanti è costituito dal Quarto Pacchetto Ferroviario, un insieme di direttive e regolamenti adottati dall'Unione Europea tra il 2016 e il 2020, con l'obiettivo di armonizzare il mercato ferroviario e rafforzare la sicurezza su scala continentale [8]. In particolare, la Direttiva (UE) 2016/798 sulla sicurezza ferroviaria stabilisce i requisiti per i sistemi di gestione della sicurezza e per le autorità competenti. A essa si affianca la Direttiva (UE) 2016/797 sull'interoperabilità, che promuove standard tecnici comuni, essenziali anche per ottimizzare l'efficienza energetica e ambientale del sistema ferroviario.

Il 13 giugno 2024 è stato adottato il nuovo Regolamento (EU) 2024/1679 sugli orientamenti dell'UE per lo sviluppo della rete transeuropea dei trasporti (TEN-T) che ha abrogato il precedente Regolamento (UE) 1315/2013 e modificato il Regolamento (UE) 913/2010 istitutivo dei Corridoi Ferroviari Mercati.

Il nuovo Regolamento rafforza in modo significativo l'impegno comunitario volto a costruire una rete integrata, sostenibile e resiliente come spina dorsale del mercato unico, che contribuirà a migliorare la connettività, la coesione economica e sociale tra le regioni europee.

Un ruolo centrale è svolto dall'Agenzia dell'Unione europea per le ferrovie (ERA), potenziata dal Regolamento (UE) 2016/796, che assume compiti operativi nel rilascio delle autorizzazioni e nella definizione di linee guida in

materia di gestione del rischio, sicurezza ambientale e digitalizzazione delle reti [9].

A livello extra-europeo, la Convenzione COTIF (Convenzione relativa ai Trasporti Internazionali per Ferrovia), adottata nell'ambito dell'OTIF (Organizzazione intergovernativa per i trasporti internazionali ferroviari (OTIF)), rappresenta il riferimento normativo per i trasporti ferroviari transfrontalieri, inclusa la disciplina per il trasporto sicuro di merci pericolose. In Italia, il recepimento del pacchetto europeo è avvenuto con il D.Lgs. 50/2019 (Codice dell'ordinamento ferroviario), che riforma l'intera architettura normativa in materia di sicurezza ferroviaria. Il decreto stabilisce l'obbligo per le imprese ferroviarie e i gestori dell'infrastruttura di adottare un sistema di gestione della sicurezza (SGS), fondato sull'analisi del rischio, la formazione del personale e la pianificazione delle emergenze. L'autorità di controllo competente è l'ANSFISA (Agenzia nazionale per la sicurezza delle ferrovie e delle infrastrutture stradali e autostradali), incaricata di vigilare sul rispetto degli standard di sicurezza [10].

In parallelo, la normativa ambientale italiana impone l'obbligo di sottoporre i progetti ferroviari alle valutazioni previste dal D.Lgs. 152/2006 (Testo Unico Ambientale). Gli strumenti principali sono:

- la Valutazione di Impatto Ambientale (VIA), per le singole opere;
- la Valutazione Ambientale Strategica (VAS), per piani e programmi;
- l'Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA), per impianti con elevato potenziale inquinante.

Tali procedure sono fondamentali per minimizzare l'impatto ambientale delle infrastrutture e garantire una coerenza tra sicurezza e sostenibilità [11].

Un elemento fondamentale dell'integrazione tra sicurezza e sostenibilità è costituito dalle Specifiche Tecniche di Interoperabilità (STI/TSI), obbligatorie per tutti gli Stati membri dell'UE. Tali specifiche fissano standard dettagliati per sottosistemi come il materiale rotabile, l'infrastruttura, l'energia e il controllo del traffico. La loro adozione consente di ridurre il rischio di errore umano, ottimizzare i consumi energetici e aumentare la resilienza del sistema ferroviario [12].

In particolare, il sistema ERTMS/ETCS (European Rail Traffic Management System / European Train Control System) rappresenta un avanzato sistema di segnalamento e controllo automatico dei treni, pensato per garantire sia la sicurezza operativa sia una gestione più efficiente e sostenibile del traffico ferroviario. Questo sistema fornisce al macchinista tutte le informazioni

necessarie per una guida strumentale, controllando con continuità gli effetti del suo operato sulla sicurezza della marcia del treno e attivando la frenatura d'urgenza nel caso di velocità del treno superiore a quella massima ammessa per la sicurezza [13].

La normativa non si limita a strumenti tecnici o procedurali, ma include anche piani strategici che mirano a ridurre l'impatto ambientale del settore trasporti proprio attraverso il rafforzamento del sistema ferroviario. Tra questi:

- Il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC), che punta alla decarbonizzazione del trasporto;
- Il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), che finanzia l'ammodernamento e la digitalizzazione della rete ferroviaria italiana;
- Il Piano generale dei trasporti e della logistica, che promuove il trasporto ferroviario come alternativa ecologica alla mobilità su gomma [14].

2.4.1 Lo stato dell'arte nazionale e internazionale

Considerata la rilevanza della tematica, la ricerca nazionale ha prodotto, negli ultimi decenni numerosi studi riconducibili alla sostenibilità ambientale ed agli aspetti della sicurezza operativa. Viene qui presentata una rassegna delle principali ricerche condotte tra il 1999 e il 2024, dagli studiosi italiani membri della S.I.I.V., evidenziando come le esigenze di sostenibilità ambientale, l'innovazione tecnologica, la gestione del rischio e la digitalizzazione abbiano trasformato profondamente la pianificazione e la gestione delle infrastrutture ferroviarie.

Sostenibilità

Con riferimento alle tematiche inerenti alla sostenibilità ambientale la ricerca scientifica si è focalizzata su differenti ambiti, tra cui i materiali costituenti la sede ferroviaria, come già approfondito nel § 2.2.1, le prestazioni ambientali ed economiche dei sistemi di armamento ferroviario con e senza ballast, l'applicazione di metodologie di analisi finalizzate alla valutazione degli impatti ambientali nel ciclo di vita come la Life Cycle Assessment (LCA), le vibrazioni.

Il recente studio di Giunta, 2023 [15] propone una rassegna sistematica della letteratura internazionale più recente sui trend e le sfide della sostenibilità ferroviaria, con un focus particolare sui materiali per la sede ferroviaria, le strategie di manutenzione e gli strumenti di valutazione della sostenibilità ambientale. Lo studio evidenzia come, sebbene la ferrovia rappresenti uno dei

mezzi di trasporto a più basso impatto ambientale in fase operativa, le fasi di costruzione e manutenzione comportano impatti significativi che devono essere attentamente valutati e minimizzati.

L'adozione di soluzioni infrastrutturali meno impattanti, come strategia chiave per la sostenibilità, è affrontato nel contributo scientifico di Biancardo et al. (2021) [16] che propone un modello multi-obiettivo per l'ottimizzazione del tracciato ferroviario, privilegiando tecnologie ballastless e sezioni ridotte in galleria. Tali soluzioni non solo riducono i costi di esercizio, ma minimizzano anche l'impatto ecologico delle opere.

La sostenibilità è trattata anche in relazione alla riconversione delle linee dismesse in greenways, tema che unisce recupero territoriale, mobilità dolce e valorizzazione ambientale (Guerrieri & Ticali, 2011) [17].

Un altro ambito di ricerca molto sviluppato riguarda la sostenibilità delle linee ferroviarie, considerata lungo tutto il loro ciclo di vita. A tal proposito, Giunta e Leonardi (2024) [18] hanno proposto un quadro metodologico basato su tecniche avanzate e strumenti quantitativi per supportare le decisioni progettuali lungo tutte le fasi del ciclo di vita. Il processo decisionale, infatti, in ogni fase della costruzione e manutenzione della ferrovia può essere efficacemente guidato da questi metodi e strumenti (LCA, LCC), in grado di individuare le soluzioni più appropriate attraverso una valutazione quantitativa degli impatti ambientali associati. I risultati ottenuti hanno evidenziato significativi margini di miglioramento delle prestazioni ambientali lungo l'intero ciclo di vita della ferrovia, grazie a una selezione consapevole di materiali e tecniche costruttive e manutentive. Inoltre, i metodi proposti mostrano un grande potenziale nel supportare i decisori in scelte più sostenibili ed efficienti. Parallelamente Celauro et al. 2023 [19] applicano la medesima metodologia per effettuare valutazioni di sostenibilità di differenti scelte costruttive per linee a doppio binario. Lo studio ha mostrato che nella costruzione di una linea ferroviaria a doppio binario l'impatto ambientale maggiore si concentra nella fase iniziale, soprattutto nella produzione dei materiali (>50% dell'impatto totale). L'uso di materiali riciclati e tecniche sostenibili riduce significativamente sia l'impatto ambientale che i costi nel lungo termine. L'approccio combinato LCA-LCC si conferma efficace per supportare decisioni sostenibili nel settore ferroviario.

Con riferimento alla sovrastruttura ferroviaria, numerosi contributi mettono a confronto il binario tradizionale con ballast con quello senza ballast soprattutto in ambito alta velocità. Praticò e Giunta (2018) [20] mostrano che, sebbene le soluzioni ballastless abbiano costi ed impatti ambientali iniziali più elevati, possono risultare più vantaggiose nel lungo periodo grazie alla minore necessità di manutenzione e alla maggiore durata.

Gli aspetti ambientali connessi con la fase operativa sono trattati negli studi di Giunta e Marino (2024, 2025) [21,22] sulle aree di manovra e smistamento, dove attraverso l'applicazione di opportuni modelli sono stimate le emissioni delle locomotive diesel, ancora oggi usate in tali aree ed i benefici derivanti dall'impiego di carburanti di nuova generazione, come l'HVO, i biodiesel e l'idrogeno.

Grande attenzione è dedicata anche alla manutenzione predittiva della sovrastruttura ferroviaria, con ricerche basate sull'elaborazione di dati raccolti sul campo. Giunta e Leonardi (2024) [23] hanno sviluppato un modello data-driven per individuare difetti geometrici nel tracciato e programmare anticipatamente interventi mirati a beneficio della gestione sostenibile delle infrastrutture ferroviarie.

Dal punto di vista tecnologico, sono stati sperimentati nuovi materiali per la costruzione e manutenzione del binario, come il ballast stabilizzato con bitume (BSB), che si è rivelato più duraturo rispetto al ballast tradizionale. Lo confermano gli studi di Bressi et al. (2018) [24] e Giunta et al. (2020) [25], i quali evidenziano come l'uso del BSB permetta di ridurre la frequenza degli interventi di manutenzione e le relative emissioni. Anche i geosintetici, come le geogriglie, si sono dimostrati utili per migliorare la stabilità e la durabilità della sede ferroviaria (Leonardi et al., 2021) [26], soprattutto su sottofondi deboli.

Negli ultimi due decenni, l'interesse scientifico verso lo studio delle vibrazioni indotte dal traffico ferroviario è stato significativo, soprattutto in considerazione dei loro effetti su edifici, infrastrutture storiche e sul benessere della popolazione. Un contributo rilevante in questo campo è stato fornito da un gruppo di studiosi S.I.I.V. i quali hanno condotto un'intensa attività di ricerca, con particolare attenzione alla modellazione numerica e alle misure di mitigazione tramite barriere nel terreno.

Gli studi di Buonsanti et al. 2009, Ferrara et al. 2012 [27,28] e Di Mino et al. 2009 [29] hanno posto le basi teoriche per comprendere la propagazione delle onde sismiche in mezzi elastici semispaziali, proponendo modelli agli elementi finiti per simulare l'interazione suolo-binario-edificio. Le ricerche di Ferrara, Jourdan e Leonardi, 2013 e 2013 [30,31], hanno approfondito il comportamento dinamico del sistema veicolo/binario, considerando anche difetti nei binari e ruote non perfettamente circolari, utilizzando modelli combinati FEM e DEM. Di particolare rilievo è l'introduzione di un modello di contatto areale per la connessione tra rotaia e traversa, che migliora l'aderenza rispetto all'assunzione classica di punto di contatto.

Ulteriori studi di Buonsanti, Leonardi e Scopelliti del 2007 e Buonsanti e Leonardi del 2012 [32,33] hanno indagato l'effetto degli smorzatori viscosi

verticali su carri merci, analizzando le differenze dinamiche tra configurazioni con e senza smorzamento, sia in condizioni di carico che a vuoto. L'importanza delle condizioni dinamiche del veicolo è stata ulteriormente sottolineata nello studio sulla velocità critica del sistema veicolo/binario da parte di Ferrara, Jourdan e Leonardi del 2014 [34] che hanno evidenziato picchi di vibrazione quando la frequenza di passaggio delle traverse coincide con la risonanza del sistema.

Sempre nell'ambito della problematica connessa alle vibrazioni, un filone costante nella produzione scientifica di diversi autori (Di Mino et al 2009, Buonsanti et al 2009 e 2010, Buonsanti et al 2011, Leonardi e Buonsanti, 2014, [35,36,37,38,39]) è stata la proposta di impiego di barriere nel terreno per la riduzione delle vibrazioni trasmesse agli edifici circostanti al passaggio del mezzo. Tali studi dimostrano come la presenza di discontinuità nel terreno (ad es. trincee o barriere di vario materiale e geometria) sia in grado di ridurre significativamente l'intensità delle onde trasmesse. La modellazione parametrica ha permesso di esaminare gli effetti di profondità, materiali e distanza delle barriere rispetto al binario, evidenziando come le barriere in cemento offrano una mitigazione particolarmente efficace.

La ricerca si è estesa anche agli edifici storici, come illustrato da Leonardi e Lo Bosco, 2019 [40], che hanno valutato l'impatto delle vibrazioni sui beni culturali, confermando l'efficacia delle soluzioni proposte anche in contesti architettonicamente sensibili.

Accanto agli approcci deterministici, studi paralleli come quelli di Di Mino et al. 2009 [41] hanno introdotto l'uso di reti neurali artificiali per l'analisi di sensitività, con riferimento particolare all'efficacia delle trincee aperte come soluzione passiva di mitigazione. L'integrazione di simulazioni FEM e strumenti di intelligenza artificiale ha permesso di individuare con maggiore precisione le configurazioni geometriche ottimali in funzione delle caratteristiche geotecniche del sito.

Bosurgi et al. (2005) [42] propongono un modello per l'analisi degli effetti dinamici locali su sovrastrutture ferroviarie ad alta velocità prive di ballast, con l'obiettivo di ottimizzare la stabilità geometrica, ridurre la necessità di manutenzione e contenere le vibrazioni trasmesse al terreno.

Dell'Acqua & Lamberti (1999) [46] esplorano invece l'applicazione della logica fuzzy alla classificazione delle tratte ferroviarie, sviluppando un algoritmo in grado di trattare insieme complessi di dati qualitativi e quantitativi. Il metodo consente una valutazione multicriterio dei rami ferroviari in base ai parametri di servizio offerto.

Ulteriori lavori che utilizzano i modelli Fuzzy, quale strumento di supporto alle decisioni, per la pianificazione delle ferrovie sono quelli di Leonardi &

Moretti 2004, Leonardi 2010, Leonardi, 2016 [43,44,45], Questi studi affrontano la pianificazione e la gestione delle reti ferroviarie attraverso strumenti decisionali avanzati come il fuzzy MCDM (Multi-Criteria Decision Making), utile in contesti di incertezza e ambiguità linguistica. L’approccio fuzzy si dimostra particolarmente utile nel rappresentare la complessità delle scelte progettuali e operative.

Particolare attenzione è stata anche rivolta alle valutazioni ambientali nelle analisi sistemiche dei sistemi di mobilità sostenibile Lo Bosco et al. (2023) [47], di sicurezza, e di rischio (soprattutto nel trasporto di merci pericolose) Barilla et al. (2009) [48]. Colonna et al. (2009) [49] hanno analizzato il rischio ambientale dovuto al traffico ferroviario, in relazione alla qualità dell’aria.

Nell’ambito degli aspetti legati alla sicurezza, alcuni lavori (Leonardi et al. 2003, Leonardi 2008 e Cirianni & Leonardi 2015) [50,51,52] propongono modelli matematici per la valutazione delle prestazioni di rete, tramite matrici $n \times m$ che correlano variabili infrastrutturali con indicatori funzionali (nodi, archi, ecc.). Tali strumenti si rivelano utili nella manutenzione predittiva, nel monitoraggio dinamico, e nell’ottimizzazione dell’efficienza operativa. Ulteriori ricerche (Buonsanti et al. 2011, Buonsanti & Leonardi 2013 e Leonardi et al. 2021, Colonna et. Al 2011) [53,54,55] hanno riguardato il comportamento strutturale delle gallerie ferroviarie in scenari estremi come incendi ed esplosioni. L’approccio integrato FEM consente la simulazione tridimensionale degli effetti termo-meccanici, utile per pianificare strategie di resilienza infrastrutturale e protocolli di sicurezza. Le simulazioni includono carichi dinamici, pressioni d’onda, e danni strutturali localizzati, contribuendo alla progettazione più sicura dei tunnel ferroviari.

Alcuni studi (Ferrara & Leonardi, 2011, Leonardi et al. 2019) [56,57] propongono un indice composito di comfort che combina temperatura, rumore e vibrazioni, ed è basato sull’innovativo Hyper-Sphere Method. Questo modello consente di progettare ambienti ferroviari ottimali dal punto di vista del comfort percepito e offre indicazioni per il miglioramento dei livelli di servizio.

Nell’ambito degli aspetti legati alla sostenibilità ed al ciclo di vita del binario ferroviario, spiccano alcuni contributi di Praticò e Giunta (Praticò & Giunta, 2016 e 2017, Giunta & Praticò 2017) [58,59,60] che mettono in luce l’importanza di modelli integrati per valutare sostenibilità, durabilità e costi lungo il ciclo di vita delle infrastrutture ferroviarie. Le metodologie LCC (Life Cycle Cost) e RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Safety) sono centrali per l’ottimizzazione di strategie di design e manutenzione sostenibile. Ulteriori studi teorici propongono modelli economici e ingegneristici innovativi per la valutazione dei costi, dei parametri infrastrutturali, e delle

interazioni veicolo-infrastruttura. Offrono le basi concettuali per approcci quantitativi alla gestione ferroviaria (Lo Bosco & Praticò, 2004 e Praticò 2006) [61,62].

In ambito internazionale la letteratura evidenzia come, una delle sfide principali è riuscire a valutare in modo completo l’impatto delle infrastrutture ferroviarie. A tal proposito, Stratmann, Kool e Schultmann (2022) [63] propongono un approccio basato sull’analisi del ciclo di vita (*life-cycle analysis*) che permette di avere una visione molto più precisa e completa degli effetti ambientali nel lungo periodo. Questo approccio è particolarmente utile per fare scelte più consapevoli nella fase di progettazione, ad esempio sui materiali da usare o sulle tecniche di costruzione.

Un altro contributo importante, sempre degli stessi autori, (Kool, Stratmann e Schultmann (2023)) [64], propone un modello decisionale per una gestione sostenibile dell’intera infrastruttura. Questo modello tiene conto non solo degli aspetti ambientali, ma anche di quelli economici e sociali.

Sicurezza operativa

Un punto cardine della sicurezza ferroviaria contemporanea è rappresentato dallo sviluppo di sistemi di segnalamento avanzati.

Vignali et al. (2019) [65] propongono una metodologia analitica per determinare la lunghezza ottimale delle sezioni di blocco e la posizione delle Marker Boards in reti ferroviarie gestite con ETCS Livello 2. L’approccio, applicato al progetto danese Fjernbane Infrastructure East, utilizza il software OpenTrack per calcolare retroattivamente la disposizione degli apparati di segnalamento, garantendo il rispetto dei requisiti di headway con un minimo impiego di equipaggiamenti, ottimizzando così i costi e le prestazioni operative.

Nel lavoro di Cuppi et al. (2021) [66] si analizza l’introduzione del sistema High-Density European Rail Traffic Management System (HD-ERTMS) nel nodo ferroviario di Roma. Questo sistema, compatibile con l’infrastruttura esistente, mira a risolvere i problemi di congestione nei nodi urbani aumentando la capacità di traffico senza necessità di interventi strutturali significativi, migliorando l’efficienza e la regolarità del servizio ferroviario. Simone et al. (2020) [67] si concentrano sulla definizione di limiti di rottura per il sistema di fissaggio delle Eurobalise, componenti chiave del sistema ETCS. Attraverso test meccanici su trazione, taglio e flessione, oltre a prove in scala reale, lo studio valuta la resistenza dell’interazione tra sensori e traverse, assicurando l’affidabilità del sistema anche sotto le sollecitazioni aerodinamiche generate dal passaggio di treni ad alta velocità. L’approccio

introduce una visione ingegneristica e gestionale capace di affrontare criticità strutturali in infrastrutture ad alta velocità.

L’approccio risk-based ha acquisito una posizione centrale nella gestione ferroviaria, ed in tale ottica alcune ricerche si sono concentrate sulla gestione del rischio come strumento decisionale nelle ferrovie locali e metropolitane. Tali ricerche propongono un percorso metodologico chiaro e progressivo per integrare la gestione del rischio quantitativa nella pianificazione e gestione delle infrastrutture ferroviarie, in particolare per reti locali e sistemi metropolitani, dove vincoli economici e limitata disponibilità di dati rappresentano sfide significative.

Nel contesto delle ferrovie locali, dove l’applicazione diretta degli standard delle reti nazionali risulta spesso inefficiente, Di Graziano et al. (2023) [68] introducono un framework metodologico che permette di stimare l’impatto sul rischio delle scelte gestionali, anche in assenza di dati incidentali adeguati. Il metodo consente di integrare banche dati di reti simili e calibrare le informazioni in base alle differenze infrastrutturali, supportando così l’ottimizzazione delle strategie di intervento e la pianificazione degli investimenti.

Per la gestione metropolitana, caratterizzata da un’esposizione costante a fattori di rischio, Di Graziano et al. (2022) [69] sviluppano una metodologia di analisi del rischio applicata a decisioni operative, dimostrando attraverso un caso studio (il rischio di deragliamento in una metropolitana) come differenti strategie gestionali influenzino concretamente i livelli di sicurezza del sistema. L’approccio fornisce un supporto quantitativo alla valutazione di scelte tecniche e operative.

In una prospettiva più generale di supporto alle decisioni, Di Graziano & Marchetta (2021) [70] propongono un sistema decisionale basato sul rischio per le reti locali, in grado di valutare e prioritizzare gli interventi manutentivi e di sicurezza considerando l’interazione tra i diversi sottosistemi dell’infrastruttura (rotaie, opere civili, passaggi a livello). L’obiettivo è superare la frammentazione gestionale e fornire una visione integrata e sistemica del rischio a fronte di risorse limitate.

L’insieme di questi contributi evidenzia il valore strategico della gestione del rischio come strumento di supporto alle decisioni per la sicurezza ferroviaria. Applicata in contesti locali e urbani, questa metodologia consente di superare le carenze di dati e risorse, migliorando l’efficienza degli interventi e rafforzando la resilienza dei sistemi ferroviari a fronte di scenari complessi e disomogenei.

L’evoluzione digitale sta rivoluzionando la gestione ferroviaria. Guerrieri e Parla (2021-2022) [71-73] esplorano l’uso di tecniche deep learning (una

branca dell'IA che si basa su reti neurali profonde per l'elaborazione dei dati) per il riconoscimento automatico della segnaletica. Utilizzando algoritmi come *Yolov3* (You Only Look Once), un algoritmo di visione artificiale noto per la sua rapidità e precisione, è possibile identificare e classificare automaticamente i segnali lungo la rete ferroviaria. Questo tipo di tecnologia consente di ridurre il rischio di errori umani nella lettura dei segnali, aumentando la sicurezza operativa.

In ambito di safety comportamentale, Bosurgi et al. (2007) [74] adattano il metodo CREAM all'analisi degli eventi SPAD (Signal Passed At Danger), introducendo l'analisi intervallare per gestire l'incertezza legata al fattore umano, offrendo così un approccio flessibile sia per l'analisi retrospettiva sia per la prevenzione del rischio.

2.4.2 *Il contributo alla ricerca*

I numerosi contributi analizzati nel presente capitolo mettono in evidenza il rilevante apporto scientifico di alcuni ricercatori della S.I.I.V. sulle tematiche inerenti alla sostenibilità ambientale ed alla sicurezza operativa. Quello che emerge, anche dalla numerosità dei contributi, è che tali tematiche rientrano pienamente negli ambiti tipici del settore CEAR-03/A, e nel corso degli ultimi decenni sono stati affrontati con un crescente rigore metodologico, con lo sguardo attento alle innovazioni metodologiche, tecniche e tecnologiche, con una piena adesione ai progressi della letteratura internazionale.

È evidente come l'evoluzione del settore ferroviario, sempre più orientata verso una transizione verde e digitale, trovi nella ricerca accademica un importante motore propulsivo, capace di anticipare tendenze e proporre soluzioni concrete a problemi complessi.

Gli aspetti della sostenibilità e della sicurezza sono stati trattati sotto differenti punti di vista. Sul piano della sostenibilità ambientale, l'attenzione si è concentrata non solo sulla fase costruttiva dell'infrastruttura, ma anche sulla gestione dell'intero ciclo di vita, evidenziando come le scelte progettuali, manutentive e gestionali possano influire significativamente sulle emissioni, sul consumo di risorse naturali e sull'impatto territoriale delle opere ferroviarie. Le metodologie LCA (Life Cycle Assessment) e LCC (Life Cycle Cost), in particolare, hanno consentito un'analisi integrata e quantitativa dei compromessi tra costi economici, ambientali e prestazionali, offrendo supporto oggettivo ai processi decisionali.

Nell'ambito delle innovazioni metodologiche, oltre all'introduzione delle analisi del ciclo di vita (LCA e LCC) e dei modelli decisionali avanzati (approcci fuzzy MCDM, modelli multi-obiettivo e metodi risk-based), si segnalano anche le simulazioni numeriche FEM e DEM, le tecniche di

intelligenza artificiale e gli algoritmi data-driven nei processi decisionali riguardanti la gestione delle ferrovie. Parallelamente sono state al centro degli studi anche le innovazioni tecnologiche quali sistemi ballastless e materiali innovativi. Tali soluzioni, oltre a migliorare le performance meccaniche e la durabilità delle infrastrutture, hanno contribuito alla riduzione dei costi di esercizio e al contenimento delle interferenze con l’ambiente circostante. La digitalizzazione ha portato a sistemi avanzati di segnalamento, quali l’adozione del sistema ERTMS di ultima generazione, ad esempio, che consente di aumentare la capacità e la sicurezza della rete senza la necessità di ampliamenti fisici, favorendo una mobilità più efficiente e sostenibile.

Anche le questioni legate ai fenomeni vibratorii, particolarmente rilevanti in ambito ferroviario, sono state affrontate in modo rigoroso e scientifico, grazie allo sviluppo di modelli numerici per la previsione delle vibrazioni indotte dal traffico ferroviario e alla sperimentazione di soluzioni di mitigazione, come barriere passive o dispositivi di smorzamento installati lungo la linea o sui convogli.

Questa rassegna testimonia come la ricerca scientifica degli studiosi S.I.I.V. abbia creato un patrimonio di conoscenze, metodiche e strumenti che possono dare un contributo significativo all’evoluzione sostenibile e sicura del sistema ferroviario, adottando strumenti innovativi e interdisciplinari per affrontare sfide ambientali, tecnologiche e gestionali.

In un contesto in cui le esigenze di decarbonizzazione, digitalizzazione e ottimizzazione delle risorse diventano sempre più pressanti, l’attività scientifica descritta rappresenta una base solida su cui costruire strategie di sviluppo a lungo termine. È dunque auspicabile che tale patrimonio continui a crescere e a dialogare in modo proficuo con i proprietari e gestori ferroviari in modo da poter contribuire concretamente alla trasformazione sostenibile e sicura delle ferrovie.

2.4.3 *Criticità e sviluppi futuri*

Negli ultimi anni, il sistema ferroviario europeo ha conosciuto una profonda evoluzione, determinata da due direttrici fondamentali: l’esigenza di rafforzare la sicurezza operativa e la necessità di promuovere la sostenibilità ambientale. Una delle principali criticità che occorre superare riguarda l’effettiva applicabilità dei metodi e degli strumenti proposti dalla ricerca accademica all’interno di contesti operativi concreti. Molte delle metodologie oggi disponibili, come l’Analisi del Ciclo di Vita (LCA), le metriche di circolarità, le simulazioni numeriche e i modelli predittivi, pur essendo scientificamente robuste, si scontrano con vincoli operativi, limitazioni nei dati disponibili e complessità implementative. Anche le innovazioni

tecnologiche nel campo dei materiali richiedono, ai fini della reale applicabilità, una contestuale innovazione delle norme tecniche e dei capitoli.

Questa distanza tra “teoria” e “pratica applicativa” rappresenta un nodo fondamentale da sciogliere affinché le innovazioni possano tradursi in impatti reali sul sistema ferroviario.

Nelle reti locali e regionali, spesso caratterizzate da risorse limitate e infrastrutture datate, l'adozione di approcci quantitativi per la valutazione del rischio e la programmazione degli interventi è ancora sporadica. L'efficacia degli strumenti sviluppati dipende, quindi, non solo dalla loro validazione scientifica, ma anche dalla loro adattabilità, semplicità d'uso e capacità di integrarsi nei processi decisionali esistenti.

Dal punto di vista tecnologico, la crescente digitalizzazione e l'ingresso di strumenti basati sull'intelligenza artificiale e sull'analisi predittiva dei dati hanno aperto nuove possibilità per il monitoraggio continuo delle infrastrutture e dei sistemi di esercizio, proprio nell'ottica di una maggiore sostenibilità ambientale e sicurezza. Tuttavia, la piena valorizzazione di tali tecnologie resta subordinata alla creazione di un ecosistema operativo in cui la raccolta dei dati, la qualità delle informazioni e la capacità di interpretazione siano coerenti e affidabili. La sfida è tecnica, organizzativa e culturale.

Anche l'emergenza climatica contribuisce a ridefinire le priorità. Le reti ferroviarie sono sempre più vulnerabili a eventi meteorologici estremi, che impongono soluzioni progettuali capaci di garantire resilienza, flessibilità e adattamento nel tempo. In questo contesto, l'adozione di strategie di mitigazione e adattamento deve essere supportata da strumenti decisionali che combinino la valutazione del rischio, l'efficienza economica e l'impatto ambientale, superando l'attuale frammentazione delle competenze e delle responsabilità.

Le prospettive future richiedono, dunque, uno sforzo di sintesi tra rigore scientifico e praticabilità operativa. Sarà necessario sviluppare metodologie più agili, scalabili e adattabili ai diversi livelli di governance, che rendano fruibili le analisi complesse anche per soggetti non specialistici. Inoltre, l'integrazione tra discipline diverse – ingegneria, economia, scienze ambientali, scienze sociali – sarà determinante per produrre strumenti realmente interdisciplinari e centrati sugli utenti.

In conclusione, il futuro del trasporto ferroviario europeo si gioca su un equilibrio delicato tra sostenibilità ambientale e sicurezza operativa. Per trasformare le conoscenze scientifiche in soluzioni realmente implementabili, occorre rafforzare il dialogo tra ricerca, gestori ferroviari e istituzioni, promuovere il trasferimento tecnologico e costruire competenze capaci di

coniugare visione sistemica e concretezza applicativa. L’obiettivo non è soltanto produrre nuova conoscenza, ma renderla applicabile, efficace e duratura.

2.4.4 Bibliografia

1. Franzoni, L., Anderton, L., Markovic-Chénais, S., Favre, A., Ha, J.H., Stephanos, P.: 2023 Global Rail Sustainability Report. (2024).
2. International Energy Agency: The Future of Rail: Opportunities for Energy and the Environment. (2022).
3. Commissione Europea: Mobilità sostenibile: la strategia dell’Unione Europea, <https://www.webuildgroup.com/it/discovery/articoli/mobilita-sostenibile-la-strategia-dellunione-europea/>, (2020).
4. Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie (ANSF): Rapporto annuale sulla sicurezza delle ferrovie italiane ricadenti nelle competenze dell’Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie. (2012).
5. Moreno, J., Riera, J.M., de Haro, L., Rodriguez, C.: A survey on future railway radio communications services: challenges and opportunities. *IEEE Communications Magazine*. 53, 62–68 (2015). <https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7010510>.
6. Xu, L., Li, Y., Zhang, W., Ma, T., Jing, X.: Analysis of Hydrogen-Powered Train in Different Application Scenarios: A Review. *Energies (Basel)*. 18, 1743 (2025). <https://doi.org/10.3390/en18071743>.
7. EUR-Lex: La sicurezza delle ferrovie nell’Unione europea, <https://eur-lex.europa.eu/IT/legal-content/summary/eu-wide-railway-safety.html>, (2023).
8. Pernice, D.: Note Tematiche sull’Unione Europea - Trasporto Ferroviario, https://www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/it/FTU_3.4.5.pdf, (2025).
9. European Union Agency for Railways: Single Programming Document 2023-2025, https://www.era.europa.eu/system/files/2022-12/SPD%202023-2025_ERA.pdf, (2022).
10. Decreto Legislativo 14 maggio 2019 n. 50: Attuazione della direttiva 2016/798 del Parlamento europeo e del Consiglio, dell’11 maggio 2016, sulla sicurezza delle ferrovie, <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2019;50>, (2019).
11. Decreto Legislativo 3 aprile 2006 n. 152: Norme in materia ambientale, <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2006;152>, (2006).
12. European Union Agency for Railways: Technical Specifications for Interoperability (TSIs), https://www.era.europa.eu/domains/technical-specifications-interoperability_en, (2025).
13. Samuel, J.: The ERTMS/ETCS signalling system, <https://www.railwaysignalling.eu/wp->, (2014).
14. Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili: Allegato: Dieci anni per trasformare l’Italia – Strategie per infrastrutture, mobilità e logistica

sostenibili e resilienti per il benessere delle persone e la competitività delle imprese, nel rispetto dell’ambiente, <https://mit.gov.it/nfsmgov/files/media/notizia/2022-05/Allegato%20Infrastrutture%20Def%202022.pdf>, (2022).

15. Giunta, M.: Trends and Challenges in Railway Sustainability: The State of the Art regarding Measures, Strategies, and Assessment Tools. *Sustainability*. 15, (2023). <https://doi.org/10.3390/su152416632>.

16. Biancardo, S.A., Avella, F., Di Lisa, E., Chen, X., Abbondati, F., Dell’Acqua, G.: Multiobjective Railway Alignment Optimization Using Ballastless Track and Reduced Cross-Section in Tunnel. *Sustainability*. 13, 10672 (2021). <https://doi.org/10.3390/su131910672>.

17. Guerrieri, M., Ticali, D.: Design standards for converting disused railway lines into greenways. In: *Proceedings of ICSDC 2011*. ASCE, Kansas City, USA (2011).

18. Giunta, M., Leonardi, G.: Framework for Life Cycle Railway Sustainability Assessment: A Methodological Approach Based on Advanced Methods and Tools. In: *Lecture Notes in Computer Science*. pp. 233–244. Springer (2024). https://doi.org/10.1007/978-3-031-46278-5_19.

19. Celauro, C., Cardella, A., Guerrieri, M.: LCA of Different Construction Choices for a Double-Track Railway Line for Sustainability Evaluations. *Sustainability*. 15, 5066 (2023). <https://doi.org/10.3390/su15065066>.

20. Praticò, F.G., Giunta, M.: LCC-based appraisal of ballasted and slab tracks: limits and potential. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 13, 475–499 (2018). <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2018.57>.

21. Giunta, M., Marino, C.: Sustainable Railways and the Impact of Freight Trains: The Case Study of the Shunting Area of the Strait of Messina. In: *Proceedings of the International Conference Landscapes Across the Mediterranean (CrossMED)*. , Reggio Calabria, Italy (2024).

22. Giunta, M., Marino, C.: Exploring the Emission Reduction Potential of Innovative Fuels in Rail Freight Marshalling Operations: The Case Study of Villa S. Giovanni Rail Yard. In: *Proceedings of the 7th Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration (EMCEI 2025)*. , Reggio Calabria, Italy (2025).

23. Giunta, M., Leonardi, G.: Data-driven track geometry defects localization and strategies for preventive maintenance: a case study. In: *AIIT TIS Conference*. , Roma, Italy (2024).

24. Bressi, S., D’Angelo, G., Santos, J., Giunta, M.: Environmental performance analysis of bitumen stabilized ballast for railway track-bed using Life-Cycle Assessment. *Constr Build Mater*. 188, 1050–1064 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.030>.

25. Giunta, M., Bressi, S., Losa, M.: Sustainability in railway construction: LCA-LCC based assessment of alternative solutions for track-bed. In: *Proceedings of the Joint Rail Conference* (2020).

26. Leonardi, G., Giunta, M., Vitale, A.: Analysis of railway tracks reinforced with geogrids. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 16, 2722–2728 (2021).

27. Buonsanti, M., Cirianni, F., Leonardi, G., Santini, A., Scopelliti, F.: Mitigation of railway traffic induced vibrations: the influence of barriers in elastic half-space. *Adv Acoust Vib.* (2009). <https://doi.org/10.1155/2009/956263>.
28. Ferrara, R., Jourdan, F., Leonardi, G.: Numerical Modelling of Train Induced Vibrations. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, S.I.I.V. 5th International Congress. pp. 155–165. , Rome, Italy (2012). <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.869>.
29. Di Mino, G., Giunta, M., Di Liberto, C.M.: Assessing the Open Trenches in Screening Railway Ground-Borne Vibrations by Means of Artificial Neural Network. *Adv Acoust Vib.* (2009). <https://doi.org/10.1155/2009/123456>.
30. Ferrara, R., Leonardi, G.: A contact-area model for rail-pads connections in 2-D simulations: sensitivity analysis of train induced vibrations. *Vehicle System Dynamics.* (2013). <https://doi.org/10.1080/00423114.2013.801996>.
31. Ferrara, R., Jourdan, F., Leonardi, G.: A Two-Dimensional Numerical Model to Analyze the Critical Velocity of High-Speed Infrastructure. In: Topping, B.H. V and Iványi, P. (eds.) *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*. Civil-Comp Press, Stirlingshire, UK (2013). <https://doi.org/10.4203/ccp.102.31>.
32. Buonsanti, M., Leonardi, G., Scopelliti, F.: Modelling damping effects in vehicle-track interaction. In: *Proceedings of the 6th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation*. , Lubiana, Slovenia (2007).
33. Buonsanti, M., Leonardi, G.: Dynamic modelling of freight wagon with modified bogies. *European Journal of Scientific Research*. 86, (2012).
34. Ferrara, R., Jourdan, F., Leonardi, G.: The critical velocity of the train/track coupled system. *The International Journal of Railway Technology (IJRT)*. 3, 59–77 (2014). <https://doi.org/10.4203/ijrt.3.2>.
35. Di Mino, G., Giunta, M., Di Liberto, M.: Assessing the open trenches in screening railway ground-borne vibrations by means of artificial neural network. *International Journal of Advances on Acoustics and Vibration*. 2009, 1–12 (2009).
36. Buonsanti, M., Cirianni, F., Leonardi, G., Santini, A., Scopelliti, F.: Mitigation of railway traffic induced vibrations: the influence of barriers in elastic half-space. *Adv Acoust Vib.* (2009). <https://doi.org/10.1155/2009/956263>.
37. Buonsanti, M., Leonardi, G., Scopelliti, F.: Analyses of the ground borne vibration induced by high-speed trains in finite element models. In: *Proceedings of the 10th International Workshop on Railway Noise (IWRN10)*. , Nagahama, Japan (2010).
38. Buonsanti, M., Cirianni, F., Leonardi, G., Scopelliti, F.: Mitigation of Railway Vibrations by Using Barriers. *Rapid: Telecom.* 1, (2011).
39. Leonardi, G., Buonsanti, M.: Reduction of Train-Induced Vibrations by using Barriers. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 7, 3623–3632 (2014).
40. Leonardi, G., Lo Bosco, D.: The mitigation of train-induced ground vibrations in nearby buildings. *ArcHistoR - Architecture History Restoration*. 12, 660–673 (2019). <https://doi.org/10.14633/AHR189>.

41. Di Mino, G., Giunta, M., Di Liberto, M.: Study of the effectiveness of the open trenches in reducing railway ground-borne vibrations: sensitivity analysis of its geometric features using artificial neural network. In: Proceedings of the International Conference on Advanced Materials for Application in Acoustics and Vibration. , Cairo, Egypt (2009).
42. Bosurgi, G., Trio, A.: A Model for the Analysis of Local Dynamic Effects for High-Speed Railway. In: Convegno S.I.I.V. , Bari, Italy (2005).
43. Leonardi, G., Moretti, M.: Criteri di valutazione delle alternative progettuali in relazione agli impatti sull'ambiente e sulla sicurezza: applicazione di una metodologia fuzzy al nuovo collegamento ferroviario Lugano-Malpensa. Accademia delle Scienze di Torino, Atti della Classe di Scienze Fisiche. 138, 113–123 (2004).
44. Leonardi, G.: Fuzzy Multiple-Criteria Decision-Making for Railway Planning. Journal of Mathematical Sciences and Engineering Applications. 4, 407–421 (2010).
45. Leonardi, G.: A Fuzzy Model for a Railway-Planning Problem. Applied Mathematical Sciences. 10, 1333–1342 (2016). <https://doi.org/10.12988/ams.2016.63106>.
46. Dell'Acqua, G., Lamberti, R.: Tecnica fuzzy per la qualificazione dei rami in una rete ferroviaria. In: Atti XI Convegno Nazionale S.I.I.V. (1999).
47. Lo Bosco, D., Rixi, E., Leonardi, G., Caristi, G., Aprea, D.: Metodologie di analisi sistematica di progetti materiali e immateriali in sistemi di mobilità sostenibile. QUADERNI FS ACADEMY, Collana scientifica trimestrale di Ferrovie dello Stato Italiane SpA. Anno I, aprile – giugno (2023).
48. Barilla, D., Leonardi, G., Puglisi, A.: Risk analysis of Hazardous Materials transportation by railway. Supplemento ai Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo. 15–27 (2009).
49. Colonna, P., Lembo, F., Tragni, O.: La valutazione dei rischi ambientali dovuti al traffico ferroviario in relazione alla qualità dell'aria. In: Atti del IX Convegno Nazionale S.I.I.V. “Pianificazione e gestione delle infrastrutture viarie.” , Cagliari, Italy (1999).
50. Leonardi, G., Moretti, M., Stoka, M.: L'analisi del funzionamento della rete. Un approccio metodologico. RFI Argomenti. (2003).
51. Leonardi, G.: Safety and efficiency analysis of a railway network. Supplemento ai Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo, Serie II. 211–218 (2008).
52. Cirianni, F., Leonardi, G.: Analisi dell'efficienza e della sicurezza di esercizio di un'infrastruttura ferroviaria. LaborEst - Città Metropolitane, Aree Interne: la competitività territoriale nelle Regioni in ritardo di sviluppo. (2015).
53. Buonsanti, M., Leonardi, G., Scopelliti, F.: 3-D Simulation of shock waves generated by dense explosive in shell structures. Procedia Eng. 10, 1550–1555 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.259>.
54. Buonsanti, M., Leonardi, G.: 3-D Simulation of tunnel structures under Blast loading. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 13, 135–142 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.acme.2012.09.002>.

55. Colonna, P., Berloco, N., Ronchi, E.: Gallerie ferroviarie e metropolitane: analisi del rischio e studio degli scenari con metodi innovativi. In: Convegno “Il sistema integrato dei trasporti nell’area del Mediterraneo.”, Bari, Italy (2011).
56. Ferrara, R., Leonardi, G.: Evaluation of global comfort for train passengers. *Supplemento ai Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo, Serie II.* 209–218 (2011).
57. Leonardi, G., Lo Bosco, D., Ferrara, R., La Fauci, V.: Valutazione del comfort globale all’interno di un veicolo ferroviario. *LaborEst – Città Metropolitane, Aree Interne: la competitività territoriale nelle Regioni in ritardo di sviluppo.* 18, (2019).
58. Praticò, F.G., Giunta, M.: Assessing the sustainability of design and maintenance strategies for rail track by means life cycle cost analysis. In: *COMPRAIL Conference Proceedings.*, Madrid, Spain (2016).
59. Giunta, M., Praticò, F.G.: Design and maintenance of high speed rail tracks: a comparison between ballasted and ballast-less solutions based on Life Cycle Cost Analysis. In: *International Congress On Transport Infrastructure And Systems.*, Rome, Italy (2017). <https://doi.org/10.1201/9781315281896-14>.
60. Praticò, F.G., Giunta, M.: An integrative approach RAMS-LCC to support decision on design and maintenance of rail track. In: *Environmental Engineering - 10th International Conference.*, Vilnius, Lithuania (2017). <https://doi.org/10.3846/enviro.2017.306>.
61. Lo Bosco, D., Praticò, F.G.: Research prospects in Pay Adjustment models for roads and railways: a theoretical and experimental study. In: *Proceedings of the V International Conference of Stochastic Geometry, Convex Bodies, Empirical Measures & Applications to Engineering, Medical and Earth Sciences.*, Mondello (Palermo), Italy (2004).
62. Praticò, F.G.: Parametri infrastrutturali e parametri veicolari per i sistemi su ferro: modellistica dell’incidenza sui costi e proposte di ottimizzazione. *Rivista RFI Argomenti.* (2006).
63. Stratmann, L., Kool, T., Schultmann, F.: Environmental assessment of railway infrastructure using life-cycle analysis. *Transp Res D Transp Environ.* 103, 103134 (2022).
64. Kool, T., Stratmann, L., Schultmann, F.: A framework for sustainable railway infrastructure management. *Transp Res D Transp Environ.* 119, 103639 (2023).
65. Vignali, V., Cuppi, F., Lantieri, C., Dimola, N., Galasso, T., Rapagnà, L.: A methodology for the design of sections block length on ETCS L2 railway networks. *Journal of Rail Transport Planning & Management.* 13, 100160 (2019).
66. Cuppi, F., Vignali, V., Lantieri, C., Rapagnà, L., Dimola, N., Galasso, T.: High density European Rail Traffic Management System (HD-ERTMS) for urban railway nodes: The case study of Rome. *Journal of Rail Transport Planning & Management.* 17, 100232 (2021).

67. Simone, A., Lantieri, C., Vignali, V., Mazzotta, F., Carpinone, M., Cuppi, F., Nanni, M., Davalli, D.: A risk assessment method for “Eurobalise” fastening system. *Transportation Research Procedia*. 45, 384–393 (2020).
68. Di Graziano, A., Marchetta, V., Contino, F.: A methodology for introducing the impact of risk analysis in local railways improvements decisions. *Transportation Research Procedia*. (2023).
69. Di Graziano, A., Marchetta, V., Grande, J., Fiore, S.: Application of a decision support tool for the risk management of a metro system. *International Journal of Rail Transportation*. 10, 352–374 (2021). <https://doi.org/10.1080/23248378.2021.1906341>.
70. Di Graziano, A., Marchetta, V.: A risk-based decision support system in local railways management. *Journal of Rail Transport Planning & Management*. 20, 100284 (2021).
71. Guerrieri, M., Parla, G.: ADAS based on Deep Learning and Yolov3 Algorithms for Tramway Systems. In: *Book of Abstracts, IConSSE 2021* (2021).
72. Guerrieri, M., Parla, G.: Social distance evaluation in transportation systems and other public spaces using deep learning. *Transport and Telecommunication*. 23, 160–167 (2022).
73. Guerrieri, M., Parla, G.: Smart Tramway Systems for Smart Cities: A Deep Learning Application in ADAS Systems. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*. 20, 745–758 (2022).
74. Bosurgi, G., Fisichella, G., Pellegrino, O.: A Method to Analyse the Signal Passed at Danger (SPAD). In: *Convegno S.I.I.V. , Palermo, Italy* (2007).

2.5 Il BIM e la trasformazione digitale

La digitalizzazione sta trasformando il settore ferroviario: i tradizionali silos di DWG, Excel e documenti cartacei stanno lasciando spazio a dati integrati, gemelli digitali e piattaforme cloud. Il Building Information Modeling (BIM) è il motore di questo cambiamento: non solo un modello 3D, ma un metodo che integra geometrie, tempi (4D), costi (5D) e prestazioni in un unico ambiente dati condiviso (CDE/ACDat).

Applicato lungo tutto il ciclo di vita dell’infrastruttura, dal progetto alla dismissione, il BIM offre vantaggi concreti: riduzione dei costi grazie alla clash detection, maggiore efficienza e rapidità, sicurezza in cantiere con simulazioni AR/VR e gestione ottimizzata tramite digital twin e IoT (Internet of Things).

Il BIM è un potente strumento decisionale e di simulazione, che trasforma radicalmente i processi aziendali. Nato concettualmente negli anni ‘70 grazie a Charles M. Eastman, ha acquisito il nome nel 1992 (Van Nederveen e Tolman) e notorietà nel 2002 con il White Paper di Autodesk [1–3]. Da allora, l’interesse accademico e industriale è cresciuto esponenzialmente.

Per migliorare lo scambio dati tra software AECO (Architecture, Engineering, Construction, and Operation), nel 1994 nasce la “Industry Alliance for Interoperability”, poi diventata nel 2005 buildingSMART. Questa organizzazione ha creato il formato aperto IFC (Industry Foundation Classes), oggi standard ISO, che consente lo scambio interoperabile di modelli digitali ricchi di informazioni strutturate. L’IFC è alla base dell’Open BIM, un approccio che non dipende da specifici software proprietari [4].

Infine, normative, istituzioni e grandi attori industriali stanno spingendo verso l’adozione diffusa del BIM, promuovendone la regolamentazione e l’integrazione nei processi pubblici e privati.

Il contesto legislativo

La metodologia BIM è oggi regolamentata da un quadro normativo articolato, sia in Italia che a livello europeo e internazionale, che ne ha incentivato l’adozione progressiva nel settore degli appalti pubblici. Ecco una sintesi dell’evoluzione legislativa italiana:

- Direttiva UE 24/2014: consente agli Stati membri di rendere obbligatorio l’uso del BIM negli appalti pubblici [5].
- D.Lgs. 50/2016: recepisce la direttiva UE e promuove l’adozione di metodi digitali nella progettazione e realizzazione di opere pubbliche [6].
- D.M. 560/2017: fissa un calendario di introduzione obbligatoria del BIM, con scadenze progressive legate al valore economico degli appalti [7].
- D.L. 77/2021: introduce punteggi premianti per le imprese che usano metodi digitali nella gestione dei progetti [8].
- D.M. 312/2021: aggiorna il DM 560/2017, escludendo la manutenzione ordinaria dall’obbligo del BIM e incentivando il monitoraggio digitale in tempo reale [9].

Con il D.Lgs. 36/2023 [10], il nuovo Codice dei contratti pubblici, le regole vengono consolidate:

- Art. 43 (aggiornato mediante il D.Lgs 209/2024 [11]): il BIM diventa obbligatorio dal 1° gennaio 2025 per appalti il cui valore economico sia sopra i 2 milioni di euro (inizialmente il vincolo era fissato pari a 1 milione), per nuove opere e ristrutturazioni, escludendo la manutenzione (salvo casi gestiti già in BIM).
 - Allegato I-9: impone alle stazioni appaltanti l’adozione di una strategia digitale, comprendendo: formazione interna; piani per hardware/software; documentazione organizzativa; piattaforme interoperabili in formati aperti; nomina di ruoli chiave (CDE e

processi digitali); definizione delle specifiche informative nei bandi di gara.

La regolamentazione tecnico-normativa

In Italia, le norme tecniche per il BIM si sono sviluppate progressivamente, integrando indicazioni nazionali e standard internazionali. La prima vera norma italiana è stata la UNI 11337 del 2009, ma a partire dal 2018, con l’uscita della ISO 19650 e poi con l’Accordo di Vienna del 2019, l’Italia ha recepito ufficialmente la versione europea armonizzata della ISO, che ha preso il posto della UNI 11337 [12, 13]. Quest’ultima, però, non è stata abbandonata: continua a essere un utile riferimento nazionale per interpretare e adattare le indicazioni internazionali al contesto italiano, pur restando subordinata alla ISO in caso di conflitto.

Completano il quadro normativo altre norme chiave: lo standard IFC, regolato dalla UNI EN ISO 16739-1 [14], che garantisce l’interoperabilità tra software; la UNI EN ISO 7817, che aggiorna i criteri per stabilire il livello di necessità informativa [15]; la UNI/PdR 74, dedicata alla certificazione dei Sistemi di Gestione BIM nelle organizzazioni [16]; e la UNI/TR 11937, che promuove una maggiore integrazione tra la gestione progettuale e quella informativa [17], in linea con le pratiche del project management previste dalla UNI ISO 21502 [18].

La comprensione di qualsiasi processo BIM in accordo con la UNI EN ISO 19650 e il suo allegato nazionale UNI 11337 richiede familiarità con una serie di concetti chiave.

La UNI 11337-1 introduce un lessico tecnico strutturato che definisce contenuti informativi, modelli, deliverable, veicoli informativi, ambienti informativi (CDE) e strutture informative di prodotto, spazio e processo. Essa stabilisce che le informazioni strutturate del contenuto informativo sono composte da dati rielaborabili, correlati elettronicamente, fissati su supporto digitale e scritti in formato aperto e costituiscono il modello digitale. Il processo informativo viene articolato in fasi e stadi, con logiche temporali che possono essere sequenziali (fine-inizio) o sovrapposte (inizio-inizio), a seconda della natura dei processi coinvolti.

Poiché la trasformazione digitale del settore non può realizzarsi in un’unica transizione, il BIM Task Group del Regno Unito ha sviluppato il BIM Maturity Model, che definisce quattro livelli di maturità [19]: dal livello 0 (CAD 2D e scambio cartaceo), passando per il livello 1 (modellazione 3D parziale e file non centralizzati), al livello 2 (modelli disciplinari coordinati tramite CDE), fino al livello 3, che prevede l’adozione di processi completamente digitali, integrati e basati su standard aperti come l’IFC.

Questo schema, adottato anche dalla ISO 19650 e dalla UNI 11337, rappresenta un quadro di riferimento evolutivo per l’implementazione del BIM.

Il livello di sviluppo delle informazioni, prima legato alla scala dei disegni, nel BIM si traduce nel concetto di LOD (Level of Development), che comprende LOG (geometria) e LOI (informazioni). Con la ISO 19650, il LOD viene superato dal LOIN (Level of Information Need), definito dalla UNI EN 17412-1, che specifica l’informazione necessaria in base a uso, milestone e attori coinvolti, migliorando efficienza e qualità.

La UNI 11337-4 introduce ulteriori strumenti per il controllo del flusso informativo, definendo quattro stati di avanzamento del contenuto informativo (dall’elaborazione alla condivisione, pubblicazione e archiviazione) e quattro stati di approvazione (da approvare, approvato, approvato con commenti e non approvato). Questo meccanismo permette di monitorare l’evoluzione e la validità delle informazioni nel tempo. Complementare a ciò, la UNI 11337-5 disciplina i livelli di verifica dei contenuti informativi, articolandoli in tre gradi: verifica interna formale (VL1), verifica interna sostanziale (VL2) e verifica indipendente (VL3), ciascuno con compiti e responsabilità specifiche, garantendo la qualità, coerenza e tracciabilità delle informazioni all’interno dei modelli e dei CDE. Da questa logica multilivello nasce uno schema integrato di coordinamento, pubblicazione, controllo e approvazione che rappresenta l’ossatura operativa per la gestione informativa nei processi digitali del settore delle costruzioni.

Il BIM e il BIM ferroviario in Italia

Dai rapporti OICE 2023 e 2024 emerge che il BIM in Italia, dopo una crescita costante dal 2015, ha subito un forte rallentamento nel 2023 a causa del nuovo Codice Appalti (D.Lgs. 36/2023), con una riduzione del 36,5% nei bandi pubblici che lo richiedono, pur mantenendo un ruolo centrale negli appalti di valore elevato, soprattutto legati al PNRR. Geograficamente, il Sud tiene leggermente meglio rispetto al Centro, ma la diffusione del BIM rimane prevalente nelle opere puntuali più che in quelle lineari [21]. Dal rapporto BuildingSMART Italia del 2021, emerge che nel settore ferroviario, il BIM è ancora in fase embrionale, con forti limiti legati a scarsa esperienza, strumenti non adeguati, mancanza di standard nazionali chiari e difficoltà nell’integrazione informativa e normativa. Tuttavia, vi è consenso sul fatto che la standardizzazione, la formazione e un attore di riferimento come RFI possano accelerarne la maturità, portando benefici significativi nella gestione e manutenzione delle infrastrutture ferroviarie. Le principali sfide restano le

barriere economiche per le PMI, la frammentazione del settore e la necessità di un allineamento più efficace tra tecnologia e normativa [22].

2.5.1 *Lo stato dell'arte nazionale e internazionale*

La ricerca italiana in ambito ferroviario ha registrato negli ultimi anni un crescente interesse verso l'applicazione del Building Information Modeling (BIM) nelle infrastrutture di trasporto, con particolare attenzione al settore ferroviario. I contributi scientifici sviluppati si allineano ai principali orientamenti internazionali in termini di digitalizzazione, manutenzione predittiva e interoperabilità, ma mettono in luce anche alcune peculiarità metodologiche proprie del contesto nazionale, sia nella modellazione delle infrastrutture esistenti sia nei processi decisionali legati alla progettazione integrata.

In questo paragrafo, il materiale è stato organizzato secondo quattro principali linee tematiche emergenti:

1. digitalizzazione e diagnostica avanzata delle infrastrutture,
2. gestione del ciclo di vita e manutenzione mediante digital twin,
3. progettazione integrata e interoperabilità informativa,
4. innovazione metodologica e standardizzazione.

Per ciascuna di esse, è stata redatta una sintesi a partire dai contributi degli autori italiani afferenti alle sedi universitarie associate alla S.I.I.V. (Società Italiana Infrastrutture Viarie), evidenziando approcci, metodologie e strumenti applicativi (Fig. 2.8). I risultati mostrano un panorama di ricerca articolato e in continua evoluzione, in cui il BIM per le infrastrutture ferroviarie si configura come leva per l'innovazione nei processi di progettazione, gestione e manutenzione, pur richiedendo ulteriori avanzamenti sul fronte della standardizzazione e dell'interoperabilità.

Tab. 2.1 Sintesi delle pubblicazioni S.I.I.V. consultate

Sede	Autori	Titolo	Tematica
Bologna	Acerra, Busquet, Parente, Marinelli, Vignali, Simone	BIM application for a section of Bologna's Red Tramway Line	Coordinamento multidisciplinare e simulazione 4D
Catania	Di Graziano, Mancini, Marchetta, Spinelli	The use of checklists for verifying the design of a railway infrastructure	Verifica di progetto e qualità nel ciclo BIM
Messina	Bosurgi, Pellegrino, Ruggeri, Sollazzo	Railway condition information modelling in a BIM framework for maintenance applications	Digital Twin per manutenzione ferroviaria

CAPITOLO 2. LE PRINCIPALI TEMATICHE DI RICERCA PER LE “INFRASTRUTTURE FERROVIARIE”

Napoli Federico II	Biancardo, Gesualdi, Savastano, Intignano, Henke, Pagliara	An innovative framework for integrating CBA within BIM	Applicazione all'alta velocità ferroviaria di metodi multi- criteria per la pianificazione dei tracciati ferroviari
Napoli Federico II	Biancardo, Palazzo, Intignano, Dell'Acqua	BIM for Railway Infrastructure: the case study of the Ogliastro-Sapri High- Speed Rail	Applicazione I-BIM per la realizzazione di un Digital-Twin ferroviario dell'alta velocità
Napoli Federico II	Biancardo, Intignano, Viscione, Guerra De Oliveira, Tibaut	Procedural Modeling-Based BIM approach for railway design	Sviluppo librerie di oggetti parametri per componenti ferroviari in BIM
Napoli Federico II	Dell'Acqua, Guerra De Oliveira, Biancardo	Railway-BIM: analytical review, data standard and overall perspective	Panoramica sul BIM ferroviario con enfasi su interoperabilità
Napoli Parthenope	Abbondati, Biancardo, Sicignano, Oliveira, Tibaut, Dell'Acqua	BIM parametric modelling of a railway underpass	Modellazione parametrica e reverse engineering
Napoli Parthenope	Abbondati, Abramovic, Biancardo, Dell'Acqua, Intignano	Horizontal BIM: the Croatian railway Gradec-Sveti Ivan Zabno case study	Criticità e vantaggi del BIM in un contesto internazionale di cooperazione academia- industria
Napoli Parthenope	Biancardo, Zito, Frascarino, Inignano, Di Fonzo, Abbondati, Dell'Acqua	Digital Information Management of Railway Constructions: Comparative analysis of technologies for BIM modeling	Interoperabilità e collaborazione con focus sul confronto tra codici di calcolo
Padova	Pasetto, Giordano, Borin, Giacomello	Integrated railway design using Infrastructure-BIM: The case study of the Port of Venice	Pre-fattibilità e progettazione integrata
Padova	Pasetto, Giacomello	Project Management and Life- Cycle Cost Evaluation using I- BIM techniques: a Railway Infrastructure Design Case Study	Project management e LCC
Reggio Calabria	Giunta, Leonardi	Comprehensive Railway Track Monitoring Using Unmanned Aerial Systems (UASs) and Building Information Modeling (BIM)	Integrazione dei dati dei droni con tecniche di segmentazione basate sul soft computing e modellazione BIM per un'analisi strutturale e funzionale dettagliata

Roma La Sapienza	Catigbac, Miceli, Loprencipe, Foria, Moretti	Integrated workflow with mobile mapping survey and BIM approach to digitalize subway infrastructures	Digital Twin e SCANtoBIM
Roma La Sapienza	Foria, Calicchio, Moretti, Loprencipe	Multidimensional mobile mapping and integrated approach for the digitalisation of underground transport infrastructure	Diagnostica e manutenzione preventiva con mobile mapping
Roma La Sapienza	Bernardini, Leone, D’Andrea, Loprencipe, Malavasi	BIM: prospects for the development of Railway Infrastructure industry	Adozione strategica del BIM ferroviario
Roma La Sapienza	Foria, Miceli, Calicchio, Catigbac, Loprencipe	Digital transformation in the visual inspection of heritage railways tunnels: technology, artificial intelligence and methodology	Manutenzione di ferrovie storiche con strumenti tecnologici innovativi

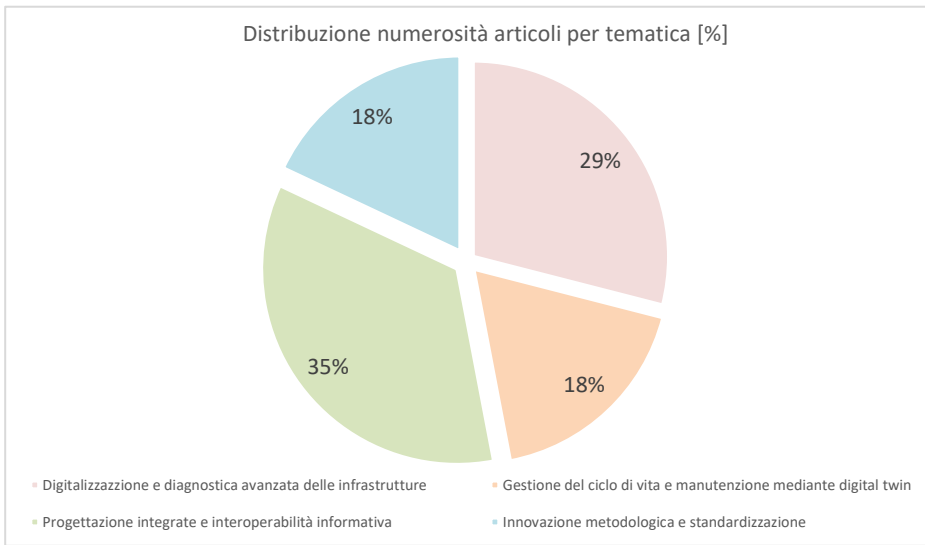


Figura 2.8 Suddivisione percentuale delle pubblicazioni S.I.I.V. per tematica individuata

Digitalizzazione e diagnostica avanzata delle infrastrutture

La digitalizzazione del costruito è affrontata con approcci convergenti ma tecnologie differenti. Catigbac et al. (2023) propongono un flusso di lavoro scan-to-BIM per il rilievo e la modellazione di gallerie metropolitane esistenti, sfruttando la piattaforma ARCHITA per l’acquisizione multi-sensoriale.

Questo processo si basa su rilievi non invasivi, e consente di generare modelli BIM aggiornati in assenza di interruzioni operative [23]. Foria et al. (2022, 2023) estendono questo approccio includendo tecniche non distruttive come GPR e termografia, evidenziando un’evoluzione verso un sistema integrato di diagnostica predittiva e smart asset management [24, 25]. Abbondati et al. (2021) contribuiscono al quadro metodologico con un'applicazione BIM a scala infrastrutturale ferroviaria, sottolineando i vantaggi informativi e collaborativi nella modellazione di una linea ferroviaria reale, in coerenza con le definizioni di processo della UNI 11337 [26]. Giunta et al. (2025) approfondiscono un caso studio di scan-to-BIM ferroviario utilizzando droni UAV (Unmanned Aerial Vehicle) per il monitoraggio delle condizioni dei binari ferroviari tramite restituzione digitale di un gemello digitale con modello BIM [27].

Un elemento comune a questi lavori è l’adozione di un approccio data-driven, mentre si distinguono per il focus: Catigbac e Foria operano in un’ottica infrastrutturale gestionale, mentre Abbondati esplora l’uso del BIM per la digitalizzazione e la gestione informativa di nuove opere ferroviarie. In tutti i casi, emerge l’importanza dell’integrazione tra rilievo e modellazione informativa come fondamento per strategie di manutenzione intelligente.

Contributo internazionale

L’integrazione delle tecnologie digitali nell’ambito infrastrutturale ferroviario ha favorito un significativo progresso nella diagnostica e manutenzione. Parallelamente, il concetto di gemello digitale (digital twin) sta emergendo come tecnologia chiave per il monitoraggio strutturale avanzato, soprattutto per sistemi di trasporto ferroviario ad alta velocità e maglev (Adeagbo et al., 2024) [28]. Tecnologie immersive e strumenti di visualizzazione avanzata, come AR/VR e BIM, stanno rivoluzionando la gestione e l’interpretazione dei big data prodotti dai sistemi SHM (Sadhu et al., 2023) [29]. L’uso di script dinamici in ambienti BIM ha inoltre migliorato l’automazione dell’analisi dei dati ispettivi, favorendo un monitoraggio più reattivo delle irregolarità geometriche nei binari (Sampaio et al., 2025) [30].

Gestione del ciclo di vita e manutenzione mediante digital twin

Questa linea si concentra sull’uso di modelli BIM come strumenti attivi nella gestione ordinaria e strategica delle infrastrutture. Bosurgi et al. (2024) propongono un framework per il monitoraggio delle condizioni geometriche del binario basato su dati provenienti da treni diagnostici e modellazione semplificata del tracciato, offrendo un digital twin funzionale per la manutenzione [31]. Biancardo et al. (2023) integrano il BIM con l’analisi

costi-benefici (CBA) per valutare le alternative progettuali della linea AV Napoli–Bari, dimostrando l’efficacia della visualizzazione integrata dei risultati decisionali [32]. Pasetto e Giacomello (2023) affrontano la stessa tematica introducendo la valutazione del ciclo di vita (LCC) su nuove connessioni ferroviarie e testando l’interoperabilità dei modelli secondo lo standard IFC 4.3 [33]. Tutti gli articoli condividono l’obiettivo di trasformare il modello BIM in uno strumento operativo post-progettuale, ma divergono nei metodi: Bosurgi utilizza dati infrastrutturali esistenti, mentre Biancardo e Pasetto lavorano su scenari di pianificazione strategica.

Contributo internazionale

L’adozione dei digital twin per la gestione del ciclo di vita delle infrastrutture ferroviarie ha mostrato capacità transformative. Studi su scambi ferroviari (Kaewunruen & Lian, 2019) e casi reali come la Taipei Metro (Kaewunruen et al., 2021) e il ponte ferroviario Minnamurra (Kaewunruen et al., 2022) hanno dimostrato come la modellazione BIM 6D consenta una valutazione integrata di costi, tempi, sostenibilità e resilienza [34 – 36]. Il monitoraggio del degrado e delle emissioni di CO₂ è stato integrato nei modelli per ottimizzare gli interventi di manutenzione [37]. Esperienze in contesti ad alta velocità evidenziano come i binari prefabbricati e le infrastrutture ballastless (Kubilitskaya et al., 2024) si prestino particolarmente a questi approcci, fornendo una visione anticipata dei rischi e delle esigenze manutentive [38]. L’uso dei digital twin si è dimostrato efficace anche per l’analisi LCA e LCC, come nel caso dei sistemi PCAT per tram leggeri (Borjigin et al., 2022), consentendo modifiche progettuali orientate alla sostenibilità [39]. Tuttavia, persistono limiti legati all’interoperabilità, alla disponibilità di dati e agli standard normativi (Neves et al., 2019; Efanov et al., 2020) [40, 41].

Progettazione integrata e interoperabilità informativa

In questa categoria rientrano studi che esplorano l’integrazione disciplinare e lo scambio di dati tra strumenti eterogenei. Acerra et al. (2022) sviluppano un modello federato per la linea tranviaria di Bologna, sfruttando simulazioni 4D e clash detection, evidenziando un’efficace applicazione operativa di strumenti I-BIM [42]. Pasetto et al. (2020) analizzano la progettazione integrata della nuova connessione ferroviaria al porto di Venezia, sottolineando le difficoltà nel rappresentare geometrie complesse e assegnare correttamente parametri informativi a oggetti lineari [43]. Abbondati et al. (2020) esplorano il potenziale del BIM parametrico per un sottopasso ferroviario, adottando approcci di reverse engineering e standard IFC per migliorare l’interoperabilità [44]. Biancardo et al. (2023) propongono un

digital twin per l’AV Ogliastro-Sapri sviluppato con strumenti Bentley [45], mentre Biancardo et al. (2024) confrontano OpenRail e Novapoint+Quadri per valutare vantaggi operativi e limiti nella modellazione informativa interoperabile di una variante ferroviaria reale [46]. A completamento del quadro metodologico, Dell’Acqua et al. (2018) offrono una revisione critica dei temi Railway-BIM, con un focus sui formati dati e sugli strumenti software specifici per infrastrutture lineari [47].

Pur con approcci diversi (cantierizzazione, pre-fattibilità, interoperabilità software), tutti i lavori mettono in evidenza la necessità di strumenti collaborativi e di una semantica condivisa per supportare pienamente la progettazione infrastrutturale in ambiente digitale.

Contributo internazionale

L’integrazione tra BIM e GIS rappresenta un’opportunità strategica per migliorare la progettazione ferroviaria, superando i limiti spaziali del solo BIM. Tuttavia, le barriere semantiche e geometriche persistono, soprattutto nei contesti infrastrutturali complessi (Kurwi et al., 2017; Floros et al., 2020) [48, 49]. La mancanza di linee guida collaborative e la riluttanza nell’adozione di nuove tecnologie restano ostacoli significativi (Kurwi et al., 2021) [50]. L’adozione di piani collaborativi strutturati, come il Collaborative Plan of Work, potrebbe colmare queste lacune, migliorando la gestione informativa durante le fasi progettuali [51]. Inoltre, strumenti di programmazione visuale come BPMN e DMN si sono rivelati utili per la verifica automatica della conformità normativa, sebbene con copertura parziale (Haussler et al., 2021) [52].

Innovazione metodologica e standardizzazione

Questa linea raccoglie contributi che mirano a rafforzare le basi teorico-metodologiche della digitalizzazione ferroviaria. Biancardo et al. (2021) propongono un approccio procedural modeling per modellare sezioni ferroviarie con geometrie non standard, superando le carenze delle librerie IFC attuali [53]. Di Graziano et al. (2020) suggeriscono invece l’uso di checklist digitali per supportare la verifica del progetto, evidenziando come la formalizzazione dei controlli possa ridurre varianti e contenziosi [54]. Infine, Bernardini et al. (2017) propongono un quadro generale di applicabilità del BIM nel contesto ferroviario, con particolare attenzione alla trasparenza procedurale e alla compatibilità con le direttive europee sugli appalti pubblici [55]. Se Biancardo guarda alla modellazione geometrica e Di Graziano alla qualità progettuale, Bernardini si colloca su un piano strategico-sistemico.

Insieme, delineano un percorso di evoluzione metodologica che dal dettaglio progettuale arriva al sistema infrastrutturale complessivo.

Contributo internazionale

Nel panorama ferroviario contemporaneo, l'innovazione metodologica e la standardizzazione rivestono un ruolo cruciale nel promuovere efficienza, sostenibilità e interoperabilità tra le diverse fasi del ciclo di vita delle infrastrutture. Bensalah et al. (2019) pongono l'attenzione sull'importanza di definire processi strutturati e formalizzati, in grado di garantire coerenza nell'uso dei dati digitali lungo tutte le fasi progettuali e operative [56]. In linea con questa visione, Cepa et al. (2023) propongono un framework metodologico evoluto che mira a sistematizzare l'adozione di tecnologie digitali nei progetti ferroviari, combinando approcci BIM avanzati con criteri prestazionali misurabili [57].

Sresakoolchai e Kaewunruen (2022) approfondiscono l'efficacia della standardizzazione nelle pratiche di progettazione e gestione, sottolineando come l'adozione di modelli digitali interoperabili consenta di migliorare la resilienza, la sostenibilità e la trasparenza decisionale nei progetti ferroviari [58]. Infine, Shim e Moon (2024) propongono una strategia integrata per l'automazione e l'interoperabilità dei modelli digitali, che enfatizza la necessità di definire strutture semantiche condivise e processi standardizzati a supporto della gestione dinamica e adattiva delle infrastrutture [59]. Questi contributi congiuntamente dimostrano che la standardizzazione metodologica è fondamentale per garantire efficienza operativa, riduzione dei costi e maggiore affidabilità lungo l'intero ciclo di vita ferroviario.

2.5.2 Contributo alla ricerca

L'esame delle pubblicazioni considerate nel presente lavoro evidenzia il ruolo centrale svolto dagli atenei afferenti alla S.I.I.V. nello sviluppo di conoscenze applicate al settore delle infrastrutture ferroviarie digitali dimostrando una solida capacità di integrare rigore metodologico, sperimentazione tecnologica e ricadute operative concrete.

In particolare, i contributi relativi alla digitalizzazione dell'infrastruttura e alla diagnostica predittiva hanno evidenziato approcci tecnici avanzati, fondati su rilievi multi-sorgente e modelli informativi aggiornabili in tempo reale. L'adozione di metodologie come il mobile mapping, il procedural modeling e la costruzione di digital twin ha consentito di affrontare sfide complesse legate all'eterogeneità geometrica delle reti e alla necessità di mantenere elevati standard di affidabilità.

Anche sotto il profilo del monitoraggio e della gestione del ciclo di vita, le soluzioni individuate sono caratterizzate da un forte orientamento all'innovazione. L'integrazione tra sistemi sensoristici, strumenti di simulazione 4D, ambienti interoperabili e algoritmi di supporto decisionale evidenzia un chiaro allineamento con i paradigmi emergenti a livello europeo e internazionale, che pongono l'accento sull'uso di intelligenza artificiale, analisi predittive e sostenibilità.

Un ulteriore elemento distintivo delle ricerche italiane risiede nella loro trasversalità metodologica e nella concretezza applicativa: le soluzioni proposte sono progettate per essere replicabili in contesti eterogenei, dai corridoi ad alta capacità alle linee suburbane e tranviarie. Questo approccio orientato all'adattabilità e alla scalabilità costituisce un valore aggiunto rilevante nel panorama della ricerca ferroviaria europea.

Nel complesso, l'attività scientifica sviluppata dai soci S.I.I.V. ha contribuito in modo significativo ad arricchire la base di conoscenze tecniche e digitali necessarie a sostenere la transizione in atto verso infrastrutture ferroviarie più efficienti, resilienti e interconnesse. L'integrazione tra dimensione teorica, sviluppo tecnologico e impatto operativo rappresenta uno dei principali punti di forza emersi, rendendo questo insieme di ricerche un punto di riferimento per la futura evoluzione del settore.

2.5.3 Criticità e sviluppi futuri

L'esame complessivo dei contributi analizzati ha permesso di mettere in luce, oltre ai traguardi raggiunti, alcune aree critiche ancora aperte nell'ambito della ricerca BIM ferroviaria. Tali elementi, lungi dal rappresentare limiti statici, possono essere letti come spunti strategici per orientare le prossime evoluzioni del settore.

Una prima fragilità si evidenzia nella non omogeneità dei criteri informativi e nella diversità dei protocolli di modellazione e valutazione adottati. Sebbene siano stati compiuti passi significativi nell'adozione di formati standardizzati come IFC 4.3 e nella costruzione di flussi interoperabili, manca ancora un quadro di riferimento condiviso che consenta un reale allineamento tra modelli digitali sviluppati in contesti differenti. Questo ostacola la continuità informativa e la comparabilità tra progetti, in particolare nei casi di infrastrutture complesse o multigiurisdizionali.

Un secondo nodo riguarda la compartimentazione delle tecnologie di rilievo e diagnostica. Le applicazioni di mobile mapping, sensori in situ e piattaforme di gestione avanzata sono spesso sviluppate in modo indipendente, con scarse connessioni operative. L'integrazione effettiva tra dati acquisiti, modelli BIM e ambienti collaborativi richiede ulteriori sforzi, sia sul piano tecnico sia su

quello organizzativo, per favorire soluzioni integrabili e replicabili su scala territoriale più ampia.

Anche sul versante predittivo, i risultati presentano margini di miglioramento. Molti studi si basano su sperimentazioni limitate a tratti pilota o a specifici scenari infrastrutturali, rendendo complessa l'estensione dei risultati a contesti diversi per natura, scala o uso. L'affidabilità dei modelli di previsione, così come la loro utilità nelle attività decisionali, dipende fortemente dalla loro validazione su casi concreti e diversificati.

Sul piano della trasferibilità tecnologica, è fondamentale potenziare il raccordo tra la sperimentazione accademica e la pratica operativa. Le soluzioni avanzate basate su intelligenza artificiale, digital twin e simulazioni evolute mostrano un alto potenziale, ma necessitano di essere meglio integrate nei processi decisionali reali delle aziende e delle autorità ferroviarie, al fine di tradurre l'innovazione in valore tangibile.

Guardando avanti, appaiono strategici alcuni filoni di sviluppo: l'accoppiamento tra dati satellitari e sensori sul campo, la definizione di indicatori prestazionali orientati alla sostenibilità ambientale e alla resilienza infrastrutturale, e la creazione di ecosistemi digitali interoperabili in grado di supportare l'intero ciclo di vita delle opere.

In definitiva, il progresso tecnologico e metodologico emerso dagli studi recenti costituisce una base solida per promuovere una nuova visione della gestione infrastrutturale: una visione in cui l'intelligenza digitale, l'efficienza operativa e la capacità adattiva convergano verso un sistema ferroviario moderno, integrato e sostenibile.

2.5.4 *Bibliografia*

1. Eastman, C., Fisher, D., Lafue, G., Lividini, J., Stoker, D., Yessios, C.: An Outline of the Building Description System. (1974).
2. van Nederveen, G.A., Tolman, F.P.: Modelling multiple views on buildings. *Autom Constr.* 1, 215–224 (1992). [https://doi.org/10.1016/0926-5805\(92\)90014-B](https://doi.org/10.1016/0926-5805(92)90014-B).
3. Autodesk Inc.: Building Information Modeling. Autodesk Inc., San Rafael, CA (2002).
4. Building SMART International: All IFC format files and standards related information, (2025).
5. European Parliament, of the European Union, C.: Directive 2014/24/EU on public procurement, (2014).
6. Italian Government: Legislative Decree 50/2016 on public procurement, implementing 2014/23/EU, 2014/24/EU, and 2014/25/EU, (2016).

7. Italian Ministry of Infrastructure, Transport: Ministerial Decree 560/2017 on public procurement, implementing Article 23, Paragraph 13, of Legislative Decree No. 50 of April 18, 2016, (2017).
8. Italian Government: Legislative Decree 77/2021, (2021).
9. Italian Government: Ministerial Decree 312/2021, (2021).
10. Italian Government: Legislative Decree 36/2023, or New Public Procurements Code, (2023).
11. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti: Decreto Legislativo 31 dicembre 2024, n. 209: Disposizioni integrative e correttive al codice dei contratti pubblici, di cui al decreto legislativo 31 marzo 2023, n. 36, <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2024/12/31/24G00231/SG>, (2024).
12. International Organization for Standardization (ISO): ISO 19650:2018 EN, (2018).
13. Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI): UNI 11337:2017 ITA, (2017).
14. Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI): UNI EN ISO 16739-1:2020 ITA, (2020).
15. Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI): UNI EN ISO 7817-1:2024 ITA, (2024).
16. Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI): UNI/PdR 74 “BIM Management System - Requirements” – Guida alle Norme per le Costruzioni Digitali (2025).
17. Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI): UNI/TR 11937 Guidelines for the Integration Activities Between Project Management and Digital Information Management in Contracts, (2025).
18. Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI): UNI ISO 21502:2021 “Project, program and portfolio management - Guide to project management” (2021).
19. British Standards Institution (BSI): PAS 1192, (2013).
20. Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI): UNI EN ISO 17412-1:2021 ITA, (2021).
21. OICE: 2024 OICE 7 Report on Digitalization and BIM Public Procurements, (2024).
22. Gd LopenBIM for Rail (Building SMART Italia): OpenBIM for Rail: stato del BIM nel settore ferroviario in Italia, (2021).
23. Manalo Catigbac, G., Miceli, G., Loprencipe, G., Foria, F., Moretti, L.: Integrated workflow with mobile mapping survey and BIM approach to digitalize subway infrastructures. EUROPEAN TRANSPORT / TRASPORTI EUROPEI. 93, 1–16 (2023).
24. Foria, F., Miceli, G., Calicchio, M., Catigbac, G.M., Loprencipe, G.: Digital transformation in the visual inspection of heritage railways tunnels: Technology, artificial intelligence and methodology. In: Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites III. pp. 337–348. CRC Press, London (2022). <https://doi.org/10.1201/9781003308867-20>.

25. Foria, F., Calicchio, M., Moretti, L., Loprencipe, G.: Multidimensional mobile mapping and integrated approach for the digitalisation of underground transport infrastructure. *Acta Polytechnica*. 63, 111–122 (2023).
26. Abbondati, F., Abramović, B., Biancardo, S.A., Dell’Acqua, G., Intignano, M.: Horizontal Building Information Modeling: the Croatian railway Gradec-Sveti Ivan Žabno case study. *Ingegneria Ferroviaria*. 76, 979–994 (2021).
27. Giunta, M., Barrile, V., Leonardi, G., Genovese, E.: Comprehensive Railway Track Monitoring Using Unmanned Aerial Systems (UASs) and Building Information Modeling (BIM). Presented at the (2026). https://doi.org/10.1007/978-3-031-97648-3_27.
28. Adeagbo, M.O., Wang, S.M., Ni, Y.Q.: Revamping structural health monitoring of advanced rail transit systems: A paradigmatic shift from digital shadows to digital twins. *Advanced Engineering Informatics*. 61, 102450 (2024).
29. Sadhu, A., Peplinski, J.E., Mohammadkhorasani, A., Moreu, F.: A review of data management and visualization techniques for structural health monitoring using BIM and virtual or augmented reality. *Journal of Structural Engineering*. 149, 3122006 (2023).
30. Sampaio, Z., Moreira, N., Neves, J.: I-BIM Applied in Railway Geometric Inspection Activity: Diagnostic and Alert. *Applied Sciences*. (2025).
31. Bosurgi, G., Pellegrino, O., Ruggeri, A., Sollazzo, G.: Railway condition information modelling in a BIM framework for maintenance applications. *International Journal of Rail Transportation*. 13, 732–752 (2025). <https://doi.org/10.1080/23248378.2024.2397660>.
32. Biancardo, S.A., Gesualdi, M., Savastano, D., Intignano, M., Henke, I., Pagliara, F.: An innovative framework for integrating Cost-Benefit Analysis (CBA) within Building Information Modeling (BIM). *Socioecon Plann Sci*. 85, 101495 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.seps.2022.101495>.
33. Pasetto, M., Giacomello, G.: Project management and life-cycle cost evaluation using infrastructure-building information modeling techniques: A railway infrastructure design case study. In: *Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems*. pp. 3752–3759. CRC Press, London (2023). <https://doi.org/10.1201/9781003323020-460>.
34. Kaewunruen, S., Lian, Q.: Digital twin aided sustainability-based lifecycle management for railway turnout systems. *J Clean Prod*. 228, 1537–1551 (2019).
35. Kaewunruen, S., AbdelHadi, M., Kongpuang, M., Pansuk, W., Remennikov, A.M.: Digital twins for managing railway bridge maintenance, resilience, and climate change adaptation. *Sensors*. 23, 252 (2022).
36. Kaewunruen, S., Sresakoolchai, J., Lin, Y.H.: Digital twins for managing railway maintenance and resilience. *Open Research Europe*. 1, 91 (2021).
37. Alqatawna, A., Sánchez-Cambronero, S., Gallego, I., Rivas, A.: BIM-centered high-speed railway line design for full infrastructure lifecycle. *Autom Constr*. 156, 105114 (2023).
38. Kublitskaya, V., Pokusaev, O., Kupriyanovsky, V.: The life cycle of intelligent high-speed rail based on BIM, digital twins, and other technologies using

the example of the construction of slab railway tracks. *International Journal of Open Information Technologies*. 12, 67–87 (2024).

39. Borjigin, A.O., Sresakoolchai, J., Kaewunruen, S., Hammond, J.: Digital twin aided sustainability assessment of modern light rail infrastructures. *Front Built Environ*. 8, 796388 (2022).

40. Efanov, D., Shilenko, A.S., Khóroshev, V. V: Digital modeling in railway infrastructure and rolling stock objects at all stages life cycle: features. In: 2020 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). pp. 29–34. IEEE (2020).

41. Neves, J., Sampaio, Z., Vilela, M.: A case study of BIM implementation in rail track rehabilitation. *Infrastructures (Basel)*. 4, 8 (2019). <https://doi.org/10.3390/infrastructures4010008>.

42. Acerra, E.M., Busquet, G.F.D., Parente, M., Marinelli, M., Vignali, V., Simone, A.: Building Information Modeling (BIM) Application for a Section of Bologna’s Red Tramway Line. *Infrastructures (Basel)*. 7, 168 (2022). <https://doi.org/10.3390/infrastructures7120168>.

43. Pasetto, M., Giordano, A., Borin, P., Giacomello, G.: Integrated railway design using Infrastructure-Building Information Modeling. The case study of the port of Venice. *Transportation Research Procedia*. 45, 850–857 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.084>.

44. Abbondati, F., Biancardo, S.A., Sicignano, G., de Oliveira, S.G., Tibaut, A., Dell’Acqua, G.: BIM parametric modelling of a railway underpass. *Ingegneria Ferroviaria*. 75, 443–459 (2020).

45. Biancardo, S.A., Palazzo, S., Intignano, M., Dell’Acqua, G.: BIM for railway infrastructure: the case study of the Ogliastro–Sapri High-Speed rail. Presented at the October 23 (2023). <https://doi.org/10.3846/enviro.2023.916>.

46. Biancardo, S.A., Zito, L., Frascarino, A., Intignano, M., Di Fonzo, F., Abbondati, F., Dell’Acqua, G.: Digital information management of railway constructions: Comparative analysis of technologies for BIM modeling. *Ingegneria Ferroviaria*. 79, 551–564 (2024). <https://doi.org/10.57597/IF.0708.2024.ART.2>.

47. Dell’Acqua, G., Guerra De Oliveira, S., Biancardo, S.A.: Railway-BIM: Analytical review, data standard and overall perspective. *Ingegneria Ferroviaria*. 73, 901–923 (2018).

48. Kurwi, S., Demian, P., Hassan, T.M.: Integrating BIM and GIS in railway projects: A critical review. In: *Proceedings of the 33rd Annual ARCOM Conference*. pp. 45–53. Association of Researchers in Construction Management, Cambridge, UK (2017).

49. Floros, G.S., Ruff, P., Ellul, C.: IMPACT OF INFORMATION MANAGEMENT DURING DESIGN & CONSTRUCTION ON DOWNSTREAM BIM-GIS INTEROPERABILITY FOR RAIL INFRASTRUCTURE. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. VI-4/W1-2020, 61–68 (2020). <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-VI-4-W1-2020-61-2020>.

50. Kurwi, S., Demian, P., Blay, K.B., Hassan, T.M.: Collaboration through Integrated BIM and GIS for the Design Process in Rail Projects: Formalising the Requirements. *Infrastructures* (Basel). 6, 52 (2021). <https://doi.org/10.3390/infrastructures6040052>.
51. Bensalah, M., Elouadi, A., Mharzi, H.: BIM integration into railway projects - case study. *Contemporary Engineering Sciences*. 11, 2181–2199 (2018). <https://doi.org/10.12988/ces.2018.85217>.
52. Häußler, M., Esser, S., Borrmann, A.: Code compliance checking of railway designs by integrating BIM, BPMN and DMN. *Autom Constr*. 121, 103427 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103427>.
53. Biancardo, S.A., Intignano, M., Viscione, N., Guerra De Oliveira, S., Tibaut, A.: Procedural Modeling-Based BIM Approach for Railway Design. *J Adv Transp*. 2021, 1–17 (2021). <https://doi.org/10.1155/2021/8839362>.
54. Di Graziano, A., Mancini, G., Marchetta, V., Spinelli, M.: The use of checklists for verifying the design of a railway infrastructure. *Ingegneria Ferroviaria*. 1, 17–37 (2020).
55. Bernardini, L., Leone, M., D’Andrea, A., Loprencipe, G., Malavasi, G.: Building Information Modeling (BIM): Prospects for the development of Railway Infrastructure industry. In: Celiński, I., Staniek, M., and Sierpiński, G. (eds.) *Transport Infrastructure and Systems*. pp. 547–556. CRC Press/Balkema, Leiden, The Netherlands (2017). <https://doi.org/10.1201/9781315281889-71>.
56. Bensalah, M., Elouadi, A., Mharzi, H.: Overview: the opportunity of BIM in railway. *Smart and Sustainable Built Environment*. 8, 103–116 (2019). <https://doi.org/10.1108/SASBE-11-2017-0060>.
57. Cepa, J.J., Pavón, R.M., Alberti, M.G., Ciccone, A., Asprone, D.: A Review on the Implementation of the BIM Methodology in the Operation Maintenance and Transport Infrastructure. *Applied Sciences*. 13, 3176 (2023). <https://doi.org/10.3390/app13053176>.
58. Sresakoolchai, J., Kaewunruen, S.: Track Geometry Prediction Using Three-Dimensional Recurrent Neural Network-Based Models Cross-Functionally Co-Simulated with BIM. *Sensors*. 23, 391 (2022). <https://doi.org/10.3390/s23010391>.
59. Shim, C., Moon, H.: Recent BIM Developments and Applications on Railway Infrastructure. In: *Digital Railway Infrastructure*. pp. 211–227. Springer Nature Switzerland, Cham (2024).

3 Normativa

3.1 La nascita delle ferrovie di stato

La costruzione della prima ferrovia nel 1825 in Inghilterra suscitò un notevole interesse a livello globale per il nuovo mezzo di trasporto su rotaia. In pochi anni, numerosi Paesi europei e il Nord America iniziarono a costruire linee ferroviarie che, sebbene inizialmente distribuite in modo disorganico sul territorio, finirono con il costituire vere e proprie reti integrate.

In Italia — o meglio, nella Penisola italiana, che all'epoca non costituiva ancora uno Stato unitario — l'interesse per le ferrovie non ebbe lo stesso impatto immediato. La prima linea ferroviaria fu la celebre Napoli–Portici, inaugurata nel 1839. Solo il Regno di Sardegna, a partire dal 1848, avviò la realizzazione di una rete ferroviaria estesa e ben articolata, che per anni rappresentò un unicum nel contesto italiano. Solo con l'Unità d'Italia e grazie al forte sostegno di Camillo Benso, conte di Cavour, il Paese conobbe uno sviluppo significativo del trasporto ferroviario.

L'introduzione delle ferrovie rese necessario affrontare la complessa regolamentazione giuridica di un sistema ricco di implicazioni: dalla concessione per la costruzione delle linee alle norme per la circolazione dei treni, fino ai rapporti di natura privatistica tra l'impresa ferroviaria (in quanto gestore del servizio e vettore) e gli utenti. Parallelamente allo sviluppo delle reti, si intervenne con nuove normative o con l'aggiornamento di quelle esistenti in tutti i settori del trasporto ferroviario.

Essendo le ferrovie chiamate a svolgere un servizio pubblico — ossia garantire la mobilità dei cittadini e promuovere lo sviluppo economico facilitando gli scambi commerciali — lo Stato, di fronte al dissesto finanziario delle diverse imprese ferroviarie, intervenne assumendo direttamente la gestione della maggior parte delle linee. In Italia, ciò avvenne con la **legge 22 aprile 1905, n. 137**, che istituì l'Azienda autonoma statale delle Ferrovie dello Stato (FS), anticipando l'intervento pubblico rispetto a molti altri Paesi europei. Le FS furono incaricate di proseguire l'esercizio delle linee esistenti e di costruirne di nuove, utilizzando fondi pubblici. La nascita delle FS segnò così l'avvio di un vero e proprio monopolio statale del settore ferroviario, con l'acquisizione della quasi totalità delle reti (fatta eccezione per quelle cosiddette "concesse") da parte dello Stato.

Con il **Regio Decreto 9 maggio 1912, n. 1447**, vengono definite le disposizioni di *“legge per le ferrovie concesse all'industria privata, le tranvie a trazione meccanica e gli automobili”*, approvato in Gazzetta Ufficiale n. 49

del 28 febbraio 1913. Questo testo unico è ancora oggi utilizzato come riferimento per la normativa in materia di ferrovie private, tranvie e automobili. In particolare, il Regio Decreto:

- Definisce le disposizioni di legge per le ferrovie concesse all'industria privata, stabilendo le regole per la costruzione, l'esercizio e la gestione di queste infrastrutture.
- Regola le tranvie a trazione meccanica, fissando i principi per la loro costruzione, l'uso delle strade e i raccordi con altre infrastrutture.
- Fissa le regole per le automobili, stabilendo le disposizioni relative alla circolazione stradale e all'uso delle strade.

Il controllo statale si manifestò nella dipendenza dell'azienda dalla Pubblica Amministrazione, con modalità diverse nei vari periodi storici. Inizialmente, le FS erano sottoposte alla vigilanza del Ministero dei Lavori Pubblici, ma nel 1924 la competenza passò al neonato Ministero delle Comunicazioni, il cui titolare ricopriva anche il ruolo di Presidente del Consiglio di amministrazione dell'azienda. Un'ulteriore trasformazione avvenne con il **decreto luogotenenziale del 12 dicembre 1944, n. 413**, che, pur mantenendo le FS nella forma di azienda autonoma, le trasformò in una direzione generale del nuovo Ministero dei Trasporti.

3.2 L'evoluzione della regolazione del sistema ferroviario in Europa e in Italia negli ultimi cinquant'anni

Negli ultimi cinquant'anni, la gestione del sistema ferroviario italiano ha subito una profonda trasformazione, incentrata principalmente sul piano regolatorio, in seguito al recepimento della normativa europea. Le riforme hanno avuto come obiettivo la liberalizzazione del settore, introducendo elementi di concorrenza in un ambito storicamente dominato da operatori pubblici in condizioni di monopolio.

L'integrazione europea ha avviato un ampio processo di liberalizzazione dei servizi pubblici, incluso quello ferroviario. Il cambiamento e le relative criticità vengono analizzate attraverso l'esame della normativa europea e del suo recepimento in Italia.

Il processo di liberalizzazione prende avvio negli anni Novanta con l'adozione delle direttive **91/440/CEE** (sviluppo delle ferrovie), **95/18/CE** (licenze ferroviarie) e **95/19/CE** (ripartizione della capacità infrastrutturale e riscossione dei diritti di accesso). Le motivazioni alla base di tali interventi sono illustrate nel Libro Bianco della Commissione europea del 1° luglio

1996, che rappresenta una premessa all'analisi dei quattro "pacchetti ferroviari".

Il primo pacchetto ferroviario (**Direttive CE 2001 n. 12-13-14-16**) ha promosso la creazione di un mercato ferroviario concorrenziale, basato sulla separazione tra gestione dell'infrastruttura e servizi di trasporto. In Italia, ciò si è concretizzato con la costituzione di Rete Ferroviaria Italiana (2001) quale gestore unico dell'infrastruttura, regolata tramite il Contratto di Programma.

Il secondo pacchetto ferroviario (**Direttive CE 2004 n. 49-50-51 e Regolamento CE 881/2004**) ha accelerato la liberalizzazione del trasporto merci, mirando alla creazione di operatori attivi su scala internazionale. Ha introdotto norme su sicurezza e interoperabilità e istituito l'Agenzia ferroviaria europea.

Il terzo pacchetto ferroviario (**Direttive CE 2007/58-2007/59 e Regolamenti CE 2007 n. 1370-1371**) ha favorito l'apertura del mercato del trasporto passeggeri internazionale, introducendo anche la licenza europea per i macchinisti e una disciplina dei diritti dei passeggeri.

Nel 2010, la Commissione europea ha fatto il punto sulla liberalizzazione, rilevando che, sebbene il trasporto merci e passeggeri internazionali fossero stati aperti, i mercati nazionali del trasporto passeggeri rimanevano sostanzialmente chiusi.

La comunicazione n. **474/2010** della Commissione ha portato alla rifusione normativa del primo pacchetto ferroviario tramite la direttiva **2012/34/UE**, che ha rafforzato l'indipendenza dell'organismo nazionale di regolazione, rendendolo supervisore unico di tutte le attività ferroviarie. In Italia, tuttavia, tale indipendenza non era pienamente garantita, portando la Commissione europea a deferire l'Italia alla Corte di Giustizia UE.

La direttiva **2012/34/UE** ribadisce i principi della concorrenza equa e dell'indipendenza tra gestori dell'infrastruttura e operatori ferroviari. È in questo contesto che si inserisce il Libro Bianco del 2011, volto a eliminare le barriere ancora esistenti alla creazione di uno spazio ferroviario unico europeo.

A livello nazionale, la riforma del 1992 ha trasformato l'Ente Ferrovie dello Stato in Ferrovie dello Stato S.p.A. Successivamente, il D.P.R. n. **277/1998** ha sancito la separazione contabile tra gestione della rete e gestione dei servizi. Nel 2001, si è completato il processo con la nascita della holding Ferrovie dello Stato Italiane S.p.A., che controlla RFI S.p.A. e Trenitalia S.p.A.

Tuttavia, la permanenza di una struttura integrata sotto la stessa holding ha creato ostacoli di fatto all'accesso di nuovi operatori, in contrasto con i principi di concorrenza.

Per promuovere una concorrenza effettiva, è stata istituita l'Autorità di Regolazione dei Trasporti (art. 37) con il **D.L. n. 201/2011**, rafforzata dal d.lgs. n. 112/2015. L'art. 37 ha assunto un ruolo centrale nella regolazione del settore, garantendo l'accesso equo e non discriminatorio alla rete (delibera 70/2014), la trasparenza del prospetto informativo (delibera 76/2014), e criteri per la definizione dei canoni di accesso (delibera 96/2015). Il complesso sistema di governance del trasporto ferroviario coinvolge anche altre autorità, come l'Autorità Garante della Concorrenza e del Mercato.

Come è noto, l'attività di regolazione e il rispetto della disciplina antitrust devono essere considerate in modo distinto, atteso che, in generale, le autorità di regolazione mirano ad introdurre e ad affermare in via preventiva nel settore delle public utilities il rispetto di alcuni principi quali il contenimento dei prezzi e le misure a favore dei nuovi entranti e dei consumatori, funzionali a prevenire comportamenti anticoncorrenziali, mentre le autorità antitrust verificano ex post il rispetto della concorrenza, con provvedimenti sanzionatori dei comportamenti lesivi di essa.

A livello europeo, i modelli di regolazione variano, ma si riscontra una tendenza a creare autorità indipendenti con competenze trasversali. Per questo, vengono brevemente analizzati i modelli di governance di Paesi come Germania, Francia e Regno Unito.

Le considerazioni finali si concentrano sul quarto pacchetto ferroviario (presentato nel 2013), che mira a completare la liberalizzazione dei mercati nazionali passeggeri e a rafforzare la separazione tra gestori della rete e operatori di servizio, tramite gare competitive per i contratti di servizio pubblico e la rimozione di barriere amministrative e tecniche.

Il quarto pacchetto ferroviario è alla base della nuova politica TEN-T dell'UE, lanciata il 1° gennaio 2014. Stabilisce nove corridoi della rete centrale di trasporto in tutta l'UE con l'obiettivo di:

- eliminare le strozzature;
- realizzare i collegamenti transfrontalieri mancanti;
- promuovere l'integrazione e l'interoperabilità tra i diversi modi di trasporto.

Le **Specifiche Tecniche di Interoperabilità (STI)** sono documenti emanati dalla Commissione europea sotto forma di regolamenti e, in quanto tali, sono pubblicati nella Gazzetta ufficiale dell'Unione europea.

Le (STI) sono norme tecniche che definiscono le condizioni per la circolazione di treni su diverse reti ferroviarie, garantendo che siano compatibili tra loro. In pratica, le STI specificano come i diversi sistemi

ferroviari nazionali devono essere progettati e mantenuti per poter funzionare insieme in modo sicuro e senza interruzioni.

Con l'entrata in vigore del quarto pacchetto ferroviario, dal 16 giugno 2019 tutte le STI sono aggiornate conformemente ai regolamenti di esecuzione pubblicati nella Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, serie L, n. 139 del 27 maggio 2019.

3.3 Normativa europea

Come visto, dal 1991, il settore ferroviario europeo è stato costantemente riformato dall'Unione Europea attraverso una serie di normative in continua evoluzione. Queste includono i cosiddetti “pacchetti ferroviari”, volti a creare un sistema ferroviario più efficiente, competitivo e sostenibile, e a costituire l'Area Ferroviaria Europea Unica (SERA). Si riportano di seguito i riferimenti principali:

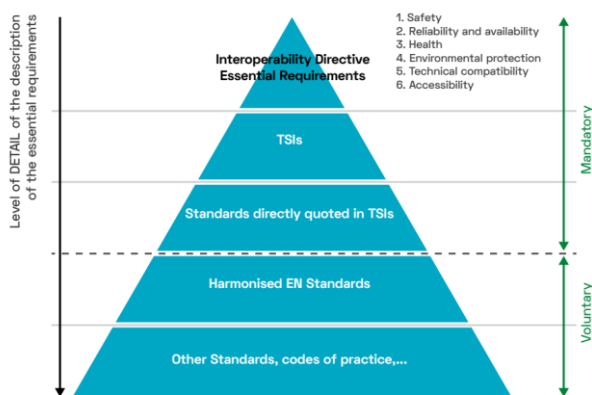


Figura 3.1 Direttive sull'interoperabilità, STI e normative

3.4 Direttive

- Direttiva 91/440/CEE del 29 luglio 1991, relativa allo “sviluppo delle ferrovie comunitarie”. Sancisce un assetto tecnico-istituzionale delle ferrovie basato sui principi di: separazione della gestione dell'infrastruttura ferroviaria dall'esercizio dei servizi di trasporto, autonomia gestionale delle imprese ferroviarie, diritto di accesso alle reti ferroviarie degli stati membri UE per le associazioni internazionali di imprese ferroviarie e per i vettori ferroviari che effettuano trasporti combinati.

- Direttiva 95/18/CEE del 19 giugno 1995, relativa “alle licenze delle imprese ferroviarie”. A complemento della Direttiva 91/440, riguarda i criteri che disciplinano il rilascio delle licenze destinate alle imprese ferroviarie che intendono effettuare servizi di trasporto ovvero ottenere il cosiddetto “accesso all’infrastruttura” ferroviaria degli Stati membri UE.
- Direttiva 95/19/CEE del 19 giugno 1995, riguardante “la ripartizione delle capacità di infrastruttura ferroviaria e la riscossione dei diritti per l’utilizzo dell’infrastruttura”. A complemento della Direttiva 91/440 definisce i principi e le procedure da seguire nella cosiddetta ripartizione della capacità, ovvero l’assegnazione della disponibilità del binario alle imprese autorizzate.
- Direttiva 2001/12/CE del 26 febbraio 2001, “che modifica la direttiva 91/440/CEE (V.) relativa allo sviluppo delle ferrovie comunitarie”. Direttiva che introduce modifiche alla precedente per tener conto dell’esperienza acquisita con la sua attuazione.
- Direttiva 2001/13/CE del 26 febbraio 2001, “che modifica la direttiva 95/18/CE (V.) relativa alle licenze delle imprese ferroviarie”.
- Direttiva 2001/14/CE del 26 febbraio 2001, “relativa alla ripartizione della capacità di infrastruttura ferroviaria, all’imposizione dei diritti per l’utilizzo dell’infrastruttura ferroviaria e alla certificazione di sicurezza”.
- Direttiva 2001/16/CE del 19 marzo 2001, “relativa all’interoperabilità del sistema ferroviario transeuropeo convenzionale”. Ha esteso i concetti e le procedure sostanziali della Direttiva 96/48/CEE al caso delle linee ferroviarie tradizionali (non ad alta velocità).
- Direttiva 2004/49/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 29 aprile 2004 relativa alla sicurezza delle ferrovie comunitarie e recante modifica della direttiva 95/18/CE del Consiglio relativa alle licenze delle imprese ferroviarie e della direttiva 2001/14/CE relativa alla ripartizione della capacità di infrastruttura ferroviaria, all’imposizione dei diritti per l’utilizzo dell’infrastruttura ferroviaria e alla certificazione di sicurezza.
- Direttiva 2004/50/ del 29 aprile 2004 che modifica la direttiva 96/48/CE del Consiglio relativa all'interoperabilità del sistema ferroviario transeuropeo ad alta velocità e la direttiva 2001/16/CE del Parlamento europeo e del Consiglio relativa all'interoperabilità del sistema ferroviario transeuropeo convenzionale.
- Direttiva 2004/51/CE del 29 aprile 2004 che modifica la direttiva 91/440/CEE relativa allo sviluppo delle ferrovie comunitarie.
- Direttiva 2007/58/CE del 23 ottobre 2007 che modifica la direttiva 91/440/CEE del Consiglio relativa allo sviluppo delle ferrovie comunitarie e la direttiva 2001/14/CE relativa alla ripartizione della

capacità di infrastruttura ferroviaria e all'imposizione dei diritti per l'utilizzo dell'infrastruttura ferroviaria.

- Direttiva 2007/59/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 23 ottobre 2007, relativa alla certificazione dei macchinisti addetti alla guida di locomotori e treni sul sistema ferroviario della Comunità
- Direttiva 2008/57/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 17 giugno 2008, relativa all'interoperabilità del sistema ferroviario comunitario (rifusione)
- Direttiva 2012/34/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 21 novembre 2012, che istituisce uno spazio ferroviario europeo unico
- Direttiva (UE) 2016/797 del Parlamento europeo e del Consiglio, dell'11 maggio 2016, relativa all'interoperabilità del sistema ferroviario dell'Unione europea
- Direttiva (UE) 2016/798 del Parlamento europeo e del Consiglio, dell'11 maggio 2016, sulla sicurezza delle ferrovie
- Direttiva (UE) 2016/2370 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 14 dicembre 2016, che modifica la direttiva 2012/34/UE per quanto riguarda l'apertura del mercato dei servizi di trasporto ferroviario nazionale di passeggeri e la governance dell'infrastruttura ferroviaria.

3.5 Raccomandazioni

- Raccomandazione (UE) 2019/780 della Commissione, del 16 maggio 2019, sulle modalità pratiche per il rilascio delle autorizzazioni di sicurezza ai Gestori delle Infrastrutture
- Raccomandazione della Commissione, del 18 luglio 2018, relativa agli orientamenti per l'attuazione armonizzata del sistema europeo di gestione del traffico ferroviario nell'Unione (C/2018/4072)
- 2014/897/UE: Raccomandazione della Commissione, del 5 dicembre 2014, sugli aspetti relativi alla messa in servizio e all'uso di sottosistemi strutturali e veicoli a norma delle direttive 2008/57/CE e 2004/49/CE del Parlamento europeo e del Consiglio
- 2014/881/UE: Raccomandazione della Commissione, del 18 novembre 2014, relativa alla procedura per dimostrare il livello di conformità delle linee ferroviarie esistenti ai parametri fondamentali delle specifiche tecniche di interoperabilità

3.6 Regolamenti

- Regolamento (CE) N. 881/2004 del 29 aprile 2004 che istituisce un'Agenzia ferroviaria europea (Regolamento sull'agenzia).
- Regolamento (CE) n. 653/2007 della Commissione, del 13 giugno 2007, sull'uso di un formato europeo comune per i certificati di sicurezza e i relativi modelli di domanda conformemente all'articolo 10 della direttiva 2004/49/CE del Parlamento europeo e del Consiglio e sulla validità dei certificati di sicurezza rilasciati nell'ambito della direttiva 2001/14/CE del Parlamento europeo e del Consiglio
- Regolamento (CE) n. 1371/2007 del 23 ottobre 2007, relativo ai diritti e agli obblighi dei passeggeri nel trasporto ferroviario.
- Regolamento (CE) n. 1370/2007 del 23 ottobre 2007, relativo ai servizi pubblici di trasporto di passeggeri su strada e per ferrovia e che abroga i regolamenti del Consiglio (CEE) n. 1191/69 e (CEE) n. 1107/70.
- Regolamento (UE) n. 1158/2010 della Commissione, del 9 dicembre 2010, relativo a un metodo di sicurezza comune per valutare la conformità ai requisiti di ottenimento di certificati di sicurezza della rete ferroviaria.
- Regolamento (UE) n. 1169/2010 della Commissione, del 10 dicembre 2010, concernente un metodo di sicurezza comune per la valutazione della conformità ai requisiti per ottenere un'autorizzazione di sicurezza per l'infrastruttura ferroviaria.
- Regolamento (UE) n. 445/2011 della Commissione, del 10 maggio 2011, relativo ad un sistema di certificazione dei soggetti responsabili della manutenzione di carri merci e che modifica il regolamento (CE) n. 653/2007.
- Regolamento (UE) n. 1078/2012 della Commissione, del 16 novembre 2012, relativo a un metodo di sicurezza comune per il monitoraggio che devono applicare le imprese ferroviarie, i gestori dell'infrastruttura che hanno ottenuto un certificato di sicurezza o un'autorizzazione di sicurezza e i soggetti responsabili della manutenzione.
- Regolamento di esecuzione (UE) n. 402/2013 della Commissione, del 30 aprile 2013, relativo al metodo comune di sicurezza per la determinazione e valutazione dei rischi e che abroga il regolamento (CE) n. 352/2009.
- Regolamento (UE) n. 1315/2013 del Parlamento europeo e del Consiglio, dell'11 dicembre 2013, sugli orientamenti dell'Unione per lo sviluppo della rete transeuropea dei trasporti e che abroga la decisione n. 661/2010/UE.
- Regolamento (UE) 2016/796 del Parlamento europeo e del Consiglio dell'11 maggio 2016 che istituisce un'Agenzia dell'Unione europea per le ferrovie e che abroga il regolamento (CE) n. 881/2004.

- Regolamento (UE) 2016/2338 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 14 dicembre 2016, che modifica il regolamento (CE) n. 1370/2007 relativamente all'apertura del mercato dei servizi di trasporto ferroviario nazionale di passeggeri.
- Regolamento di esecuzione (UE) 2018/545 della Commissione, del 4 aprile 2018, che stabilisce modalità pratiche per la procedura di autorizzazione dei veicoli ferroviari e la procedura di autorizzazione dei tipi di veicoli ferroviari a norma della direttiva (UE) 2016/797 del Parlamento europeo e del Consiglio.
- Regolamento delegato (UE) 2018/761 della Commissione, del 16 febbraio 2018, che istituisce metodi comuni di sicurezza per la supervisione da parte delle autorità nazionali preposte alla sicurezza in seguito al rilascio di un certificato di sicurezza unico o di un'autorizzazione di sicurezza a norma della direttiva (UE) 2016/798 del Parlamento europeo e del Consiglio e che abroga il regolamento (UE) n. 1077/2012 della Commissione.
- Regolamento delegato (UE) 2018/762 della Commissione, dell'8 marzo 2018, che stabilisce metodi comuni di sicurezza relativi ai requisiti del sistema di gestione della sicurezza a norma della direttiva (UE) 2016/798 del Parlamento europeo e del Consiglio e che abroga i regolamenti della Commissione (UE) n. 1158/2010 e (UE) n. 1169/2010.
- Regolamento di esecuzione (UE) 2018/763 della Commissione, del 9 aprile 2018, che stabilisce le modalità pratiche per il rilascio dei certificati di sicurezza unici alle imprese ferroviarie a norma della direttiva (UE) 2016/798 del Parlamento europeo e del Consiglio e che abroga il regolamento (CE) n. 653/2007 della Commissione.
- Regolamento di esecuzione (UE) 2018/764 della Commissione, del 2 maggio 2018, relativo ai diritti e ai corrispettivi pagabili all'Agenzia dell'Unione europea per le ferrovie e alle condizioni di pagamento.
- Regolamento di esecuzione (UE) 2019/250 della Commissione, del 12 febbraio 2019, relativo ai modelli di dichiarazioni e di certificati «CE» per i sottosistemi e i componenti di interoperabilità ferroviari, relativo al modello di dichiarazione di conformità a un tipo di veicolo ferroviario autorizzato e alle procedure «CE» di verifica dei sottosistemi conformemente alla direttiva (UE) 2016/797 del Parlamento europeo e del Consiglio e che abroga il regolamento (UE) n. 201/2011.
- Regolamento di esecuzione (UE) 2019/777 della Commissione, del 16 maggio 2019, relativo alle specifiche comuni per il registro dell'infrastruttura ferroviaria e che abroga la decisione di esecuzione 2014/880/UE.

- Regolamento di esecuzione (UE) 2019/779 della Commissione, del 16 maggio 2019, che stabilisce disposizioni dettagliate su un sistema di certificazione dei soggetti responsabili della manutenzione dei veicoli a norma della direttiva (UE) 2016/798 del Parlamento europeo e del Consiglio e che abroga il regolamento (UE) n. 445/2011 della Commissione.
- Regolamento di esecuzione (UE) 2019/776 della Commissione del 16 maggio 2019 che modifica i regolamenti (UE) n. 321/2013, (UE) n. 1299/2014, (UE) n. 1301/2014, (UE) n. 1302/2014, (UE) n. 1303/2014 e (UE) 2016/919 della Commissione e la decisione di esecuzione 2011/665/UE della Commissione per quanto riguarda l'allineamento alla direttiva (UE) 2016/797 del Parlamento europeo e del Consiglio e l'attuazione di obiettivi specifici stabiliti nella decisione delegata (UE) 2017/1474 della Commissione.
- Regolamento di esecuzione (UE) 2020/387 della Commissione del 9 marzo 2020 che modifica i regolamenti (UE) n. 321/2013, (UE) n. 1302/2014 e (UE) 2016/919 della Commissione per quanto riguarda l'estensione dell'area d'uso e le fasi di transizione.
- Regolamento (UE) 2020/698 del Parlamento europeo e del Consiglio del 25 maggio 2020 recante misure specifiche e temporanee in considerazione dell'epidemia di Covid-19 con riguardo al rinnovo o alla proroga di taluni certificati, licenze e autorizzazioni e al rinvio di talune verifiche e attività formative periodiche in taluni settori della legislazione in materia di trasporti.
- Regolamento di esecuzione (UE) 2023/1694 della Commissione del 10 agosto 2023 recante modifica dei regolamenti (UE) n. 321/2013, (UE) n. 1299/2014, (UE) n. 1300/2014, (UE) n. 1301/2014, (UE) n. 1302/2014 e (UE) n. 1304/2014 e del regolamento di esecuzione (UE) 2019/777.

3.7 Specifiche tecniche interoperabilità

Attualmente esistono 11 STI pubblicate, che riguardano: segnalamento, energia, infrastruttura, rumore, gestione operativa, accessibilità, rotabili passeggeri e merci, sicurezza in gallerie, e applicazioni telematiche per merci e passeggeri. Queste norme definiscono i requisiti tecnici per garantire l'interoperabilità del sistema ferroviario dell'UE.

- **STI Energia (ENE TSI)**
Regolamento (UE) n. 1301/2014
- **STI Infrastruttura (INF TSI)**
Regolamento (UE) n. 1299/2014

- **STI Materiale rotabile – Locomotive e materiale rotabile per il trasporto di passeggeri (LOC & PAS TSI)**
Regolamento (UE) n. 1302/2014
- **STI Materiale rotabile – rumore (NOI TSI)**
Regolamento (UE) n. 1304/2014
- **STI Materiale rotabile – carri merci (WAG TSI)**
Regolamento (UE) n. 321/2013
- **STI Sicurezza nelle gallerie ferroviarie (SRT TSI)**
Regolamento (UE) n. 1303/2014
- **STI Controllo-comando e segnalamento (CCS TSI)**
Regolamento (UE) 2016/919
- **STI Persone con disabilità e persone a mobilità ridotta (PRM TSI)**
Regolamento (UE) n. 1300/2014
- **STI Esercizio e gestione del traffico (OPE TSI)**
Regolamento di esecuzione (UE) 2019/773
- **STI Applicazioni telematiche per i passeggeri (TAP TSI)**
Regolamento (UE) n. 454/2011
- **STI Applicazioni telematiche per il trasporto merci (TAF TSI)**
Regolamento (UE) n. 1305/2014

Le STI sono redatte dall'Agenzia dell'Unione Europea per le Ferrovie (ERA) su mandato della Commissione Europea.

3.8 Normativa nazionale

In Italia, i primi provvedimenti normativi risalgono all'epoca preunitaria e riflettevano un sistema ancora frammentato. Dopo l'unificazione del Regno d'Italia (1861), si avviò un processo di progressiva centralizzazione normativa. Si riportano i principali riferimenti normativi italiani a partire dal 1905.

- Legge 22 aprile 1905, n. 137, che istituisce l'Azienda autonoma statale delle Ferrovie dello Stato (FS)
- D.R. n. 1447 09/05/1912 – “Testo Unico delle disposizioni di legge per le ferrovie concesse all'industria privata, le tramvie a trazione meccanica e gli automobili”
- Decreto luogotenenziale del 12 dicembre 1944, n. 413
- P.R. 11 luglio 1980, n. 753: Nuove norme in materia di polizia, sicurezza e regolarità dell'esercizio delle ferrovie e di altri servizi di trasporto. (GU n.314 del 15-11-1980 – Suppl. Ordinario)
- Lgs. 10 agosto 2007, n. 162: Attuazione delle direttive 2004/49/CE e 2004/51/CE relative alla sicurezza e allo sviluppo delle ferrovie

- comunitarie. (GU n.234 del 8-10-2007 – Suppl. Ordinario n. 199). *Documento abrogato in data 16/06/2019 dal D.Lgs. 14 maggio 2019, n. 50.*
- Lgs. 27 gennaio 2010, n. 35: Attuazione della direttiva 2008/68/CE, relativa al trasporto interno di merci pericolose. (10G0049) (GU n.58 del 11-3-2010).
 - Lgs. 23 dicembre 2010, n. 264: Attuazione della direttiva 2005/47/CE del Consiglio, del 18 luglio 2005, concernente l'accordo tra la Comunità delle ferrovie europee (CER) e la Federazione europea dei lavoratori dei trasporti (ETF) su taluni aspetti delle condizioni di lavoro dei lavoratori mobili che effettuano servizi di interoperabilità transfrontaliera nel settore ferroviario. (11G0026) (GU n.33 del 10-2-2011).
 - Lgs. 30 dicembre 2010, n. 247: Attuazione della direttiva 2007/59/CE relativa alla certificazione dei macchinisti addetti alla guida di locomotori e treni sul sistema ferroviario della Comunità. (11G0013) (GU n.16 del 21-1-2011 – Suppl. Ordinario n. 15).
 - Lgs. 15 luglio 2015, n. 112: Attuazione della direttiva 2012/34/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 21 novembre 2012, che istituisce uno spazio ferroviario europeo unico (Rifusione). (15G00126) (GU n.170 del 24-7-2015).
 - L. 28 settembre 2018, n. 109, convertito con modificazioni dalla Legge 16 novembre 2018, n. 130 (in S.O. n. 55, relativo alla G.U. 19/11/2018, n. 269). Art. 12 sull'istituzione dell'Agenzia nazionale per la sicurezza delle ferrovie e delle infrastrutture stradali e autostradali (ANSFISA).
 - Lgs. 14 maggio 2019, n. 50: Attuazione della direttiva 2016/798 del Parlamento europeo e del Consiglio, dell'11 maggio 2016, sulla sicurezza delle ferrovie. (19G00057) (GU Serie Generale n.134 del 10-06-2019).
 - Lgs. 14 maggio 2019, n. 57: Attuazione della direttiva 2016/797 del Parlamento europeo e del Consiglio, dell'11 maggio 2016, relativa all'interoperabilità del sistema ferroviario dell'Unione europea (rifusione). (19G00058) (GU Serie Generale n.147 del 25-06-2019).

3.9 Le Norme Tecniche di Progetto e il ruolo di RFI

Dalla fine degli anni 2000, la normativa ferroviaria si allinea progressivamente alle Specifiche Tecniche di Interoperabilità (STI) emanate dalla Commissione Europea, sotto la supervisione dell'Agenzia dell'Unione europea per le ferrovie (ERA).

Le STI definiscono requisiti minimi per garantire interoperabilità nei corridoi ferroviari transeuropei (TEN-T). Le norme europee prevalgono su quelle nazionali in caso di conflitto.

Rete Ferroviaria Italiana (RFI) continua ad aggiornare e pubblicare:

Norme Tecniche di Progetto e Manuali di progettazione che riguardano la geometria, la sovrastruttura, l'armamento, le gallerie, i ponti, le opere civili:

- Norme tecniche per la progettazione dei tracciati ferroviari – RFI 2006
- Standard di qualità geometrica del binario con velocità fino a 300 km/h - RFI -2007
- Regolamento per la circolazione dei treni Edizione 1962 Testo aggiornato, in vigore dal 13/12/2009 (ultimo aggiornamento: decreto ANSF n. 12/2009
- Manuale di progettazione delle opere civile di RFI (2022)
 - Parte I – I.1 scopo e campo d'applicazione
 - Parte I - I.2 documentazione di riferimento
 - Parte I - I.3 definizioni
 - Parte I - I.4 abbreviazioni
 - Parte I - I.5 disposizioni generali
 - Parte II - sezione 1 – ambiente
 - Parte II - sezione 2 – ponti e strutture
 - Parte II - sezione 3 – corpo stradale
 - Parte II - sezione 4 – gallerie
 - Parte II - sezione 5 – prescrizioni per gli impianti dei terminali aperti al pubblico, per i marciapiedi e per le pensiline delle stazioni
 - Parte II - ferroviarie a servizio dei viaggiatori
 - Parte II - sezione 6 – sagome e profilo minimo degli ostacoli
 - Parte II - sezione 7 – geologia
- Manuale di Progettazione d'Armamento di RFI (2022)
 - Parte I - dispositivi e principi di carattere generale
 - Parte II - standard dei materiali d'armamento
 - Parte III - specifiche tecniche di fornitura e prodotto
 - Parte IV - norme tecniche riguardanti i tracciati ferroviari
 - Parte V - ulteriori requisiti ai lavori relativi al posizionamento e alla termica del binario, alla posa dei giunti isolanti e sul binario senza massicciata

- Parte VI - indicazioni relative agli elaborati progettuali da produrre
- Manuale del sistema di gestione della sicurezza della circolazione dei treni e dell'esercizio ferroviario – RFI (2024)

Gli aggiornamenti sono progressivamente armonizzati con le norme UNI/EN e le STI.

3.10 Principali norme UNI-EN

Uno degli esiti principali delle riforme europee è il quadro regolamentare tecnico definito dagli **Standard Europei** (EN). Si riportano di seguito i riferimenti alle principali norme EN:

- UNI-EN 12299:2024 - Applicazioni ferroviarie - Comfort di marcia per passeggeri - Misurazione e valutazione
- UNI-EN 13230-1:2016 - Applicazioni ferroviarie - Binario - Traverse e traversoni di calcestruzzo - Parte 1: Requisiti generali
- UNI-EN 13230-2:2016 - Applicazioni ferroviarie - Binario - Traverse e traversoni di calcestruzzo - Parte 2: Traverse monoblocco precomprese
- UNI-EN 13230-3:2016 - Applicazioni ferroviarie - Binario - Traverse e traversoni di calcestruzzo - Parte 3: Traverse biblocco rinforzate
- UNI-EN 13230-4:2016+A1:2020 - Applicazioni ferroviarie - Binario - Traverse e traversoni di calcestruzzo - Parte 4: Traversoni precompressi per scambi e incroci
- UNI-EN 13230-5:2016 - Applicazioni ferroviarie - Binario - Traverse e traversoni di calcestruzzo - Parte 5: Elementi speciali
- UNI-EN 13230-6:2020 - Applicazioni ferroviarie - Binario - Traverse e traversoni di calcestruzzo - Parte 6: Progettazione
- UNI-EN 13231-1:2023 Applicazioni ferroviarie - Binario - Accettazione dei lavori - Parte 1: Lavori su binario con ballast - Piena linea, scambi e incroci
- UNI-EN 13231-2:2020 - Applicazioni ferroviarie - Binario - Accettazione dei lavori - Parte 2: Accettazione delle rotaie riprofilate in piena linea, scambi e incroci e dispositivi di espansione
- UNI-EN 13231-3:2012 - Applicazioni ferroviarie - Binario - Accettazione dei lavori - Parte 3: Accettazione della riprofilatura delle rotaie ferroviarie

- UNI-EN 13231-5:2018 Applicazioni ferroviarie - Binario - Accettazione dei lavori - Parte 5: Procedure per la riprofilatura di binari in linea normale, scambi, incroci e giunti di dilatazione
- UNI-EN 13250:2016 - Geotessili e prodotti affini - Caratteristiche richieste per l'impiego nella costruzione di ferrovie
- UNI-EN 13260:2020 - Applicazioni ferroviarie - Sale montate e carrelli - Sale montate - Requisiti del prodotto
- UNI-EN 13261:2024 -Applicazioni ferroviarie - Sale montate e carrelli - Assi - Requisiti del prodotto
- UNI-EN 13262:2020 -Applicazioni ferroviarie - Sale montate e carrelli - Ruote - Requisiti del prodotto
- UNI-EN 13450:2002 - Aggregati per massicciate per ferrovie
- UNI-EN 13674-1:2017 - Applicazioni ferroviarie - Binario - Rotaia - Parte 1: Rotaie Vignole da 46 kg/m ed oltre
- UNI-EN 13674-2:2019 - Applicazioni ferroviarie - Binario - Rotaia - Parte 2: Rotaie per scambi e incroci utilizzate in accoppiamento con rotaie Vignole da 46 kg/m e oltre
- UNI-EN 13674-3:2010 - Applicazioni ferroviarie - Binario - Rotaia - Parte 3: Controrotaie
- UNI-EN 13674-4:2019 - Applicazioni ferroviarie - Binario - Rotaia - Parte 4: Rotaie Vignole di massa compresa fra 27 kg/m e 46 kg/m (escluso 46 kg/m)
- UNI-EN 13803:2017 - Applicazioni ferroviarie - Binario - Parametri di progettazione dei tracciati del binario - Scartamento del binario da 1 435 mm e maggiore
- UNI-EN 13848-1:2019 - Applicazioni ferroviarie - Binario - Qualità della geometria del binario - Parte 1: Caratterizzazione della geometria del binario
- UNI-EN 13848-2:2020 - Applicazioni ferroviarie - Binario - Qualità della geometria del binario - Parte 2: Sistemi di misura - Veicoli per la misurazione del binario
- UNI-EN 13848-3:2021 - Applicazioni ferroviarie - Binario - Qualità della geometria del binario - Parte 3: Sistemi di misura - Macchine per la costruzione e la manutenzione del binario

- UNI-EN 13848-4:2011 - Applicazioni ferroviarie - Binario - Qualità della geometria del binario - Parte 4: Sistemi di misurazione - Dispositivi leggeri e portatili
- UNI-EN 13848-5:2017 - Applicazioni ferroviarie - Binario - Qualità della geometria del binario - Parte 5: Livelli di qualità geometrica - Piena linea, scambi e incroci
- UNI-EN 13848-6:2021 - Applicazioni ferroviarie - Binario - Qualità della geometria del binario - Parte 6: Caratteristiche della qualità della geometria del binario
- UNI-EN 14033-1:2017 - Applicazioni ferroviarie - Binario - Macchine per la costruzione e la manutenzione della infrastruttura ferroviaria - Parte 1: Requisiti tecnici per la circolazione
- UNI-EN 14033-2:2017 - Applicazioni ferroviarie - Binario - Macchine per la costruzione e la manutenzione della infrastruttura ferroviaria - Parte 2: Requisiti tecnici di viaggio e di lavoro
- UNI-EN 14033-3:2017 - Applicazioni ferroviarie - Binario - Macchine per la costruzione e la manutenzione della infrastruttura ferroviaria - Parte 3: Requisiti generali di sicurezza
- UNI-EN 14033-4:2019 - Applicazioni ferroviarie - Binario - Macchine per la costruzione e la manutenzione della infrastruttura ferroviaria - Parte 4: Requisiti tecnici di circolazione, di viaggio e di lavoro sulla rete ferroviaria urbana
- UNI-EN 14067-1:2003 - Applicazioni ferroviarie - Aerodinamica - Simboli e unità
- UNI-EN 14067-3:2003 - Applicazioni ferroviarie - Aerodinamica - Aerodinamica in gallerie
- UNI-EN 14067-4:2024 - Applicazioni ferroviarie - Aerodinamica - Parte 4: Requisiti e procedure di valutazione per l'aerodinamica su binario all'aperto
- UNI-EN 14067-5:2021 - Applicazioni ferroviarie - Aerodinamica - Parte 5: Requisiti e procedure di valutazione per l'aerodinamica in galleria
- UNI-EN 14067-6:2022 - Applicazioni ferroviarie - Aerodinamica - Parte 6: Requisiti e procedure di prova per la valutazione della stabilità rispetto al vento laterale

- UNI CEN/TR 14067-7:2021 - Applicazioni ferroviarie - Aerodinamica - Parte 7: Principi fondamentali per le procedure di prova per proiezioni di zavorra generate dalla circolazione dei treni
- UNI-EN 14531-1:2019 - Applicazioni ferroviarie - Metodi di calcolo delle distanze di arresto, di rallentamento e della frenatura di immobilizzazione - Parte 1: Algoritmi generali che utilizzano il calcolo del valore medio per composizioni di treni o veicoli isolati
- UNI-EN 14531-2:2016 - Applicazioni ferroviarie - Metodi di calcolo delle distanze di arresto, di rallentamento e della frenatura di immobilizzazione - Parte 2: Calcoli progressivi per composizioni di treni o veicoli isolati
- UNI-EN 15016-1:2023 - Applicazioni ferroviarie - Documenti tecnici - Parte 1: Principi generali
- UNI-EN 15016-2:2023 - Applicazioni ferroviarie - Documenti tecnici - Parte 2: Elenchi dei componenti
- UNI-EN 15016-3:2023 - Applicazioni ferroviarie - Documenti tecnici - Parte 3: Gestione delle modifiche dei documenti tecnici
- UNI-EN 15016-4:2023 - Applicazioni ferroviarie - Documenti tecnici - Parte 4: Scambio di dati
- UNI-EN 15273-1:2017 - Applicazioni ferroviarie - Sagoma - Parte 1: Generalità - Regole comuni per infrastruttura e materiale rotabile
- UNI-EN 15273-2:2017 - Applicazioni ferroviarie - Sagoma - Parte 2: Profilo degli ostacoli
- UNI-EN 15273-3:2017 - Applicazioni ferroviarie - Sagoma - Parte 3: Sagoma strutturale
- UNI-EN 17636:2023 Applicazioni ferroviarie - Infrastruttura - Parametri di progettazione dell'allineamento dei binari - Ferrovia urbana
- UNI 11180:2006 - Ferrovie storico turistiche - Linee guida per la gestione delle ferrovie e la circolazione dei treni - Principi generali
- CEN/TR 17420:2020 - Railway applications - Vehicle end design for trams and light rail vehicles with respect to pedestrian safety
- CEN/TR 16513:2014 - Railway applications - Track - Survey of track geometry quality
- ISO 37184:2023 - Smart community infrastructures — Smart transportation by run-through train/bus operation in/between cities

3.11 Digitalizzazione della progettazione:

L'evoluzione tecnologica ha innescato una trasformazione profonda anche nel settore delle infrastrutture, introducendo nuove opportunità e approcci innovativi nella gestione dei progetti complessi. In questo scenario si colloca il **Building Information Modeling (BIM)**, una metodologia che consente di realizzare un modello digitale dell'opera, ottimizzando l'intero processo progettuale. Il BIM promuove una maggiore collaborazione tra i diversi attori coinvolti, migliorando la comunicazione, la pianificazione dei tempi e la previsione dei costi.

Nel tempo, l'approccio BIM si è esteso anche al settore infrastrutturale. In quest'ambito, il modello digitale assume una dimensione più articolata, includendo informazioni specifiche relative a infrastrutture come ferrovie, ponti, gallerie, reti e impianti. Quando si fa riferimento in particolare all'applicazione del BIM nel settore ferroviario, si parla spesso di Rail BIM. Quest'ultimo è oggi al centro dell'attenzione, soprattutto per quanto riguarda la definizione di standard di interoperabilità tra dati e software, attraverso lo sviluppo dell'IFCRail da parte di buildingSMART.

In Italia, l'adozione del BIM per le opere pubbliche è diventata obbligatoria a partire dal 2019, con il **Decreto Ministeriale 560/2017**, successivamente aggiornato dal **D.M. 312/2021**. Inizialmente era previsto che, dal 1° gennaio 2025, il BIM diventasse obbligatorio per tutte le opere pubbliche, indipendentemente dall'importo. Tuttavia, il nuovo Codice dei contratti pubblici (**D.Lgs. 36/2023**) ha modificato tali disposizioni: a partire dal 1° gennaio 2025, l'obbligo si prevede solo per progetti di nuova costruzione o interventi su opere esistenti con importo a base di gara superiore a un milione di euro.

Successivamente, con l'entrata in vigore del **d.Lgs. n. 209/2024**, il c.d. "Correttivo al Codice Appalti", che ha modificato anche l'art. 43, comma 1 del Codice dei Contratti Pubblici, il MIT ha sottolineato come l'art. 15, comma 1, lett. a), n. 1) del d.Lgs. n. 209/2024 abbia apportato le seguenti modifiche:

- innalzamento della soglia sopra la quale scatta l'obbligo di utilizzo del BIM a partire dal 1° gennaio 2025;
- introduzione di una norma transitoria che si collega alla data di entrata in vigore del Correttivo.

Scendendo nel dettaglio, adesso per l'applicazione dell'obbligo di utilizzo del BIM sono previste le seguenti soglie:

- 2 milioni di euro per la progettazione e la realizzazione di opere di nuova costruzione e per gli interventi su costruzioni esistenti;

- quella indicata all'articolo 14, comma 1, lettera a), in caso di interventi su edifici di cui all'articolo 10, comma 1, del Codice dei beni culturali.

Inoltre, il Correttivo ha introdotto una norma transitoria che esclude dall'obbligo di adozione del BIM i procedimenti di programmazione superiori alle soglie di cui all'articolo 14 già avviati alla data di entrata in vigore del decreto correttivo (quindi il 31 dicembre 2024), per i quali è stato redatto il documento di fattibilità delle alternative progettuali ai sensi dell'articolo 2, comma 5, dell'allegato I.7 (art. 225 bis, comma 2, inserito dall'art. 70 del D.Lgs. 209/2024).

All'interno di questo processo di trasformazione digitale, la norma **UNI EN ISO 19650** (normativa tecnica sovradimensionale e internazionale) e la norma Un passo significativo in questa direzione è rappresentato dalla pubblicazione delle norme del pacchetto **UNI 11337** e in particolare della parte 12 del 2025, intitolata **“Edilizia e opere di ingegneria civile – Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni – Parte 12: Flussi informativi, ruoli, e requisiti per le opere infrastrutturali”**.

Questa norma approfondisce i flussi informativi relativi allo sviluppo delle opere infrastrutturali, coprendo tutte le fasi del ciclo di vita dell'opera. Definisce inoltre indirizzi metodologici, livelli di dettaglio informativo, ruoli e responsabilità, nonché la documentazione contrattuale necessaria.

Le infrastrutture occupano un ruolo strategico nel settore delle costruzioni, sia come motore dell'innovazione e della digitalizzazione, sia come volano per l'economia. Per valorizzare pienamente questo ruolo, è essenziale adottare un approccio omogeneo a livello nazionale, fondato su metodologie e strumenti condivisi, in linea con la normativa vigente e in grado di garantire l'effettivo coinvolgimento di tutti gli stakeholder.

Un elemento cruciale è la standardizzazione e l'organizzazione del settore infrastrutturale secondo convenzioni comuni, per sostenere l'adozione dei metodi di gestione digitale lungo l'intero ciclo di vita degli asset e dei relativi contratti.

La norma UNI 11337-12:2025 dettaglia i requisiti delle diverse fasi del processo informativo digitale delle opere infrastrutturali — dalla programmazione alla progettazione, realizzazione, esercizio, manutenzione e dismissione — identificando sia elementi comuni alle varie tipologie di opere, sia aspetti specifici. Include anche indicazioni sull'interoperabilità e sull'integrazione dei sistemi GIS nei processi di gestione digitale.

La norma si rivolge a tutti i soggetti coinvolti nel ciclo di vita delle infrastrutture: committenti pubblici e privati, professionisti, società di ingegneria e imprese esecutrici.

Recentemente, Italferr ha predisposto le **“Linea guida per i DocFAP sviluppati con Metodi e Strumenti di Gestione Informativa Digitale” – 2025**. Il documento descrive le attività e i flussi informativi previsti per lo sviluppo del Documento di Fattibilità delle Alternative Progettuali svolti da Italferr (di seguito DocFAP) mediante l’adozione di metodi e strumenti di gestione informativa digitale delle costruzioni di cui all’art. 43 del D.Lgs. 36/2023 (i.e. BIM & Information Management).

Gaetano Bosurgi · Stefano Coropulis · Giovanni Giacomello · Marinella Silvana Giunta
Mattia Intignano · Aldo La Placa · Giovanni Leonardi · Giuseppe Loprencipe
Emiliano Pasquini · Roberto Roberti · Fabio Rondinella · Valeria Vignali

INFRASTRUTTURE FERROVIARIE

Didattica, ricerca, normativa e nuove sfide

Rapporto tecnico della S.I.I.V.



DOI: 10.6093/978-88-6887-372-1