



SALCEF GROUP
Leading the **Railway**

Overail
track solutions

InnoTrans 2026

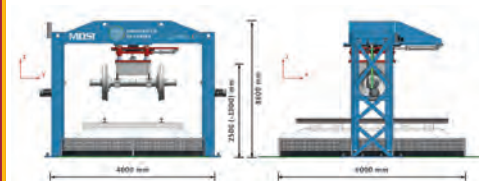
22 - 25 settembre
Messe Berlin

Hall 26B - Stand 240

In questo numero
In this issue



Intelligenza artificiale nel settore ferroviario
Artificial intelligence in the railway sector



Railway Superstructure Test Frame: prototipo multifunzionale
Railway Superstructure Test Frame: multifunctional prototype

Contatti - Contacts

Tel. 06.4742987

E-mail: redazioneif@cifi.it – notiziari.if@cifi.it – direttore.if@cifi.it

Servizio Pubblicità - Advertising Service

Roma: 06.47307819 – areasoci@cifi.it

Milano: 02.63712002 – 339.1220777 – segreteria@cifimilano.it

Direttore - Editor in Chief

Stefano RICCI

Vice Direttore - Deputy Editor in Chief

Valerio GIOVINE

Comitato di Redazione - Editorial Board

Benedetto BARABINO
Massimiliano BRUNER
Maurizio CAVAGNARO
Giuseppe CAVALLERI
Federico CHELI
Maria Vittoria CORAZZA
Biagio COSTA
Bruno DALLA CHIARA
Massimo DEL PRETE
Salvatore DI TRAPANI
Anders EKBERG
Alessandro ELIA
Luigi EVANGELISTA
Carmen FORCINITI
Attilio GAETA
Federico GHERARDI
Ingo HANSEN
Virginia INFANTE
Marino LUPI
Adoardo LUZI
Gabriele MALAVASI
Giampaolo MANCINI
Vito MASTRODONATO
Elena MOLINARO
Francesco NATONI
Umberto PETRUCELLI
Luca RIZZETTO
Stefano ROSSI
Dario ZANINELLI

Consulenti - Consultants

Giovannino CAPRIO
Paolo Enrico DEBARBIERI
Giorgio DIANA
Antonio LAGANÀ
Emilio MAESTRINI
Mauro MORETTI
Silvio RIZZOTTI
Giuseppe SCIUTTO

Redazione - Editorial Staff

Massimiliano BRUNER
Ivan CUFARI
Francesca PISANO



Associazione NO PROFIT con personalità giuridica (n. 645/2009)
iscritta al Registro Nazionale degli Operatori della Comunicazione
(ROC) n. 33553 - Poste Italiane SpA - Spedizione in abbonamento
postale - d.l. 353/2003

(conv. In l. 27/02/2004 n. 46) art. 1 - DBC Roma

Via Giovanni Giolitti, 46 - 00185 Roma

E-mail: info@cifi.it – u.r.l.: www.cifi.it

Tel. 06.4742986

Partita IVA 00929941003

Orario Uffici: lun.-ven. 8.30-13.00 / 13.30-17.00

Biblioteca: lun.-ven. 9.00-13.00 / 13.30-16.00

Indice

Anno LXXXI | **Luglio-Agosto 2026** | 7-8**Condizioni di Associazione al CIFI 538****Attualità – Gianpiero STRISCIUGLIO 541****Attualità – Mauro MORETTI, Michele Mario ELIA 542**

**INTELLIGENZA ARTIFICIALE NEL SETTORE FERROVIARIO:
UNA RASSEGNA DELLA RICERCA RECENTE**
*ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN THE RAILWAY SECTOR:
A REVIEW OF RECENT RESEARCH*

FRANCESCO FLAMMINI

543

**RAILWAY SUPERSTRUCTURE TEST FRAME (RSTF):
UN PROTOTIPO MULTIFUNZIONALE IN VERA
GRANDEZZA PER LE PROVE IN LABORATORIO
SU SOVRASTRUTTURE FERROVIARIE**
*RAILWAY SUPERSTRUCTURE TEST FRAME (RSTF):
A FULL-SCALE, MULTIFUNCTIONAL PROTOTYPE USED FOR
THE LABORATORY TESTING OF RAILWAY SUPERSTRUCTURES*

Aldo LA PLACA

Federico AUTELITANO

Francesco FREDDI

Erika GARILLI

Felice GIULIANI

567**Vita del CIFI - Giornata del CIFI 2026 581****Notizie dall'interno 585****Notizie dall'estero***News from foreign countries***595****IF Biblio 609**

Condizioni di Abbonamento a IF – Ingegneria Ferroviaria
Terms of subscription to IF – Ingegneria Ferroviaria

610**Elenco di tutte le Pubblicazioni CIFI 612****Fornitori di prodotti e servizi 614**

La pubblicazione totale o parziale di articoli o disegni è permessa citando la fonte.

The total or partial reproduction of articles or figures is allowed providing the source citation.



Railway Superstructure Test Frame (RSTF): un prototipo multifunzionale in vera grandezza per le prove in laboratorio su sovrastrutture ferroviarie

Railway Superstructure Test Frame (RSTF): a full-scale, multifunctional prototype used for the laboratory testing of railway superstructures

Aldo LA PLACA^(*)
Federico AUTELITANO^(*)
Francesco FREDDI^(*)
Erika GARILLI^(**)
Felice GIULIANI^(***)

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.0708.2026.ART.2>)

Sommario - Nell'ambito delle attività di ricerca promosse dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza, si presentano le funzioni e lo schema progettuale del *Railway Superstructure Test Frame*, prototipo di piattaforma sperimentale per lo studio in laboratorio del comportamento meccanico di sovrastrutture ferroviarie a grandezza reale. Il complesso sperimentale, caratterizzato da un telaio di prova di grande luce cui è consentita una movimentazione verticale elettroattuata, è dotato di sistemi di misura, integrati e *wayside*, per l'esecuzione di prove dinamiche di carico trasmesso direttamente da una sala montata su sezioni di binario. Il lavoro illustra le potenzialità del prototipo come strumento di analisi e validazione *off-road* di soluzioni tecniche per la sovrastruttura ferroviaria fornendo informazioni preliminari di performance e supportando lo sviluppo sperimentale di soluzioni innovative o la calibrazione di specifici modelli digitali.

1. Introduzione

Le recenti politiche nazionali di innovazione e sostenibilità, promosse anche nell'ambito del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), hanno fornito un impulso decisivo alla modernizzazione del sistema ferroviario italiano, sostenendo il potenziamento della rete, lo sviluppo di tecnologie avanzate per il controllo, la digitalizzazione e la sicurezza dell'infrastruttura [1][2]. Nell'ambito della ricerca avanzata e del trasferimento tecnologico, questo

Summary - As part of the research activities promoted by the National Recovery and Resilience Plan, this paper presents the functions and design scheme of the *Railway Superstructure Test Frame*, a prototype experimental platform for the laboratory study of the mechanical behavior of full-scale railway superstructures. The experimental facility, featuring a long-span test frame capable of electro-actuated vertical movement, is equipped with integrated and *wayside* measurement systems for conducting dynamic load tests transmitted directly from a railway wheelset to sections of track. The work illustrates the prototype's potential as a tool for off-road analysis and validation of technical solutions for railway superstructures, providing preliminary performance data and supporting the experimental development of innovative solutions or the calibration of specific digital models.

1. Introduction

Recent national policies on innovation and sustainability, promoted within the framework of the Italian National Recovery and Resilience Plan (NRRP), have provided significant incentives to modernize the Italian railway system. These policies support network upgrades and the development of advanced infrastructure, monitoring, digitalization, and safety technologies [1][2]. Against the backdrop of advanced research and technology transfer, this renewal process has fostered remarkable synergy within the Italian National Center for Sustainable Mobility (MOST), integrat-

^(*) Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università di Parma, Parco Area delle Scienze 181/a, Parma, PR 43124, Italia.

^(**) Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università degli Studi di Pavia, Via Adolfo Ferrata 3, Pavia, PV 27100, Italia.

^(***) Autore di riferimento - E-mail: felice.giuliani@unipr.it - Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università di Parma, Parco Area delle Scienze 181/a, Parma, PR 43124, Italia.

^(*) Department of Engineering and Architecture, University of Parma, Parco Area delle Scienze 181/a, Parma, PR 43124, Italy.

^(**) Department of Engineering and Architecture, University of Pavia, Via Adolfo Ferrata 3, Pavia, PV 27100, Italy.

^(***) Corresponding author - E-mail: felice.giuliani@unipr.it - Department of Engineering and Architecture, University of Parma, Parco Area delle Scienze 181/a, Parma, PR 43124, Italy.

processo di rinnovamento ha visto nel Centro Nazionale per la Mobilità Sostenibile (MOST) una straordinaria sinergia fra università italiane, CNR e grandi imprese, organizzate in un sistema Hub-Spoke, per la promozione dell'innovazione, la transizione *green* e digitale di soluzioni sostenibili e inclusive per le infrastrutture ed i sistemi di trasporto [3]. Con il coordinamento scientifico del Politecnico di Milano, lo Spoke 4 "Trasporto Ferroviario" è specificamente rivolto all'innovazione nel settore ferroviario, con l'obiettivo di migliorare l'efficienza, la sostenibilità e la sicurezza, anche attraverso nuovi approcci progettuali e sistemi digitali che esaltino il monitoraggio avanzato dell'esercizio e dell'infrastruttura. In questo contesto, l'Università di Parma, una delle 24 sedi universitarie affiliate al MOST [4], ha intrapreso specifiche attività di ricerca incentrate sull'analisi del comportamento meccanico della sovrastruttura ferroviaria sotto carichi statici e dinamici, con l'intento di studiare fenomeni potenzialmente critici in ambiente di laboratorio, sia fisico che virtuale, prima di intraprendere più complesse sperimentazioni in esercizio. Proprio con riferimento alla sovrastruttura ferroviaria, le prove di laboratorio, in un ambiente sicuro, controllato e riproducibile consentono lo studio dell'interazione tra i diversi strati e permettono la calibrazione di modelli numerici affidabili. Tuttavia, la riproduzione in scala reale delle condizioni di esercizio richiede infrastrutture sperimentali dedicate e adeguate risorse tecniche.

Elemento centrale dell'attività sperimentale condotta dall'Università di Parma è stata la produzione dell'originale *Railway Superstructure Test Frame* (RSTF), un prototipo multifunzionale progettato per prove su porzioni di binario e relativa sovrastruttura a grandezza reale. Pensato per disambiguare le numerose fonti di incertezza proprie di allestimenti sperimentali più semplici, RSTF è forse il più avanzato sistema di test condotti in ambiente chiuso, intrinsecamente sicuro per gli operatori, concepito per la riproduzione di fenomeni critici e la calibrazione di modelli previsionali di degrado delle sovrastrutture ferroviarie e di specifiche parti dell'armamento.

2. Contesto scientifico di riferimento

Negli ultimi anni, la ricerca nazionale e internazionale ha visto lo sviluppo di numerose strutture sperimentali progettate per ricreare in laboratorio sezioni di binario ferroviario a grandezza reale e analizzarne il comportamento meccanico in condizioni controllate, anche a supporto della manutenzione [5]. Questi sistemi sono stati spesso concepiti con limitata versatilità, costruiti in funzione di specifici obiettivi di studi mirati. Le sezioni di prova replicano le dimensioni effettive del binario, solitamente con un numero limitato di traversine, e sono tipicamente installate all'interno di telai rigidi di contrasto, entro vasche di contenimento. L'applicazione dei carichi avviene tramite attuatori idraulici o elettromeccanici, capaci di simulare, con diverso grado di verosimiglianza, le condizioni determinate dal passaggio dei treni. Una rete di

ing Italian universities, the National Research Council of Italy (CNR), and major industrial partners. These institutions are organized within a hub-and-spoke structure that promotes innovation and enables the green and digital transition toward sustainable, inclusive transport infrastructure and systems [3]. Spoke 4 "Rail Transportation", under the scientific coordination of the Politecnico di Milano, is specifically dedicated to innovation in the railway sector. Its objective is to improve efficiency, sustainability and safety. This is achieved by adopting novel design approaches and digital systems that enable more advanced monitoring of operations and infrastructure. Within this framework, the University of Parma, one of MOST's 24 academic partners [4], has undertaken research activities focused on analyzing the mechanical behavior of railway superstructure systems under static and dynamic loading conditions. The objective is to examine potentially significant phenomena in controlled laboratory settings, both physical and virtual, before conducting more complex in-service experiments. For railway superstructures, laboratory testing allows for detailed investigation of interactions between different layers in a safe, controlled, and reproducible environment. It also supports the calibration of reliable numerical models. However, reproducing full-scale operational conditions requires specialized experimental facilities and appropriate technical resources.

A key element of the University of Parma's experimental activity has been developing the original Railway Superstructure Test Frame (RSTF), a multifunctional prototype designed to test full-scale track sections and their associated superstructure. The RSTF is one of the most advanced indoor testing systems, intended to minimize the multiple sources of uncertainty inherent in simpler experimental setups. It is intrinsically safe for operators and has been specifically developed to reproduce critical processes and calibrate predictive degradation models for railway superstructures and their individual components.

2. Scientific background

In recent years, national and international research has led to the development of several experimental facilities designed to reproduce full-scale sections of railway track under laboratory conditions, enabling researchers to investigate their mechanical behavior in a controlled environment, also in support of maintenance activities [5]. However, these systems are often conceived with limited versatility because they are tailored to specific research objectives. Test sections usually replicate the dimensions of actual tracks with a few sleepers and are typically installed in rigid reaction frames inside containment boxes. Loads are applied using hydraulic or electromechanical actuators, which can simulate train passage conditions with varying degrees of accuracy. A network of sensors measures displacements in real time and quantifies deformations and stresses within the different layers of the superstructure in accordance with rigorous testing protocols. Some experimental facilities worldwide are notable for their completeness, innovation, and ability to accurately reproduce loading conditions and interactions among railway super-

sensori misura in tempo reale spostamenti, quantifica le deformazioni e le pressioni nei vari strati della sovrastruttura secondo rigorosi protocolli di indagine. Alcune delle strutture sperimentali realizzate nel mondo si distinguono per completezza, innovazione e capacità di replicare con accuratezza le condizioni di carico e le interazioni tra le parti della sovrastruttura ferroviaria. Tuttavia, non tutte le strutture riproducono l'intera sovrastruttura per limiti di quota o altri vincoli operativi; alcune si concentrano esclusivamente su componenti o elementi singoli, limitando così le analisi ai comportamenti locali anziché alla risposta globale del sistema. Escludendo i grandi circuiti di prova, tra le strutture sperimentali a grandezza reale più significative a livello mondiale vi è la piattaforma cinese, denominata HTST, che si distingue quale il sistema di prova più grande e completo per lo studio del comportamento meccanico delle infrastrutture ferroviarie ad alta velocità. Questa struttura, sviluppata presso la Southwest Jiaotong University di Chengdu, misura 72,5 m di lunghezza, 6 m di larghezza e quasi 6 m di altezza, quest'ultima rappresentativa della sezione sperimentale contenuta nella vasca di prova. Costruita secondo gli standard delle linee ferroviarie ad alta velocità cinesi, comprende tutti e cinque i tipi di sistema binario utilizzati nel paese: CRTS I, CRTS II, CRTS III, binario *ballastless* a doppio blocco e binario tradizionale con ballast [6]. Un'altra importante struttura sperimentale a grandezza reale in Cina è rappresentata dal Zhejiang University High-Speed Rail Tester (ZJU-iHSRT), sviluppata presso la Zhejiang University di Hangzhou in collaborazione con l'University of Illinois (Urbana-Champaign).

Questa piattaforma è stata progettata per studiare la risposta dinamica dei binari su ballast sotto carichi realistici di treni ad alta velocità. È costituita da una sezione di binario lunga 15 m e larga 5,5 m, con otto traversine in cemento armato precompresso, ballast, sub-ballast e rilevato artificiale. Gli attuatori idraulici applicano carichi equivalenti ai diversi assi dei treni, riproducendo le sollecitazioni indotte da velocità operative fino a 300 km/h e carichi per asse fino a 216 kN (22 t) [7]. La collaborazione dell'University of Illinois nello sviluppo del ZJU-iHSRT si inserisce in un più ampio impegno dell'ateneo statunitense nella ricerca sperimentale a scala reale, portato avanti attraverso il *Research and Innovation Laboratory (RAIL)*. All'interno di questo laboratorio è stato realizzato il *Track Loading System (TLS)*, una piattaforma full-scale progettata per studiare in condizioni controllate la risposta meccanica del binario e le interazioni tra i suoi diversi strati. Il TLS comprende una sezione di binario lunga 6,7 m, con undici traverse in calcestruzzo installate su 31 cm di ballast, 20 di sub-ballast in materiale non legato e 86 di sottofondo limoso-argilloso, ricostruiti secondo gli standard costruttivi della Burlington Northern & Santa Fe (BNSF) railway. Il carico viene applicato mediante due attuatori servoidraulici verticali e un attuatore laterale montati su un telaio in acciaio, che consentono di riprodurre combinazioni di carichi verticali e trasversali su una sala montata [8]. Un ruolo

structure components. However, not all facilities can replicate the entire superstructure due to geometric constraints or other operational limitations. Some facilities focus exclusively on individual components or elements, restricting analyses to local behavior rather than the global system response.

The Chinese platform, referred to as HTST, is one of the most significant full-scale experimental facilities worldwide, excluding large-scale test tracks. It is the largest and most comprehensive testing system for studying the mechanical behavior of high-speed railway infrastructure. Developed at Southwest Jiaotong University in Chengdu, the HTST measures 72.5 m in length, 6 m in width, and nearly 6 m in height, which corresponds to the depth of the experimental section within the testing box. Constructed according to Chinese high-speed railway standards, the facility includes all five track system types used in the country: CRTS I, CRTS II, CRTS III, double-block slab track and conventional ballasted track [6]. Another important full-scale experimental facility in China is the Zhejiang University High-Speed Rail Tester (ZJU-iHSRT), which was developed at the Zhejiang University of Hangzhou in collaboration with the University of Illinois (Urbana-Champaign). The ZJU-iHSRT is designed to study the dynamic response of ballasted tracks under realistic high-speed train loads. It consists of a 15-meter-long, 5.5-meter-wide track section with eight prestressed reinforced concrete sleepers, ballast, sub-ballast, and an artificial embankment. Hydraulic actuators apply loads equivalent to train axles, reproducing stresses induced by operating speeds of up to 300 km/h and axle loads of up to 216 kN (22 t) [7]. The University of Illinois' involvement in developing the ZJU-iHSRT is part of its broader commitment to full-scale experimental research, which is carried out through the Research and Innovation Laboratory (RAIL). Within RAIL, the Track Loading System (TLS) was developed. It is a full-scale platform designed to study the mechanical response of railway tracks and the interaction among their different layers under controlled conditions. The TLS includes a 6.7-meter track section with eleven concrete sleepers installed on 31 cm of ballast, 20 of unbound sub-ballast, and 86 of silty clay subgrade. All of these components are reconstructed according to Burlington Northern & Santa Fe (BNSF) Railway standards. Loading is applied through two vertical servo-hydraulic actuators and one lateral actuator mounted on a steel frame, enabling the reproduction of combined vertical and transverse loads on a wheelset [8]. Australia has played a significant role in full-scale laboratory research by developing the National Facility for Heavy-Haul Railroad Testing (NFHRT) at the University of Technology Sydney. The NFHRT is the first Australian platform dedicated to studying track behavior under heavy-haul freight conditions. The platform consists of a 6 × 6 × 2.3 meter rigid testing chamber designed to accommodate a complete track section, including ballast, sub-ballast, an artificial embankment, and drainage systems. Four synchronized dynamic hydraulic actuators apply loading to simulate axle loads of up to 245 kN (25 t) at realistic frequencies (up to 15 Hertz), reproducing operating conditions typical of heavy-haul railway lines [9]. In the European context, the Geo-pavement and Railways Accelerated Fatigue Testing Facility (GRAFT-

importante nella ricerca di laboratorio in scala reale è rivestito anche dall'Australia, che ha sviluppato la National Facility for Heavy-Haul Railroad Testing (NFHRT) presso la Sydney University of Technology. Si tratta della prima piattaforma australiana in scala reale dedicata allo studio del comportamento del binario sotto carichi pesanti per il traffico merci. La struttura comprende una vasca rigida di $6 \times 6 \times 2.3$ m, progettata per ospitare un'intera sezione di binario con ballast, sub-ballast, rilevato artificiale e sistemi di drenaggio. Il carico è applicato tramite quattro attuatori idraulici dinamici sincronizzati, capaci di simulare carichi equivalenti a 245 kN (25 t) per asse con frequenze realistiche (fino a 15 Hertz), replicando le condizioni operative tipiche delle linee ferroviarie per il trasporto di minerali e merci pesanti [9]. Analizzando l'ambito Europeo, il *Geo-pavement and Railways Accelerated Fatigue Testing Facility* (GRAFT-II), sviluppato presso la Heriot-Watt University di Edimburgo (UK), rappresenta una delle strutture sperimentali a grandezza reale più avanzate attualmente operative nel settore della geotecnica ferroviaria [10]. Costruita come una vasca rigida, può ospitare sezioni di binario complete, mentre attuatori idraulici simulano il passaggio degli assi ferroviari ad alta velocità [11]. Accanto alle strutture progettate per la caratterizzazione meccanica del binario, sono stati sviluppati sistemi sperimentali specifici per monitorare la risposta idraulica della struttura ferroviaria, con particolare attenzione all'evoluzione del contenuto di umidità negli strati di sub-struttura e rilevato. Un esempio significativo è rappresentato dagli studi condotti dal Department of Railway Engineering and Track Management (DRETM) della University of Žilina (SK), dove sono stati realizzati due stand sperimentali a grandezza reale (DRETM I e DRETM II) per riprodurre con precisione la stratigrafia di una sovrastruttura ferroviaria e analizzare l'influenza di fattori climatici, come precipitazioni, gelo e disgelo, sul regime termo-idraulico del rilevato [12].

Sulla scia delle esperienze internazionali, la realizzazione RSTF del Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell'Università di Parma replica in scala reale la successione stratigrafica e le condizioni di carico tipiche di una linea ferroviaria, con particolare riferimento alle configurazioni comunemente adottate nelle sezioni italiane. Trattandosi di un contesto controllato, proprio dell'ambito di laboratorio, il prototipo si presta all'implementazione di strumentazioni di monitoraggio di tipo bordo-binario, permettendo di studiare in dettaglio le risposte meccaniche della sovrastruttura simulando il transito di un treno. Il punto di forza della proposta dell'Ateneo parmense risiede nella notevole capacità di adattamento della struttura del telaio di contrasto e dei sistemi di carico, nella perfetta riproduzione del sistema binario/sala montata, nella originale interfaccia uomo/macchina HMI del sistema di comando (*Human-Machine Interface*) e nella innovativa configurazione del sistema di monitoraggio degli spostamenti basato su tecnologia no-contact.

II), which was developed at the Heriot-Watt University of Edinburgh (UK), is one of the most advanced full-scale experimental facilities operating in railway geotechnics [10]. Constructed as a rigid containment pit, GRAFT-II can accommodate full track sections while hydraulic actuators simulate the passage of high-speed train axles [11]. In addition to facilities designed for mechanical characterization, specific experimental systems have been developed to monitor the hydraulic response of railway structures, paying particular attention to moisture evolution within the substructure and embankment layers. Notable examples include studies conducted at the Department of Railway Engineering and Track Management (DRETM) of the University of Žilina (SK), where two full-scale experimental stands (DRETM I and DRETM II) were constructed to accurately reproduce railway superstructure stratigraphy and analyze how climatic factors, such as precipitation, freezing and thawing, influence the thermo-hydraulic regime of embankments [12].

Based on these international experiences, the RSTF developed by the Department of Engineering and Architecture of the University of Parma is a full-scale reproduction of the stratigraphic sequence and loading conditions typical of Italian railway lines. Operating in a controlled laboratory environment, the prototype enables the implementation of wayside monitoring instrumentation and allows for a detailed investigation of the superstructure's mechanical response under simulated train passage. Strengths of the proposed system include highly adaptable loading systems and frames, accurate reproduction of track-wheelset interaction, an original human-machine interface (HMI) for the control system, and an innovative configuration of a non-contact displacement monitoring system.

3. Structural configuration of the Railway Superstructure Test Frame

The multifunctional prototype was developed and installed at the "Structures Laboratory and Technology Transfer" of the Department of Engineering and Architecture at the University of Parma. It consists of a load-bearing structure formed by a steel portal frame structure. The frame is designed to lodge a full-scale railway superstructure section that was fully reconstructed in the laboratory. This section includes track components, ballast, and a sub-ballast layer made of an asphalt mixture. The portal frame comprises two vertical side columns and an upper horizontal crossbeam. The crossbeam serves as the reaction element and is equipped with an electro-actuated vertical movement system that adjusts its elevation according to the current experimental setup. With a range of motion of 1000 mm, the height of the underside of the crossbeam can be adjusted from 1500 mm to 2500 mm above ground level. This allows adaptation to different test section configurations, such as Profile A with a 50 cm ballast thickness or Profile B with a 35 cm ballast thickness. A movable carriage connected to the horizontal crossbeam has longitudinal and transverse guides that enable electromechanical movement within the X-Y plane (Fig. 1).

3. Configurazione strutturale del Railway Superstructure Test Frame

Il prototipo multifunzionale, realizzato e installato presso il “Laboratorio di Strutture e Trasferimento Tecnologico” del Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell’Università di Parma, ha una struttura portante costituita da un portale in acciaio progettato per coprire una sezione di sovrastruttura ferroviaria completamente ricostruita in laboratorio, comprendente armamento, massicciata e lo strato di sub-ballast in conglomerato bituminoso. Il portale è composto da due colonne laterali verticali e da un traverso orizzontale superiore di contrasto cui è consentita una movimentazione verticale elettroattuata per governare la quota in base alla configurazione dell’allestimento sperimentale del momento. La corsa di 1000 mm permette di variare l’intradosso del traverso tra 1500 mm e 2500 mm da terra, adattandosi a differenti configurazioni della sezione di prova (profilo A con spessore della massicciata pari a 50 cm o profilo B con spessore pari a 35 cm). Al traverso orizzontale è collegata una slitta mobile, dotata di guide longitudinali e trasversali che ne consentono il movimento elettromeccanico nel piano (direzioni X-Y, Fig. 1).

Alla slitta mobile è collegato l’elemento sollecitante il binario attualmente consistente in una sala ferroviaria reale ($\varnothing$ 920 mm); il piano inferiore della slitta è equipaggiato con un martinetto idraulico lungo l’asse Z, caratterizzato da una corsa di 45 mm e da una capacità di carico modulabile fino a valori rappresentativi dei carichi assiali di riferimento, destinato all’applicazione di carichi statici e/o dinamici. La posizione della sala montata, rispetto alle rotaie e lungo lo sviluppo dello stesso binario, è governabile attraverso specifici attuatori idraulici. Una struttura perimetrale confina la massicciata e tutta l’area operativa del prototipo è protetta da sistemi anti-intrusione e specifici dispositivi di sicurezza propri degli ambienti di lavoro. L’intera movimentazione tridimensionale è gestita da un software di controllo dedica-

The loading element, which applies force to the track, consists of a real railway wheelset with a diameter of 920 mm connected to the mobile carriage. The lower plane of the carriage is equipped with a hydraulic actuator that operates along the Z-axis. The actuator has a 45 mm stroke and a load capacity adjustable up to values representative of reference axle loads. The actuator is intended for applying static and/or dynamic loads. The position of the wheelset relative to the rails and along the length of the track can be controlled using specific hydraulic actuators. A perimeter structure confines the ballast, while anti-intrusion systems and safety devices typical of industrial environments protect the entire operational area of the prototype. Dedicated control software manages three-dimensional movement and coordinates the action of the actuators, carriages and moving platforms. This enables accurate load application at desired frequencies ranging from 0.1 to 10 Hz according to industrial automation architecture. The hydraulic system is based on a Hydraulic Power Unit (HPU) consisting of a high-performance motor-pump assembly with pump displacement control and load-sensing technology. This optimizes energy consumption according to actual demand. The HPU integrates an offline circuit for continuous oil filtration, an air-oil heat exchanger for temperature control and an electric preheater. The dedicated software operates the whole system, enabling real-time visualization of the machine’s status and operating parameters, as well as manual control of individual functions.

4. Design and construction of the railway superstructure section

The first indoor railway test section was designed and constructed as part of the MOST project and was physically completed in 2025. The test section serves as a platform for analyzing the interactions between the various layers of the superstructure in response to applied loads. In accordance with the design manual and specifications provided by Ferrovie dello Stato Italiane, the work included preparing a 120-mm-thick asphalt sub-ballast, constructing a 350-mm-

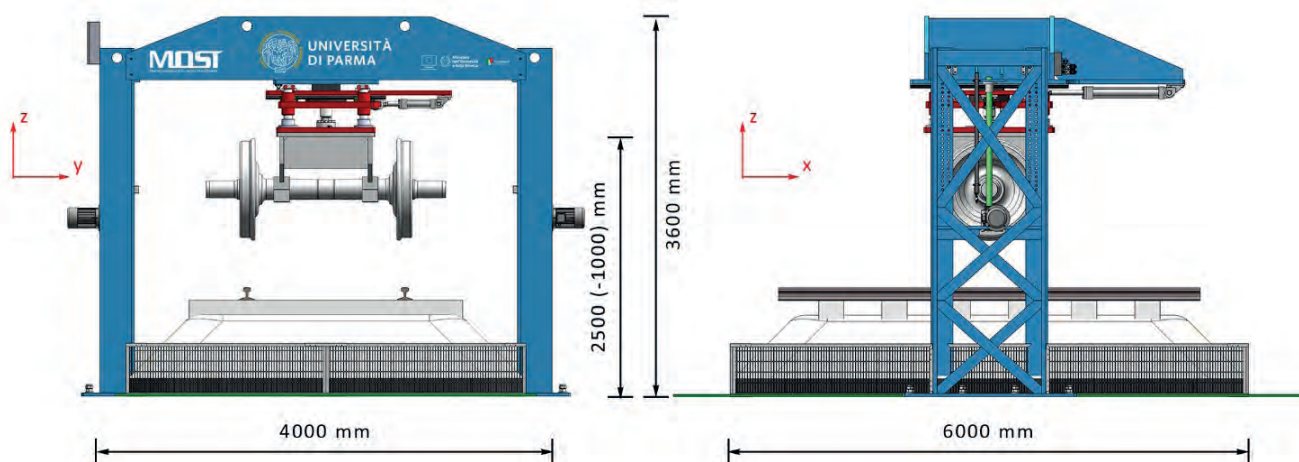


Figura 1 – Railway Superstructure Test Frame layout.
Figure 1 – Railway Superstructure Test Frame layout.

to, che coordina martinetti, slitte e piani mobili, che permette l'impostazione dei carichi con massima precisione ed alle frequenze desiderate (range da 0,1 a 10 Hz) con l'architettura propria dell'automazione industriale. Il sistema idraulico si basa su un gruppo di potenza idraulica (HPU) costituito da motore-pompa ad alte prestazioni, con controllo della cilindrata della pompa e tecnologia load-sensing (controllo in funzione del carico), che consente di ottimizzare il consumo energetico in base alla domanda effettiva. L'HPU integra un circuito offline per la filtrazione continua dell'olio, uno scambiatore aria-olio per il controllo della temperatura e un preriscaldatore elettrico. L'intero sistema è gestito tramite software dedicato, che consente la visualizzazione in tempo reale dello stato della macchina e dei parametri operativi, oltre al controllo manuale delle singole funzioni.

4. Progettazione e costruzione della sezione di sovrastruttura ferroviaria

La prima sezione ferroviaria di prova indoor, progettata e allestita quale deliverable MOST, è stata fisicamente completata nel 2025, quale banco di prova finalizzato all'analisi delle interazioni tra i diversi strati della sovrastruttura in relazione ai carichi applicati. Conformemente al manuale di progettazione ed ai capitolati di Ferrovie dello Stato Italiane l'allestimento ha incluso la preparazione del sub-ballast in conglomerato bituminoso di spessore pari a 120 mm, la costruzione dello strato di massicciata di spessore pari a 350 mm e l'installazione dei sistemi di armamento, comprensivi di binario, traverse e organi d'attacco, su specifico allettamento di base.

4.1. Prove su sub-ballast

Tra gli elementi costitutivi della prima sezione ferroviaria ricostruita in laboratorio, lo strato di sub-ballast in conglomerato bituminoso ha ruolo centrale in quanto oggetto di specifica attività di indagine prevista nel programma di ricerca MOST. In accordo con gli standard italiani di riferimento [13], è stato progettato e realizzato il sub-ballast in conglomerato bituminoso di diversa formulazione, di spessore pari a 120 mm in n. 42 lastre di dimensioni 500 mm × 500 mm × 120 mm, compattate con un particolare compattatore da laboratorio, unico in Italia, in dotazione al gruppo di ricerca (Fig. 2), fino al raggiungimento della prevista percentuale dei vuoti residui (3% ÷ 6%).

Le diverse formulazioni di conglomerato bituminoso, rispondenti al capitolato RFI Parte II - Sezione 13,

thick ballast layer and installing track systems, including rails, sleepers and fasteners, on a specially prepared sub-grade.

4.1. Tests on sub-ballast

The asphalt sub-ballast layer plays a central role among the constituent elements of the first reconstructed railway section in the laboratory because it is the subject of specific investigative activities within the MOST research program. In accordance with relevant Italian standards [13], the asphalt sub-ballast was designed and produced with different mix formulations and a thickness of 120 mm. A total of 42 slabs, each measuring 500 mm × 500 mm × 120 mm, were produced. These slabs were compacted using a dedicated laboratory compactor, unique of its kind in Italy, and available within the research group (Fig. 2), until the target residual air void content of 3%-6% was achieved.

The different asphalt mixture formulations that comply with Rete Ferroviaria Italiana's specifications (Part II, Section 13) were initially subjected to original experimental punching tests [14] and are currently the focus of research activities conducted by the University of Parma through the National Sustainable Mobility Center. Some of the asphalt slabs were instrumented with sensors embedded in the material during manufacturing (Fig. 3).

4.2. Ballast and track structure

In the adopted test configuration, the 350-mm-thick ballast layer was constructed in two stages. In the test setup, the 350-mm-thick ballast layer was installed in two stages. First, it was manually spread to ensure uniform coverage of the sub-ballast and areas where instrumentation was installed. Then, a specialized contractor me-



Figura 2 – Compattatore lastre in conglomerato bituminoso.
Figure 2 – Asphalt mixtures slab compactor.

preliminarmente sottoposte ad originali prove sperimentali di *punching* [14] sono attualmente oggetto di specifica ricerca dell'Università di Parma in seno al Centro Nazionale per la Mobilità Sostenibile. Alcune delle lastre in conglomerato bituminoso sono state inoltre strumentate mediante sensori integrati nel materiale in fase di realizzazione (Fig. 3).

4.2. Massicciata e armamento

Nella configurazione di prova realizzata, lo strato di massicciata, di spessore pari a 350 mm, è stato posto in opera in due fasi successive: una prima stesa manuale, finalizzata a garantire una copertura uniforme del sub-ballast e delle zone interessate dalla strumentazione, seguita da una posa meccanizzata eseguita da ditta specializzata, volta ad assicurare uniformità e adeguata compattazione. Durante le operazioni sono state eseguite attività di livellamento e cicli di vibrazione controllata mediante rinalzatore, al fine di favorire l'assettamento del pietrisco e riprodurre condizioni rappresentative di una reale sovrastruttura ferroviaria di nuovo impianto.

La campata di armamento è costituita da otto traversine monoblocco in calcestruzzo precompresso conformi alle specifiche RFI 230, sistemi di fissaggio elastico Vossloh e rotaie tipo 60 E1 di lunghezza pari a 5 m. Le rotaie sono state giuntate in mezzzeria mediante due giunzioni isolate incollate (GII), elementi che non garantiscono la perfetta continuità della rotaia [15]. Tali componenti sono stati oggetto di specifica attività di indagine prevista nel programma di ricerca MOST, finalizzata alla valutazione del comportamento sotto carico e alla misura di parametri caratteristici quali il *gap value* [16], anche in ottica di sviluppo e validazione di modelli digitali [17][18].

Analogamente a quanto svolto per il sub-ballast, alcune traversine sono state strumentate. Il binario, posato, rinalzato e livellato, presenta, in questa prima configurazione di prova, interasse tra le traversine pari a 600 mm e scartamento ordinario di 1435 mm, riferibile a tratto rettilineo privo di sopraelevazione (Fig. 4).

4.3. Sistemi di monitoraggio bordo binario

Accanto ai sistemi di monitoraggio previsti e integrati in fase di realizzazione della sovrastruttura, il prototipo è stato dotato di sistemi di monitoraggio bordo binario, concepiti per acquisire in modo non invasivo la risposta della sovrastruttura ferroviaria durante l'esecuzione delle prove [19].

chanically placed it to ensure uniformity and adequate compaction. A tamping machine performed leveling work and controlled the vibration cycles throughout the process. This process allowed the crushed stone to settle and replicated conditions typical of a newly constructed railway superstructure.

The track panel consists of eight monoblock prestressed concrete sleepers that comply with Rete Ferroviaria Italiana (RFI) specifications (type 230), as well as Vossloh elastic fastening systems and 5-meter-long, 60 E1 rails. The rails were jointed at the midpoint using two bonded insulated joints (IRJ), which do not ensure perfect rail continuity [15]. These components have been the subject of a specific investigation within the MOST research program, which aimed to evaluate the joints' behavior under load and measure characteristic parameters, such as the gap value [16], to develop and validate digital twin models [17][18].

As with the sub-ballast layer, some sleepers were instrumented. The laid, tamped, and leveled track has 600-mm sleeper spacing and a standard 1,435-mm gauge in this initial test configuration. This results in a straight track section without cant (Fig. 4).

4.3. Wayside monitoring systems

In addition to the monitoring systems planned and integrated during the superstructure construction, the prototype is equipped with wayside monitoring systems designed to capture the response of the superstructure during testing activities in a non-invasive manner [19]. Specifically, the adopted wayside monitoring framework uses optical and inertial measurement systems, which have already been validated through in-line

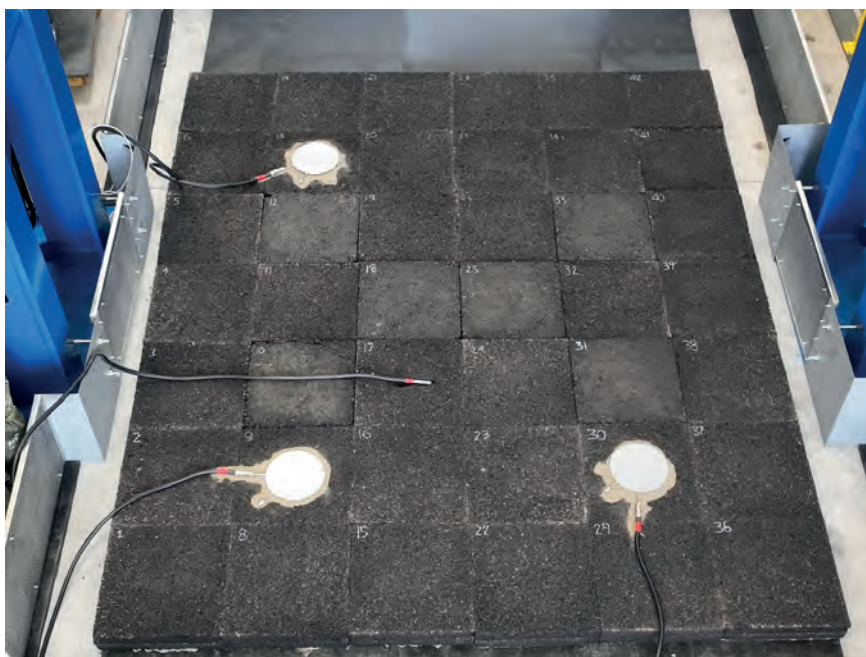


Figura 3 – Sub-ballast layout: reticolo lastre strumentate.
Figure 3 – Sub-ballast layout: grid of slabs with monitoring sensors.

In particolare, il *framework* di monitoraggio *wayside* adottato vede l'uso complementare di sistemi di misura ottici e inerziali già sperimentati sul campo in linea. I dispositivi ottici, basati su telecamere e marker retroriflettenti (Fig. 5), consentono la misura diretta degli spostamenti con precisione sub-millimetrica alle basse e medie frequenze, mentre gli accelerometri triassiali permettono di caratterizzare la risposta dinamica ad alta frequenza acquisendo le componenti vibrazionali del sistema. Tali strumenti sono stati progettati per essere installati e rimossi con elevata flessibilità, consentendo di adattare la configurazione di misura in funzione del tipo di test e delle grandezze di interesse, senza interferire con la geometria del binario o con le condizioni di carico applicate. L'ambiente di prova controllato consente di superare molte delle limitazioni tipiche del monitoraggio in linea, permettendo un'osservazione continua della sovrastruttura, inclusi elementi e superfici che in esercizio reale risultano difficilmente accessibili o temporaneamente celati dal passaggio dei convogli. La flessibilità del setup consentirà, inoltre, di introdurre variazioni controllate nella geometria e nelle condizioni di vincolo per anali-



Figura 4 – Prototipo multifunzionale RSTF.
Figure 4 – Multifunctional RSTF prototype.

field applications, complementarily. The optical device, based on cameras and retroreflective markers (Fig. 5), enable direct displacement measurements with submillimeter accuracy at low and medium frequencies. Meanwhile, tri-axial accelerometers characterize the high-frequency dynamic response by capturing the vibrational components of the system. These instruments are designed for easy installation and removal, ena-



Figura 5 – Vista d'insieme, comprensiva dei sistemi di monitoraggio bordo binario.
Figure 5 – Overview, including wayside monitoring systems.

zare sistematicamente la risposta della sovrastruttura anche in presenza di configurazioni non ordinarie o di scenari di dissesto simulato.

5. Output tipici

Tramite il pannello operatore vengono definite le condizioni di carico applicate alla sovrastruttura ferroviaria, mediante l'imposizione di segnali statici e dinamici con ampiezza e frequenza prefissate. Il software consente la visualizzazione in tempo reale dello stato della macchina e dei principali parametri operativi, oltre al controllo manuale delle singole funzioni. La posizione degli attuatori lungo gli assi X, Y e Z è monitorata in continuo tramite trasduttori di posizione, garantendo il controllo istantaneo della cinematica del sistema e il corretto svolgimento delle prove sperimentali (Fig. 6).

Parallelamente, il sistema di monitoraggio *wayside* consente l'acquisizione sincrona della risposta cinematica della sovrastruttura ferroviaria durante l'imposizione dei carichi [20][21]. In particolare, l'apparato ottico multi-camera permette di tracciare con elevata accuratezza gli spostamenti tridimensionali di punti discreti del binario, opportunamente materializzati mediante i marker retro-riflettenti. La configurazione adottata, basata su più telecamere opportunamente disposte lungo la tratta monitorata, consente di interrogare simultaneamente più punti individuati tramite i marker, ricostruendone le traiettorie e quindi valutandone direttamente gli spostamenti nelle tre direzioni principali.

6. Conclusioni e prospettive di ricerca

Il presente articolo descrive il processo di realizzazione dell'originale *Railway Superstructure Test Frame* (RSTF), un impianto di prova prototipale, realizzato presso il "Laboratorio di Strutture e Trasferimento Tecnologico" dell'Università di Parma, che consente di studiare il comportamento di un tratto di binario strumentato a grandezza naturale sottoposto a carichi ciclici continui applicati tramite una sala ferroviaria reale ($\varnothing$ 920 mm). L'installazione permette la riproduzione di una sezione completa di binario, comprensiva di sub-ballast in conglomerato bituminoso, ballast, rotaie, traversine e giunti, consentendo l'osservazione diretta delle interazioni tra strati e della trasmissione delle sollecitazioni ai diversi elementi costitutivi. I primi test hanno fornito risultati promettenti evidenziando la capacità del sistema di cogliere in modo coerente le risposte deformative e dinamiche della sovrastruttura sotto condizioni di carico controllate, confermando il potenziale dello strumento per analisi più approfondite e per lo studio di fenomeni di comportamento e degrado in condizioni operative rappresentative. In linea con gli obiettivi del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) e con le attività del Centro Nazionale per la Mobilità Sostenibile (MOST), l'RSTF si inserisce nel quadro delle infrastrutture di ri-

bling adaptation of the measurement configuration according to the test type and quantities of interest, without interfering with the track geometry or applied loading conditions. The controlled testing environment overcomes many limitations of in-line monitoring and enables continuous observation of the superstructure, including difficult-to-access elements and surfaces that are temporarily hidden during real train operations. Furthermore, setup flexibility allows controlled variations in geometry and boundary conditions to be introduced. This makes it possible to systematically investigate the superstructure response under non-standard configurations or simulated degradation scenarios.

5. Typical outputs

The loading conditions applied to the railway superstructure are defined through the operator panel by applying static and dynamic signals with predefined amplitudes and frequencies. The software provides real-time visualization of the machine's status and main operating parameters, as well as manual control of individual functions. Displacement transducers continuously monitor the position of the actuators along the X, Y and Z axes, ensuring real-time control of the system kinematics and correct execution of experimental tests (Fig. 6).

Meanwhile, the wayside monitoring system enables the simultaneous acquisition of the kinematic response of the railway superstructure when a load is applied [20][21]. Specifically, the multi-camera optical equipment allows for the precise tracking of three-dimensional displacements of discrete track points materialized by retro-reflective markers. The adopted configuration, based on multiple cameras appropriately arranged along the monitored section, allows the simultaneous interrogation of multiple points identified via markers, reconstructing their trajectories and thus directly evaluating their displacements in the three main directions.

6. Conclusions and future research projects

This paper describes the development process of the original Railway Superstructure Test Frame (RSTF), a prototype testing facility constructed at the "Structures Laboratory and Technology Transfer" of the University of Parma. The RSTF allows researchers to investigate the behavior of a full-scale instrumented track section under continuous cyclic loading applied by a real railway wheelset ($\varnothing$ 920 mm). The installation can reproduce a complete track section, including the asphalt sub-ballast, ballast, rails, sleepers and joints. This enables direct observation of the interactions between the layers and the transmission of stress to the different structural components. Initial tests provided encouraging results, showing the capacity of the system to reliably capture the deformational and dynamic responses of the superstructure under controlled loading conditions. These results confirm the potential for in-depth analysis and investigation of behavior and degradation phenomena under representative operating conditions. In line with the objec-

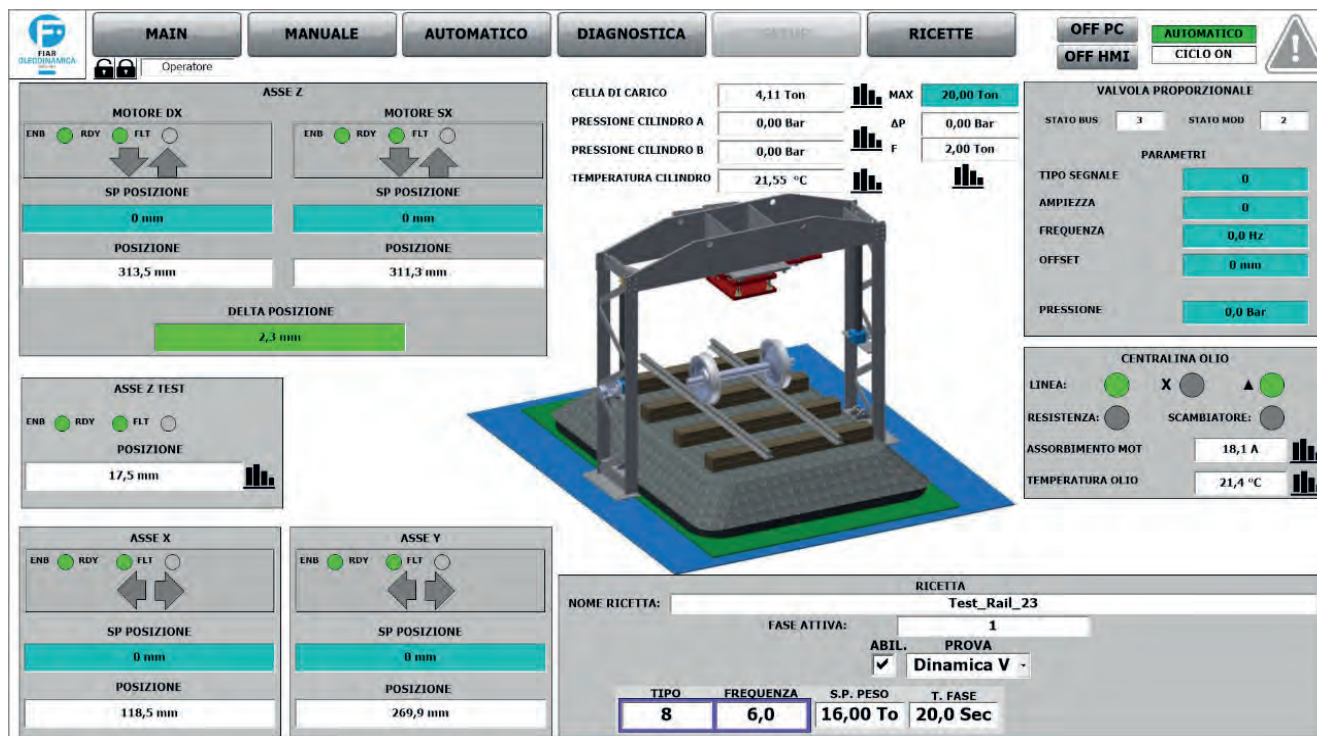


Figura 6 – Interfaccia utente del software di controllo RSTF.
Figure 6 – User interface of the RSTF control software.

cerca finalizzate alla digitalizzazione, alla sostenibilità e al miglioramento della sicurezza del sistema ferroviario. L'RSTF costituisce un complesso apparato di laboratorio a grandezza naturale progettato per riprodurre condizioni di carico dinamico controllate, rappresentative del traffico ferroviario. Proprio per questa rilevantissima versatilità, questa piattaforma sperimentale consentirà di testare sistematicamente componenti di binario (attacchi, giunti, traversine, tappetini, ecc...) di nuova concezione o predisposti per simulare specifici scenari di degrado controllato, generando così serie di dati sperimentali adatti al confronto diretto con i dati sintetici prodotti da modelli digitali che ne seguono l'evoluzione nel tempo sotto carico. RSTF può fornire quindi le basi sperimentali per nuovi progetti industriali, supportando la calibrazione, la validazione incrociata e l'integrazione progressiva della diagnostica AI basata su dati concreti derivati dal monitoraggio delle infrastrutture nel loro complesso, con la precisione e la sicurezza dell'ambiente di laboratorio. Anticipando le necessarie osservazioni in linea, i risultati derivabili da RSTF possono far parte di un percorso strutturato verso sistemi di manutenzione predittiva automatizzata per il monitoraggio delle infrastrutture ferroviarie di prossima generazione.

7. Finanziamento

Progetto finanziato nell'ambito del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), Missione 4 Componente 2

atives of the National Recovery and Resilience Plan (NRRP) and the activities of the National Center for Sustainable Mobility (MOST), the RSTF is part of a broader framework of research infrastructures aimed at digitalization, sustainability and improving the safety of railway systems. The RSTF is a full-scale laboratory facility designed to reproduce the dynamic loading conditions experienced by railway traffic in a controlled environment. Thanks to this high level of versatility, the platform enables systematic testing of track components (fastening systems, joints, sleepers, mats, etc.), either newly developed or configured to simulate specific controlled degradation scenarios. This approach enables the generation of experimental datasets that can be directly compared with synthetic data produced by digital models, tracking the evolution of the components under load over time. The RSTF therefore provides a solid experimental foundation for new industrial applications, supporting model calibration and cross-validation, as well as the gradual integration of AI-based diagnostic tools grounded in real-world infrastructure monitoring data, within the safe and accurate confines of a laboratory environment. By anticipating the need for field observations, the results obtained from the RSTF can contribute to a structured pathway towards automated, predictive maintenance systems for next-generation railway infrastructure.

7. Funding

Project funded under the National Recovery and Resil-

Investimento 1.4 - Bando di gara n. 3138 del 16/12/2021 del Ministero dell'Università e della Ricerca italiano finanziato dall'Unione Europea - NextGenerationEU. Numero di aggiudicazione: Codice progetto CN00000023, Decreto di concessione n. 1033 del 17/06/2022 adottato dal Ministero dell'Università e della Ricerca, CUP D93C22000400001, "Centro Nazionale per la Mobilità Sostenibile" (CNMS). Spoke 4 - Trasporto ferroviario.

ience Plan (NRRP), Mission 4 Component 2 Investment 1.4 - Call for tender No. 3138 of 16/12/2021 of Italian Ministry of University and Research funded by the European Union – NextGenerationEU. Award Number: Project code CN00000023, Concession Decree No. 1033 of 17/06/2022 adopted by the Italian Ministry of University and Research, CUP D93C22000400001, "Sustainable Mobility Center" (CNMS). Spoke 4 - Trasporto ferroviario.

BIBLIOGRAFIA – REFERENCES

- [1] MIMS (2021), "Documento strategico della mobilità ferroviaria di passeggeri e merci - *Strategic document on passenger and freight rail mobility*", Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, Rome.
- [2] MEF (2021), "PNRR - Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza dell'Italia - NRRP - National Recovery and Resilience Plan", Ministero dell'Economia e delle Finanze, Rome.
- [3] MOST – CNMS: Sustainable Mobility Center, <https://www.centronazionalemost.it/>. Accessed 04 Jun 2026.
- [4] UNIPR – CNMS: Sustainable Mobility Center, <https://www.unipr.it/en/node/102835>. Accessed 04 Jun 2026.
- [5] SENESI F., EUSEPI R., DI FILIPPO B., FERRANTE C., RICCIARDI L. (2025), "I Laboratori di RFI a supporto della manutenzione: monitoraggio di quattro deviatori su un tratto di linea ad alta velocità - RFI laboratories supporting maintenance: monitoring of four turnouts on a section of a high-speed line", *Ingegneria Ferroviaria*, 80:97–109, Edizioni CIFI, February.
- [6] ZHAI W., WANG K., CHEN Z. *et al.* (2020), "Full-scale multi-functional test platform for investigating mechanical performance of track-subgrade systems of high-speed railways", *Railway Engineering Science* 28:213–231. <https://doi.org/10.1007/s40534-020-00221-y>.
- [7] FENG B., BASARAH Y.I., GU Q. *et al.* (2021), "Advanced full-scale laboratory dynamic load testing of a ballasted high-speed railway track", *Transportation Geotechnics* 29:100559. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100559>.
- [8] RESEARCH AND INNOVATION LAB (RAIL) - RailTEC. <https://railtec.illinois.edu/laboratories/rail/>. Accessed 11 Dec 2025.
- [9] INDRARATNA B., NGO T., FERREIRA F.B. *et al.* (2021), "Large-scale testing facility for heavy haul track", *Transportation Geotechnics* 28:100517. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100517>.
- [10] MAROLT ČEBAŠEK T., ESEN A.F., WOODWARD P.K., LAGHROUCHE O., CONNOLLY D.P. (2018), "Full scale laboratory testing of ballast and concrete slab tracks under phased cyclic loading", *Transportation Geotechnics* 17:33–40. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2018.08.003>.
- [11] THÖLKEN D., ABDALLA FILHO J.E., POMBO J., SAINZ-AJA J., CARRASCAL I., POLANCO J., ESEN A., LAGHROUCHE O., WOODWARD P. (2021), "Three-dimensional modelling of slab-track systems based on dynamic experimental tests", *Transportation Geotechnics* 31:100663. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100663>.
- [12] DOBEŠ P. (2015), "Calibration of TDR Test Probe for Measuring Moisture in the Body of the Railway Substructure and its Subgrade", *Civil and Environmental Engineering* 11:84–94. <https://doi.org/10.1515/cee-2015-0011>.
- [13] RFI (2020), "RFI DTC SI CS SP IFS 009 E: Capitolato generale tecnico di appalto delle opere civili. Parte II - Sezione 13 - RFI DTC SI CS SP IFS 009 E: General Technical Specifications for Civil Works Contracts. Part II – Section 13", *Rete Ferroviaria Italiana*, Rome.
- [14] LA PLACA A., AUTELITANO F., GIULIANI F. (2025), "Punching test for mechanical characterization of asphalt railway sub-ballast", *Railway Engineering Science* 2025 1–14. <https://doi.org/10.1007/S40534-025-00407-2>.
- [15] MEGNA G., BRACCIALI A. (2025), "Progetto e verifiche di laboratorio dell'ABJ, un giunto isolante incollato innovativo - Design and laboratory tests of ABJ, an innovative insulated rail joint", *Ingegneria Ferroviaria* 80:303–319, Edizioni CIFI, April.
- [16] LA PLACA A., FREDDI F., GIULIANI F. (2023), "Monitoring of insulated rail joints based on gap value measurement", *Urban Rail Transit*. <https://doi.org/10.1007/S40864-023-00206-0>.
- [17] LA PLACA A., BENELLI F., BIANCHI G., FREDDI F., GIULIANI F. (2025), "Behaviour of supported and unsupported insulated rail joint under different preload conditions", *Transportation Research Procedia*. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2025.06.013>.

- [18] BIANCHI G., FREDDI F., GIULIANI F., LA PLACA A. (2025), “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*. <https://doi.org/10.1007/s40534-024-00371-3>.
- [19] BIANCHI G., FANELLI C., FREDDI F., GIULIANI F., LA PLACA A. (2024), “Systematic review railway infrastructure monitoring: from classic techniques to predictive maintenance”, *Advances in Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.1177/16878132241285631>.
- [20] MOSLEH A., MOHAMMADI M., SILVA R., MAGALHÃES J., JORGE T., VALE C., RIBEIRO D., ZHAI W. (2026), “Recent advances in wayside condition monitoring for railways: a comprehensive review”, *Railway Engineering Science*. <https://doi.org/10.1007/s40534-025-00423-2>.
- [21] AELA P., CAI J., JING G., CHI H.L. (2024), “Vision-based monitoring of railway superstructure: A review”, *Constr Build Mater* 442:137385. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137385>.
