



La diagnostica dell'armamento ferroviario - Possibilità di sviluppo attraverso la misura di accelerazioni e forze di contatto

Diagnostics of the railway track - Possibility of development through the measurement of accelerations and contact forces

Giulio ROSANO ^(*)

Daniele MASSINI ^(*)

Luca BOCCIOLINI ^(*)

Carmine ZAPPACOSTA ^(*)

Egidio Di GIALLEONARDO ^(**)

Claudio SOMASCHINI ^(**)

Ivano LA PAGLIA ^(**)

Luca PUGI ^(***)

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.02.2024.ART.1>)

Sommario - La sicurezza del trasporto su ferro è influenzata dallo stato e dall'integrità dell'infrastruttura su cui circolano i rotabili.

L'articolo si propone di fare un'analisi bibliografica delle tecniche di misura ed elaborazioni mostrando come l'integrazione fra le misure accelerometriche e delle forze di contatto possa portare ad un miglioramento dell'identificazione e della previsione di comparsa dei difetti dell'armamento.

Lo scopo dello studio è quello di poter fornire elementi e strumenti utili per approcciarsi alla tematica della diagnostica e della manutenzione dell'infrastruttura ferroviaria.

1. Introduzione

Per garantire gli standard di sicurezza richiesti dalla circolazione ferroviaria, le attività di diagnostica e di manutenzione della linea risultano di fondamentale importanza. La diagnostica dell'infrastruttura rappresenta uno strumento indispensabile per l'identificazione tempestiva di danneggiamenti ed usure dell'armamento e consente di poter impostare un'attività manutentiva predittiva che garantisce la sicurezza, limita i disagi alla circolazione ed i costi di intervento.

Nello specifico, il termine diagnostica identifica tutte le metodologie, gli strumenti, e i mezzi impiegati nel-

Summary - The safety of rail transport is affected by the condition and integrity of the infrastructure on which the rolling stock circulates.

The article aims at making a bibliographic analysis of measurement and processing techniques showing how the integration between accelerometric measurements and contact forces can lead to an improvement in the identification and prediction of the onset of permanent way defects.

The purpose of the study is to provide useful elements and tools to approach the issue of diagnostics and maintenance of the railway infrastructure.

1. Introduction

The diagnostic and maintenance activities of the line are of fundamental importance in order to guarantee the safety standards required by rail traffic. Infrastructure diagnostics is an essential tool for the timely identification of damage and wear of the permanent way and allows setting up a predictive maintenance activity that guarantees safety, limits inconvenience to circulation and intervention costs.

Specifically, the term diagnostics identifies all the methodologies, tools, and means used to identify the condition of a system, in the case under analysis of the railway infrastructure.

Instrumented vehicles, dedicated to mobile diagnostics play a leading role in monitoring the infrastructure. The

^(*) Italcertifer S.p.a.

^(**) Politecnico di Milano.

^(***) DIEF, Università degli Studi di Firenze.

^(*) Italcertifer S.p.a.

^(**) Politecnico di Milano.

^(***) DIEF, Università degli Studi di Firenze.

SCIENZA E TECNICA

l'identificazione dello stato di un sistema, nel caso in analisi dell'infrastruttura ferroviaria.

Al fine del monitoraggio dell'infrastruttura un ruolo di primo piano è quello dei veicoli strumentati, dedicati alla diagnostica mobile. Le misure eseguite da questi veicoli permettono di verificare periodicamente lo stato della linea, programmando quindi gli interventi manutentivi e intervenendo in maniera tempestiva nel caso si riscontrino situazioni anomale. Questa strategia manutentiva, largamente diffusa nell'ambito del trasporto ferroviario, può esser ricondotta alla categoria della manutenzione programmata, di tipo ordinario e straordinario.

Recentemente, con lo sviluppo di nuove tecnologie e sistemi di misura fisicamente più compatti e semplici da installare a bordo veicolo, sono diventate di estremo interesse le tecniche di manutenzione predittiva e "on condition", che permettono di intervenire in anticipo rispetto al manifestarsi di una anomalia. A tal fine, la possibilità di disporre di una grande mole di dati diagnostici collezionati con continuità lungo la linea ferroviaria risulta indispensabile.

Indipendentemente dalla logica manutentiva adottata, si evidenzia pertanto l'importanza di misurare delle quantità fisiche che descrivano, direttamente o indirettamente, lo stato di degrado dell'infrastruttura.

La misura delle forze di contatto ruota/rotaia e delle accelerazioni registrate in boccia, o a bordo veicolo, sono così strumenti indispensabili per questo tipo di attività.

Queste possono essere utilizzate non solo per l'identificazione di tali difetti, ma anche per la previsione dei tratti di linea maggiormente predisposti a subire determinate dinamiche di danneggiamento e degrado.

In questo articolo, si propone una analisi critica delle alternative a disposizione nell'ambito della diagnostica e della manutenzione dell'armamento.

In dettaglio, nella Sezione 3 vengono presentati i meccanismi di deterioramento dell'armamento, distinguendo i difetti di rotaia, di geometria di binario e dei vari componenti dell'armamento. In seguito, la Sezione 4 elenca le tecnologie e i metodi disponibili ai fini diagnostici. Le Sezioni 5 e 6 presentano le metodologie di diagnostica basate rispettivamente sulle misure di accelerazioni a bordo veicolo, e sulle misure delle forze di contatto ruota/rotaia. La Sezione 7 presenta i risultati di una campagna sperimentale condotta nell'ambito del progetto DynoTRAIN, ed è dedicata ai parametri di maggior influenza sul deterioramento dell'armamento. Infine, nella Sezione 8 vengono tratte le conclusioni di questo lavoro.

2. Meccanismi di deterioramento dell'armamento

Con il termine armamento si richiama il complesso infrastrutturale ferroviario costituito dalle rotaie, le traversi, gli attacchi e i deviatori. Il complesso costituito dall'armamento e la massicciata prende invece il nome di sovra-

measurements carried out by these vehicles allow periodically checking the condition of the line, thus scheduling maintenance interventions, and intervening in a timely manner in the event of abnormal situations. This maintenance strategy, widely used in the field of rail transport, can be traced back to the category of scheduled, routine, and extraordinary maintenance.

Recently, with the development of new technologies and measurement systems that are more physically compact and easier to install on board the vehicle, predictive and "on condition" maintenance techniques have become of extreme interest, which allow intervening in advance of the occurrence of an anomaly. To this end, the possibility of having a large amount of diagnostic data collected continuously along the railway line is essential.

Regardless of the maintenance logic adopted, it is therefore important to measure the physical quantities that directly or indirectly describe the condition of degradation of the infrastructure.

The measurement of wheel/rail contact forces and accelerations recorded in the axlebox, or on board the vehicle, are thus essential tools for this type of activity.

These can be used not only for the identification of such defects, but also for the prediction of the sections of line most prone to undergoing certain damage and degradation dynamics.

In this article, we propose a critical analysis of the alternatives available in the field of permanent way diagnostics and maintenance.

In detail, Section 3 presents the deterioration mechanisms of the permanent way, distinguishing the rail, track geometry and the various components of the permanent way defects. Then, Section 4 lists the technologies and methods available for diagnostic purposes. Sections 5 and 6 present diagnostic methodologies based on in-vehicle acceleration measurements, and wheel/rail contact force measurements, respectively. Section 7 presents the results of an experimental campaign conducted as part DynoTRAIN project and is dedicated to the parameters of greatest influence on the deterioration of the permanent way. Finally, Section 8 draws the conclusions of this work.

2. Permanent way deterioration mechanisms

The term permanent way refers to the railway infrastructure complex consisting of rails, sleepers, fastenings, and turnouts. The complex consisting of the permanent way and the ballast is instead called the railway superstructure, while the sub-base on which the superstructure rests is part of the subgrade (Fig. 1) [1].

The purpose of the permanent way is to guide the running of rolling stock, withstand the static and dynamic loads that arise from the wheel/rail interaction and transmit them to the subgrade, bridge deck or bottom of the tunnel.

To ensure the safe running of rolling stock, the infrastructure must be built and maintained within strict geometric standards defined in the regulatory frameworks [2]

SCIENZA E TECNICA

struttura ferroviaria, mentre il sottofondo su cui poggia la sovrastruttura fa parte del corpo stradale (Fig. 1) [1].

Lo scopo dell'armamento è quello di guidare la marcia dei rotabili, sopportare carichi statici e dinamici che nascono dall'interazione ruota/rotaia e di trasmetterli al sottofondo, all'impalcato del ponte o al fondo della galleria.

Per garantire la corsa in sicurezza del materiale rotabile l'infrastruttura deve essere realizzata e mantenuta entro stretti canoni geometrici definiti nei quadri normativi [2] e ripresi nelle istruzioni tecniche dei gestori dell'infrastruttura ferroviaria [3].

Il fattore di gran lunga più significativo che contribuisce al deterioramento dell'armamento sono i carichi dinamici a cui esso è ciclicamente sottoposto dal transito veicolare [4].

I carichi dinamici sono direttamente correlati alle caratteristiche del veicolo (carico assiale, capacità di iscrizione in curva, capacità di ammortizzare i carichi verticali), la sua velocità e la geometria del binario.

Le irregolarità del binario (geometriche o della superficie di rotolamento), seppur modeste, possono portare ad un aumento delle forze dinamiche scambiate tra ruota e rotaia ed innescare un meccanismo che porta alla comparsa di difetti più severi nei componenti dell'armamento.

Il risultato è un'accelerazione nel degrado dell'armamento ed un trasferimento di carichi sempre più gravosi a tutte le parti dell'infrastruttura: ancoraggi, traverse, massicciata e sottofondo.

I fattori che contribuiscono al deterioramento dell'armamento possono essere distinti in tre classi:

- Utilizzo: usura da contatto fisico, carichi statici e dinamici.
- Ambiente: influenza climatica, infiltrazioni idriche.
- Errori: componenti difettosi, errori di installazione.

Il logoramento infrastrutturale, il più delle volte, non è causato da uno solo di questi fattori, ma da una loro combinazione; e la sua evoluzione è funzione della frequenza nella circolazione dei veicoli, delle caratteristiche degli stessi oltre che della velocità di percorrenza della linea.

Oltre alle forze dinamiche scambiate tra rotabile e binari, hanno influenza sul danneggiamento dei componenti dell'armamento anche le forze statiche e quasi-statiche.

Nella Tab. 1, per i due sottosistemi veicolo e infrastruttura, sono riportati parametri e caratteristiche che influenzano l'entità ed il tipo di forze di contatto ruota/rotaia, e quindi, anche la vita dell'armamento.

La conseguenza di elevate forze di contatto comporta molteplici meccanismi di danneggiamento dell'armamento che possono essere raggruppati in diverse classi, descritte brevemente nei paragrafi successivi.

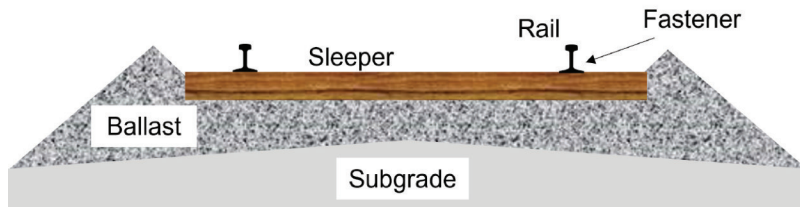


Figura 1 - Componenti principali che costituiscono l'armamento ferroviario.
Figure 1 - Main components that make up the permanent way.

and included in the technical instructions of the railway infrastructure managers [3].

By far the most significant factor contributing to the deterioration of the permanent way is the dynamic loads to which it is cyclically subjected by vehicular transit [4].

Dynamic loads are directly related to the characteristics of the vehicle (axial load, curve negotiation capability, vertical load absorption capacity), its speed and track geometry.

The irregularities of the track (geometric or of the rolling surface), albeit modest, can lead to an increase in the dynamic forces exchanged between wheel and rail and trigger a mechanism that leads to the onset of more severe defects in the components of the permanent way.

The result is an acceleration in the degradation of the permanent way and an increasingly burdensome transfer of loads to all parts of the infrastructure: anchors, sleepers, ballast, and subgrade.

The factors that contribute to the deterioration of the permanent way can be distinguished into three categories:

- Use: physical contact wear, static and dynamic loads.
- Environment: climatic influence, water infiltration.
- Errors: defective components, installation errors.

Infrastructural wear, most of the time, is not caused by just one of these factors, but by a combination of them; and its evolution is a function of the frequency in the circulation of vehicles, their characteristics as well as the speed of travel of the line.

In addition to the dynamic forces exchanged between rolling stock and tracks, static and quasi-static forces also have an influence on the damage of the permanent way components.

In Tab. 1, parameters and characteristics are reported for the two vehicle and infrastructure subsystems, that influence the amount and type of wheel/rail contact forces, and therefore, also the life of the permanent way.

The consequence of high contact forces involves multiple permanent way damage mechanisms that can be grouped into different classes, briefly described in the following paragraphs.

2.1. Rail defects

Rail defects, generated by the transit of rolling stock, are linked to fatigue and wear mechanisms of the rolling surface

SCIENZA E TECNICA

2.1. Difetti della rotaia

I difetti della rotaia, generati dal transito dei rotabili, sono legati a meccanismi di fatica e usura della tavola di rotolamento [5]. I principali sono catalogabili nei seguenti gruppi:

- Fatica da contatto di rotolamento (RCF)

L'RCF comprende una famiglia di meccanismi di danneggiamento indotti da ripetuti cicli di carico associati a contatti di rotolamento [6][7]. I danni risultanti sulla rotaia sono potenzialmente gravi da un punto di vista di integrità strutturale. La cricca, indipendentemente dal difetto materiale, si genera sulla superficie di rotolamento della rotaia o negli strati immediatamente al di sotto di essa. La propagazione delle cricche può portare al cedimento della stessa rotaia. I meccanismi di danneggiamento RCF più rilevanti sono:

- *Head Checking*: formazione di cricche oblique superficiali filiformi (*Head checks*) che enucleano, generalmente sul fianco interno della rotaia, in presenza di una combinazione di alti carichi normali ed elevati scorrimenti tangenziali rispetto alla superficie di contatto (Fig. 2).
- *Spalling*: distaccamento di particelle di materiale dalla superficie della rotaia che si presenta a seguito della crescita e fusione delle *head checks* sotto la superficie di rotolamento (Fig. 2).
- *Shelling*: perdita di rilevanti parti metalliche che si verificano sul fianco interno della rotaia a seguito di alti stress nel punto di contatto ruota/rotaia. La cricca si genera al di sotto della superficie in presenza di inclusioni nell'acciaio e avanza longitudinalmente alla rotaia.
- *Squat*: avvallamento poco profondo sulla testa della rotaia causato da cricche sub superficiali.

- Usura ondulatoria

L'usura ondulatoria è il risultato di una complessa combinazione di deformazione plastica e di asportazione del materiale della rotaia e si manifesta macroscopicamente secondo una successione di impronte, localizzate su alcuni tratti del binario, reciprocamente distanziate [8]. La marezzatura (Fig. 3) è un tipo di difetto ondulatorio della tavola di rotolamento caratterizzato da una ridotta lunghezza d'onda (30-300 mm) che si presenta di solito sulla rotaia interna delle curve. Tale difetto non compromette la sicurezza di mar-

[5]. The main ones can be classified into the following groups:

- *Rolling Contact Fatigue (RCF)*

The RCF comprises a family of damage mechanisms induced by repeated load cycles associated with rolling contacts [6][7]. The resulting damage to the rail is potentially serious from a structural integrity point of view. Regardless of the material defect, the crack is generated on the rolling surface of the rail or in the layers immediately below it. The propagation of cracks can lead to the subsidence of the rail itself. The most important RCF damage mechanisms are:

- *Head Checking*: formation of oblique threadlike surface

Tabella 1 – Table 1

Parametri che impattano sul deterioramento dell'armamento
Parameters that impact on the deterioration of the permanent way

Sottosistema Subsystem	Caratteristiche Features	Influenza del Sottosistema Subsystem Influence
Veicolo Vehicle	<ul style="list-style-type: none">• Velocità• Speed• Carico asse• Axis load• Masse non sospese• Unsprung masses• Sospensioni• Suspensions• Profilo ruota• Wheel profile• Spaziatura assi, ecc.• Axis spacing, etc.	<ul style="list-style-type: none">• Forze statiche• Static forces• Forze quasi-statiche• Quasi-static forces• Forze dinamiche• Dynamic forces
	<ul style="list-style-type: none">• Ruota (condizione corrente come spiattellamenti e corrugazione ruota)• Wheel (current condition such as wheel splay and corrugation)	<ul style="list-style-type: none">• Forze dinamiche• Dynamic forces
Linea Line	<ul style="list-style-type: none">• Geometria di progetto della linea (curve ecc.)• Line design geometry (curves etc.)	<ul style="list-style-type: none">• Forze statiche• Static forces• Forze quasi-statiche• Quasi-static forces
	<ul style="list-style-type: none">• Qualità della geometria del binario• Quality of track geometry	<ul style="list-style-type: none">• Forze dinamiche• Dynamic forces
	<ul style="list-style-type: none">• Usura ondulatoria• Wave wear	<ul style="list-style-type: none">• Forze ad alta frequenza• High frequency forces
	<ul style="list-style-type: none">• Difetti della rotaia come giunti e saldature scadenti• Rail defects such as poor joints and welds	<ul style="list-style-type: none">• Forze impulsive• Impulsive forces

SCIENZA E TECNICA

cia, ma induce un aumento delle vibrazioni e dei carichi dinamici che hanno un'influenza negativa sui componenti dell'armamento ed il materiale rotabile [9].

- Fenditure sul gambo e nei fori di giunzione

Sono cricche che nascono all'estremità della rotaia tipicamente in prossimità di giunti di collegamento danneggiati, come quello riportato in Fig. 4. I punti di innescio, caratterizzati da elevate concentrazioni di sforzo, sono il raccordo tra fungo e gambo della rotaia ed i fori per il fissaggio delle ganasce.

2.2. Deterioramento della geometria del binario

La geometria del binario tende nel tempo a discostarsi da quella iniziale di costruzione a causa dell'assestamento del tracciato, ma soprattutto dei carichi legati all'utilizzo della linea. Le deviazioni nella geometria del binario sono definite come irregolarità del binario e sono utilizzate principalmente per caratterizzare la qualità del tracciato e per pianificare le attività di manutenzione dell'infrastruttura [10][11]. Le principali tipologie, definite nei documenti [2][3] e descritte anche in Fig. 5, includono:

- Allineamento: Deviazione in direzione laterale di ciascuna fila di rotaia valutata rispetto alla relativa linea di riferimento (posizione laterale media) ed espressa nei diversi campi di lunghezze d'onda D0, D1, D2 e D3.
- Scartamento: Difetto di distanza tra i fianchi attivi dei funghi delle due rotaie, misurata dal piano di rotolamento fino a 14 mm sotto di esso, valutato rispetto al valore nominale.
- Livello longitudinale: Deviazione in direzione verticale di ciascuna fila di rotaia valutata rispetto alla relativa linea di riferimento (posizione verticale media) ed espressa nei diversi campi di lunghezze d'onda D0, D1, D2 e D3.
- Sopraelevazione: Differenza altimetrica tra le superfici di rotolamento delle due rotaie.
- Sghembo: Errore di planarità fra i quattro punti di contatto ruota-rotaia in due distinte sezioni ed espressa come un gradiente tra i due punti di misura.

2.3. Deterioramento dei componenti dell'armamento

Il deterioramento dell'infrastruttura coinvolge anche tutte le parti poste al di sotto delle rotaie. In particolare, riguarda:

- Attacchi: Gli attacchi sono i sistemi di fissaggio delle rotaie alle traverse. Limitano gli spostamenti laterali, longitudinali e le rotazioni delle rotaie, causati dalle forze di interazione con il veicolo e da quelle che nascono a fronte delle variazioni di temperatura delle rotaie stesse. Il cedimento di uno di questi elementi (Fig. 6) comporta un'influenza significativa sulle risposte dinamiche dei componenti della sottostruttura e mina

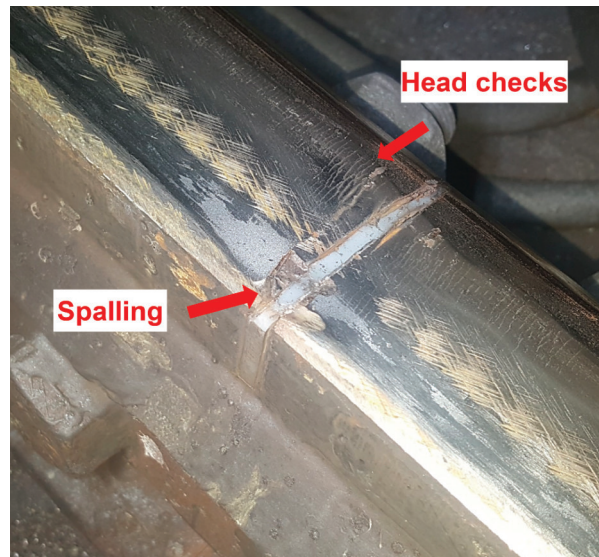


Figura 2 - Spalling ed head checks.
Figure 2 - Spalling and head checks.

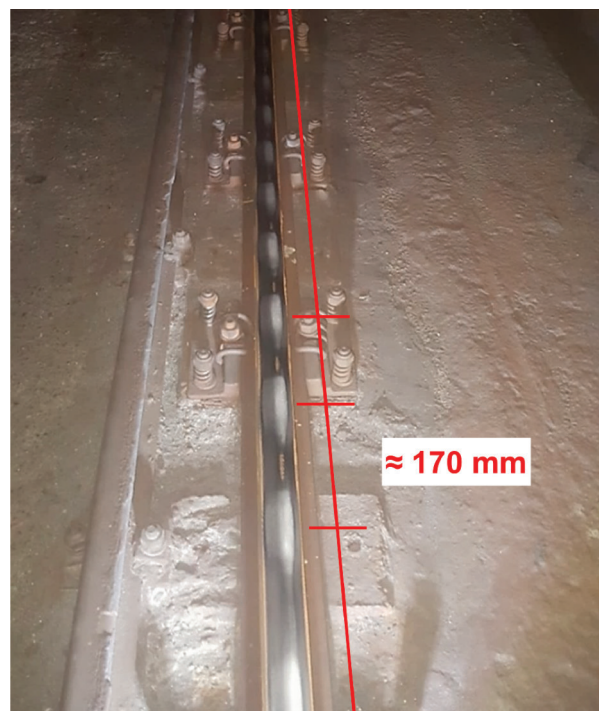


Figura 3 - Marezzatura.
Figure 3 - Corrugation.

cracks (Head checks) that enucleate, generally on the inner side of the rail, in the presence of a combination of high normal loads and high tangential slides with respect to the contact surface (Fig. 2).

- Spalling: detachment of material particles from the rail

SCIENZA E TECNICA

la longevità della linea e la sicurezza di marcia del veicolo [12][13].

- **Traverse:** Le traverse vincolano i movimenti delle rotaie e permettono di trasferire e redistribuire efficacemente sulla massicciata le forze generate dal traffico veicolare [14]. Queste possono essere realizzate in legno, cemento armato e acciaio e sono soggette a diversi meccanismi di usura/cedimento.
- **Ballast:** Il ballast, o massicciata, è lo strato di pietrisco su cui poggiano le traverse. I compiti più importanti che assolve sono: ancorare e stabilizzare il binario dai movimenti laterali, longitudinali e verticali, distribuire

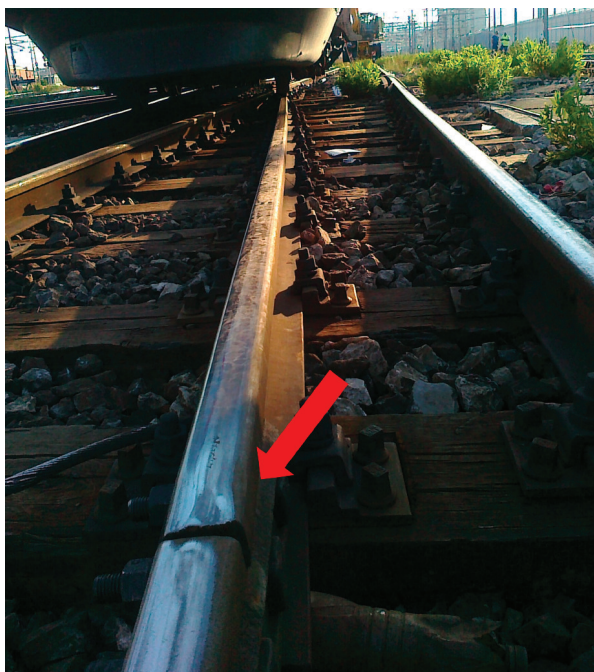


Figura 4 - Giunto di collegamento danneggiato.
Figure 4 - Damaged connection joint.

surface that occurs as a result of the growth and fusion of the head checks below the rolling surface (Fig. 2).

- **Shelling:** loss of consistent metal parts that occur on the inner side of the rail as a result of high stress at the wheel/rail contact point. The crack is generated below the surface in the presence of inclusions in the steel and propagates longitudinally to the rail.
- **Squat:** shallow depression on the head of the rail caused by sub-surface cracks.
- **Corrugation**

Corrugation is the result of a complex combination of plastic deformation and removal of the rail material and appears macroscopically according to a sequence of footprints, located on some sections of the track, mutually spaced [8]. Short-pitch corrugation (Fig. 3) is a type of rolling surface wave defect characterised by a short wavelength (30-300 mm) that usually occurs on the inner rail of curves. This defect does not compromise driving safety but induces an increase in vibrations and dynamic loads that have a negative impact on the components of the permanent way and the rolling stock [9].

- **Cracks on the web and in the junction holes**

These are cracks that arise at the end of the rail, typically close to damaged connection joints, such as the one shown in Fig. 4. The trigger points, characterised by high stress concentrations, are the connection between the head and the rail web and the holes for fixing the fishing plate.

2.2. Track geometry deterioration

The geometry of the track tends to deviate over time from that of the initial construction due to the settlement of the track, but above all due to the loads related to the use of the line. Deviations in track geometry are defined as track irregularities and are mainly used to characterise track quality and to plan infrastructure maintenance activities [10][11]. The main types, defined in the documents [2][3] and also described in Fig. 5, include:

- **Alignment:** Deviation in lateral direction of each rail row evaluated with respect to the relative reference line (mean lateral position) and expressed in the different wavelength fields D0, D1, D2 and D3.
- **Gauge:** Defect in the distance between the active sides of the rail heads of the two rails, measured by the rolling surface up to 14 mm below it, evaluated with respect to the nominal value.
- **Longitudinal level:** Deviation in vertical direction of each rail row evaluated with respect to the relative reference line (average vertical position) and expressed in the different wavelength fields D0, D1, D2 and D3.
- **Cross level (also called cant or superelevation):** Altimetric difference between the rolling surfaces of the two rails.

SCIENZA E TECNICA

le forze dalle traverse al sottofondo, ed aiutare ad assorbire gli urti derivanti dai carichi dinamici. La qualità della geometria del binario è strettamente correlata all'assestamento della massicciata e alla presenza di deconsolidamenti al di sotto delle traverse. Questi ultimi rappresentano una delle più frequenti cause di danneggiamento della linea; il meccanismo di danneggiamento è da ricondurre alle interazioni dinamiche sfavorevoli tra la traversa ed il sottofondo su cui questa va ad impattare (Fig. 7). Il risultato è un progressivo peggioramento del fenomeno che, se non tempestivamente riparato, può portare ad instabilità locali costose come il cedimento del sottofondo [15][16].

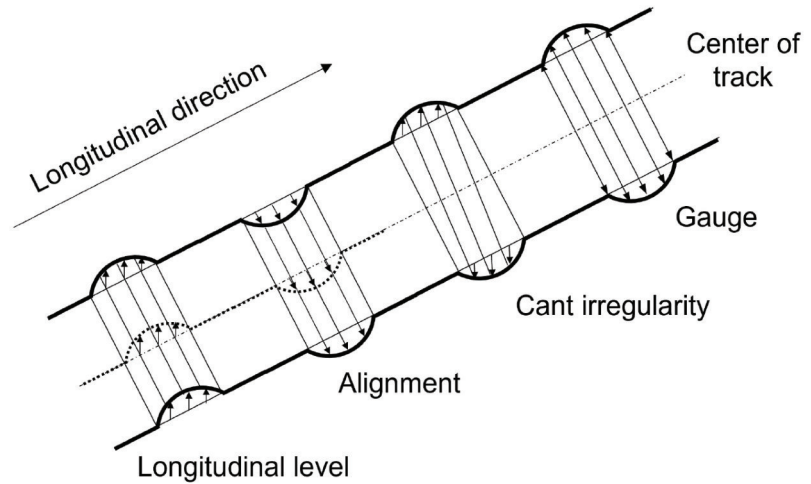


Figura 5 - Definizione delle irregolarità geometriche del binario.

Figure 5 - Definition of track geometric irregularities.

3. Tecnologie e metodi disponibili per la diagnostica

Oggi giorno sono disponibili diverse tecnologie e metodologie per la diagnostica dell'infrastruttura. Ciascuna tecnologia e la relativa metodologia che la impiega ha i suoi pro ed i suoi contro. L'integrazione di diversi sistemi può, quindi, permettere di ottenere una visione più completa dello stato dell'infrastruttura rendendo le diverse informazioni complementari.



Figura 6 - Esempio di attacco integro e attacco ceduto.

Figure 6 - Example of intact and damaged fastening.

- *Twist:* Flatness error between the four wheel-rail contact points in two different sections and expressed as a gradient between the two measurement points.

2.3. Deterioration of permanent way components

The deterioration of the infrastructure also involves all the parts under the rails. In particular, it concerns:

- *Fastenings:* Fastenings are the rail fixing systems to the sleepers. They limit the lateral and longitudinal displacements and rotations of the rails, caused by the interaction forces with the vehicle and by those arising from the temperature variations of the rails themselves. The failure of one of these elements (Fig. 6) has a significant influence on the dynamic responses of the substructure components and undermines the longevity of the line and the running safety of the vehicle [12][13].
- *Sleepers:* The sleepers constrain the movements of the rails and allow the forces generated by vehicular traffic to be effectively transferred and redistributed on the ballast [14]. These can be made of wood, reinforced concrete and steel and are subject to different wear/failure mechanisms.
- *Ballast:* The ballast, or massif, is the layer of stone on which the sleepers rest. The most important tasks it performs are: anchoring and stabilising the track from lateral, longitudinal and vertical movements, distributing forces

SCIENZA E TECNICA

Le tecnologie disponibili rendono rilevabili tutti i difetti dell'armamento definiti nel paragrafo precedente.

In particolare, partendo dai difetti di geometria del binario questi sono rilevabili attraverso:

- sistemi di misura con assi telescopici, che vengono spinti contro il binario da attuatori, tipicamente pneumatici, per garantire l'aderenza tra le due superfici;
- sistemi di misura ottici, tipo laser, che sono costituiti da una sorgente, una ricevente ed eventuali specchi per deflettere il fascio;
- sistemi di misura di tipo inerziale, costituiti da un insieme di accelerometri e giroscopi che consentono di definire la posizione del binario nello spazio.

I primi due sistemi sono tipicamente impiegati per la ricostruzione della posizione del binario attraverso un sistema corda-freccia che prevede la misura della posizione del binario in tre punti. Questa metodologia ha una funzione di trasferimento che distorce il segnale misurato. Conoscendo tale funzione di trasferimento, si può tenere conto di questo effetto e compensarlo effettuando la cosiddetta operazione di "ricoloratura", come descritto nell'Appendice A della norma EN 13848-1 [2]. Come già anticipato, invece, i sistemi di misura di tipo inerziale permettono di ricavare la posizione assoluta del binario attraverso metodologie specifiche, quali, ad esempio, la doppia integrazione.

Quest'ultima soluzione è direttamente utilizzabile anche su veicoli commerciali, tuttavia, mentre per ricavare il livello longitudinale del binario non occorrono altre informazioni, per la valutazione di altri parametri come allineamento e sghembo è necessaria anche la conoscenza del punto di contatto ruota rotaia [17].

Tecnologie analoghe sono impiegate per il rilievo dei difetti di mazzatura della rotaia:

- carrelli manuali (ad es. CAT o RMF-1100) che consentono la misura a partire dal rotolamento degli stessi eventualmente utilizzando dei tastatori che vengono premuti sulla rotaia;
- sistemi ottici basati su tecnologia laser che possono essere installati su veicoli diagnostici in modo da consentire una maggiore velocità di rilevazione;
- sistemi accelerometrici basati sull'impiego di accelerometri montati in bocca.

Per rilevare, invece, difetti sulle rotaie associate alla presenza di cricche viene tipicamente impiegata la tecnologia ad ultrasuoni: diverse sonde (di solito inclinate di 0° ,

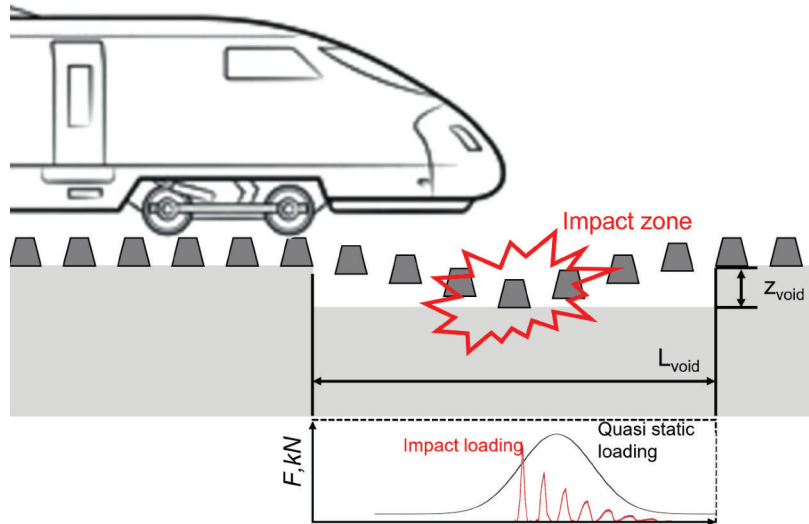


Figura 7 - Meccanismo di danneggiamento della linea causato da vuoti sotto le traverse.

Figure 7 - Mechanism of line damage caused by voids under the sleepers.

from the sleepers to the subgrade, and helping to absorb shocks deriving from dynamic loads. The quality of the track geometry is closely related to the settlement of the ballast and the presence of breakups below the sleepers. The latter represent one of the most frequent causes of damage to the line; the damage mechanism can be traced back to the unfavourable dynamic interactions between the sleeper and the subgrade on which it impacts (Fig. 7). The result is a progressive worsening of the phenomenon that, if not promptly repaired, can lead to costly local instabilities such as subgrade subsidence [15][16].

3. Available technologies and methods for diagnostics

Nowadays, different technologies and methodologies are available for infrastructure diagnostics. Each technology and the related methodology that uses it has its advantages and disadvantages. The integration of different systems can, therefore, allow obtaining a more complete view of the condition of the infrastructure by making the different information complementary.

The available technologies make all the permanent way defects defined in the previous paragraph detectable.

In particular, starting from the track geometry defects, these can be detected through:

- measuring systems with telescopic axes, which are pushed against the track by actuators, typically pneumatic, to ensure adherence between the two surfaces;

SCIENZA E TECNICA

35° e 70°) vengono collegate da un punto di vista acustico con la rotaia mediante interposizione di un liquido, usualmente acqua, e provvedono a generare delle onde ad elevata frequenza, sulla base della loro riflessione/assorbimento rilevata da un ricevitore, si stima la presenza di difetti sulla rotaia stessa. Di conseguenza, le tecniche ad ultrasuoni consentono di rilevare anche la presenza di singolarità lungo la linea (ad es. giunti, deviatoi).

L'utilizzo dei sistemi di visione, invece, può consentire il rilievo della presenza di ostacoli sull'infrastruttura ferroviaria (ad esempio alla riapertura del servizio passeggeri) o di alcuni difetti macroscopici, quali la mancanza di parte dei sistemi di attacco. Come già evidenziato per i sistemi ad ultrasuoni, anche i sistemi di visione consentono di rilevare facilmente la presenza di singolarità lungo la linea.

Per quello che riguarda, invece, il monitoraggio delle condizioni della massicciata questo tipicamente non viene effettuato direttamente, ma ne vengono valutate le conseguenze in termini di geometria del binario. Esistono tuttavia tecnologie che consentono di avere informazioni sulla rigidità della massicciata stessa, che può essere un indicatore [18] di eventuali problemi agli elementi che la compongono. Tra i sistemi disponibili ed impiegabili per il monitoraggio continuo vanno annoverati quelli sviluppati dalla *China Academy of Railway Science* (CARS) [19], TTIC [20], SBB, e Banverket [21][22]. Tra questi sistemi, i primi tre si basano su misure di geometria del binario a fronte di una applicazione di diversi livelli di carico. Il sistema sviluppato da Banverket, invece, si basa su un'eccitazione dinamica dell'armamento attraverso delle masse oscillanti posizionate sopra gli assi del veicolo di misura. La rigidità della massicciata viene poi ottenuta a partire da misure di forza e accelerazione. Misure effettuate con tecniche tipo georadar (GPR, *Ground Penetrating Radar*) possono essere impiegate per verificare variazioni delle proprietà degli elementi della massicciata [23].

4. Misura delle accelerazioni

Una soluzione versatile mirata al monitoraggio dello stato di degrado dei binari si basa sull'impiego di sensori installati a bordo veicolo, che misurano le accelerazioni indotte dalle irregolarità del binario.

Nello specifico, la posizione di installazione dei sensori nonché la loro tipologia risultano strettamente dipendenti dal target della campagna di misura. Le lunghezze d'onda caratteristiche del fenomeno di interesse determinano quale sia la posizione più adeguata all'installazione dei sensori, visti gli effetti di filtro introdotti dai due stadi di sospensione. Ne consegue che le posizioni di installazione tipicamente adottate prevedano sensori montati in boccola, sui carrelli o in cassa [24]. Di seguito si propongono alcuni esempi di applicazioni mirate all'identificazione e monitoraggio dei difetti del binario, distinguendo la posizione di installazione degli accelerometri.

- *optical measuring systems, such as lasers, which consist of a source, a receiver and any mirrors to deflect the beam;*
- *inertial measurement systems, consisting of a set of accelerometers and gyroscopes that allow defining the position of the track in the space.*

The first two systems are typically used for the reconstruction of the track position through a chord-sagitta system that involves measuring the track position at three points. This methodology has a transfer function that distorts the measured signal. Knowing this transfer function, this effect can be considered and can be compensated for by carrying out the so-called "re-colouring" operation, as described in Appendix A of EN 13848-1 regulation [2]. As previously mentioned, however, inertial measurement systems allow obtaining the absolute position of the track through specific methodologies, such as, for example, double integration.

This latter solution is directly applicable to commercial vehicles as well; however, while no additional information is needed to determine the longitudinal level of the track, for assessing other parameters such as alignment and twist, knowledge of the wheel-rail contact point is also required [17].

Similar technologies are used for the detection of short pitch corrugation defects:

- *manual bogies (e.g. CAT or RMF-1100) that allow measurement starting from the rolling of the same, possibly using feelers that are pressed on the rail;*
- *optical systems based on laser technology that can be installed on diagnostic vehicles in order to allow a faster detection speed;*
- *accelerometric systems based on the use of axlebox mounted accelerometers.*

Ultrasonic technology is typically used to detect defects on the rails associated with cracks: several probes (usually inclined at 0°, 35° and 70°) are acoustically connected to the rail by the interposition of a liquid, usually water, and generate high-frequency waves. Based on their reflection/absorption detected by a receiver, the presence of defects on the rail itself is estimated. Consequently, ultrasonic techniques also allow detecting the presence of singularities along the line (e.g. joints, turnouts).

The use of vision systems, on the other hand, can allow the detection of obstacles on the railway infrastructure (for example at the reopening of the passenger service) or of some macroscopic defects, such as the lack of part of the fastening systems. As already highlighted for ultrasonic systems, vision systems also allow easily detecting the presence of singularities along the line.

As far as the monitoring of the conditions of the ballast is concerned, this is typically not carried out directly, but the consequences in terms of track geometry are evaluated. However, there are technologies that allow obtaining information on the rigidity of the ballast itself, which can in-

SCIENZA E TECNICA

In primo luogo, si considerino sensori installati in boccola, ovvero i più prossimi alla zona di contatto ruota/rotaia. Pertanto, le accelerazioni registrate da questi sensori risulteranno estremamente elevate, e generalmente non influenzate da effetti di amplificazione dinamica (primi modi deformabili della sala nell'ordine dei 70 Hz). Per questo motivo, vengono tipicamente adottati nel monitoraggio di difetti di tipo *rail roughness* (caratterizzati dalle lunghezze d'onda più corte, inferiori a 1000 mm) nonché difetti superficiali.

Ad esempio, accelerometri installati in corrispondenza delle boccole dei veicoli della linea metropolitana di Milano hanno permesso il riconoscimento di difetti calcolando l'RMS dei segnali misurati a bordo veicolo [25]. In un'applicazione simile, è stato sviluppato un sistema di monitoraggio di difetti di mazzatura basato su misure di accelerazione in boccola [26]. Un setup di misura simile è stato installato su un treno in servizio passeggeri lungo le linee giapponesi [27].

I sensori installati in boccola si sono dimostrati anche estremamente efficaci nell'identificare difetti superficiali delle rotaie. Ad esempio, sensori triassiali sono stati usati per riconoscere l'occorrere di *squat* [28], difetti superficiali causati da fenomeni di fatica che possono comportare rallentamenti della velocità di esercizio per prevenire il rischio di rotture delle rotaie. In applicazioni successive, i medesimi autori hanno impiegato la stessa strumentazione per monitorare l'evoluzione temporale e pertanto l'integrità dei giunti [29][30], mediante passaggi successivi del veicolo strumentato.

Se da un lato i sensori installati in boccola si sono dimostrati efficaci nel monitorare e riconoscere difetti della rotaia, dall'altro è importante sottolineare come questi possano essere soggetti a problemi di durabilità: le boccole sono soggette a livelli di accelerazione estremamente elevati, nell'ordine delle centinaia di g in corrispondenza di giunti e scambi. Pertanto, questi sensori sono spesso soggetti a danneggiamenti, con conseguenti tempi e costi di manutenzione rilevanti.

Negli anni le attività di ricerca si sono quindi concentrate su soluzioni che prevedano l'installazione di accelerometri sui carrelli dei veicoli, in modo tale da beneficiare dell'effetto di filtro del primo stadio di sospensione. Si precisa che questa soluzione è efficace nello studio di difetti di lunghezze d'onda maggiori rispetto al passo sale (tipicamente nell'ordine di 3 m). In quest'ambito, è stata dimostrata la possibilità di stimare il livello longitudinale e l'allineamento rispettivamente mediante accelerazioni verticali [31] e laterali [32] misurate da sensori carrello.

Da ultimo, si considerino sensori installati in cassa. In questo caso, le accelerazioni misurate saranno filtrate da entrambi gli stadi di sospensione. Ne consegue che questo setup di misura risulta particolarmente adeguato nel caso di lunghezze d'onda maggiori, spesso legate a tematiche di ride comfort, e ad applicazioni a bassa velocità. Esempi

dicate [18] possible issues with the elements that compose it. Among the systems available and usable for continuous monitoring are those developed by the China Academy of Railway Science (CARS) [19], TTCI [20], SBB, and Banverket [21][22]. Among these systems, the first three are based on track geometry measurements against an application of different load levels. The system developed by Banverket, on the other hand, is based on a dynamic excitation of the permanent way through oscillating masses placed above the axes of the measuring vehicle. The stiffness of the ballast is then obtained from force and acceleration measurements. Measurements made with georadar techniques (GPR, Ground Penetrating Radar) can be used to verify variations in the properties of the elements of the ballast [23].

4. Measurement of accelerations

A versatile solution aimed at monitoring the degradation condition of the tracks is based on the use of sensors installed on board the vehicle, which measure the accelerations induced by track irregularities.

Specifically, the installation position of the sensors as well as their type are strictly dependent on the target of the measurement campaign. The characteristic wavelengths of the phenomenon of interest determine which is the most appropriate position for the installation of the sensors, given the filtering effects introduced by the two suspension stages. It follows that the installation positions typically adopted include sensors mounted on the axle box, on the bogies or in the body [24]. Below are some examples of applications aimed at identifying and monitoring track defects, distinguishing the installation position of the accelerometers.

First of all, consider the sensors installed on the axle boxes, i.e. the ones closest to the wheel/rail contact area. Therefore, the accelerations recorded by these sensors will be extremely high, and generally unaffected by dynamic amplification effects (first deformable modes of the wheel set in the order of 70 Hz). For this reason, they are typically adopted in the monitoring of rail roughness defects (characterised by shorter wavelengths, less than 1000 mm) as well as surface defects.

For example, accelerometers installed at the axle boxes of the vehicles of the Milan metro line allowed the identification of defects by calculating the RMS of the signals measured on-board the vehicle [25]. In a similar application, a corrugation defect monitoring system based on axle box acceleration measurement was developed [26]. A similar sized setup was installed on a passenger service train along the Japanese lines [27].

The sensors installed in the axle box have also proved to be extremely effective in identifying surface defects of the rails. For example, triaxial sensors have been used to identify the occurrence of squats [28], surface defects caused by fatigue phenomena that can lead to slowdowns in operating speed to prevent the risk of rail breakage. In subsequent applications, the same authors used the same instrumentation

SCIENZA E TECNICA

di applicazioni basate sull'impiego di accelerometri in cassa sono stati proposti in [27] e [33].

Indipendentemente dalla tipologia di sensori e posizioni di installazione, le accelerazioni misurate a bordo veicolo sono generalmente utilizzate per risolvere problemi inversi, che mirano cioè ad identificare il profilo del binario responsabile delle accelerazioni registrate. In questo contesto, una tecnica comunemente utilizzata ricorre all'utilizzo di filtri di Kalman, come mostrato ad esempio in [34]. Tali tecniche si basano sulla definizione di un osservatore dello stato di un sistema dinamico a partire da misure affette da rumore. Le accelerazioni misurate possono anche essere trattate secondo opportune tecniche di elaborazione dei segnali. Tra queste, si ricorda la doppia integrazione delle accelerazioni unitamente al metodo della corda, utilizzati con successo nella ricostruzione della geometria di una linea ad alta velocità in [35]. Altre tecniche popolari fanno uso di trasformate *wavelet* ed analisi spettrali [27].

Le metodologie citate mirano all'identificazione del profilo di geometria del binario, e pertanto sono associate ad un significativo numero di sensori e costi computazionali generalmente non trascurabili, come dimostrato in [36]. Pertanto, questi sistemi potrebbero rivelarsi non adeguati nel caso di applicazioni su veicoli commerciali. L'attenzione è stata quindi rivolta verso lo sviluppo di tecniche per monitorare lo stato di degrado della geometria mediante indici sintetici, quali valori rms o di picco lungo finestre prefissate. Ad esempio, con l'obiettivo di monitorare l'evoluzione del livello longitudinale, è stato utilizzato il valore rms di accelerazione verticale carrello per stimare i valori di picco e di rms del livello longitudinale [37][38][39]. In questo contesto, tecniche di *machine learning* stanno assumendo via via maggior rilevanza [40], quali metodi probabilistici (MARKOV chain [41]), e di classificazione (*Support Vector Machine*, *Bayesian* [42][43]), impiegati per predire il degrado delle condizioni del binario.

5. Misura delle forze di contatto ruota/rotaia

Le tecniche di misura delle forze di contatto fra ruota e rotaia sono variegata e basate sulla deformazione di uno o più elementi sottoposti alle forze stesse.

La misura delle forze ha finora avuto un forte impiego nel campo della sicurezza dei rotabili, per i quali in Europa la norma EN14363 [44] ne richiede l'utilizzo ai fini dell'ottenimento dei permessi di circolazione, in particolare per veicoli di nuova progettazione.

La conoscenza dei carichi in esercizio consente anche di fornire dati utili alla riprogettazione dei rotabili (con focus incentrato sulla riduzione delle masse del veicolo) e di supportare un tipo di manutenzione più efficace e sicura come quella adattativa e su condizione.

Con quest'ottica sono stati portati avanti studi di sistemi per la valutazione delle forze di interazione ruota rotaia

to monitor the temporal evolution and therefore the integrity of the joints [29][30], by means of subsequent transits of the instrumented vehicle.

While the sensors installed on the axle boxes have proven to be effective in monitoring and identifying rail defects, it is important to underline how these can be subject to durability problems: the axle boxes are subject to extremely high acceleration levels, in the order of hundreds of *g* at joints and turnouts. Therefore, these sensors are often subject to damage, resulting in significant maintenance times and costs.

Over the years, research activities have therefore focused on solutions that include the installation of accelerometers on vehicle bogies, in such a way as to benefit from the filtering effect of the first suspension stage. It should be noted that this solution is effective in the study of defects of longer wavelengths than the wheelbase (typically in the order of 3 m). In this context, the possibility of estimating the longitudinal level and alignment respectively by means of vertical [31] and lateral accelerations [32] measured by bogie sensors was demonstrated.

Finally, consider sensors installed in the body. In this case, the measured accelerations will be filtered from both suspension stages. It follows that this measurement setup is particularly suitable in the case of longer wavelengths, often related to ride comfort issues, and low speed applications. Examples of applications based on the use of accelerometers in body have been proposed in [27] and [33].

Regardless of the type of sensors and installation positions, the accelerations measured on board the vehicle are generally used to solve opposite problems, which aim to identify the track profile responsible for the recorded accelerations. In this context, a commonly used technique resorts to the use of Kalman filters, as shown for example in [34]. These techniques are based on an observer's definition of the status of a dynamic system based on measurements affected by noise. The measured accelerations can also be treated according to appropriate signal processing techniques. Among these, it is worth mentioning the double integration of accelerations together with the chord method, successfully used in the reconstruction of the geometry of a high-speed line in [35]. Other popular techniques make use of wavelet transforms and spectral analyses [27].

The aforementioned methodologies aim to identify the geometry profile of the track, and therefore are associated with a significant number of sensors and computational costs that are generally not negligible, as demonstrated in [36]. Therefore, these systems may not be suitable for commercial vehicle applications. Attention was therefore addressed towards the development of techniques to monitor the degradation condition of the geometry by means of synthetic indices, such as rms or peak values along predetermined windows. For example, in order to monitor the evolution of the longitudinal level, the bogie vertical acceleration rms value was used to estimate the peak and rms values of the longitudinal level [37][38][39]. In this context, machine learning

SCIENZA E TECNICA

ia semplici e a basso costo, implementabili su flotte di treni commerciali [45].

Tuttavia, negli ultimi anni, con l'affinamento delle tecniche di misura e l'incremento delle possibili frequenze di acquisizione raggiungibili, si sta facendo strada la possibilità di un loro impiego anche per la diagnostica delle linee ferroviarie e l'identificazione dei difetti.

5.1. Metodi di misura

La scelta del metodo di misura delle forze di interazione dipende da alcune caratteristiche di seguito elencate:

- installazione del sistema di misura: sul treno o sulla rotaia;
- componente di forza da misurare;
- frequenza di taglio.

5.1.1. Installazione del sistema di misura

Per quanto riguarda l'installazione del sistema di misura, la scelta si divide fra rotaia e treno (Fig. 8): nel primo caso, viene strumentata una sezione di rotaia e vengono monitorate le forze scambiate con tutti i treni che la percorrono. Strumentazioni di questo tipo posso trovarsi in specifiche sezioni di test che vengono percorse da più treni per verificarne la sicurezza in marcia, oppure in ingresso o uscita dalle stazioni per motivi di diagnostica dei rotabili che le percorrono; si tratta in generale di sistemi di diagnostica di medio-lungo termine.

Nel secondo caso, lo scopo della misura è quello di avere un'informazione estesa delle forze lungo una linea percorsa da un certo treno. Un esempio di questo utilizzo sono i test omologativi di un veicolo nuovo, oppure il monitoraggio di una linea attraversata da un treno diagnostico.

5.1.2. Componente di forza

Le forze di contatto possono essere proiettate in tre direzioni principali rispetto alla rotaia: verticali, laterali, longitudinali.

Alcune tecniche risultano in grado di misurare solo alcune componenti, ad esempio attraverso trasduttori lineari di spostamento opportunamente posizionati in corrispondenza della sospensione primaria, tra il telaio del carrello e le bocche è possibile correlare lo schiacciamento delle molle con le forze verticali. Con questa tecnica

techniques are becoming increasingly important [40], such as probabilistic (MARKOV chain [41]), and classification methods (Support Vector Machine, Bayesian [42][43]), used to predict the degradation of track conditions.

5. Measurement of wheel/rail contact forces

The techniques for measuring the contact forces between wheel and rail are varied and based on the deformation of one or more elements subjected to the same forces.

The measurement of forces has so far had a strong use in the field of rolling stock safety, for which the EN 14363 standard in Europe requires [44] its use in order to obtain transport permits, in particular for newly designed vehicles.

Knowledge of the loads in operation also allows providing useful data for the redesign of rolling stock (with a focus on reducing vehicle masses) and supporting a more effective

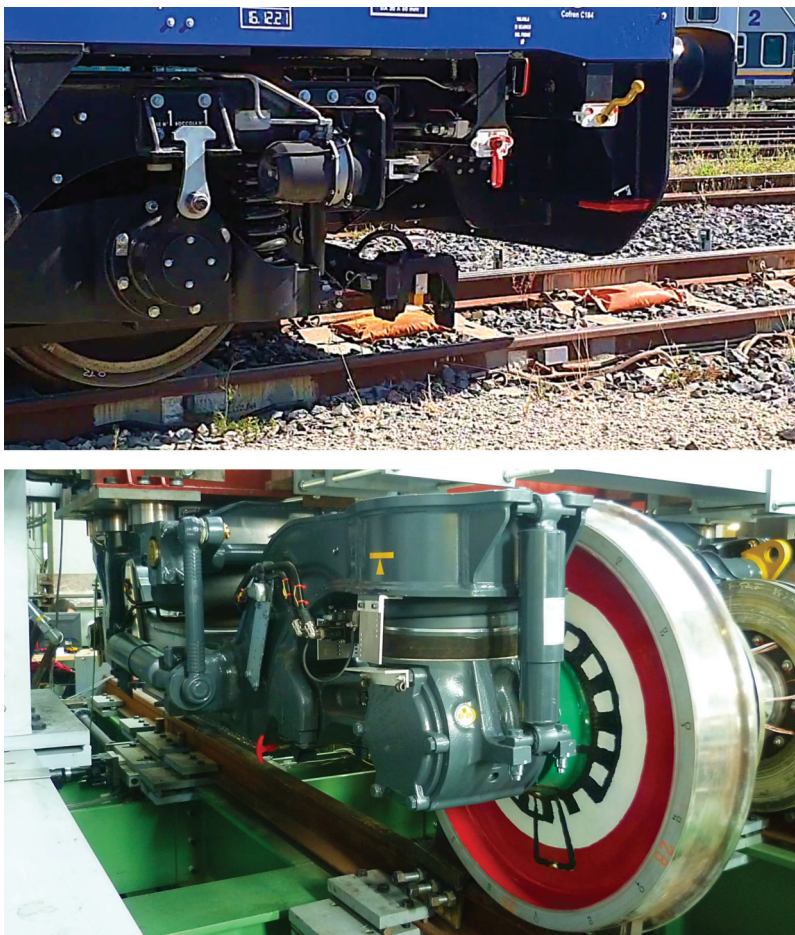


Figura 8 - Installazione sistemi di misura: rotaia strumentata (figura in alto) e sala strumentata (figura in basso).

Figure 8 - Installation of measuring systems: instrumented rail (top figure) and instrumented wheel set (bottom figure).

SCIENZA E TECNICA

non è tuttavia possibile misurare la componente laterale delle forze di contatto.

Applicando ponti estensimetrici a taglio o momento in opportune sezioni della rotaia è invece possibile disaccoppiare entrambe le componenti verticale e laterale.

Una simile applicazione di ponti estensimetrici, in varie sezioni di una sala, permette di ottenere informazioni su tutte le componenti di forza [46], rendendo questo metodo più completo rispetto agli altri (Fig. 9).

Tali strumenti sono utilizzabili solo dopo aver eseguito un'operazione di taratura, eseguita su appositi banchi prova, che consente di definire la relazione che lega la deformazione delle zone strumentate della sala con le forze applicate alla medesima [47].

5.1.3. Frequenza di taglio

Ogni metodo finora citato è basato sulla misura delle deformazioni di alcuni componenti di rotaia o sala, per cui può essere affetto dal comportamento dinamico dei metodi stessi.

In particolare, per mantenere la linearità dei metodi di misura è necessario mantenersi al di sotto delle frequenze proprie del sistema in esame.

Nella norma EN14363 [44], che definisce i test per la valutazione del comportamento dinamico dei rotabili, è richiesto un filtraggio passa basso dei dati misurati a frequenze relativamente basse di 20 Hz, raggiungibili da tutti i sistemi sopra menzionati. Volendo utilizzare i sistemi di misura per l'identificazione di difetti, tuttavia, risulta necessario spingersi a frequenze più elevate, per le quali ri-

and safe type of maintenance such as adaptive and condition-based maintenance.

With this in mind, studies have been carried out on systems for the evaluation of simple and low-cost wheel-rail interaction forces, which can be implemented on commercial train fleets [45].

However, in recent years, with the improvement of measurement techniques and the increase in the possible acquisition frequencies achievable, the possibility of their use is emerging also for the diagnosis of railway lines and the identification of defects.

5.1. Measurement methods

The choice of the measurement method of the interaction forces depends on some characteristics listed below:

- installation of the measuring system: on the train or on the rail;
- force component to be measured;
- cut-off frequency.

5.1.1. Installation of the measuring system

As for the installation of the measuring system, the choice is divided between rail and train (Fig. 8): in the first case, a section of rail is instrumented and the forces exchanged with all the trains that travel it are monitored. Instrumentation of this type can be found in specific test sections that are covered by several trains to verify their safety on the road, or at the entrance or exit of the stations for diagnostic reasons of the rolling stock that runs through them; these are in general medium-long term diagnostic systems.

In the second case, the purpose of the measurement is to have extended information of the forces along a line travelled by a given train. An example of this use is the homologation tests of a new vehicle, or the monitoring of a line crossed by a diagnostic train.

5.1.2. Force component

The contact forces can be projected in three main directions with respect to the rail: vertical, lateral, longitudinal.

Some techniques can measure only some components, for example through linear displacement transducers suitably positioned at the primary suspension, between the bogie frame and the axle boxes the compression of the own springs with the vertical forces can be associated. With this technique, however, the lateral component of the contact forces cannot be measured.

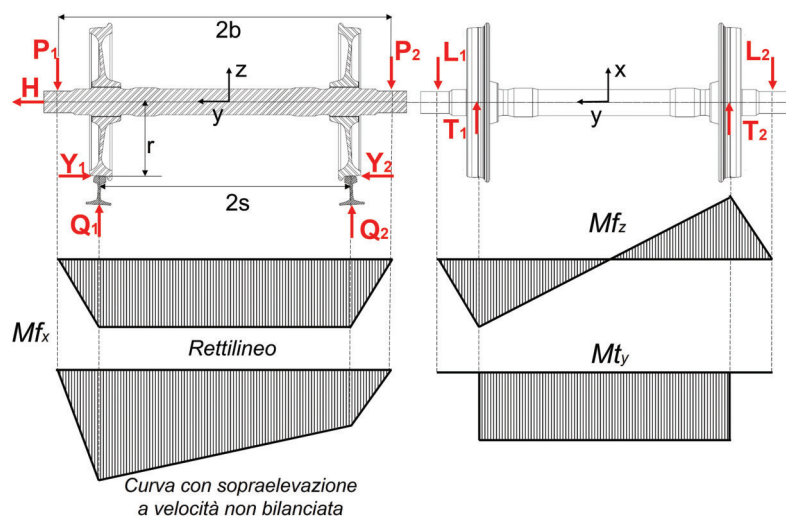


Figura 9 - Andamento dei carichi lungo una sala sottoposta a forze verticali Q, laterali Y e longitudinali T.

Figure 9 - Distribution of loads along a wheelset subjected to vertical Q, lateral Y and longitudinal T forces.

SCIENZA E TECNICA

sulta necessario l'utilizzo del metodo delle sale strumentate che hanno modi propri a frequenze più elevate (Fig. 10).

A tal proposito sono numerosi gli studi che si trovano in letteratura sull'analisi dei modi propri di una sala. Uno dei primi studi sperimentali è stato pubblicato su Ingegneria Ferroviaria nel 1994 da Bracciali e Rissone [48], i quali mostrarono un'analisi modale di una sala dotata di una serie di accelerometri ed eccitata con un martello strumentato.

I risultati di questo studio mostrano come i modi a frequenze più basse (sotto i 100Hz) sono attribuibili alla rigidità dell'assile, mentre le vele risultavano avere una rigidità maggiore e quindi modi propri a frequenze più elevate.

Studi più recenti hanno integrato risultati sperimentali a calcoli FEM della vela, con lo scopo di valutare come i modi propri possano influenzare il calcolo delle forze a frequenze elevate. GULLERS *et al.* [49] ad esempio, hanno analizzato l'effetto delle risonanze di una sala sul calcolo delle forze verticali individuando un picco a 1712 Hz. L'aumen-

On the other hand, by applying shear or moment strain gauges in appropriate sections of the rail, both the vertical and lateral components can be decoupled.

A similar application of strain gauges, in various sections of a wheelset, allows obtaining information on all the force components [46], making this method more complete than the others (Fig. 9).

These instruments can only be used after performing calibration, carried out on special test benches, which allows for the establishment of the relationship between the deformation of the instrumented areas of the wheelset and the forces applied to it [47].

5.1.3. Cut-Off Frequency

Each method mentioned so far is based on the measurement of the deformations of some rail or wheelset components, so it can be affected by the dynamic behaviour of the methods themselves.

In particular, in order to maintain the linearity of the measurement methods, it is necessary to stay below the own frequencies of the system in question.

In the EN 14363 standard [44], which defines the tests for the evaluation of the dynamic behaviour of rolling stock, a low-pass filtering is required of the measured data at relatively low frequencies of 20 Hz, achievable by all the systems mentioned above. However, in order to use the measurement systems for the identification of defects, it is necessary to go to higher frequencies, for which the use of the instrumented wheelset method is required, as they have their own modes at higher frequencies (Fig. 10).

In this regard, there are numerous studies in literature on the analysis of the own modes of a wheelset. One of the first experimental studies was published in Railway Engineering fatigue by BRACCIALI and RISSONE [48], who showed a modal analysis of a wheelset equipped with a series of accelerometers and excited with an instrumented hammer.

The results of this study show that the modes at lower frequencies (below 100Hz) are attributable to the rigidity of the axle, while the webs were found to have greater rigidity and therefore typical modes at higher frequencies.

More recent studies have integrated experimental results with FEM calculations of the web, with the aim of

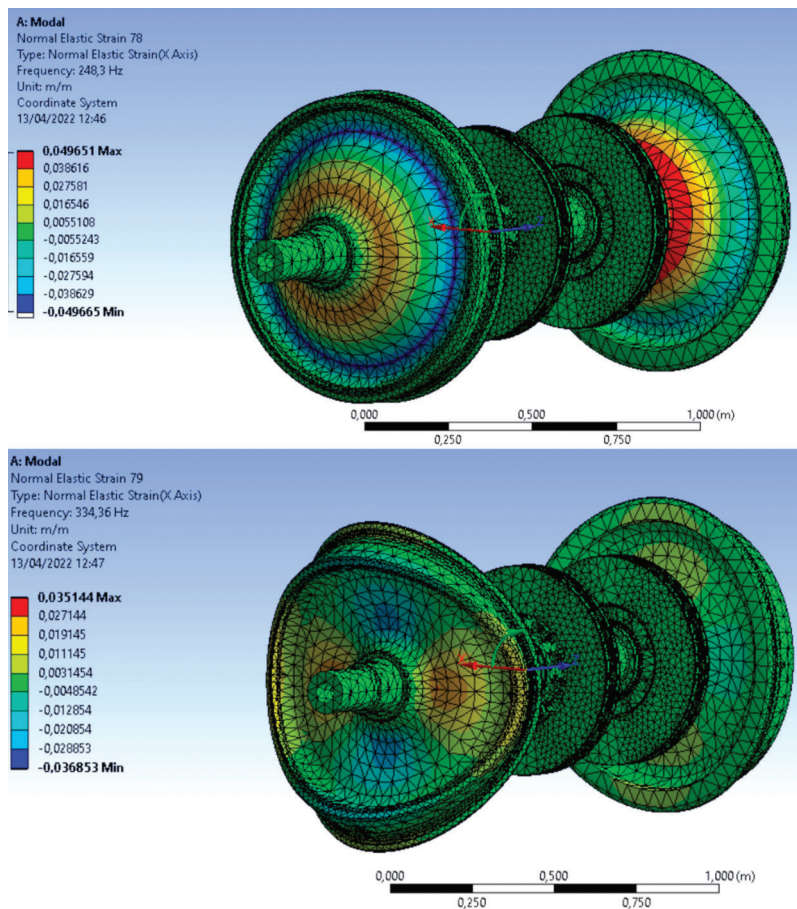


Figura 10 - Esempi di deformate modali che interessano le ruote delle sale.
Figure 10 - Examples of modal deformations affecting the wheels of the wheel set.

SCIENZA E TECNICA

to dell'ampiezza della forza, in prossimità di tale risonanza, è stato poi compensato attraverso una funzione filtro.

L'applicazione di estensimetri sulla sala a sua volta complica notevolmente il sistema di acquisizione, rendendo necessaria l'installazione di ulteriori accessori su un componente rotante ed una telemetria per l'alimentazione e il passaggio dei dati acquisiti con eventuali limiti di frequenza di acquisizione.

5.2. Individuazione dei difetti della linea

Le sale strumentate, come descritto sempre dagli autori GULLERS *et al.* [50], possono essere utilizzate come strumenti diagnostici TCA (*track condition analyser*) per la caratterizzazione dello stato dell'armamento e, conseguentemente, consentono quindi un'efficace programmazione delle attività manutentive.

Tale sistema è stato installato su un treno passeggeri alta velocità X2 che operava in Svezia sulla tratta Stoccolma Göteborg.

Nel caso specifico la TCA lavora con il *machine learning*, una delle tecniche della *data science* più usata.

Per ogni tratto di linea di lunghezza pari a 25 m, i dati delle forze di contatto ruota/rotaia sono pre-processati per la creazione di un set finito di parametri chiamati "*features*".

I principali parametri, inclusi nel vettore delle "*features*", sono: valore medio, percentile e deviazione standard del segnale della forza, dopo che quest'ultimo è stato precedentemente trattato con filtri passa-banda con diversi intervalli di frequenze di taglio descritti nel dettaglio di seguito.

La TCA, successivamente, attraverso logiche di calcolo opportunamente allenate a riconoscere diversi tipi di difettosità, elabora le grandezze di interesse e classifica il tratto di linea come libero da difetti oppure affetto da uno o più tipologie di essi.

Il parametro Δ_{Q95} (95° percentile del contributo dinamico della forza verticale Q) è adottato come indice per l'individuazione dei potenziali tratti di linea difettati.

Per tale parametro, correlabile ai fenomeni affaticanti sia di ruota che della rotaia, sono stati definiti dei limiti oltre i quali sono consigliati interventi manutentivi pianificati o urgenti; nel dettaglio:

- $\Delta_{Q95} \geq 30$ kN Manutenzione Urgente.
- $19 \text{ kN} \leq \Delta_{Q95} < 30$ kN Manutenzione Pianificata.

Includendo nelle forze anche i contributi ad alta frequenza (fino a 2 kHz), è possibile rilevare e localizzare sulla linea i più significativi e frequenti tipi di difetti correlati al deterioramento della superficie di rotolamento della rotaia e alle irregolarità della geometria del binario.

I quattro tipi di meccanismi di danneggiamento dell'infrastruttura individuati con la TCA sono riportati di seguito.

- Marezzatura della rotaia

evaluating how typical modes can influence the calculation of forces at high frequencies. GULLERS et al. for [49] example, analysed the effect of wheel set resonances on the calculation of vertical forces by identifying a peak at 1712 Hz. The increase in the amplitude of the force, near of this resonance, was then compensated through a filter function.

The application of strain gauges on the wheel set in turn considerably complicates the acquisition system, making it necessary to install additional accessories on a rotating component and a telemetry for the power supply and the passage of the acquired data with potential acquisition frequency limits.

5.2. Detection of line defects

The instrumented wheel sets, as always localized by the authors GULLERS et al. [50], can be used as TCA (track condition analyser) diagnostic tools for the characterisation of the condition of the permanent way and, consequently, allow effective programming of maintenance activities.

This system was installed on an X2 high-speed passenger train operating in Sweden on the Stockholm-Göteborg route.

In this specific case, the TCA works with machine learning, one of the most widely used data science techniques.

For each 25m long section of line, the wheel/rail contact force data is pre-processed to create a finite set of parameters called "features".

The main parameters, included in the "features" vector, are: average value, percentile and standard deviation of the force signal, after the latter has been previously treated with band-pass filters with different cut-off frequency ranges described in detail below.

The TCA, subsequently, through calculation logics suitably worked out to recognise different types of defects, processes the quantities of interest and classifies the section of the line as free of defects or affected by one or more types of them.

The parameter Δ_{Q95} (95th percentile of the dynamic contribution of the vertical force Q) is adopted as an index for the identification of potential faulty line sections.

For this parameter, which can be related to the fatigue phenomena of both the wheel and the rail, limits have been defined beyond which planned or urgent maintenance interventions are recommended; in detail:

- $\Delta_{Q95} \geq 30$ kN Urgent Maintenance.
- $19 \text{ kN} \leq \Delta_{Q95} < 30$ kN Planned Maintenance.

Including high frequency contributions (up to 2 kHz) also in the forces, the most significant and frequent types of defects related to the deterioration of the rolling surface of

SCIENZA E TECNICA

Tali difetti di lunghezza d'onda ridotta, compresa tra 3 e 8 cm, sono stati individuati attraverso valori elevati di Δ_{Q95} e di deviazione standard della forza verticale Q elaborata con filtro passa-banda 800-1400 Hz.

- Cedimento della massicciata

La condizione di degrado della massicciata, in concomitanza alla presenza di piastre elastiche più rigide, determina un comportamento dinamico del veicolo sulla linea poco soddisfacente confermato da fluttuazioni importanti della forza verticale al passaggio delle ruote sulle traverse. L'identificazione di tali tratti è stata eseguita valutando la deviazione standard della forza Q elaborata con un filtro passa banda impostato alla frequenza di passaggio sulle traverse (distanza traverse 0.6-0.65 m).

- Giunti e scambi usurati

Un giunto, o uno scambio, usurato genera una discontinuità puntuale significativa del segnale della forza.

La TCA, attraverso il calcolo percentile (99.975%) del segnale della forza Q , è in grado di identificare i tratti di linea caratterizzati da tali problematiche.

- Difetti periodici della rotaia

Questi tipi di difetti sono generalmente prodotti da ruote danneggiate che, durante la marcia del rotabile, generano delle leggere infossature della tavola di rotolamento della rotaia. Il segnale di forza risultante mostra dei picchi periodici il cui distanziamento è correlato alla lunghezza della circonferenza della ruota danneggiata. Queste irregolarità sono facilmente identificabili dalla TCA valutando il segnale della forza verticale Q elaborato con un filtro passa banda limitato alla lunghezza della circonferenza delle ruote dei veicoli che circolano sulla linea.

Nel caso più comune in cui sulla linea circolino rotabili diversi, con ruote di diverso diametro, sarà sufficiente modificare i limiti della banda del filtro per includerle tuttenell'analisi.

Le sale strumentate, come riportato nell'articolo di MOUSAPOUR *et al.* [51], possono essere utilizzate, insieme a misure accelerometriche, per calcolare la variazione di rigidità del tracciato ferroviario.

Quest'ultimo è un parametro chiave usato per valutare la condizione e l'integrità della sottostruttura della linea.

La rigidità verticale del binario è ottenuta come rapporto del carico verticale, misurato con le sale strumentate, ed il valore dello spostamento del binario ottenuto attraverso la doppia integrazione di un segnale accelerometrico misurato con sensori posizionati sulla cassa del veicolo.

L'articolo, nel dettaglio, propone un metodo per calcolare il rapporto carico/spostamento utilizzando il contributo in frequenza più rilevante tra i segnali misurati di accelerazione e carico. Il metodo è sviluppato utilizzando la tecnica di decomposizione nel dominio della frequenza (FDD) implementata con la decomposizione del valore singolare (SVD).

Gli autori NIU *et al.*, invece, propongono nell'articolo [52]

the rail and to the irregularities of the track geometry can be detected and located on the line.

The four types of infrastructure damage mechanisms identified with the TCA are listed below.

- Short pitch rail corrugation

These short wavelength defects, between 3 and 8 cm, were detected through high values of Δ_{Q95} and standard deviation of the vertical force Q processed with 800-1400 Hz bandpass filter.

- Subsidence of the ballast

The condition of degradation of the ballast, in conjunction with the presence of stiffer elastic plates, determines an unsatisfactory dynamic behaviour of the vehicle on the line confirmed by significant fluctuations in the vertical force at the passage of the wheels on the sleepers. The identification of these sections was performed by evaluating the standard deviation of the Q force processed with a bandpass filter set at the frequency of passage on the sleepers (sleepers distance 0.6-0.65 m).

- Worn joints and turnouts

A worn joint, or turnout, generates a significant localized discontinuity of the force signal.

The TCA, through the percentile calculation (99.975%) of the Q -force signal, can identify the line sections characterised by these problems.

- Periodic rail defects

These types of defects are generally caused by damaged wheels that, during running of the rolling stock, generate slight indentations on the rolling surface of the rail. The resulting force signal shows periodic peaks whose spacing is related to the length of the circumference of the damaged wheel. These irregularities are easily identified by the TCA by evaluating the signal of the vertical force Q processed with a bandpass filter limited to the length of the circumference of the wheels of the vehicles circulating on the line.

In the most common case where different rolling stock circulate on the line, with wheels of different diameters, it will be sufficient to modify the limits of the filter band to include them all in the analysis.

*The instrumented wheel sets, as reported in the article by MOUSAPOUR *et al.* [51], can be used to calculate the change in stiffness of the railway track, together with accelerometric measurements.*

The latter is a key parameter used to assess the condition and integrity of the substructure of the line.

The vertical stiffness of the track is obtained as a ratio of the vertical load, measured with the instrumented wheel sets, and the value of the displacement of the track obtained through the double integration of an accelerometric signal measured with sensors positioned on the vehicle body.

SCIENZA E TECNICA

un metodo per la misura della mazzatura della rotaia su linee e Bmax velocità basata sulla misura della forza verticale di contatto ruota/rotaia eseguita con sale strumentate.

Tale misura è successivamente utilizzata per ottenere un indicatore accurato discriminante per l'esecuzione della molatura della rotaia; operazione che consente di eliminare tale tipo di difetto.

Tale indicatore è calcolato come rapporto tra le forze di contatto misurate in linea e le forze di contatto ottenute tramite simulazioni numeriche.

La decisione riguardante l'esecuzione di manutenzione della linea, infatti, secondo gli autori non può essere eseguita direttamente sulla base delle forze misurate perché la correlazione tra la profondità della mazzatura (che non può superare un certo limite) e l'entità delle forze misurate è influenzata anche dalla lunghezza d'onda del difetto.

6. Parametri che influenzano il deterioramento dell'armamento e la campagna DynoTRAIN

La campagna DynoTRAIN WP4, condotta con lo scopo di migliorare il processo di omologazione reciproca e individuare i valori limite di realizzazione e mantenimento dell'infrastruttura, ha evidenziato la correlazione tra alcuni parametri di interazione veicolo-linea ed i principali meccanismi di deterioramento dell'armamento [53].

Tali parametri, riportati nei diversi quadri normativi [44][54], sono calcolati a partire dalle misure delle forze di contatto ruota/rotaia e vengono valutati per l'omologazione del rotabile.

I principali indici di valutazione del veicolo, sia da un punto di vista di sicurezza di marcia (*running safety*) che di impatto sulla linea (*track loading*), sono riportati sotto insieme ai meccanismi di deterioramento dell'infrastruttura correlati. Questi, mostrati anche in Tab. 2, sono:

- Q_{qst} - Forza verticale quasi statica su rotaia esterno curva.

Correlata a fenomeni di fatica della rotaia e assestamento della posa del binario.

- $Q - Q_{max}$ - Forza verticale dinamica.

Legata al deterioramento dei seguenti componenti: rotaie, attacchi, traverse e ballast.

- Y_{qst} - Forza laterale quasi statica su rotaia esterno curva.

Associata a fenomeni di usura laterale della rotaia esterna e resistenza laterale del binario, delle saldature, dei giunti e degli attacchi.

- $\sum Y_{max}$ (o H_{max} per Metodo semplificato) - Somma delle forze laterali (*running safety*).

Usata per il controllo del rischio di spostamento laterale del binario (difetto geometrico di allineamento).

Tali quantità, tuttavia, non sono sufficienti a descrivere tutti i meccanismi fisici coinvolti nel deterioramento dei componenti dell'armamento. Per questo motivo, in al-

The article, in detail, proposes a calculation method of the load/displacement ratio using the most relevant frequency contribution between the measured acceleration and load signals. The method is developed using the frequency domain decomposition (FDD) technique implemented with singular value decomposition (SVD).

In the article, the authors NIU et al., on the other hand, propose [52] a method for measuring the short pitch corrugation of the rail on high-speed lines based on the measurement of the vertical force of wheel/rail contact performed with instrumented wheel sets.

This measure is subsequently used to obtain an accurate discriminating indicator for the execution of the grinding of the rail; an operation that allows eliminating this type of defect.

This indicator is calculated as the ratio between the contact forces measured in line and the contact forces obtained through numerical simulations.

According to the authors, the decision regarding the execution of line maintenance, in fact, cannot be executed directly on the basis of the measured forces because the association between the depth of the corrugation (which cannot exceed a certain limit) and the magnitude of the measured forces is also influenced by the wavelength of the defect.

6. Parameters affecting permanent way deterioration and the DynoTRAIN campaign

The DynoTRAIN WP4 campaign, conducted with the aim of improving the mutual approval process and identifying the limit values for the construction and maintenance of the infrastructure, highlighted the correlation between some vehicle-line interaction parameters and the main mechanisms of deterioration of the permanent way [53].

These parameters, reported in the different regulatory frameworks [44][54], are calculated from the measurements of the wheel/rail contact forces and are evaluated for the approval of the rolling stock.

The main vehicle evaluation indices, both from an operation safety and track loading point of view, are shown below together with the related infrastructure deterioration mechanisms. These, also shown in Tab. 2, are:

- Q_{qst} - Quasi-static vertical force on curved outer rail.

Related to phenomena of fatigue of the rail and settling of the laying of the track.

- $Q - Q_{max}$ - Dynamic vertical force.

Linked to the deterioration of the following components: rails, fastenings, sleepers, and ballasts.

- Y_{qst} - Quasi-static lateral force on curved outer rail.

Associated with phenomena of lateral wear of the outer rail and lateral resistance of the track, welds, joints, and fastenings.

SCIENZA E TECNICA

Tabella 2 – Table 2

Relazioni tra i principali fenomeni di deterioramento dell'armamento e i parametri di valutazione del veicolo
Relationships between the main permanent way deterioration phenomena and the vehicle evaluation parameters

	Fatica/usura delle rotaie <i>Rail fatigue/wear</i>	Attacchi <i>Fastenings</i>	Traverse <i>Sleepers</i>	Massicciata <i>Ballast</i>	Sottofondo <i>Subgrade</i>	Geometria del binario verticale / sopraelevazione <i>Vertical / superelevation track geometry</i>	Geometria del binario laterale <i>Side track geometry</i>
Q_{qst}	X			X	X	X	
Q_o							
Q_{max}	X	X	X	X	X	X	
Y_{qst}	X	X					X
ΣY_{max}				X			X
Y_{max}	X	X					X
T_{qst}	X						
B_{qst}	X	X					
B_{max}	X	X					

cuni paesi, sono stati introdotti parametri restrittivi aggiuntivi e ne sono stati proposti di nuovi anche nelle revisioni delle vecchie normative (vedi UIC 518 [54]).

Questi parametri sono riportati nell'Allegato j della norma EN 14363 [44] e sono:

- Y_{max} - Forza laterale dinamica su rotaia esterno curva.
Ha impatto sull'usura e la fatica della rotaia e sul danneggiamento degli ancoraggi della stessa alle traverse.
- B_{qst} e B_{max} - Forza risultante (combinata verticale e laterale) su rotaia esterno curva.
Connessa alla fatica della rotaia e dell'armamento.
Tale parametro è stato inserito con un duplice scopo:
 - consentire al gestore dell'infrastruttura di accettare, a parità del livello di sollecitazione della rotaia, forze laterali più elevate (rispetto al valore limite Y_{qst}) quando le forze verticali sono contenute (veicoli piuttosto leggeri) e, viceversa, forze verticali maggiori (rispetto al valore limite Q_{max}) quando le forze laterali sono contenute (veicoli con buona capacità di iscrizione in curva);
 - aiutare a definire i limiti di velocità (e di insufficienza di sopraelevazione) quando le forze sono eccessive, utilizzando un indice proporzionale alle sollecitazioni della rotaia e adattabile al tipo di rotaia localmente utilizzata.
- Y/Q - Rapporto tra forza verticale e laterale su rotaia esterno curva (*running safety*).

Usato in questo caso come indice di valutazione del carico del binario.

- T_{qst} - Quantità di danneggiamento superficiale della rotaia.

- ΣY_{max} (or H_{max} for Simplified Method) - Sum of lateral forces (*running safety*).

Used to control the risk of lateral displacement of the track (geometric misalignment).

Such quantities, however, are not sufficient to describe all the physical mechanisms involved in the deterioration of permanent way components. For this reason, in some countries, additional restrictive parameters have been introduced and new ones have also been proposed in the revisions of the old regulations (see UIC 518 [54]).

These parameters are listed in Annex j of EN 14363 [44] standards and are:

- Y_{max} - Dynamic lateral force on curved external rail.
It has an impact on the wear and fatigue of the rail and on the damage of the rail anchoring to the sleepers.
- B_{qst} and B_{max} - Resulting force (combined vertical and lateral) on curved external rail.
Connected to the fatigue of the rail and the permanent way.
This parameter has been introduced with a dual purpose:
 - allow the infrastructure manager to accept higher lateral forces, at the same level of rail stress (with respect to the limit value Y_{qst}) when the vertical forces are contained (rather light vehicles) and, vice versa, higher vertical forces (with respect to the limit value Q_{max}) when the lateral forces are contained (vehicles with good curve negotiation capacity);
 - help define speed limits (and cant insufficiency) when forces are excessive, using an index proportional to rail stresses and adaptable to the type of rail locally used.

SCIENZA E TECNICA

Ottenuta dalla combinazione delle forze longitudinali, laterali e verticali (descritta in dettaglio nell'Allegato k della norma EN 14363[44]), è correlata a fenomeni di danneggiamento e usura superficiale della rotaia.

Per questi ultimi parametri (tranne Y/Q) la norma EN 14363 [44], non evidenzia dei valori limite vincolanti, ma riporta, solo per alcuni di essi, valori informativi.

La stessa norma, infatti, suggerisce la raccolta di questi parametri durante le campagne di test per acquisire esperienza e conoscenza utile per le future revisioni del quadro normativo.

7. Conclusioni

L'articolo si propone di fare un'analisi bibliografica delle tecniche di misura ed elaborazioni mostrando come l'integrazione fra le misure accelerometriche e delle forze di contatto possa portare ad un miglioramento dell'identificazione e della previsione di comparsa dei difetti dell'armamento. Dopo aver ripercorso i principali difetti della linea che possono essere causa di disservizi ed incremento dei costi di manutenzione, sono stati elencati i metodi di diagnostica comunemente utilizzati e i possibili sviluppi.

I metodi di misura accelerometrici sono molto comuni per il rilevamento di alcune tipologie di difetti, ma una loro integrazione con misura di forze tramite, ad esempio, l'impiego di sale strumentate può migliorare le capacità diagnostiche e predittive.

La misura delle accelerazioni permettere una installazione, una taratura ed un controllo funzionale semplice ad un costo relativamente contenuto (impiegando, per esempio, sensori di tipo MEMS oggi disponibili su larga scala).

La misura delle forze per mezzo delle sale strumentate richiede tipicamente delle soluzioni realizzative e di installazione più complesse.

Il vantaggio di quest'ultima soluzione, tuttavia, è la possibilità di leggere direttamente le forze statiche e dinamiche che ruota e rotaia si scambiano, nelle diverse direzioni (verticale, laterale e longitudinale). Con le accelerazioni invece, nota la massa sottoposta al moto, è possibile calcolare il contributo dinamico, ma non quello statico.

Entrambe le soluzioni mostrano dei limiti sulla banda di frequenza utile legata alle frequenze proprie del rodiggio. Tale complicazione può però essere superata correggendo il segnale con delle funzioni di trasferimento che tengano conto del comportamento dinamico della sala.

L'impiego di questi strumenti per l'attività di diagnostica è possibile solo attraverso la raccolta di una mole notevole di dati.

È necessario che treni speciali, o treni commerciali opportunamente strumentati, circolino con continuità sull'infrastruttura ed effettuino queste misure.

Tali dati dovranno poi essere gestiti e processati, attra-

- *Y/Q – Ratio between vertical and lateral force on curved external rail (running safety)*

Used in this case as an index for evaluating the track load.

- *T_{qst} – Amount of rail surface damage*

Obtained from the combination of longitudinal, lateral, and vertical forces (described in detail in Annex k of EN 14363 [44] standard), it is related to damage and surface wear of the rail phenomena.

For the latter parameters (except Y/Q) the EN 14363 standard [44] does not highlight binding limit values, but reports informative values, just for some of them.

The same standard, in fact, suggests the collection of these parameters during testing campaigns to gain experience and useful knowledge for future revisions of the regulatory framework.

7. Conclusions

The article aims at making a bibliographic analysis of measurement and processing techniques showing how the integration between accelerometric measurements and contact forces can lead to an improvement in the identification and prediction of the onset of permanent way defects. The commonly used diagnostic methods and possible developments were listed after reviewing the main line defects that can cause disruption and increase maintenance costs.

Accelerometric measurement methods are very common for the detection of certain types of defects, but their integration with force measurement through, for example, the use of instrumented wheel sets can improve diagnostic and predictive capabilities.

The measurement of accelerations allows simple installation, calibration, and functional control at a relatively low cost (using, for example, MEMS type sensors currently available on a large scale).

The measurement of forces by means of instrumented wheel sets typically requires more complex construction and installation solutions.

The advantage of the latter solution, however, is the possibility of directly reading the static and dynamic forces that the wheel and rail exchange, in the different directions (vertical, lateral, and longitudinal). With accelerations, on the other hand, knowing the mass subjected to motion, the dynamic contribution can be calculated, but not the static one.

Both solutions show limits on the useful frequency band linked to the own frequencies of the running gear. However, this complication can be overcome by correcting the signal with transfer functions that consider the dynamic behaviour of the wheel set.

The use of these tools for diagnostics is only possible through the collection of a considerable amount of data.

Special trains, or commercial trains properly instru-

SCIENZA E TECNICA

verso le diverse logiche di calcolo sopra descritte, per poter constatare la comparsa e registrare l'evoluzione dei danneggiamenti dell'infrastruttura che, nel tempo, possano arrivare anche a minare la sicurezza della circolazione sulla linea.

Per quanto riguarda i difetti della geometria del binario, solo la misura delle forze e delle accelerazioni consente di determinare come lo specifico tipo di difetto, o la combinazione di più difetti di questo tipo, impattino sulla dinamica di marcia del veicolo e quindi consente di definire con opportuna precisione il livello di rischio associato alla loro presenza.

La diagnostica condotta attraverso queste misure consentirebbe così di definire la priorità degli interventi manutentivi o avere ulteriori strumenti per applicare interventi di mitigazione del rischio, come la riduzione della velocità dei veicoli, sui tratti che mostrano tali tipi di problemi.

L'analisi delle normative di riferimento per l'omologazione del veicolo può essere un punto di partenza per individuare grandezze fisiche da monitorare e relativi parametri statistici utili per sviluppare metodi di diagnostica predittiva per l'infrastruttura.

Dato lo stato dell'arte fin qui presentato, risulta evidente l'importanza di incrementare e integrare le diverse tecniche di misura e metodi di analisi, non solo per fare una fotografia allo stato odierno dell'infrastruttura, ma anche per fare una previsione su quale tratto di linea sarà maggiormente predisposto a subire danneggiamenti e possibilmente anche individuare la tipologia di difetto che con più probabilità tenderà a svilupparsi.

mented, must circulate continuously on the infrastructure, and carry out these measurements.

These data must then be managed and processed, through the different calculation logics described above, in order to verify the emergence and record the evolution of infrastructure damage that, over time, can also undermine the safety of traffic on the line.

As far as track geometry defects are concerned, only the measurement of forces and accelerations allows determining how the specific type of defect, or the combination of several defects of this type, impact the vehicle's driving dynamics and therefore allows defining the level of risk associated with their presence with appropriate precision.

The diagnostics carried out through these measures would thus allow defining the priority of maintenance interventions or to have additional tools to apply risk mitigation interventions, such as the reduction of vehicle speed, on the sections that show such types of problems.

The analysis of the reference regulations for vehicle approval can be a starting point to identify physical quantities to be monitored and related statistical parameters useful for developing predictive diagnostics methods for the infrastructure.

Given the state of the art presented so far, the importance of increasing and integrating the different measurement techniques and methods of analysis is clear, not only to take a picture of the current condition of the infrastructure, but also to predict which section of the line will be most likely to suffer damage and possibly also identify the type of defect that is most likely to develop.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] S. IWNICKI, (2006), "Handbook of railway vehicle dynamics", CRC press.
- [2] CEN, EN - 13848-1 (2019), "Railway applications - Track - Track geometry quality -Part 1: Characterization of track geometry", Brussels, March.
- [3] Direzione Tecnica RFI (2007), "Standard di qualità geometrica del binario e parametri di dinamica di marcia per velocità fino a 300 km/h".
- [4] K. TZANAKAKIS (2013), "The railway track and its long term behaviour: a handbook for a railway track of high quality", Springer Science & Business Media.
- [5] D. BOMBARDA, G.M. VITETTA, G. FERRANTE (2021), "Rail diagnostics based on ultrasonic guided waves: an overview", Applied Sciences, vol. 11.3, n. 1071, 2021.
- [6] E. E. MAGEL (2011), "Rolling contact fatigue: a comprehensive review".
- [7] C. ESVELD (2014), "Modern Railway Track, Digital Edition", version 3.1.
- [8] G. DI MINO, J. NIGRELLI (2003), "Indagine sperimentale sui segnali sonori all'interno dei rotabili per la diagnosi dello stato dell'armamento ferroviario" in XIII Convegno SIV Strade, ferrovie ed aeroporti, PADOVA, 30/31 OTTOBRE.
- [9] L. LING, W. LI, H. SHANG, X. XIAO, Z. WEN, X. JIN (2014), "Experimental and numerical investigation of the effect of rail corrugation on the behaviour of rail fastenings", Vehicle System Dynamics, vol. 52, n. 9, pp. 1211-1231.
- [10] H. KHAEJEHI, A. AHMADI, I. SOLEIMANMEIGOUNI, A. NISSEN (2019), "Allocation of effective maintenance limit for railway track geometry", Structure and Infrastructure Engineering, vol. 15, n. 12, pp. 1597-1612, 2019.
- [11] L. LING, Y. DENG, Q. GUAN, X. JIN (2017), "Effect of track irregularities on the dynamic behavior of a tram vehicle", Journal of Advances in Vehicle Engineering, vol. 3, n. 1, pp. 29-39.
- [12] Y. XIAO, Z. CHANG, J. MAO, S. ZHOU, X. WANG, W. A. C. D. WANG, H. ZHU, Y. LONG (2022), "Evaluating the effect of rail fastener failure on dynamic responses of train-ballasted track-subgrade coupling system for smart track condition assessment", Materials, vol. 15, n. 7, p. 2675.

SCIENZA E TECNICA

- [13] D. ZHENG, L. LI, S. ZHENG, X. CHAI, S. ZHAO, Q. TONG, J. WANG, L. GUO (2021), "A Defect Detection Method for Rail Surface and Fasteners Based on Deep Convolutional Neural Network" Computational Intelligence and Neuroscience, pp. 1-15.
- [14] W. FERDOUS, A. MANALO (2014), "Failures of mainline railway sleepers and suggested remedies—review of current practice", Engineering Failure Analysis, vol. 44, pp. 17-35.
- [15] M. SYSYN, M. PRZYBYLOWICZ, O. NABOCHENKO, L. KOU (2021), "Identification of sleeper support conditions using mechanical model supported data-driven approach", Sensors, vol. 21, n. 11, p. 3609, 2021.
- [16] M. SYSYN, M. PRZYBYLOWICZ, O. NABOCHENKO, J. LIU, (2021), "Mechanism of the Sleeper-Ballast Dynamic Impact in Void Zones".
- [17] M. ANTIGNOLI, C. MARINACCI, S. RICCI, L. RIZZETTO (2020), "Specifiche di requisiti per sistemi di misura e monitoraggio del binario / Requirement specifications for track measuring and monitoring systems", Ingegneria Ferroviaria, vol. 11, p. 841.
- [18] E. BERGGREN (2009), "Railway Track Stiffness - Dynamic Measurements and Evaluation for Efficient Maintenance", Stockholm: Doctoral Thesis.
- [19] W. WANGQING, Z. GEMING, Z. KAIMING (1997), "Development of inspection car for measuring railway track elasticity" in Proceedings from 6th international heavy haul conference, Cape Town.
- [20] R. THOMPSON, D. MARQUEZ (2001), "Track strength testing using TTCI's track loading vehicle", Railway Track and Structures", vol. 97, n. 12.
- [21] E. BERGGREN, Å. JAHLÉNIUS, B.-E. BENGTSSON (2002), "Continuous Track Stiffness Measurement - An Effective Method to Investigate the Structural Conditions of the Track", in Proceedings of the conference Railway Engineering, London.
- [22] E. BERGGREN, Å. JAHLÉNIUS, B.-E. BENGTSSON, M. BERG (2005), "Simulation, Development and Field Testing of a Track Stiffness Measurement Vehicle", in Proceedings of 8th International Heavy Haul Conference, Rio de Janeiro.
- [23] A. BENEDETTO, F. TOSTI, L. B. CIAMPOLI, A. CALVI, M. G. BRANCADORO, A. M. ALANI (2017), "Railway ballast condition assessment using ground-penetrating radar—An experimental, numerical simulation and modelling development", Construction and Building Materials, vol. 140, pp. 508-520, 2017.
- [24] C. WARD, P. WESTON, E. STEWART, H. LI, R. GOODALL (2011), "Condition monitoring opportunities using vehicle-based sensors", In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, vol. 225.2 , pp. 202-218.
- [25] M. BOCCIOLONE, A. CAPRIOLI, A. CIGADA, A. COLLINA (2007), "A measurement system for quick rail inspection and effective track maintenance strategy", Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 21, n. 3, pp. 1242-1254.
- [26] L. FACCINI, J. KARAKI, E. DI GIALLEONARDO, C. SOMASCHINI, M. BOCCIOLONE, A. COLLINA, "A Methodology for Continuous Monitoring of Rail Corrugation on Subway Lines Based on Axlebox Acceleration Measurements" Appl. Sci., vol. 3773, n. <https://doi.org/10.3390/app13063773>, p. 12, 2023.
- [27] Y. HAYASHI, T. KOJIMA, H. TSUNASHIMA, Y. MARYUMO (2006), "Real Time Fault Detection of Railway Vehicles and Tracks", in 2006 IET International Conference On Railway Condition Monitoring, Birmingham, UK.
- [28] M. MOLODOVA, Z. LI, A. NÚÑEZ, R. DOLLEVOET (2014), "Automatic detection of squats in railway infrastructure" In: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems , vol. 15.5, n. doi: 10.1109/TITS.2014.2307955, pp. 1980-1990.
- [29] M. MOLODOVA, M. OREGUI, A. NÚÑEZ, Z. LI, J. MORAAL (2014), "Axle box acceleration for health monitoring of insulated joints: A case study in the Netherlands" in 17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC).
- [30] M. MOLODOVA, M. OREGUI, A. NÚÑEZ, Z. D. R. LI (2016), "Health condition monitoring of insulated joints based on axle box acceleration measurements", Engineering Structures , vol. 123, pp. 225-235.
- [31] P. WESTON, C. LING, C. ROBERTS, C. GOODMAN, P. LI (2007), "Monitoring vertical track irregularity from in-service railway vehicles", Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, vol. 221.1, pp. 75-88.
- [32] P. WESTON, C. LING, C. GOODMAN, C. ROBERTS, P. LI (2007), "Monitoring lateral track irregularity from in-service railway vehicles", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, vol. 221.1, pp. 89-100.
- [33] H. TSUNASHIMA, R. HIROSE (2022), "Condition monitoring of railway track from carbody vibration using time-frequency analysis", Vehicle System Dynamics, vol. 60.4, pp. 1170-1187.
- [34] H. TSUNASHIMA, Y. NAGANUMA, T. KOBAYASHU (2014), "Track geometry estimation from car-body vibration", Vehicle System Dynamics, vol. 52, n. DOI: 10.1080/00423114.2014.889836, pp. 207-219.
- [35] H. TSUNASHIMA, Y. NAGANUMA, A. MATSUMOTO, T. MIZUMA, H. MORI (2011), "Japanese railway condition monitoring of tracks using in-service vehicle" in IET Conference Publications, 10.1049/cp.2011.0587.

SCIENZA E TECNICA

- [36] A. DE ROSA, S. ALFI, S. BRUNI (2019), "Estimation of lateral and cross alignment in a railway track based on vehicle dynamics measurements", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 116, n. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.06.041>, pp. 606-623.
- [37] I. LA PAGLIA, M. CARNEVALE, R. CORRADI, E. DI GIALLEONARDO, A. FACCHINETTI E S. LISI, (2023), "Condition monitoring of vertical track alignment by bogie acceleration measurements on commercial highspeed vehicles", *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 186, n. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109869>.
- [38] I. LA PAGLIA, E. DI GIALLEONARDO, A. FACCHINETTI, M. CARNEVALE, R. CORRADI (2023), "Acceleration-based condition monitoring of track longitudinal level using multiple regression models" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*.
- [39] I. LA PAGLIA, E. DI GIALLEONARDO, A. FACCHINETTI, M. CARNEVALE, R. CORRADI (2023), "A Methodology to Estimate Railway Track Conditions from Vehicle Accelerations Based on Multiple Regression", in *Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures. EVACESE* Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures. EVACES 2023. Lecture Notes in Civil Engineering, Milano, https://doi.org/10.1007/978-3-031-39109-5_21.
- [40] Y. SHANG, M. NOGAL, H. WANG, A. WOLFERT (2023), "Systems thinking approach for improving maintenance management of discrete rail assets: a review and future perspectives", *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 19:2, n. DOI: 10.1080/15732479.2021.1936569, pp. 197-215.
- [41] BAI, L., R. LIU, Q. SUN, F. WANG, P. XU (2015), "Markov-based model for the prediction of railway track irregularities", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 229, n. 2, pp. 150-159.
- [42] A. DE ROSA, KULKARNI, R., A. QAZIZADEH, M. D. G. E. BERG, A. FACCHINETTI, S. BRUNI, "Monitoring of lateral and cross level track geometry irregularities through onboard vehicle dynamics measurements using machine learning classification algorithms", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 235(1), n. DOI:10.1177/0954409720906649, pp. 107-120.
- [43] L. BAI, R. LIU, Q. SUN, F. WANG, F. WANG (2016), "Classification-learning-based framework for predicting railway track irregularities", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 230, n. 2, pp. 598-610.
- [44] CEN, EN - 14363:2016, "Railway applications - Testing and Simulation for the acceptance of running characteristics of railway vehicles - Running Behaviour and stationary tests", Brussels, April.
- [45] F. VELLETRANI, R. LICCIARDELLO, M. BRUNER (2020), "Intelligent wheelsets for the trains of the future. The role of in-service wheel-rail force measurement / Sale montate intelligenti per il treno del futuro. Il ruolo della misura in esercizio delle forze ruota-rotaia" *Ingegneria Ferroviaria*, vol. 75.10, pp. 701-725.
- [46] X. JIN (2019), "Evaluation and analysis approach of wheel-rail contact force measurements through a high-speed instrumented wheelset and related considerations", *Vehicle System Dynamics*, pp. 1-23, 2019.
- [47] G. DIANA, F. RESTA, F. BRAGHIN, M. F. BOCCIOLONE, E. DI GIALLEONARDO, P. F. CROSIO (2012), "Methodology for the calibration of dynamometric wheel-sets for the measurement of the wheel-rail contact forces," *Ingegneria Ferroviaria*, vol. 67.1, pp. 9-21, 2012.
- [48] A. BRACCIALI E P. RISSONE (1994), "Analisi modale sperimentale di una sala portante", *Ingegneria Ferroviaria*, vol. 7/8, pp. 394-407.
- [49] P. GULLERS, L. ANDERSSON E R. LUNDÉN (2008), "High-frequency vertical wheel-rail contact forces—Field measurements and influence of track irregularities", *Wear*, Vol. %1 di %2265.9-10, pp. 1472-1478.
- [50] P. GULLERS, P. DREIK, J. C. NIELSEN, A. EKBERG E L. ANDERSSON (2011), "Track condition analyser: identification of rail rolling surface defects, likely to generate fatigue damage in wheels, using instrumented wheelset measurements", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 225, n. 1, pp. 1-13.
- [51] P. H. A. M. T. H. a. M. G. REZA MOUSAPOUR (2021), "Evaluating railway track stiffness variations using instrumented wheelset (IWS) and accelerometer measurements", in *Canadian & Cold Regions Rail Research Conference*.
- [52] L. NIU, F. YANG, X. DENG, P. ZHANG, G. JING, W. QIANG, Y. GUO (2023), "An assessment method of rail corrugation based on wheel-rail vertical force and its application for rail grinding", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, pp. 1-20.
- [53] B. EICKHOFF, L. MAZZOLA, Y. BEZIN, G. TUCKER, H. STRADTMANN, A. HAIGERMOSER, H. CHOLLET J. LANDAIS (2015), "Track loading limits and cross-acceptance of vehicle approvals", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 229, n. 6, pp. 710-728.
- [54] UIC 518 : 4ED (2009), "Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour - safety - track fatigue - ride quality".