

# DIAGNOSTICA E MONITORAGGIO DELLE ROTAIE FERROVIARIE

Andrea Bracciali<sup>1</sup>, Cristiana Delprete<sup>2</sup>, Angelo Pezzati<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Università di Firenze - Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali  
via S. Marta 3, 50139 Firenze. e-mail: bracciali@ing.unifi.it*

<sup>2</sup> *Politecnico di Torino - Dipartimento di Meccanica  
Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino. e-mail: cristiana.delprete@polito.it*

<sup>3</sup> *RFI S.p.A. - Direttore Compartimentale Infrastruttura  
Piazza dell'Unità d'Italia 1, 50100 Firenze. e-mail: a.pezzati@rfi.it*

## SOMMARIO

Il monitoraggio dell'infrastruttura comprende, ovviamente, anche il monitoraggio delle rotaie in quanto elemento principale e particolare del sistema ferroviario. Nella presente memoria vengono descritte alcune attività di ricerca attualmente in corso in collaborazione fra RFI SpA, Politecnico di Torino e Università di Firenze. In particolare si descrivono i concetti base, le modalità di effettuazione delle ricerche e le potenziali ricadute sull'esercizio.

## 1. INTRODUZIONE

Lo sviluppo di tecniche di monitoraggio e di diagnostica dell'infrastruttura riveste importanza fondamentale nel processo di separazione fra il gestore dell'infrastruttura stessa e gli operatori di trasporto.

Il gestore dell'infrastruttura necessita di tecniche di monitoraggio per diversi scopi complementari:

- a) dovendo garantire una costanza delle caratteristiche dell'infrastruttura in modo che gli operatori possano operare al meglio, deve continuamente mantenere tutto quanto riguarda l'infrastruttura stessa (linee, stazioni, scali, ecc.) con criteri di efficienza e di economicità;
- b) dato che il transito dei convogli tende naturalmente a far peggiorare le condizioni geometriche della linea, deve monitorare il passaggio dei convogli stessi per accertarsi che non siano presenti veicoli la cui marcia impartisce sollecitazioni anomale all'armamento;
- c) deve garantire, unitamente agli operatori di trasporto, il rispetto dei parametri di impatto ambientali, riconducibili, per quanto concerne l'infrastruttura, al rumore emesso al transito dei convogli ferroviari.

L'Università di Firenze (UniFi), attiva da molti anni su alcuni degli argomenti che verranno descritti nella presente memoria, ha ricercato ed ottenuto la collaborazione del Politecnico di Torino (PoliTo) e della Direzione Compartimentale Infrastruttura RFI SpA di Firenze per affrontare da più punti di vista alcuni degli aspetti che riguardano principalmente il binario e, più in particolare, le rotaie.

Nel presente lavoro verranno descritte le seguenti tre attività:

- a) la diagnostica degli sforzi ruota-rotaia, ottenuta con l'utilizzo di una nuova tipologia di sensori estensimetrici applicati alla rotaia;

- b) la diagnostica dello stato delle superfici delle rotaie, in una zona vicina a Firenze, al fine di mantenere sotto controllo lo stato di rumorosità emesso dai treni;
- c) lo sviluppo, al momento a livello di ricerca, di un sistema di rilevazione delle rotaie parzialmente o totalmente rotte che sia indipendente dalla presenza dei circuiti di binario utilizzati nel blocco automatico a correnti codificate in uso in FS sulle linee principali.

## **2. LA DIAGNOSTICA DEGLI SFORZI RUOTA-ROTAIA - Un nuovo sensore**

Numerose sono le tecniche utilizzate per la verifica della rispondenza della marcia di un veicolo ai criteri di sicurezza stabiliti dalle norme internazionali.

Al momento della consegna di un nuovo veicolo, o quando siano state apportate modifiche che si pensa possano portare a variazioni nel comportamento della dinamica di marcia del veicolo stesso, è necessario effettuare prove di omologazione secondo le normative internazionali [1]. Queste richiedono che il veicolo venga provato in numerose condizioni di linea diverse tra loro in termini di raggio di curvatura e di accelerazione non compensata. Si ricorre quindi alla strumentazione delle sale del veicolo con catene estensimetriche opportunamente tarate che trasmettono, via telemetria, i segnali a centraline di acquisizione e condizionamento poste a bordo veicolo.

Questa metodologia non può, ovviamente, essere applicata estensivamente a tutti i veicoli e, peraltro, il sistema di misura non può neanche essere lasciato permanentemente a bordo del veicolo utilizzato per le prove; ne consegue che è di fatto impossibile monitorare con continuità il parco veicoli circolante su una data amministrazione ferroviaria.

In particolare, l'usura del rodiggio, in termini di usura del profilo trasversale e circonferenziale delle ruote, la variazione delle caratteristiche degli eventuali elementi smorzanti nelle sospensioni e la rottura di alcuni elementi della sospensione primaria non possono essere controllati se non mediante ispezione visiva.

Per il gestore dell'infrastruttura assume quindi particolare interesse la disponibilità di un'apparecchiatura in grado di misurare, al passaggio dei vari convogli, le forze scambiate al contatto ruota-rotaia. L'individuazione di veicoli anomali può consentire di evitare il verificarsi di pericolosi svii o, comunque, la creazione di particolari combinazioni di forze in grado di danneggiare l'armamento.

Le tecniche proprie della Meccanica Sperimentale consentono, ormai da molto tempo, di effettuare la misura delle deformazioni di un corpo solido soggetto ad un campo di forze esterne mediante l'uso di estensimetri elettrici a resistenza.

Pur non volendo pretendere di trattare esaustivamente il problema, si può accennare che nel campo ferroviario le forze ruota-rotaia sono critiche ai fini della sicurezza contro lo svio e contro la deformazione laterale permanente del binario. Nel primo caso assumono importanza sia la componente verticale  $Q$ , legata direttamente al peso del veicolo, sia la componente orizzontale  $Y$ , legata più specificamente alle forze centrifughe agenti in curva, applicate a ciascuna rotaia. Nel secondo caso la somma delle forze orizzontali sulle due rotaie, detta forza di ripage  $H$ , non deve superare un dato limite, determinato anche dalla somma delle forze verticali, per evitare il disallineamento del binario.

In particolare, il limite di svio  $Y/Q$ , detto limite di Nadal, può assumere valori non compatibili con la sicurezza per diversi motivi:

- a) lo spostamento del carico che, a causa della iperstaticità dei vincoli elastici (sospensioni) dei veicoli, porta ad una sghembatura del carro o del carrello con disuniforme ripartizione dei carichi verticali  $Q$ , per cui alcune ruote possono trovarsi particolarmente scariche;
- b) il cedimento, totale o parziale, di alcuni organi di sospensione del veicolo che introduce una sghembatura equivalente molto grave;
- c) la presenza di forze laterali  $Y$  anomale, ad esempio all'ingresso di una curva;
- d) l'insorgere di moti parassiti del veicolo (detti instabilità di marcia o serpeggio) dovuti alla variazione di conicità equivalente dei profili delle ruote a seguito del consumo anomalo delle superfici di rotolamento, che introduce forze laterali  $Y$  particolarmente elevate.

Sul mercato esistono, ormai da tempo, numerosi sistemi di rilevazione dei carichi agenti sulle rotaie. Tali sistemi, tipicamente, sono realizzati con estensimetri montati direttamente, per incollaggio, sulle rotaie in un tratto rettilineo della linea ferroviaria. Questi sistemi, facilmente reperibili anche in Internet, sono però soggetti alle seguenti limitazioni:

- a) essendo gli estensimetri montati sulla superficie della rotaia, non è possibile realizzare un sistema semplice che sia esclusivamente sensibile alle forze  $Q$ , per cui è necessaria una configurazione con numerosi estensimetri per filtrare il contributo alla deformazione della rotaia dato dalle forze  $Y$ ;
- b) il montaggio degli estensimetri è un'operazione complessa e delicata, che richiede personale altamente specializzato e lunghi tempi di intervento;
- c) in caso di rottura accidentale di un sensore, la sostituzione non è possibile con facilità, ma richiede l'intervento di personale specializzato e può richiedere anche la chiusura della linea a causa dei lunghi tempi di intervento necessari.

L'Università di Firenze ha sviluppato, nel 1999, un sensore estensimetrico innovativo che, applicato all'interno di un foro praticato in corrispondenza dell'asse neutro della rotaia, consente di misurare le sole forze  $Q$  con notevole semplicità [2].

Quale naturale estensione di tale concetto, una nuova famiglia di sensori in grado di misurare separatamente e contemporaneamente le forze  $Q$  e le forze  $Y$  è stata sviluppata congiuntamente con il Politecnico di Torino. Questi sensori sono equipaggiati con un diverso numero di estensimetri (4 nell'esecuzione UniFi, 8 nell'esecuzione PoliTo) e sono sensibili a una diversa caratteristica di sollecitazione (2 momenti flettenti nell'esecuzione UniFi, 2 forze di taglio nell'esecuzione PoliTo) a seconda della sezione di rotaia in cui vengono posizionati (in corrispondenza della traversina nell'esecuzione UniFi, a metà campata nell'esecuzione PoliTo).

I vantaggi di questo nuovo tipo di trasduttore sono riassumibili come segue:

- a) l'unica operazione preliminare da effettuare sulla rotaia è la foratura in corrispondenza dell'asse neutro, che è peraltro anche l'unica operazione consentita sulle rotaie in esercizio [3];
- b) l'inserimento delle bussole strumentate non richiede personale specializzato e necessita, al massimo, di cinque minuti per ciascun sensore;
- c) ciascun sensore contiene due catene estensimetriche complete ed indipendenti per la misura contemporanea delle forze  $Q$  e  $Y$ , consentendo l'immediata identificazione di tutte le anomalie (carico spostato, sospensioni rotte, forze laterali anomale) riscontrabili durante la marcia del treno;
- d) il costo relativamente limitato e la semplicità di applicazione e di manutenzione ne consentono, ad esempio, l'uso in numerosi esemplari sia in rettilineo ad alta velocità (rilevazione dei moti di serpeggio, non rotondità delle ruote quali sfaccettature o poligonazione) che in curve di qualsiasi raggio;

- e) le catene di misura estensimetriche più moderne contengono tutti gli elementi per effettuare il monitoraggio continuo dei trasduttori che potrebbero, con le opportune considerazioni, divenire ottimi candidati anche per l'inserimento nel sistema di segnalamento dei treni.

Al momento della stesura della presente memoria (20.2.2003) il sistema è in fase di prova presso la stazione ferroviaria di Compiobbi (FI) grazie alla collaborazione alla ricerca offerta da RFI Direzione Compartmentale Infrastruttura di Firenze.

### **3. LA MISURA DELLA CORRUGAZIONE DELLE ROTAIE - Indagine sperimentale**

Il rumore costituisce una caratteristica certamente indesiderata del traffico ferroviario. Lo stato dell'arte della ricerca attribuisce oggi una responsabilità importante sia al rumore emesso dal binario, normalmente preponderante alle basse velocità di traffico, che al rumore emesso dal veicolo, normalmente preponderante alle più alte velocità.

Prescindendo dal rumore di origine meccanica (motori, riduttori, pantografi,...) ed aerodinamica (normalmente presente al di sopra dei 250 km/h), il rumore si genera dalla vibrazione del veicolo e del binario che deriva a sua volta dalla combinazione delle rugosità delle ruote e delle rotaie.

Non è questa la sede per entrare nel dettaglio del problema, si fa però esplicitamente osservare come le lunghezze d'onda, da qualche mm fino a 250 mm, e le ampiezze in gioco, inferiori a 0.1  $\mu\text{m}$ , siano decisamente al di fuori di qualunque standard industriale e, a maggior ragione, al di fuori della tipica mazzatura riscontrabile sulla rotaia bassa nelle curve strette percorse ad elevate accelerazioni non compensate.

La nuova normativa sul rumore ferroviario EN ISO 3095:2003 richiede la misura della rugosità delle rotaie nel sito nel quale si effettuano le prove di tipo di nuovi veicoli prescrivendo il limite massimo dello spettro di rugosità in tale sito.

Sebbene l'intera materia sia tuttora in divenire, ed i lavori in sede AEIF (progetto NOEMIE) sono illuminanti in proposito, è stato proposto in numerose sedi di abbassare lo spettro limite di corrugazione in quanto, sperimentalmente, è stato osservato come le rotaie siano in realtà più lisce di quanto richiesto dalla succitata norma.

Al fine di effettuare una prima indagine sugli effettivi livelli riscontrati in esercizio, sono state condotte, con la indispensabile collaborazione di RFI SpA, le seguenti campagne prova di rilevazione della rugosità:

- Linee DD e Lenta Firenze-Prato, stazione di Sesto Fiorentino;
- Linee DD e Lenta Firenze-Prato, fermata di Pratignone;
- Linea Lenta Firenze-Arezzo, stazione di Compiobbi;
- Linea DD Firenze-Roma, PC S. Donato;
- Linea Lenta Firenze-Arezzo, in linea fra S. Ellero e Rignano;
- Linea DD Firenze-Roma, PC Renacci (solo binario pari) e località Matassino;
- Linea Firenze-Pisa, località Montelupo F.no;
- Linea Tirrenica Livorno-Grosseto, località Quercianella.

Tali linee rappresentano una discreta combinazione di linee a traffico specializzato e misto, lento e veloce, in rettilineo ed in curva, con rotaie visivamente in buono ed in cattivo stato.

Si ricorda come, a tutt'oggi, i metodi di effettuazione ed elaborazione delle misure di rugosità non siano ancora standardizzati e come, senza le necessarie cautele, sia semplice cadere in considerazioni errate sull'argomento (si veda [4] per un'analisi critica del problema).

Al momento della stesura della presente memoria (20.2.2003) le misure effettuate sono soggette ad un'elaborazione particolarmente critica che, sperabilmente, porterà alla definizione di nuovi criteri di misura.

#### **4. LA RILEVAZIONE DELLE ROTAIE DANNEGGIATE - La rotaia come guida d'onda**

Le rotaie ferroviarie sono soggette a numerose rotture durante l'esercizio che sono classificabili in funzione dell'aspetto assunto dopo rottura [5]. Che il problema abbia dimensioni rilevanti è facilmente riscontrabile dalle statistiche sui tipi di inconvenienti rilevati nelle principali amministrazioni ferroviarie europee (si veda ad esempio [6]).

La diagnostica dello stato di sanità interna delle rotaie può essere effettuata mediante controlli ad ultrasuoni manuali o con sonde montate su veicoli [7]; in quest'ultimo caso la posizione delle sonde e la presenza di un fluido di accoppiamento (acqua) limita sia la tipologia di difetti osservabile che la velocità della rilevazione.

Un'altra metodologia indiretta di controllo è offerta dal BACC (Blocco Elettrico Automatico a Correnti Codificate) che costituisce lo standard FS tradizionale per la ripetizione dell'aspetto dei segnali in locomotiva. In tale sistema, le rotaie sono percorse da correnti alternate opportunamente codificate che, nel caso di rottura completa di una rotaia, ovviamente si interrompono, occupando, come suol dirsi, il circuito di binario corrispondente ed impedendo di fatto l'apertura dei segnali.

Quest'ultimo sistema non ha validità generale in quanto non tutte le amministrazioni ferroviarie usano sistemi che utilizzano le rotaie come supporto per la trasmissione delle informazioni sul segnalamento e, soprattutto, il controllo è di tipo "digitale", ossia non è possibile rilevare la rottura finché non è completa e, peraltro, se la rotaia è in compressione per motivi termici può darsi che dia continuità elettrica ma, ovviamente, non meccanica. Al momento della chiusura del circuito, non c'è ovviamente modo di sapere quanta parte di rotaia è mancante, il che obbliga ad un'ispezione immediata con chiusura della circolazione.

Diversi sistemi commercialmente disponibili introducono in un punto, mediante attuatori piezoelettrici, vibrazioni ad opportune frequenze che poi si propagano, in funzione della frequenza, anche fino a distanze molto elevate. Al termine della tratta vi è un opportuno sensore di ricezione e, dall'ampiezza del segnale rilevato, è possibile dedurre se e quanta parte della rotaia si stia fratturando. Questo sistema, analogo ad altri sistemi impiegati nel controllo non distruttivo, ha da un lato il vantaggio di un monitoraggio permanente ma, d'altro canto, il notevole svantaggio di richiedere una coppia sorgente/ricevitore per ogni tratto analizzato.

Inoltre le tecnologie ad ultrasuoni attualmente in uso limitano la loro capacità di analisi ad una porzione di spazio confinata nei pressi dell'elemento ricevitore. Queste tecniche consentono quindi di individuare soltanto i difetti localizzati in prossimità del sensore stesso; per questo motivo l'indagine ultrasonica in rotaia deve essere effettuata mediante un veicolo strumentato dedicato.

Il Politecnico di Torino sta attualmente sviluppando una metodologia per il controllo dello stato di sanità delle rotaie che fa uso del concetto di rotaia vista come guida d'onda.

La propagazione di un'onda elastica in un mezzo continuo, cioè dotato di una delle tre dimensioni spaziali decisamente più rilevante delle altre due, avviene con meccanismi analoghi a quelli che caratterizzano la propagazione della luce nelle fibre ottiche. Le onde elastiche propagano, quindi, rimbalzando all'interno della geometria dell'oggetto in questione. Ciascuna onda è inoltre

caratterizzata da un modo di propagazione proprio, cioè ogni onda interessa l'intera sezione del corpo in cui propaga con modalità diverse e ogni modo è frutto di una ben precisa combinazione di frequenza e lunghezza d'onda. Dall'opportuna interazione tra i vari modi propri di propagare è possibile ottenere informazioni circa la posizione spaziale di un difetto, sia sulla sezione trasversale della rotaia sia lungo la direzione di marcia [8, 9].

I modi in oggetto possono godere anche della proprietà di essere non evanescenti e di propagare quindi per grandi distanze, consentendo di poter effettuare un'analisi statica anziché un'analisi cinetica. Appare quindi possibile pensare di utilizzare un ristretto numero di sensori, in numero circa pari ai modi che si vogliono rilevare, da dislocare lungo il percorso ferroviario, al fine di ottenere un'analisi in continuo dello stato di salute della rotaia stessa.

La collaborazione di UniFi con PoliTo ha recentemente portato ad interessanti conclusioni, di prossima pubblicazione, circa il tipo di sorgente utilizzabile per effettuare l'analisi in guida d'onda. E' noto come al contatto ruota-rotaia si generino forze che hanno spettro molto ampio, ossia un contenuto in frequenza rilevante fino a frequenze molto elevate. Il convoglio risulta pertanto essere un buon candidato al ruolo di generatore passivo del segnale di indagine e in questa direzione si sta concentrando il lavoro.

In ogni caso, indipendentemente dal meccanismo di generazione, è necessaria un'analisi preliminare che consenta di individuare a priori i campi di frequenza nei quali conviene effettuare la generazione e la ricezione del segnale, nonché un'analisi di sensitività che consenta di stimare a priori, con ragionevole approssimazione, la dimensione minima del difetto rilevabile. In tale ottica si stanno sviluppando modelli della rotaia in grado di fornire le caratteristiche dispersive del mezzo e di caratterizzarlo in frequenza e si stanno conducendo analisi dello spettro eccitatore utilizzabile.

## **5. CONCLUSIONI**

Dalla collaborazione tra RFI SpA, Politecnico di Torino ed Università di Firenze è nata un'attività di ricerca applicata all'infrastruttura che abbraccia diversi aspetti legati alla rotaia.

In questa prima fase della ricerca si sono messe a punto le strategie e la base di conoscenze necessarie per l'effettuazione di un lavoro organico e strutturato che possa portare, in tempi relativamente brevi, all'ottenimento di strumenti e metodologie operative che possano essere di utilizzo immediato e diretto nella gestione quotidiana dell'infrastruttura.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] prEN 13463-2002. Railway applications - Testing for the acceptance of running characteristics of railway vehicles - Testing of running behaviour and stationary tests.
- [2] A. Bracciali, R. Ciuffi, F. Piccioli, "Progetto e validazione di un sensore estensimetrico multifunzione per il binario ferroviario", XXX Convegno AIAS, Alghero, 12-15.9.2001, 901-912.
- [3] UNI 3141-1991. Rotaie per linee ferroviarie. Tipi, dimensioni e tolleranze.
- [4] A. Bracciali, P. Folgarait, "Rail Corrugation Measurements for Rolling Stock Type Testing and Noise Control", Techrail Workshop, Paris, 14-15.03.2002 (su CD).
- [5] Fiche UIC 712-2002. Rail Defects.
- [6] A. Raimondi, M.O. Cannavò, D. Cocciaglia, "Sulle rotture di rotaie, deviatori e giunzioni nel 1998", La Tecnica Professionale, CIFI 11/1999, 47-53.

- [7] G. Maffei, A. Raimondi, “Il treno ad ultrasuoni Galileo”, La Tecnica Professionale, CIFI 7-8/1999, 75-83.
- [8] J.L. Rose, M.J. Avioli, P. Mudge, R. Sanderson, “Guided wave inspection potential of defects in rail”, Railway Engineering 2002, 5<sup>th</sup> International Conference and exhibition, 3-4.07.2002, London, (su CD).
- [9] P. Wilcox, P. Cawley, et al., “Long range inspection of rail using guided wave”, Railway Engineering 2002, 5<sup>th</sup> International Conference and exhibition, 3-4.07.2002, London, (su CD).