



SCIENZA E TECNICA

Misura dei carichi verticali trasmessi alla rotaia

Measurement of the vertical loads transferred to the rail

Prof. Ing. Franco M.D. ACCATTATIS^(***)

Dott. Ing. Massimiliano BRUNER^(*)

Dott. Ing. Maddalena CATENA^(**)

Prof. Ing. Giuseppe Romolo CORAZZA^(****)

Dott. Ing. Emilio COSCIOTTI^(****)

Prof. Ing. Gabriele MALAVASI^(*)

Dott. Ing. Stefano ROSSI^(**)

Dott. Ing. Mario TESTA^(**)

Sommario - Obiettivo della ricerca è lo studio e l'implementazione di una Stazione di Misura dei Carichi Verticali (SMCV) trasmessi dalle ruote alle rotaie durante la marcia.

La ricerca è stata sviluppata attraverso modelli teorici, simulazioni numeriche, prove in laboratorio ed in linea durante il normale esercizio, in collaborazione tra Rete Ferroviaria Italiana (RFI) e l'Università La Sapienza di Roma (Dipartimento Ingegneria Civile, Edile e Ambientale - DICEA).

La calibrazione del sistema di misura, le incertezze, la ripetibilità e la riproducibilità dei rilievi sono state verificate in laboratorio e su un binario di prova.

Le prove su di un binario in esercizio, con analisi automatica dei dati per l'identificazione del tipo di rodiggio dei veicoli, degli assi, delle ruote e degli indicatori di carico trasmesso, assoluto e relativo (squilibri), hanno permesso di verificare l'efficacia della stazione di misura e la sua attitudine a rilevare superamenti di valori di soglia impostabili per i carichi massimi e gli squilibri relativi.

1. Lineamenti dello stato dell'arte e della ricerca

Le ricerche sul rilievo dei carichi sono iniziate molto tempo addietro: la ricerca di ZACHER [1], apparsa nel 1996 e quella di MOREAU [2] nel 1987, hanno aperto la via

Summary - The aim of the research is the study and setup of a Vertical Loads Measurement Station (SMCV) transmitted from the wheels to the rails during operation.

The research was developed through theoretical models, numeric simulations, laboratory and online tests during normal operation, in collaboration with the Italian Railway Network (RFI) and the University of Rome La Sapienza (Department of Civil, Building and Environmental Engineering - DICEA).

The calibration of the measurement system, the uncertainties, the repeatability and reproducibility of the findings have been verified in the laboratory and on a test track.

Tests on a track in operation, with automatic data analysis to identify the type of vehicle wheel arrangement, axles, wheels and indicators of absolute and relative load transmitted (imbalances), have allowed verifying the effectiveness of the measurement station and its ability to detect excess of threshold values that can be set for maximum loads and related imbalances.

1. Outline of the state of the art and research

Research on the importance of loads started a long time ago: the Zacher research [1] appeared in 1996, and the one of Moreau [2] in 1987, opened the way for a variety of works

^(*) Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale.

^{(**) RFI SpA, Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane, Direzione Tecnica, Standard Tecnologici e Sperimentali, Armamento.}

^{(***) Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale a.r.}

^{(****) Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale quando ha partecipato al lavoro qui descritto - oggi Italcertifier Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane.}

^{(*) Department of Civil, Building and Environmental Engineering, Sapienza University of Rome.}

^{(**) RFI SpA, Ferrovie dello Stato Italiane Group, Technical Management, Technological and Experimental Standards, Permanent way.}

^{(***) Department of Civil, Building and Environmental Engineering, Sapienza University of Rome a.r.}

^{(****) Department of Civil, Building and Environmental Engineering, Sapienza University of Rome when he participated in the work described herein - today Italcertifier Ferrovie dello Stato Italiane Group.}



SCIENZA E TECNICA

ad una molteplicità di lavori sul tema. Ciononostante il rilievo dei carichi verticali ha portato ad un proliferare di soluzioni tecnologiche descritte in letteratura con notevole riservatezza sull'elaborazione dati e le modalità di presentazione dei risultati.

Lo studio effettuato nel 2009 da UIC sullo stato dell'arte degli Axle Load Checkpoints [3] delinea l'entità degli sforzi fatti dai gestori dell'infrastruttura per la misura dei carichi per asse (fig. 1). In esso vengono individuati i campi d'applicazione delle stazioni di misura dei carichi per asse (ALC) e i settori dell'esercizio che potrebbero trarne vantaggi. Le risposte ad un questionario inviato ai principali gestori delle reti nazionali hanno mostrato una grande varietà di esigenze e punti di vista. Viene presentata una sintesi dei risultati delle misure compiute nelle esperienze della ÖBB in vari siti e della SBB ad Osogna, descritti in modo più approfondito in [4], [5] e [6]. Una particolare attenzione viene dedicata ai possibili indicatori per il monitoraggio della distribuzione longitudinale e trasversale dei carichi sui carri e per l'individuazione dei difetti di rotondità delle ruote. Viene affrontato anche il problema dei valori limite e dei livelli di allarme, che vengono messi in relazione alle varie norme che li prevedono più o meno esplicitamente. Questo argomento e la precisione con la quale devono essere eseguite le misure sono argomenti trattati in maniera più esaustiva in [4].

Infrastructure Manager	Number of ALCs per measured quantities										Realised (Realised) or Expected (E) Benefit									
	Vertical wheel forces	Wheel defects	Vertical wheel forces and wheel defects	Vertical wheel forces and track load	Vertical wheel forces, wheel defects and out-of-roundness	Transversal and vertical wheel forces	Deraiment, transversal and vertical wheel forces	Transversal and vertical wheel forces (instability), noise in straight track	Track load	Transversal and vertical wheel forces (instability), noise and track load	Commercial overloading	Commercial track access fee	Maintenance of infrastructure	Safety	Authorisation type test	Environment, noise and vibration	Standard (S), test (T), support (S), in Discussion (D)	Number of ALCs	Number of measurement sites	
ADIF	27												R			S	27	17		
BDK																D	0	0		
BV	15															S	15	15		
	1															T	1	1		
DB AG				23									R	R		S	23	22		
				5									R	R		T	5	5		
RHK	1				3	3							R	R	R	U	7	5		
OSE													R	R	R	R	1	1		
JBV	3													E		D	0	0		
NetworkRail	72												R	R		S	3	3		
	5												R	R		T	72	26		
ProRail		79											R			R	5	3		
RFI	18															S	79	44		
SBB		7														S	18	10		
				6												S	7	6		
SNCB																D	0	0		
SNCF	8															S	8	8		
ÖBB		1	2		1	1		1		1	R	E	R	R	R	R	S	6	6	
									1	2					E	E	E	T	4	4
Sum	150	8	80	4	36	3	1	1	1	3							287	178		

(Fonte - Source: "Axle Load Checkpoints – State of the art report", UIC Report, 20.02.2009)

Fig. 1 - Attività in ambito europeo sulle stazioni di misura dei carichi.

Fig. 1 - Activities in Europe on measurement stations of loads.

on the subject. Nevertheless, the importance of vertical loads has led to a proliferation of technological solutions on the development of data and the methods of presenting the results described in literature with considerable discretion.

The study carried out in 2009 by UIC on the state of the art of Axle Load Checkpoints [3] outlines the extent of the efforts made by the infrastructure managers to measure loads per axle (Fig. 1).

It identifies the fields of application of the measuring stations of axle loads (ALC) and the operation areas that may benefit thereof. The answers to a questionnaire sent to the main national network operators have shown a wide variety of needs and points of view. A summary is presented of the results of measurements carried out in the experiences of ÖBB at various sites and of SBB at Osogna, described in more detail in [4], [5] and [6].

Particular attention is paid to possible indicators for monitoring the longitudinal and transverse distribution of loads on bogies and for the detection of defects in roundness of the wheels.

The issue of the limit values and warning levels is also addressed that are correlated with various standards that more or less explicitly envisage them. This topic and the precision with which measures are to be carried out will be covered more comprehensively in [4].

The UIC [3] study does not describe the measurement methods used exhaustively.

The measurement principle and processing methods, analysis and use of data is rarely clarified even in literature and advertising of solutions available in the market.

The measuring systems known are essentially based:

1. on direct or indirect measurement of the rail-sleeper reactions in conjunction with bending and/or shear strain gauge measurements [5], [6], [7] and [8];
2. on measurement of the relative rotation due to bending between two sections of the rail [9], for each span between sleepers. This article shows a schematisation of the device and a typical signal obtained at the transit of a load, from which, by repeating the system in sequence on multiple spans, the load is measured with continuity in the portion of equipped track. This reconstruction does not appear to be so simple from the trend of the signal detected from the individual span.



SCIENZA E TECNICA

Nello studio UIC [3] non sono descritti in maniera esaustiva i metodi di misura utilizzati. Anche in bibliografia e nel materiale pubblicitario delle soluzioni disponibili sul mercato raramente viene chiarito il principio di misura e le modalità di elaborazione, analisi ed utilizzazione dei dati acquisiti.

I sistemi di misura di cui si hanno notizie sono basati essenzialmente:

1. sulla misura diretta o indiretta delle reazioni rotaia-traversa unitamente a misure estensimetriche di flessione e/o taglio [5], [6], [7] e [8];
2. sulla misura della rotazione relativa per flessione fra due sezioni della rotaia [9], per ogni campata tra traverse. In questo articolo sono riportati una schematizzazione del dispositivo ed un segnale tipico ottenuto al passaggio di un carico, dal quale, ripetendo in cascata il sistema su più campate, viene misurato con continuità il carico nel tratto di binario attrezzato. Dall'andamento del segnale rilevato dalla singola campata non sembra semplice tale ricostruzione.

Partire dalla misura delle reazioni delle traverse, rende più indiretta la misura rispetto alla misura con estensimetri sulla rotaia e difficile da gestire la presenza contemporanea dei carichi adiacenti (ad esempio i 2 assi di un carrello) e la possibilità di individuare il carico applicato da ciascuno di essi.

Dalle informazioni disponibili sembra siano emerse problematiche quali: la dipendenza della misura da alcune quantità (elasticità e smorzamento del binario, distanze tra gli assi, velocità, etc.); problemi di calibrazione in linea; la necessità di modificare il binario introducendo localmente fenomeni dinamici; mancanza di semplicità, immediatezza, affidabilità e indipendenza da usura o fenomeni di degrado della sovrastruttura o del sistema di misura.

Tutte queste problematiche sono state tenute presenti ed accuratamente evitate nella progettazione e realizzazione del sistema di misura sviluppato.

La presente ricerca giunge ad un metodo di misura simile a quello descritto da MOREAU in [2] attraverso una progettazione del sistema che ha visto, in stretta collaborazione con RFI, la individuazione degli obiettivi e dei requisiti desiderati, la formulazione di diversi metodi di misura alternativi analizzati attraverso modelli teorici e simulazioni numeriche automatiche. I risultati delle simulazioni numeriche, di cui si riporta una breve descrizione in Appendice I, hanno messo a disposizione valori numerici simili a quelli attesi sperimentalmente che hanno sia guidato nella scelta del metodo di misura più promettente tra quelli ipotizzati ed analizzati, sia permesso di: ipotizzare le strategie di taratura più efficaci (cfr. par. 3.1.8); calcolare le incertezze di misura (cfr. par. 3.1); comprendere i fenomeni fisici misurati (cfr. par. 3.2); mettere a punto gli algoritmi di elaborazione per le prove sperimentali; definire le modalità di elaborazione dei dati grezzi e di presentazione dei dati elaborati (cfr. par. 3.3.4).

Starting from the extent of the reactions of the sleepers, makes measurement more indirect with respect to measurement with strain gauges on the rail and makes the simultaneous presence of adjacent loads difficult to manage (for example the 2-axes of a bogie), and the possibility of detecting the load applied by each of them.

From the information available the following issues appear to have emerged such as: the dependence of the measure on some quantities (elasticity and damping of the track, distance between axles, speed, etc.); online calibration problems; the need to change the track by introducing dynamic phenomena locally; lack of simplicity, immediacy, reliability and independence from wear or degradation of the superstructure or of the measuring system.

All these issues have been taken into account and carefully avoided in the design and implementation of the measurement system developed.

This study reaches a measurement method similar to that described by MOREAU in [2] through a system design which, in close collaboration with RFI, has seen the identification of objectives and requirements desired, the formulation of different alternative measuring methods analysed through theoretical models and automatic numerical simulations.

The results of numerical simulations, of which a brief description is given in Appendix I, have provided numerical values similar to those expected experimentally that have both guided in choosing the most promising measuring method among those contemplated and analysed, and have allowed to: hypothesize more effective calibration strategies (see par. 3.1.8); calculate measurement uncertainties (see par. 3.1); understand the physical phenomena measured (see par. 3.2); develop processing algorithms for experimental tests; define the process methods of raw data and presentation of processed data (see par. 3.3.4) useful for the required practical applications that research results have actually allowed (see par. 5); (fig. 2).

The design solution developed with research described herein has aspects not highlighted in analysed literature such as the choice to acquire the Q load indirectly, but the shear at certain measurement sections. For these sections in this paper the following issues are provided: the requirements to be observed for correct positioning, the validity field of the acquired signals, the most effective calibration procedure (see 3.2), an analysis of all parameters that could affect the uncertainty of the results acquired and the quantification of their effects on it (see 3.1)

From the start, the research in cooperation between RFI and DICEA was oriented to define the characteristics of the measuring device, of the operating logic and processing of the raw data in detail.

2. Measurement principle

The measurement system principle described below exploits the properties of the cutting diagram generated in the rail by a Q load between two sleepers (fig. 3).



SCIENZA E TECNICA

ID	Nome attività	nov	dic	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug
1	Laboratory tests																					
2	On line tests on a track not in service (Colleferro station)																					
3	On line tests on a track in service (close to Rocca S. Croce station)																					
4	On line tests on a track in service of the re-activated Rocca S. Croce site																					

Fig. 2 - Programmazione dei lavori: esempio Gantt delle fasi di ricerca.
Fig. 2 - Gantt chart of the demonstration steps of the research innovation.

utili ai fini delle desiderate applicazioni pratiche che i risultati della ricerca hanno poi effettivamente avuto (cfr. par. 5); (fig. 2).

La soluzione progettuale sviluppata con la ricerca e qui descritta presenta aspetti non evidenziati nella letteratura analizzata come la scelta di acquisire non direttamente il carico Q , ma il taglio in corrispondenza a determinate sezioni di misura per le quali in questa memoria si forniscono sia i requisiti da rispettare per un corretto posizionamento, sia il campo di validità dei segnali acquisiti, sia la procedura di taratura più efficace (cfr. 3.2), sia una analisi di tutti parametri che potrebbero influenzare la incertezza dei risultati acquisiti e la quantificazione dei loro effetti su di essa (cfr. 3.1).

La fase di ricerca è stata orientata fin da subito in collaborazione tra RFI e DICEA a definire in modo dettagliato le caratteristiche del dispositivo di misura, delle logiche di funzionamento e dell'elaborazione del dato grezzo.

2. Principio di misura

Il principio del sistema di misura di seguito descritto sfrutta le proprietà del diagramma del taglio generato nella rotaia da un carico Q compreso tra 2 traverse (fig. 3).

In fig. 3 si considera la singola rotaia appoggiata su due traverse adiacenti ed il carico Q agente su di essa nelle posizioni che esso assume in tre genericci istanti successivi. Sono rappresentati inoltre gli andamenti qualitativi dei diagrammi della sollecitazione di taglio relativi alle tre posizioni. La differenza tra il valore del taglio a sinistra T_1 (fig. 4) e il valore del taglio a destra del carico Q , T_2 è pari al carico Q che si vuole misurare.

$$Q = T_1 - T_2 \quad (1)$$

Pertanto, nel tratto di rotaia compreso tra due traverse, la misura del carico Q non dipende dalle reazioni verticali delle traverse.

Il fatto che nelle singole sezioni di misura, all'avvicinamento del carico Q si misuri un valore di taglio diverso da zero, offre la possibilità di comandare l'acquisizione e/o la registrazione dei segnali, al passaggio dei treni, attraverso l'impostazione di un trigger (e di un opportuno pre-trigger). La discontinuità della misura del taglio consente di individuare l'istante di passaggio dei singoli assi.

La misura dei carichi deriva dalla somma algebrica di segnali omogenei (tutte sezioni di misura di taglio), per-

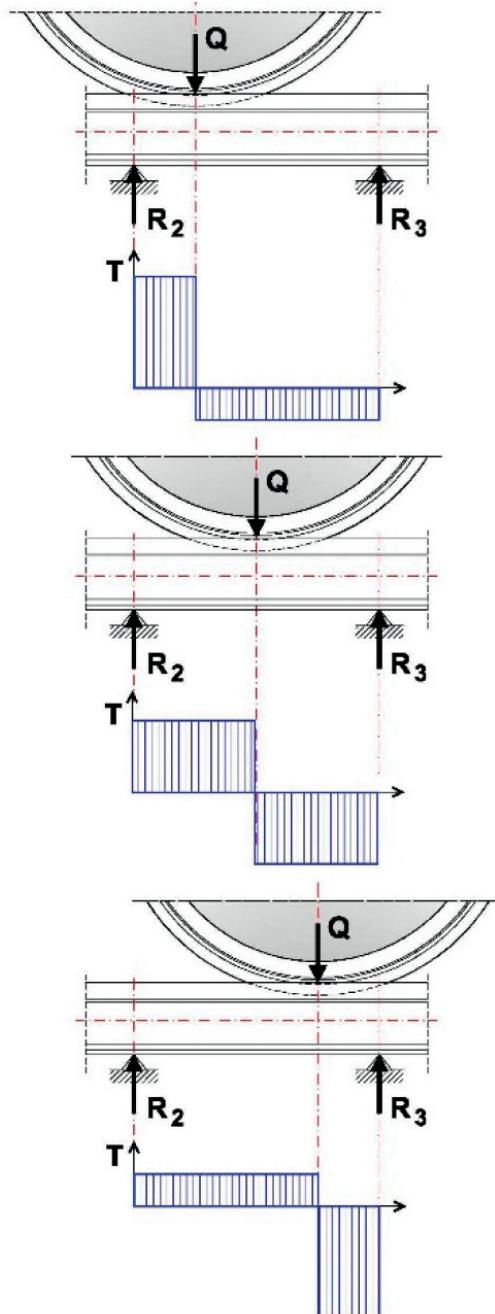


Fig. 3 - Diagrammi della sollecitazione di taglio per posizioni successive del carico Q .
Fig. 3 - Shear stress diagrams for Q load subsequent positions.



SCIENZA E TECNICA

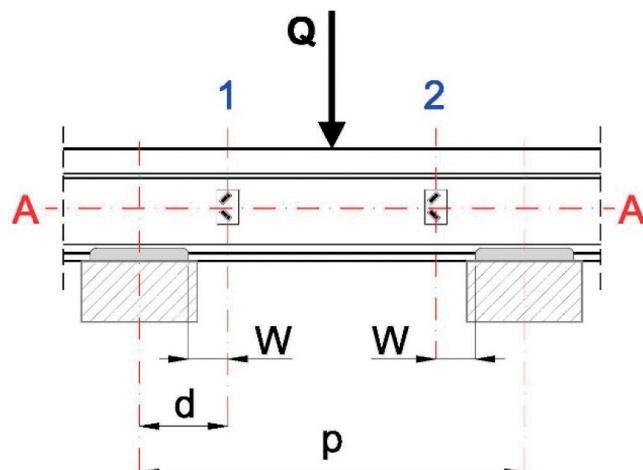


Fig. 4 - Modulo base di lunghezza p (interasse tra traverse) del sistema di misura del carico Q che utilizza misure della sollecitazione di taglio nelle sezioni di misura 1 e 2 posizionate ad una distanza W dal bordo della piastra dell'attacco più vicino e ad una distanza d dall'asse della traversa adiacente.

Fig. 4 - Basic module with p length (distance between sleepers) of the Q load measuring system that uses shear stress measures in measurement sections 1 and 2 positioned at a W distance from the edge of the nearest connection plate and at distance d from the axis of the adjacent sleeper.

tanto si ha il vantaggio che le derive dello zero nel tempo, dovute alla catena di misura (influenzate tra l'altro da condizioni ambientali e di funzionamento della strumentazione), saranno presumibilmente simili e quindi, visto che vengono a due a due sottratti i segnali in uscita (formula 1) il loro contributo sarà circa nullo.

La caratteristica che il taglio nella rotaia debba essere nullo o al più costante in assenza del transito di treni sulla stazione di misura fornisce l'opportunità di prevedere facili calibrazioni (azzeramento delle uscite di tutti i canali anche in automatico, in real-time o in post-elaborazione) capaci di escludere quegli effetti di disturbo che se non controllabili, secondo le definizioni della ENV 13005 [10], sarebbero da considerarsi fonti di incertezza della misura.

Importante è la proprietà per cui, quando il carico Q è fuori della zona di misura, il diagramma del taglio tra le due generiche sezioni di misura ha andamento costante, cioè ha lo stesso valore in tutti i punti e quindi anche nelle sezioni 1 e 2 di fig. 4: la differenza del taglio misurato da queste sezioni fornisce pertanto un risultato pari a zero. Questa proprietà è particolarmente favorevole perché gli assi adiacenti di uno stesso carrello, o di due carrelli appartenenti alle estremità di due veicoli tra loro accoppiati, non influenzano la misura.

È inoltre possibile calcolare, in maniera analoga a quanto fatto per il carico Q , la forza di reazione verticale agente sulla rotaia in corrispondenza delle traversa misurando la sollecitazione di taglio prima e dopo la traversa stessa.

Il principio di misura del carico Q a partire dalla differenza delle misure di taglio è già stato applicato da studio-

Fig. 3 considers the single rail supported on two adjacent sleepers and the Q load working on it in positions that it takes in three successive generic moments.

The shear stress qualitative trends diagrams relating to the three positions are also represented. The difference between the T_1 left shear value (fig. 4) and the shear value to the right of the Q load, T_2 , is equal to the Q load that one wants to measure.

$$Q = T_1 - T_2 \quad (1)$$

Therefore, in the stretch of rail between two sleepers, the measure of the Q load does not depend on the vertical reactions of the sleepers.

The fact that in the individual measurement sections with the approach of the Q load a different shear value from zero is measured offers the possibility to control the acquisition and/or recording of signals, upon the transit of trains, through the setting of a trigger (and of a suitable pre-trigger). The discontinuity of the shear measurement allows identifying the transit instant of the individual axles.

The measurement of loads derives from the algebraic sum of homogeneous signals (all shear measurement sections), therefore there is the advantage that the drifts of zero in time due to the measurement chain (influenced inter alia by environmental conditions and operation of the instrumentation) will presumably be similar and therefore, given that the output signals (formula 1) are subtracted two by two, their contribution will be approximately zero.

The feature that the shear in the rail should be zero or at the most constant in the absence of the transit of trains on the measuring station provides the opportunity to foresee easy calibration (zeroing of the outputs of all channels even automatically, in real-time or in post-processing) capable of excluding those disturbance effects that if uncontrollable, should be considered as sources of uncertainty of measurement, according to the definitions of ENV 13005 [10].

The property that, when the Q load is out of the measurement zone, the shear diagram between the two generic measurement sections has constant trend is important, i.e. it has the same value at all points, and hence also in sections 1 and 2 of Fig. 4: the difference of the shear measured by these sections therefore provides a result equal to zero.

This characteristic is particularly favourable because the adjacent axles of a same bogie, or of two bogies belonging to the ends of two coupled vehicles, do not influence the measurement.

Similarly to what was done for the Q load, it is also possible to calculate the vertical reaction force acting on the rail in correspondence of the sleeper measuring the shear stress before and after the same sleeper.

The measuring principle of the Q load starting from the difference in shear measures has already been applied by French researchers [11].

This and other experiences seem to compute the Q load starting from the measurement of the difference of the max-



SCIENZA E TECNICA

si francesi [11]. Questa ed altre esperienze sembra che calcolino il carico Q a partire dalla misura della differenza del valore massimo e minimo del taglio registrato al passaggio del carico su una unica sezione di misura o su due sezioni di misura molto ravvicinate in corrispondenza delle quali si annullerebbe il campo di validità del principio di misura individuato e descritto nel seguente par. 3.2.

Nel presente lavoro si è cercato di massimizzare la distanza tra due sezioni di misura per estendere la zona di misura (minimizzando le distanze w e d riportate in fig. 4); particolare attenzione è stata posta inoltre sulla valutazione e riduzione delle incertezze.

3. Prestazioni del sistema di misura

3.1. Incertezze di misura

La misura estensimetrica del taglio può essere effettuata attraverso l'applicazione di estensimetri a doppia griglia disposti tra di loro a 90° e in corrispondenza dell'asse neutro, in modo tale che le singole griglie siano posizionate a 45° rispetto a quest'ultimo.

In letteratura non si sono trovate indicazioni sulla incertezza della misura del taglio al variare della posizione angolare degli estensimetri. Si riporta uno studio effettuato su questi aspetti per la importanza che essi rivestono nella definizione del sistema di misura.

Le incertezze della misura di Q dipendono da fenomeni che danno origine a contributi noti, che potrebbero essere opportunamente eliminati e quindi non considerati nel computo dell'incertezza del sistema di misura, secondo quanto previsto dalla ENV13005 [10], e da altri contributi non controllabili che vanno invece presi in considerazione per tale computo. Altrettanto importante è la valutazione delle incertezze di misura nelle fasi di sperimentazione in laboratorio ed in linea ed il loro confronto con quelle ipotizzate nell'analisi teorica.

Gli errori di posizionamento degli estensimetri, che potrebbero avere effetto sulla misura, generano:

1. incertezza per errato posizionamento verticale rispetto all'asse neutro;
2. incertezza per errato posizionamento angolare degli estensimetri rispetto alla direzione dell'asse neutro.

Altri fenomeni possono influenzare, in modo marginale, lo stato di tensione della rotaia, senza dare effetti sull'incertezza del sistema di misura (in quanto, come si vedrà nel seguito, sistematicamente eliminati):

3. forze trasversali (torsione e flessione trasversale);
4. forze longitudinali di trazione e frenatura;
5. variazioni di temperatura della rotaia;
6. tensioni proprie della rotaia.

Contributi all'incertezza di misura possono derivare infine dal sistema di acquisizione ed elaborazione dei dati per:

imum and minimum shear value registered upon the transit of the load on a single measurement section or on two measurement sections very close together in correspondence of which the field of validity of the measurement principle identified and described in the following paragraph 3.2 would be nullified.

This work has sought to maximize the distance between two measuring sections to extend the measurement area (minimising the distances w and d shown in fig. 4); particular attention was also paid on the assessment and reduction of uncertainties.

3. Measuring system performance

3.1. Measurement uncertainties

The strain gauge measure of the shear can be performed through the application of double grid strain gauges arranged at 90° between them and at the neutral axis, so that the individual grids are positioned at 45° with respect to the latter.

Indications on the shear measurement uncertainty were not found in literature as the angular position of the strain gauges varies. A study of these aspects is reported for their importance in the definition of the measuring system.

Measurement uncertainties of Q depend on phenomena that give rise to known contributions, that may be suitably eliminated and therefore not considered in the calculation of the uncertainty of the measurement system, as provided by ENV13005 [10], and other uncontrollable contributions that must instead be taken into account for this calculation.

The evaluation of measurement uncertainties in the early stages of testing in the laboratory and online and their comparison with those assumed in theoretical analysis is equally important. Positioning errors of the strain gauges, which may affect the measure, generate:

1. *uncertainty due to improper vertical positioning to the neutral axis;*
2. *uncertainty due to improper angular positioning of the strain gauges to the direction of the neutral axis.*

Other phenomena may, in a marginal way, affect the stress state of the rail, without giving effects on the uncertainty of the measuring system (since, as will be seen below, they are systematically eliminated):

3. *transverse forces (torsional and lateral bending moments);*
4. *longitudinal traction and braking forces;*
5. *temperature variations of the track;*
6. *previous rail stress.*

Contributions to the measurement uncertainty can finally be derived from the acquisition and data processing system for:

7. *filtering of the shear signal;*



SCIENZA E TECNICA

7. filtraggio del segnale del taglio;
8. forze di inerzia;
9. prestazioni della catena di misura.

La valutazione delle incertezze è stata effettuata utilizzando i risultati delle simulazioni FEM. I risultati ottenuti vengono descritti nei paragrafi successivi.

L'incertezza è stata calcolata simulando una procedura completa di applicazione del sistema compresa la sua taratura secondo quanto descritto in par. 3.1.8.

Il valore dell'incertezza riportato nei grafici è espresso in percentuale del valore di $Q = 100 \text{ kN}$ applicato nelle simulazioni; per i casi di carico nullo è riportato il valore assoluto.

3.1.1. Incertezza per errato posizionamento verticale rispetto all'asse neutro degli estensimetri

Nelle considerazioni che seguono si calcola l'incertezza sulla misura di Q per un errato posizionamento verticale rispetto all'asse neutro degli estensimetri. Si è ipotizzato l'utilizzo di singoli estensimetri a due griglie posizionate a 90° tra di loro.

Si considerino le griglie di fig. 5 posizionate: sul gambo di una rotaia usurata (preso come caso peggiore anche se raramente riscontrabile in rettilineo e in linea) collegate a mezzo ponte di Wheatstone in corrispondenza della posizione dell'asse neutro AA della rotaia non usurata (BB asse neutro della rotaia usurata).

In fig. 5 si riporta inoltre l'andamento teorico della σ , dovuta al carico verticale Q ; le tensioni tangenziali τ (in nero), dovute al taglio T ; la σ (in blu).

L'incertezza per l'errato posizionamento verticale dell'estensimetro rispetto all'asse neutro non ha effetto in

8. *inertia forces;*
9. *measurement chain performance.*

The evaluation of the uncertainties was performed using the results of the FEM simulations. The results are described in the following paragraphs. The uncertainty was calculated by simulating a complete application procedure of the system including its calibration as described in par. 3.1.8.

The value of the uncertainty indicated in the graphs is expressed as a percentage of the value of $Q = 100 \text{ kN}$ applied in the simulations; for the cases of zero load the absolute value is shown.

3.1.1.1. Uncertainty due to improper vertical positioning with respect to the neutral axis of the strain gauges

In what follows the uncertainty on the measurement of Q due to improper vertical positioning with respect to the neutral axis of the strain gauges is calculated. The use of individual two grid strain gauges was assumed positioned at 90° between them. Let us consider the grids of fig. 5 positioned: on the web of a worn rail (taken as the worst case even if rarely found in straight and open line tracks) connected by means of a Wheatstone bridge in correspondence of the position of the neutral axis AA of the not worn rail (BB neutral axis of the worn rail).

Fig. 5 also shows the theoretical trend of σ , due to the vertical load Q ; the tangential stress τ (in black), due to shear T ; the σ (in blue).

Uncertainty due to incorrect vertical positioning of the strain gauge with respect to the neutral axis has no effect because the bending stresses of the two grids are offset (see Appendix 1).

Only the sensitivity of the measuring system to the T shear varies, maximum at the neutral axis real but slightly

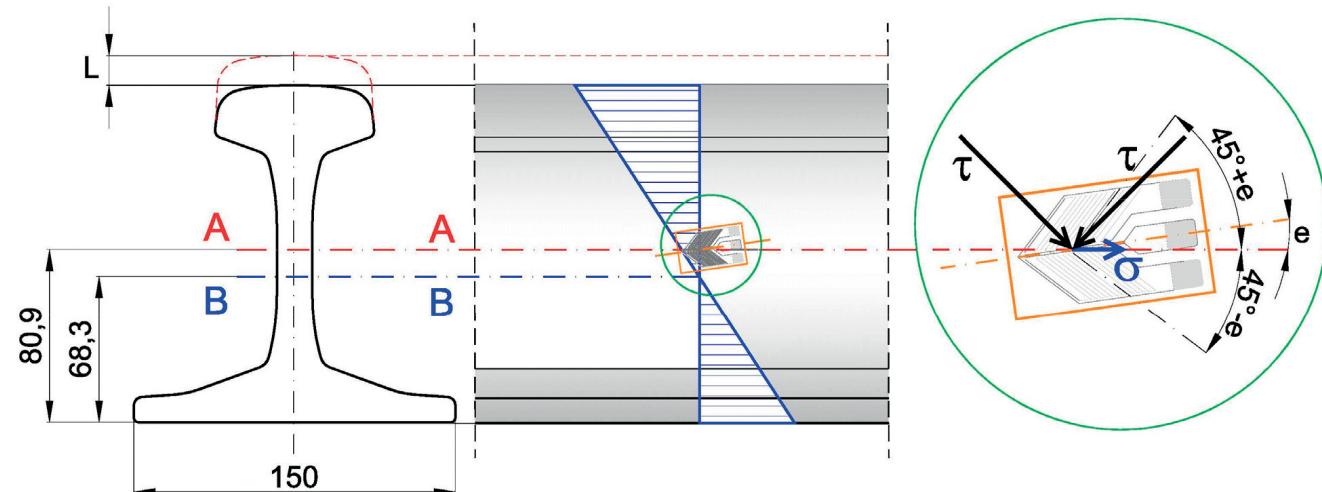


Fig. 5 - Errore di posizionamento verticale e angolare dell'estensimetro; AA: asse neutro della sezione nominale; BB: asse neutro della sezione usurata; e: errore angolare dell'estensimetro; σ : tensione di flessione; andamento delle tensioni di flessione (in blu).
Fig. 5 - Error in vertical and angular positioning of the strain gauge; AA: nominal section neutral axis; BB: neutral axis of the worn section; and angular strain gauge error; σ : bending stress; performance of the bending stress (in blue).



SCIENZA E TECNICA

quanto le tensioni di flessione delle due griglie si compensano (cfr. Appendice 1). Varia solo la sensibilità del sistema di misura al taglio T , massima in corrispondenza dell'asse neutro reale ma di poco variabile con la distanza da esso. Una configurazione a ponte completo di Wheatstone produrrebbe gli stessi risultati con sensibilità maggiore.

Gli estensimetri andrebbero incollati in corrispondenza dell'asse neutro della sezione effettiva, che varia nel tempo per effetto dell'usura.

Tuttavia una collocazione sull'asse neutro della sezione nominale (non usurata) non produce effetti significativi.

Dal calcolo si sono ottenuti a parità di carico i seguenti risultati (fig. 6):

1. Sezione nominale: Tensione τ in corrispondenza dell'asse neutro (AA) = 42,25 [N/mm²];
2. Sezione usurata: Tensione τ in corrispondenza dell'asse neutro (BB) = 45,46 [N/mm²];
3. Sezione usurata: Tensione τ in corrispondenza dell'asse AA = 45,09 [N/mm²].

variable with the distance from it. A full Wheatstone bridge configuration would produce the same results with greater sensitivity. The strain gauges should be glued at the neutral axis of the actual section, which varies over time due to wear.

However, positioning on the neutral axis of the nominal section (not worn) does not produce significant effects. With the same load the following results were obtained from the calculation (fig. 6):

1. Nominal section: τ stress at the neutral axis (AA) = 42.25 [N/mm²];
 2. Worn section: τ stress at the neutral axis (BB) = 45.46 [N/mm²];
 3. Worn section: τ stress at the AA axis = 45.09 [N/mm²].
- 3.1.2. Uncertainty due to improper angular positioning of the strain gauges with respect to the direction of the neutral axis

The uncertainty due to vertical and angular positioning errors has been calculated using the theoretical model, as-

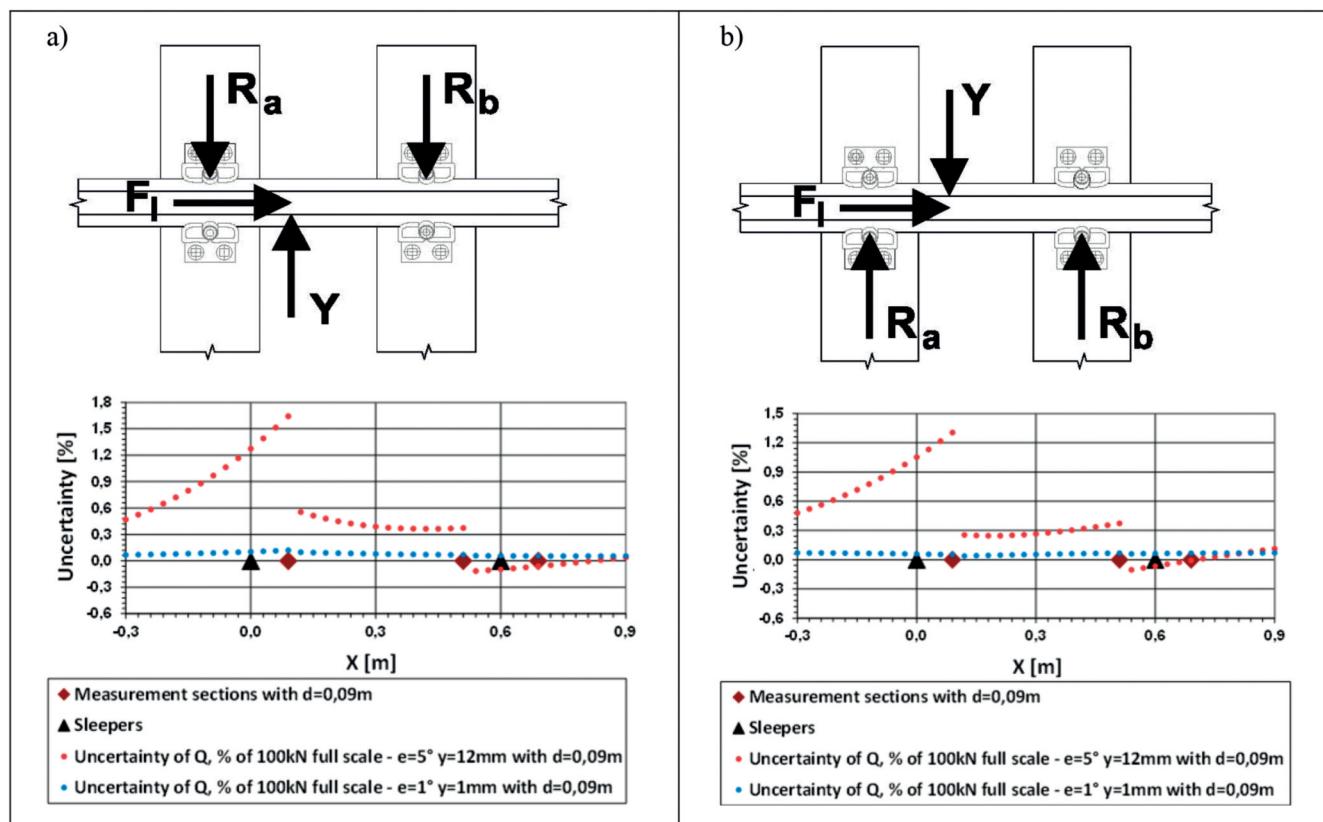


Fig. 6 - Incertezza sulla misura di Q (percentuale rispetto al valore del carico $Q=100\text{kN}$ applicato nelle simulazioni) calcolata ipotizzando, nella sezione 1 un errore e di posizionamento angolare degli estensimetri, un contemporaneo errore y di posizionamento verticale rispetto all'asse neutro, una forza longitudinale di frenatura $F_l=25\text{kN}$: con in a) una forza trasversale $Y=8540\text{N}$; con in b) una forza trasversale $Y=-8540\text{N}$.

Fig. 6 - Uncertainty on the measurement of Q (percentage with respect to the value of load $Q = 100\text{kN}$ applied in simulations) calculated assuming an angular positioning error e in section of the strain gauges, a contemporary vertical positioning error y with respect to the neutral axis, a longitudinal braking force $F_l = 25\text{kN}$: with in a) a transverse force $Y = 8540\text{N}$; and in b) a transverse force $Y = -8540\text{N}$.



SCIENZA E TECNICA

3.1.2. Incertezza per errato posizionamento angolare degli estensimetri rispetto alla direzione dell'asse neutro

L'incertezza dovuta ad errori di posizionamento verticale e angolare è stata calcolata mediante il modello teorico, ipotizzando un errore di posizionamento dell'estensimetro in corrispondenza della sezione di misura.

In Appendice 1 si riportano i risultati numerici del calcolo dell'incertezza, ipotizzando un errore e di 1° e 5° combinato con un errore y di posizionamento verticale di 1mm e 12 mm.

Nel caso estremo di errore $e = 5^\circ$ e $y = 12$ mm, valori che si ritengono ampiamente elevati, si produce una incertezza massima di 1,2% rispetto al valore di riferimento di 100 kN, ovvero 1,2 kN. Nella zona di misura tra le due sezioni considerate l'incertezza massima è inferiore allo 0,05%.

Con una combinazione di errori $e = 1^\circ$ e $y = 1$ mm, l'incertezza è inferiore a 0,06% del valore di riferimento di 100kN e nella zona di misura tra le due sezioni considerate l'incertezza massima è inferiore allo 0,02%.

Tali risultati dimostrano l'applicabilità del sistema non solo su linee principali ma anche su binari di stazionamento, di ingresso in linea, in officine di riparazioni, in fasci di smistamento, che potrebbero avere rotaie caratterizzate da valori di usura simili a quelli considerati.

Si è inoltre rilevata una scarsa sensibilità dell'incertezza di misura rispetto alla distanza d delle sezioni di misura dall'asse degli attacchi traversa-rotaia; pertanto al fine di estendere quanto più possibile la zona di misura sono stati scelti per d i valori più piccoli possibile.

3.1.3. Incertezza dovuta alle forze trasversali (flessione trasversale e torsione)

• Flessione trasversale

La presenza di una forza Y trasversale determina due reazioni trasversali in corrispondenza della suola e degli attacchi traversa-rotaia, unici vincoli in grado di reagire ad Y . Essa determina quindi una flessione trasversale su un piano parallelo a quello di appoggio delle traverse che si manifesta all'altezza delle sezioni di misura a cavallo dell'asse neutro con una che fornisce un contributo all'incertezza di misura simile a quello già considerato in fig. 5 e in Appendice 1.

Questo contributo dipende dalla rigidezza trasversale del binario k_t in corrispondenza degli appoggi, dalla forza Y e dal modulo di inerzia trasversale della rotaia.

Per la valutazione dell'incertezza i valori del taglio T e del momento M sono stati calcolati attraverso le simulazioni FEM assumendo: la rigidezza trasversale $k_t = 28$ kN/mm; il semi-spessore della rotaia pari a 8,25 mm; una forza $Y = 8540$ N.

Il valore assunto per la rigidezza trasversale k_t corrisponde ad uno spostamento trasversale di 0,15 mm di un binario in rettilineo tradizionale su ballast quando è sot-

suming a positioning error of the strain gauge at the measurement section. The numerical results of the calculation of uncertainty are reported in the Appendix 1, assuming an error e of 1° and 5° combined with a vertical positioning error y of 1 mm and 12 mm.

In the extreme case of error $e = 5^\circ$ and $y = 12$ mm, values that are considered high, a maximum uncertainty of 1.2% is produced compared to the reference value of 100 kN, i.e. 1.2 kN. In the measurement area between the two sections considered, the maximum uncertainty is less than 0.05%.

With a combination of errors $e = 1^\circ$ and $y = 1$ mm, the uncertainty is less than 0.06% of the reference value of 100 kN and in the measurement area between the two sections considered the maximum uncertainty is less than 0.02%.

These results demonstrate the applicability of the system not only on main lines but also on parking and entry line tracks, in repair workshops, in shunting sidings that may be characterised by rails featuring wear values similar to those considered.

Low sensitivity of measuring uncertainty was also found with respect to the distance d of the measuring sections from the axle of the sleeper-rail connections; therefore, in order to extend the measuring area as much as possible the smallest values possible have been chosen for d .

3.1.3. Uncertainty due to transverse forces (torsion and transverse bending)

• Lateral bending

The presence of a transverse force Y determines two transverse reactions on the base and on sleeper-rail connections, only constraints capable of reacting to Y .

It therefore determines transverse bending in a plane parallel to the support surface of the sleepers that occurs at the height of the measuring sections over neutral axis with a that contributes to measurement uncertainty similar to that already seen in fig. 5 and in Appendix 1.

This contribution depends on the transverse stiffness of the k_t rail at the supports, from force Y and from the transverse inertia module of the rail.

To assess uncertainty the values of shear T and of moment M have been calculated using FEM simulations assuming: the transverse stiffness $k_t = 28$ kN/mm; the semi-thickness of the rail equal to 8,25 mm; a Y force = 8540 N.

The value taken for the transverse stiffness k_t corresponds to a transverse shift of 0.15 mm of straight traditional track on ballast when subjected to a transverse force of 1/10 of the vertical load of approximately 85 kN and assuming that 3 sleepers balance this transverse load with the central one that reacts by 50%.

This stiffness is consistent with the values obtained from the experiences known in literature. For less rigid permanent ways such as those considered in [12] a transverse stiffness value of approximately 20.000 N/mm can be esti-



SCIENZA E TECNICA

toposto ad una forza trasversale di 1/10 del carico verticale pari a circa 85 kN e ipotizzando che facciano equilibrio a questo carico trasversale 3 traverse con quella centrale che reagisce per il 50%. Tale rigidezza è coerente con i valori ricavabili dalle esperienze note in letteratura. Per armamenti meno rigidi come quelli considerati in [12] si può stimare un valore di rigidezza trasversale pari a circa 20.000 N/mm.

In Appendice 1 sono riportati i risultati ottenuti considerando: anche il contributo della flessione trasversale, l'incertezza nella misura del carico Q non supera lo 0,06%.

• Torsione

La forza trasversale Y applicata sul fungo della rotaia genera anche una sollecitazione di torsione. Gli effetti del momento torcente producono tensioni tangenziali lungo le direzioni a 45° rispetto all'asse neutro e quindi vengono rilevati dalle griglie degli estensimetri.

L'incertezza dovuta alla torsione provocata, sia da forze laterali, sia da forze verticali, sia dall'inclinazione di 1/20 della rotaia, sia da imperfezione dei vincoli di appoggio è stata analizzata mediante prove in laboratorio.

Le prove hanno dimostrato effetti non trascurabili, che tuttavia possono essere eliminati ricorrendo ad un collegamento a ponte completo degli estensimetri tale da annullarli.

I risultati sperimentali ottenuti con le sezioni di misura a ponte completo hanno confermato che gli effetti della flessione e della torsione sono da escludersi dal calcolo dell'incertezza del sistema di misura.

3.1.4. Incertezza dovuta alle forze longitudinali di trazione, frenatura e d'inerzia

Ipotizzando un carico per ruota Q di 100kN ed un carico longitudinale massimo dovuto all'azione frenante pari al 25% di Q [13] (si trascurano le forze longitudinali di trazione in quanto inferiori, e mai presenti contemporaneamente, alla frenatura) si avrebbe uno sforzo normale sulla rotaia pari a 3.8 N/mm² che provoca variazioni trascurabili dell'incertezza anche se sommate agli effetti delle flesioni dovute al carico verticale Q e alla forza trasversale Y.

Nella fig. 6 si riportano i risultati dell'incertezza calcolata al variare della posizione X del carico Q = 100 kN applicato tra due sezioni di misura adiacenti ed ipotizzando:

- un errore di posizionamento angolare e degli estensimetri rispetto alla direzione dell'asse neutro (cfr. fig. 5);
- un errore y di posizionamento verticale dell'estensimetro rispetto all'asse neutro della sezione (cfr. fig. 5);
- una forza longitudinale di frenatura F₁ = 25 kN;
- una forza trasversale Y = +8540 N in fig. 6a) e Y = -8540 N in fig. 6b).

Infine si osserva che l'effetto di forze d'inerzia, che dipende dalla masse comprese tra il punto di applicazione del carico e la zona di misura è, nel caso specifico, ridot-

mated. The results obtained are shown in Appendix 1, considering: the contribution of the transverse bending, the uncertainty in the measurement of the Q load does not exceed 0.06%.

• Torsion

The transverse force Y applied on railhead also generates a torsional stress. The effects of the torque moment produce tangential stresses along the directions at 45° with respect to the neutral axis and are therefore detected by the stress gauges grids.

The uncertainty due to torsion caused both by lateral forces, by vertical forces, and by the inclination of 1/20 of the rail, and imperfection of the support constraints, was analysed through laboratory tests. The trials showed significant effects, that can however be eliminated by using a strain gauge full bridge connection that cancel them.

The experimental results obtained with the full bridge measuring sections have confirmed that the effects of bending and torsion are to be excluded from the calculation of the measurement system uncertainty.

3.1.4. Uncertainty due to longitudinal traction, braking forces and inertia

Assuming a Q wheel load of 100kN and a maximum longitudinal load due to the braking action equal to 25% of Q [13] (the longitudinal traction forces are neglected as they are inferior, and never simultaneously present, when braking) there would be a normal stress on the rail equal to 3.8 N/mm² which causes negligible changes in uncertainty even when added to the bending effects due to the vertical load Q and the transverse force Y. Fig. 6 shows the results of the uncertainty calculated as the X position of load Q = 100 kN varies applied between two adjacent measurement sections and assuming:

- an angular positioning error of the strain gauges with respect to the direction of the neutral axis (see fig. 5);
- a vertical positioning error y of the strain gauge with respect to the neutral axis of the section (see fig. 5);
- a longitudinal braking force F₁ = 25 kN;
- a transverse force Y = +8540 N in fig. 6a) and Y = -8540 N in fig. 6b).

Finally, we can observe that the effect of inertia forces that depends on the masses between the load application point and the measurement area is, in the specific case, reduced. This effect is caused by the entity and the distance and by the nature of mass forces, uniformly distributed along the rail segment, subjected to oscillation (in theory not limitable uniquely to the rail section between the two measurement sections).

In the calculation of Q, the shear values measured in the two sections 1 and 2 are subtracted (see fig. 4 and formula 1). Therefore the system should be affected only by the differences of the inertia forces (differences of vertical acceleration of the masses adjacent to each measurement sec-



SCIENZA E TECNICA

to sia per effetto della loro entità e della loro distanza sia per la loro natura di forze di massa, uniformemente distribuite lungo il segmento di rotaia sottoposto ad oscillazione (in teoria non limitabile al solo tratto di rotaia tra le due sezioni di misura). Nel calcolo della Q si sottraggono i valori di taglio misurati nelle due sezioni 1 e 2 (cfr. fig. 4 e formula 1) e pertanto il sistema dovrebbe risentire solo delle differenze delle forze di inerzia (differenze di accelerazione verticale delle masse limitrofe a ciascuna sezione di misura in determinato istante di acquisizione) viste dalle singole sezioni di misura e non della forza di inerzia complessiva.

Tale considerazione è coerente con la riscontrata indipendenza delle misure dalla velocità di transito.

3.1.5. Incertezza dovuta a stati di coazione della rotaia

Nella lunga rotaia saldata si ha una zona molto estesa in cui la rotaia non è (almeno teoricamente, nella realtà ci sono sempre dei piccoli spostamenti) libera di muoversi ed una zona di estremità che in presenza di variazioni termiche si allunga o si contrae.

Nelle ipotesi che il sistema di misura sia posizionato nella zona di estremità di massima deformazione longitudinale della rotaia, e di una variazione di 35° di temperatura della rotaia rispetto alla temperatura di posa, ovvero ipotizzando un carico longitudinale nella rotaia pari a 700 kN [14] (condizioni assolutamente rare ed eccezionali) in aggiunta ai carichi Q ed Y già applicati con errori di posizionamento $e = 1^\circ$ ed $y = 1 \text{ mm}$, si otterrebbe un errore inferiore al 2% del valore di riferimento di 100 kN.

In presenza degli errori di posizionamento degli estensimetri più elevati e nelle ipotesi particolarmente sfavorevoli considerate (temperatura e posizione nella zona di estremità) l'incertezza potrebbe assumere valori più elevati, che tuttavia possono essere eliminati in fase di elaborazione confrontando i valori rilevati prima ed al passaggio del convoglio.

Analogamente non comportano effetti sull'incertezza eventuali stati di coazione presenti sulla rotaia che non producono deformazioni se pre-esistenti all'applicazione degli estensimetri.

Inoltre gli effetti delle eventuali deformazioni che potrebbero generarsi a seguito delle saldature delle rotaie, già attrezzate con gli estensimetri per il loro inserimento in linea, vengono eliminati con le operazioni di calibrazione.

Infine l'incertezza dovuta a questi fenomeni dovrebbe essere considerata solo se le deformazioni fossero di entità tale da superare il campo di linearità dell'estensimetro, ipotesi che, tenuto conto dell'entità di tali deformazioni, si ritiene non realizzabile.

3.1.6. Incertezza dovuta al filtraggio del segnale del taglio ed alla catena di misura

Gli effetti del trattamento dei segnali acquisiti, mediante filtri anti-alias e filtri passa-basso sono stati stu-

tation in a given acquisition instant), seen from the individual measurement sections and not of the overall inertia force.

Such finding is consistent with the observed independence of the measures from the transit speed.

3.1.5. Uncertainty due to rail constraint conditions

In the long welded rail there is a very extensive area in which the rail is not (at least theoretically, there are actually always small displacements) free to move and an end area that in the presence of thermal variations stretches or shrinks.

In the hypothesis such as the measurement system lays in the end area of maximum longitudinal deformation of the rail a temperature variation of the rail of 35° with respect to the laying temperature, i.e. assuming a longitudinal load in the rail of 700 kN [14] (very rare and exceptional circumstances) in addition to loads Q and Y already applied with positioning errors $e = 1^\circ$, $y = 1 \text{ mm}$, an error, of less than 2% of the reference value of 100 kN would occur.

In the presence of positioning errors of the highest strain gauges and in the cases considered particularly unfavourable (temperature and position at the end), the uncertainty could take higher values, that can however be eliminated during processing by comparing the values measured before and upon transit of the convoy.

Similarly, any constraints on the rail that do not produce deformations do not result in any effects on the uncertainty if pre-existing the application of the strain gauges.

Furthermore, any deformation effects that could arise as a result of welding of the rails, already equipped with strain gauges for their introduction on-line, are eliminated with calibration operations.

Finally, the uncertainty due to these phenomena should be considered only if the deformations were large enough to exceed the linearity range of the strain gauge hypothesis that, given the size of these distortions, is considered not feasible.

3.1.6. Uncertainty due to shear signal filtering and to the measuring chain

The effects of the processing of the acquired signals, by means of anti-alias filters and low-pass filters have been studied both filtering the simulation calculation signals, and filtering the signals acquired experimentally.

Taking into account the sampling frequencies compatible with the running speed, the uncertainty due to shear signal filtering was negligible.

The choice of the processing parameters of signals (sampling frequency, filters cut frequency, etc.) has therefore no effect on the uncertainty. It must be such as to allow the identification of the transit of the wheels on the measurement sections, the tracking of the load of a wheel along the measurement spans, the calculation of the transit



SCIENZA E TECNICA

diati sia filtrando i segnali simulati a calcolo, sia filtrando i segnali acquisiti sperimentalmente. Tenuto conto delle frequenze di campionamento compatibili con la velocità di marcia, l'incertezza dovuta al filtraggio del segnale del taglio è risultata trascurabile.

La scelta dei parametri di trattamento dei segnali (frequenza di campionamento, frequenza di taglio dei filtri, ecc.) pertanto non ha effetto sulla incertezza, ma deve essere tale da consentire l'individuazione del passaggio delle ruote sulle sezioni di misura, l'inseguimento del carico di una ruota lungo le campate di misura, il calcolo della velocità di transito di ciascuna ruota, il calcolo della distanza tra le ruote, l'individuazione in automatico del rodiggio dei veicoli in transito.

Infine i valori di incertezza complessivi in laboratorio sono risultati simili a quelli ipotizzati a calcolo da cui si deduce che l'incertezza dovuta all'intera catena di misura sia trascurabile o al massimo dello stesso ordine di grandezza di quella calcolata.

3.1.7. Riepilogo delle incertezze di misura calcolate

Nella tabella 1 si riassumono i valori massimi calcolati nella zona di misura, ipotizzando un errore e di posizionamento angolare degli estensimetri ed un contemporaneo errore y di posizionamento verticale rispetto all'asse neutro, ottenuti attraverso la costruzione di grafici analoghi a quelli riportati in fig. 6.

Le incertezze calcolate risultano molto basse e sono confermate dai risultati sperimentali di laboratorio che hanno evidenziato bassi valori degli scostamenti tra carichi misurati e carichi applicati e basse variazioni dei valori delle costanti di taratura calcolate.

Inoltre l'utilizzazione delle proprietà della configurazione a ponte completo permette di compensare eventuali errori di posizionamento degli estensimetri. Le favorevoli proprietà di tale configurazione estensimetrica e del metodo di misura si avvalgono anche della possibilità di compensare nella fase di taratura eventuali effetti dell'errore di posizionamento degli estensimetri attraverso la determinazione di costanti di taratura per ogni sezione di misura (cfr. par. 3.1.8).

La tabella 1 mostra che il valore massimo di incertezza risulterebbe pari a 0,6% corrispondente agli effetti del carico Q e delle altre forze ipotizzabili nel caso di massimo errore di posizionamento degli estensimetri.

La sperimentazione ha dimostrato che gli errori massimi effettivi di posizionamento sono sensibilmente inferiori e contenuti nei valori più bassi considerati. Pertanto l'errore complessivo è da ritenersi pari a 0,12%.

Tenuto conto di un analogo valore per l'incertezza dovuta alla catena di misura si può dedurre che l'incertezza complessiva possa essere mediamente dell'ordine dello 0,25% come anche rilevato sperimentalmente in laboratorio.

speed of each wheel, the calculation of the distance between the wheels, the automatic detection of the wheel arrangement of the vehicles in transit.

Finally, the overall uncertainty values in the laboratory turned out to be similar to those assumed in the calculation from which it is inferred that the uncertainty due to the entire measurement chain is negligible or at the most, of the same order of magnitude as that calculated.

3.1.7. Summary of calculated measurement uncertainties

Table 1 summarises the maximum values calculated in the measurement area, assuming an angular positioning error e of the strain gauges and a simultaneous vertical positioning error y with respect to the neutral axis, obtained through the construction of graphs similar to those shown in fig. 6.

The calculated uncertainties are very low and confirmed by the results of laboratory experiments that showed low deviation values between the measured loads and applied loads and low variations in the values of the calibration constants calculated.

Moreover, the utilisation of the properties of the complete bridge configuration allows compensating for any errors in the positioning of the strain gauges.

The favourable properties of such strain gauge configuration and of the measurement method make use also of the possibility of offsetting any effects of the positioning error of the strain gauges in the calibration phase through the determination of calibration constants for each measurement section (see par. 3.1.8).

Table 1 shows that the maximum uncertainty value would be equal to 0.6% corresponding to the effects of the load Q and of other imaginable forces in the case of the maximum positioning error of the strain gauges.

Experimentation has shown that the maximum actual positioning errors are considerably lower and restrained in lower values considered. Therefore, the total error is equal to 0.12%.

Given a similar value for the uncertainty due to the measurement chain, we can infer that the overall uncertainty may be an average of the order of 0.25% as also found experimentally in the laboratory.

3.1.8. Calibration procedure

The calibration procedure of the measurement system is carried out by determining the coefficient k for each section that multiplied by the measured deformation provides the shear value.

Calibration is carried out by applying three known loads in three different x positions, between the two measurement sections, to explore the variation field of the deformation extent (fig. 7).

Table 2 shows an example of the calculation of the coefficients by simulating correct positioning of strain gauges



SCIENZA E TECNICA

TABELLA 1 – TABLE 1

RIEPILOGO DELLE INCERTEZZE DI MISURA SUMMARY OF MEASUREMENT UNCERTAINTIES

Causate da <i>Caused by</i>	Forze applicate <i>Applied forces</i>	Errori ipotizzati <i>Assumed errors</i>	Valutazione dell'incertezza (valore di riferimento di Q: 100 kN) <i>Evaluation of uncertainty (Reference value of Q: 100 kN)</i>
Errato posizionamento verticale y rispetto all'asse neutro degli estensimetri <i>Improper vertical positioning y with respect to the neutral axis of the strain gauges</i>	$Q = 100 \text{ kN}$	$y=1 \text{ mm}; e=1^\circ$ $y=12 \text{ mm}; e=5^\circ$	< 0,02% < 0,05%
Errato posizionamento angolare degli estensimetri rispetto alla direzione dell'asse neutro <i>Improper angular positioning of the strain gauges to the direction of the neutral axis</i>	$Q = 100 \text{ kN}$ $Y = \pm 8540 \text{ N}$	$y=1 \text{ mm}; e=1^\circ$ $y=12 \text{ mm}; e=5^\circ$	< 0,06 % < 0,25%
Forze trasversali (flessione trasversale) <i>Transverse forces (transverse moment)</i>	$Q = 100 \text{ kN}$ $Y = \pm 8540 \text{ N}$	$y=1 \text{ mm}; e=1^\circ$ $y=12 \text{ mm}; e=5^\circ$	Eliminata mediante compensazione <i>Eliminated by offsetting</i>
Forze longitudinali di trazione o frenatura <i>Longitudinal traction or braking forces</i>	$Q = 100 \text{ kN}$ $Y = \pm 8540 \text{ N}$ $F_l = 25 \text{ kN}$	$y=1 \text{ mm}; e=1^\circ$ $y=12 \text{ mm}; e=5^\circ$	< 0,12 % < 0,6 %
Variazioni di temperatura della rotaia <i>Rail temperature variations</i>	$Q = 100 \text{ kN}$ $F_l = 700 \text{ kN}$	$y=1 \text{ mm}; e=1^\circ$ $y=12 \text{ mm}; e=5^\circ$	< 2 % < 9 % Eliminata mediante elaborazione dei segnali <i>Removed by signal processing</i>
Stati di coazione della rotaia <i>Rail constraint conditions</i>			Eliminata mediante elaborazione dei segnali <i>Removed by signal processing</i>
Forze di inerzia <i>Inertia forces</i>			Trascurabile per l'entità delle masse presenti nella zona di applicazione e misura del carico <i>Negligible for the entity of the masses present in the application and load measurement area</i>
Filtraggio del segnale <i>Signal filtering</i>			Trascurabile per effetto delle modalità di elaborazione del segnale <i>Negligible due to the effect of the signal processing mode</i>

3.1.8. Procedura di taratura

La procedura di taratura del sistema di misura viene effettuata tramite la determinazione, per ciascuna sezione, del coefficiente k , che moltiplicato per la deformazione misurata fornisce il valore del taglio.

La taratura viene effettuata applicando tre carichi noti in tre diverse posizioni x , tra le due sezioni di misura, per esplorare il campo di variazione dell'entità della deformazione (fig. 7).

Nella tabella 2 viene riportato un esempio di calcolo dei coefficienti simulando un posizionamento degli

for section 2 and with an angular and vertical positioning error (see table 1) for section 1.

The calculation of the coefficients is performed through linear regression with zero constant coefficient.

3.2. Laboratory tests

Experimental tests were carried out at the laboratory of the RFI Istituto Sperimentale by applying forces to the rail using both vertical and transversal actuators (fig. 8). The effect of rail inclination was simulated using connection plates with and without an inclination of 1/20.



SCIENZA E TECNICA

estensimetri corretto per la sezione 2 e con un errore di posizionamento verticale e angolare (cfr. tabella 1) per la sezione 1.

Il calcolo dei coefficienti è effettuato mediante la regressione lineare a coefficiente costante nullo.

3.2. Verifiche di laboratorio

Le verifiche sperimentali sono state effettuate presso il laboratorio dell'Istituto Sperimentale di RFI applicando forze alla rotaia mediante attuatori, sia verticali sia trasversali (fig. 8). L'effetto dell'inclinazione della rotaia è stato simulato utilizzando piastre degli attacchi con e senza inclinazione di 1/20.

In fig. 9 si riporta un esempio dell'andamento temporale dei carichi applicati: verticali Q (variabili da 1 a 100 kN) e trasversali Y (variabili da 1 a 10 kN).

Nelle prove, per eliminare gli effetti sulla misura del taglio delle deformazioni di torsione e flessione della ro-

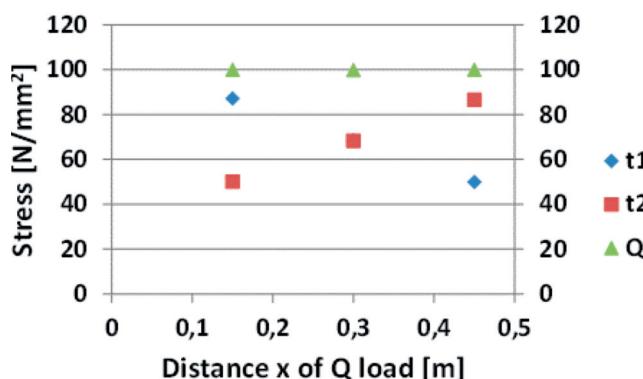


Fig. 7 - Tensioni τ calcolate mediante simulazione nelle sezioni di

misura 1 e 2 al variare della posizione del carico Q.

Fig. 7 - τ stresses calculated by simulation in measurement sections 1 and 2 as the Q load position varies.

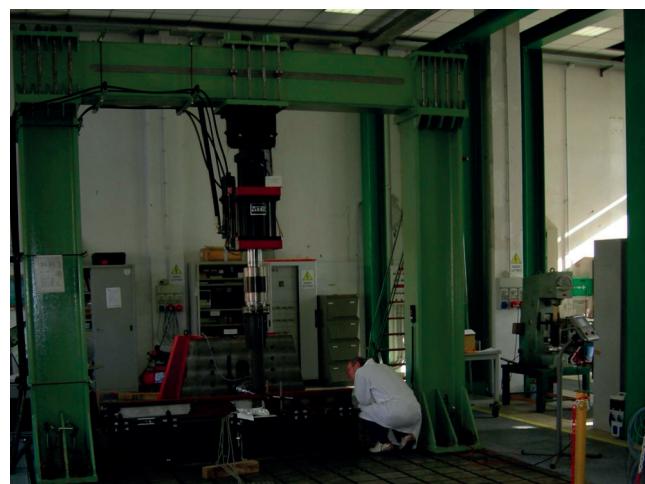


Fig. 8 - Portale con attuatore verticale e attuatore trasversale.
Fig. 8 - Portal with vertical actuator and transverse actuator.

Fig. 9 is an example of temporal evolution of the loads applied: Q vertical (ranging from 1 to 100 kN) and Y transversal (ranging from 1 to 10 kN).

In tests, to eliminate the effects on shear measurement of torsion deformations and rail bending, full bridge strain gauge configurations, at each measuring section, are adopted (marked in fig. 10). Two strain gauges have been placed on the web of the rail, each with two grids applied at 45° with respect to the neutral axis of the rail, one on the inside of the rail (with respect to the rail) and one on the outside of the track (with respect to the rail).

Two basic modules were tested each consisting of two measuring sections: base unit s. 3-s. 4, base module s. 34-s. 1718.

Fig. 11 a), b) and (c) shows the relationship between the Q load measured (Q_m) and the Q load applied (Q_a), for the two basic modules, depending on the distance between the Q load and a reference section of the basic module using vertical and transverse loads given in table 3.

From these figures it is possible to verify the existence of an area around each non validity measurement of the same measurement due to reduced sensitivity to shear: the Q_m/Q_a ratio varies gradually, with an "s" shaped trend, as the reference section approaches and is overcome. This phenomenon can be attributed to the alteration of the theoretical distribution of deformations in the area where the load is applied.

From the comparison of the results shown in fig. 11 a) and b) it is evident how there is no influence on Q by force Y, with the strain gauge full bridge configuration. This property is also evident from the analysis of time series (see fig. 12 b) of the Q load measured from the basic module consisting of s. 3-s. 4 (in green) and the basic module consisting of s. 3-4-s. 1718 (in fuchsia) where all curves of the loads Q applied (in blue) and measured are perfectly overlapping even after applying load Y (in red). Equality between the measured Q load and the applied Q load (almost always equal to 100 kN) can also be seen by the numeric values reported (in green and fuchsia) at the top of fig. 12 b) corresponding to the moments highlighted in the figure (vertical lines).

TABELLA 2 – TABLE 2

RIEPILOGO DELLE INCERTEZZE DI MISURA
SUMMARY OF MEASUREMENT UNCERTAINTIES

x [m]	τ_1 wrong displacement [N/mm ⁻²]	τ_2 correct displacement [N/mm ⁻²]	Q applied [N]
0,15	-87,23	50,02	100000
0,30	-68,52	68,33	100000
0,45	-49,96	86,64	100000
	K2	K1	b
	736,85	-724,12	0



SCIENZA E TECNICA

taia, si sono adottate configurazioni estensimetriche a ponte completo in corrispondenza ad ogni sezione di misura (evidenziate in fig. 10) posizionando sul gambo della rotaia due estensimetri, dotati ciascuno di due griglie applicate a 45° rispetto all'asse neutro della rotaia, uno sul lato interno della rotaia (rispetto al binario) ed uno sul lato esterno della rotaia (rispetto al binario).

Sono stati sperimentati due moduli base costituiti ciascuno da due sezioni di misura: modulo base s.3-s.4, modulo base s.34-s.1718.

In fig. 11 a), b) e c) si riporta il rapporto tra il carico Q misurato (Q_m) e il carico Q applicato (Q_a), per i due moduli base, in funzione della distanza tra il carico Q ed una sezione di riferimento del modulo base applicando carichi verticali e trasversali riportati in tabella 3.

Da queste figure è possibile verificare l'esistenza di una zona intorno a ciascuna sezione di misura di non validità della misura stessa a causa della ridotta sensibilità al taglio: il rapporto Q_m/Q_a varia gradualmente, con un andamento a forma di "s", all'avvicinarsi e al superamento della sezione di riferimento. Tale fenomeno può essere attribuito alla alterazione della distribuzione teorica delle deformazioni nella zona in cui è applicato il carico.

Dal confronto dei risultati riportati in fig. 11 a) e b) è evidente come, con la configurazione estensimetrica a ponte completo, non ci sia alcuna influenza sulla Q da parte della forza Y. Tale proprietà è evidente anche dall'analisi delle storie temporali (cfr. fig. 12 b) del carico Q misurato dal modulo base costituito da s.3-s.4 (in verde) e dal modulo base costituito da s.3-s.1718 (in fucsia) ove tutte le curve dei carichi Q applicati (in blu) e misurati sono perfettamente sovrapposte anche dopo l'applicazione del carico Y (in rosso). L'ugualianza tra carico Q misurato e carico Q applicato (praticamente

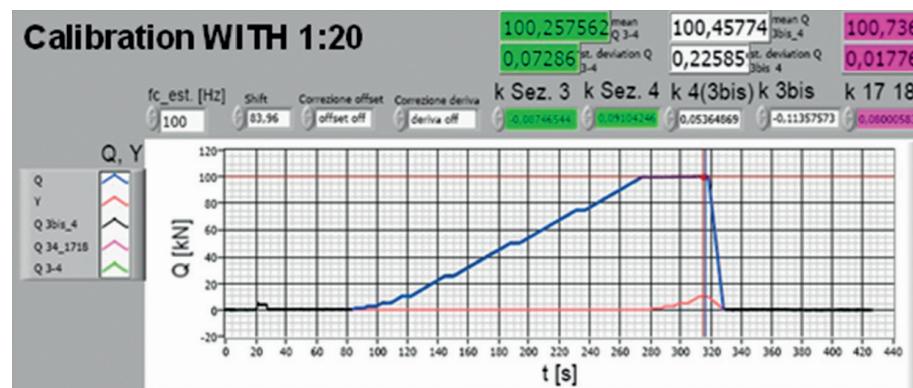


Fig. 9 - Carico verticale Q (in blu) e trasversale Y (in rosso) applicati durante le prove in laboratorio.

Fig. 9 - Vertical load Q (in blue) and transversal Y (in red) applied during laboratory tests.

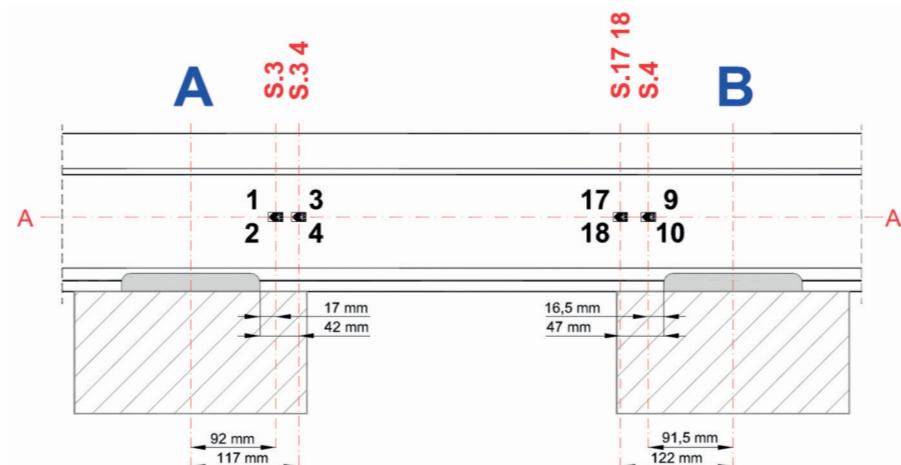


Fig. 10 - Attrezzaggio della rotaia con due moduli base costituiti da estensimetri applicati su entrambi i lati della rotaia: modulo base s.3-s.4, modulo base s.34-s.1718.

Fig. 10 - Rail setup with two base modules consisting of strain gauges mounted on both sides of the rail: base unit s. 3-s. 4, base modules. 34-s. 1718.

TABELLA 3 – TABLE 3

SEZIONI DI RILEVAMENTO E CARICHI APPLICATI NELLE PROVE DI LABORATORIO

SURVEY SECTIONS AND LOADS APPLIED IN LABORATORY TESTING

Caso Case	Modulo Base Basic Module	Sezione di riferimento Reference section	Q_a [kN]	Y_a [kN]	Figura 11 Figure 11
a)	s.3-s.4	s.3	100	0	(verde) (green)
a)	s.34-s.1718	s.34	100	0	(fucsia) (purple)
b)	s.3-s.4	s.3	100	10	(verde) (green)
b)	s.34-s.1718	s.34	100	10	(fucsia) (purple)
c)	s.3-s.4	s.3	1	0	(verde) (green)
c)	s.34-s.1718	s.34	1	0	(fucsia) (purple)



SCIENZA E TECNICA

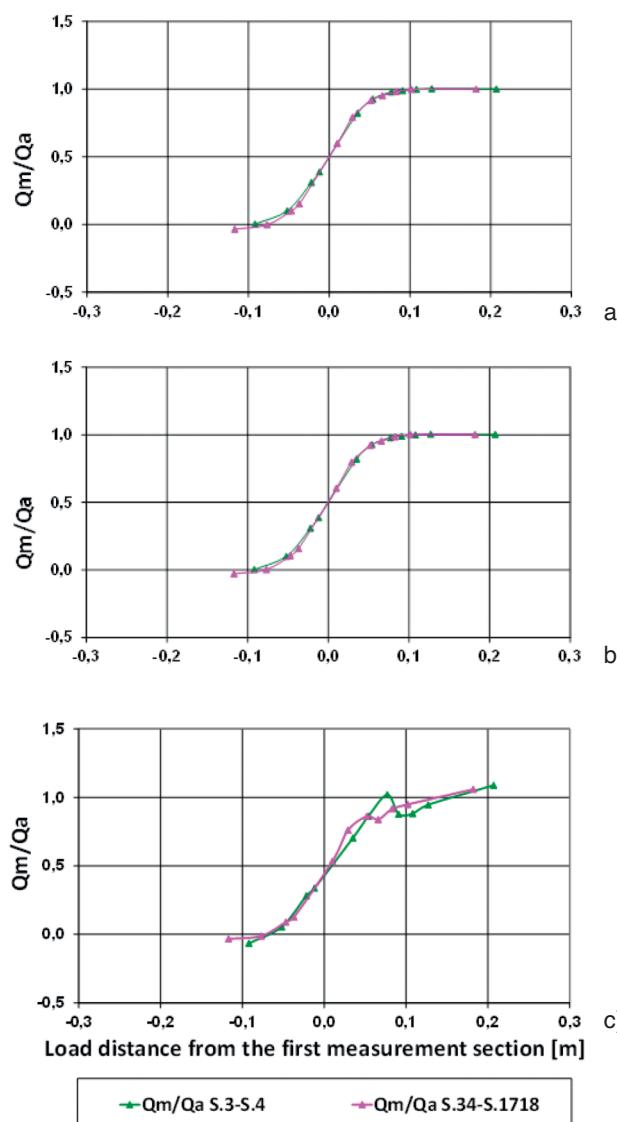


Fig. 11 - Rapporto Q_m/Q_a in funzione della distanza del carico dalla prima sezione di misura (sezione di riferimento). Caso a) $Q_a = 100\text{kN}$, $Y_a = 0 \text{ kN}$; caso b) $Q_a = 100 \text{ kN}$, $Y_a = 10 \text{ kN}$; caso c) $Q_a = 1 \text{ kN}$, $Y_a = 0 \text{ kN}$.

Fig. 11 - Q_m/Q_a Ratio as a function of the load distance from the first measurement section (reference section). Case a) $Q_a = 100 \text{ kN}$, $Y_a = 0 \text{ kN}$; case b) $Q_a = 100 \text{ kN}$, $Y_a = 10 \text{ kN}$; case c) $Q_a = 1 \text{ kN}$, $Y_a = 0 \text{ kN}$.

sempre uguale a 100 kN si rileva anche dai valori numerici riportati (in verde e in fucsia) in alto in fig. 12 b) corrispondenti agli istanti evidenziati in figura (righe verticali).

L'insensibilità alla forza trasversale conferma l'indipendenza del sistema di misura dai momenti delle forze Y e Q nel piano trasversale.

Al di fuori della campata di misura dove il sistema di misura dovrebbe fornire un risultato di Q pari a zero si sono ottenuti valori di Q sempre inferiori a 2 kN e normalmente ad 1 kN.

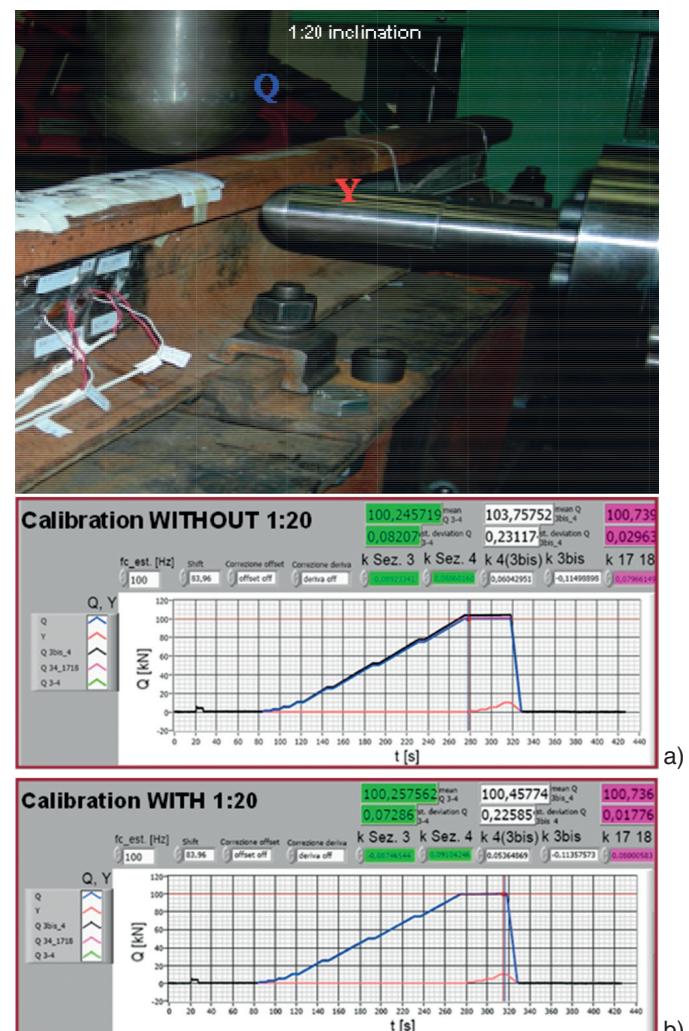


Fig. 12 - Misure effettuate con e senza inclinazione rotaia di 1/20: carichi misurati dalle due campate di misura (in verde e fucsia), carichi applicati (in blu); valori numerici (in verde e fucsia) misurati in corrispondenza dei riferimenti verticali; in bianco valori numerici non affidabili per avaria estensimetri.

Fig. 12 - Measurements taken with and without 1/20 rail inclination: loads measured from the two measurement spans (in green and fuchsia), applied loads (in blue); numeric values (green and fuchsia) measured at vertical references; unreliable numeric values in white due to faulty strain gauges.

Insensitivity to transverse force confirms the independence of the measuring system from the Y and Q forces moments in the transverse plane.

Outside the measuring span where the measuring system should provide a result of Q equal to zero we have Q values always less than 2 kN and normally at 1 kN.

This property eliminates the influence of consecutive axes and allows replicating the measurement system producing more adjacent basic modules in succession.

Fig. 11 c) highlights the high resolution of the measurement system that is able to detect Q values of 1 kN.



SCIENZA E TECNICA

Questa proprietà elimina l'influenza degli assi consecutivi e permette di replicare il sistema di misura realizzando più moduli base adiacenti in successione.

La fig. 11 c) evidenzia l'elevata risoluzione del sistema di misura che è in grado di rilevare valori di Q di 1 kN.

Le prove hanno evidenziato inoltre l'indipendenza dalla inclinazione della rotaia. I valori dei carichi rilevati con e senza inclinazione della rotaia sono praticamente coincidenti (fig. 12 a) e b)).

Le prove hanno evidenziato anche l'indipendenza dalla presenza o meno della piastra in gomma sotto l'attacco della rotaia.

Lo scarto tra il valore di Q misurato e il valore del carico Q applicato (pari a 100 kN), con e senza l'interposizione di una piastra in gomma ($k = 22.5 \text{ kN/mm}$), è risultato inferiore a 1 kN (fig. 13).

La distanza tra la sezione di misura e l'attacco della rotaia non influenza i valori rilevati per distanze w (fig. 4) maggiori o uguali a circa 20 mm (assunto pari a 30 mm nelle applicazioni per cautelarsi da eventuali errori di posizionamento dello spezzone della rotaia durante la fase di inserimento in linea).

In fig. 14 si riporta la sintesi dei risultati ottenuti, al variare della distanza dei carichi dalla prima sezione di misura, per i due moduli base, con e senza l'interposizione della piastra in gomma sotto l'attacco della rotaia, variando la distanza relativa tra attacco e sezione di misura (distanza w di fig. 4): in fig. 14 a) i carichi applicati sono $Q_a = 100 \text{ kN}$, $Y_a = 10 \text{ kN}$; in fig. 14 b) i carichi applicati sono $Q_a = 1 \text{ kN}$, $Y_a = 0$.

Il campo di validità del sistema di misura è stato definito valutando l'incertezza di misura. Nella fig. 15 si riporta la incertezza calcolata al par. 3.1 e quella stimata sperimentalmente a partire dallo scarto del carico Q misurato rispetto al carico Q applicato, espresse entrambe come percentuale del valore di riferimento applicato pari a 100 kN.

Come da fig. 15 l'incertezza calcolata e quella sperimentale coincidono nella zona compresa tra le sezioni di misura ma divergono in corrispondenza delle posizioni X del carico prossime alla sezione di misura. Ciò è coerente con l'effetto sulla misura di Q della distanza tra il carico Q applicato e le sezioni di misura del modulo base.

Assumendo un valore limite per l'incertezza pari all'1% la zona di validità della misura è compresa tra due sezioni di misura escludendo una fascia di circa 0,1 m a partire da ciascuna sezione di misura.

3.3. Verifiche sperimentali in linea

3.3.1. Installazione e verifica della taratura

Per le prove in linea sono stati attrezzati due siti di prova di estensione pari a circa 4 m, con 6 moduli base (s. 1-2; 3-4; 5-6; 7-8; 9-10; 11-12) nella stazione di Colleferro

Tests also showed independence from rail inclination. The load values measured with and without the rail inclination are virtually coincident (fig. 12 a) and b)).

Tests also showed independence from the presence or absence of rubber plate under the rail connection. The gap between the Q measured value and the value of the Q load applied (equal to 100 kN), with and without the interposition of a rubber plate ($k = 22.5 \text{ kN/mm}$) was less than 1 kN (fig. 13).

The distance between the measuring section and the rail connection does not affect the values found for distances w (fig. 4) greater than or equal to about 20 mm (assumed equal to 30 mm in applications as protection from possible positioning errors of the segment of the rail during inline insertion).

Fig. 14 shows the synthesis of the results obtained, as the distance of the loads from the first measurement section varies, for the two basic modules (with or without the interposition of the rubber plate under the rail connection), varying the relative distance between connection and measurement section (distance w of fig. 4): in fig. 14 a) the applied loads are $Q_a = 100 \text{ kN}$, $Y_a = 10 \text{ kN}$; in fig. 14 b) the applied loads are $Q_a = 1 \text{ kN}$, $Y_a = 0$.

The field of validity of the measurement system has been defined considering the uncertainty of measurement. Fig. 15 shows the uncertainty calculated at par. 3.1 and the one estimated experimentally starting from the Q load difference measured with respect to the Q load applied, expressed either as a percentage of the applied reference value of 100 kN.

As shown in fig. 15 the uncertainty calculated and the experimental one coincides in the area between the measurement sections but diverge at positions X of the load near to the measurement section. This is consistent with the effect on the measurement of Q of the distance between the load Q applied and the measurement sections of the basic module.

Assuming a limit value for the uncertainty equal to 1% the area of validity of the measurement is between two measuring sections except for a range of about 0.1 m from each measurement section.

3.3. Experimental tests online

3.3.1. Installation and calibration verification

Two test sites for online testing measuring approximately 4 m were equipped, with 6 basic modules (s. 1-2; 3-4; 5-6; 7-8; 9-10; 11-12) in Colleferro station and with 7 basic modules in Roccasecca station (s. 1-2; 3-4; 5-6; 7-8; 9-10; 11-12; 13-14).

These extensions allow to measure the load applied to each wheel in a wheel revolution. This way the circularity defects of the wheel can be detected. These defects cause effects on loads that occur in the validity areas of the measurement (about 1/3 of the distance between sleepers).



SCIENZA E TECNICA

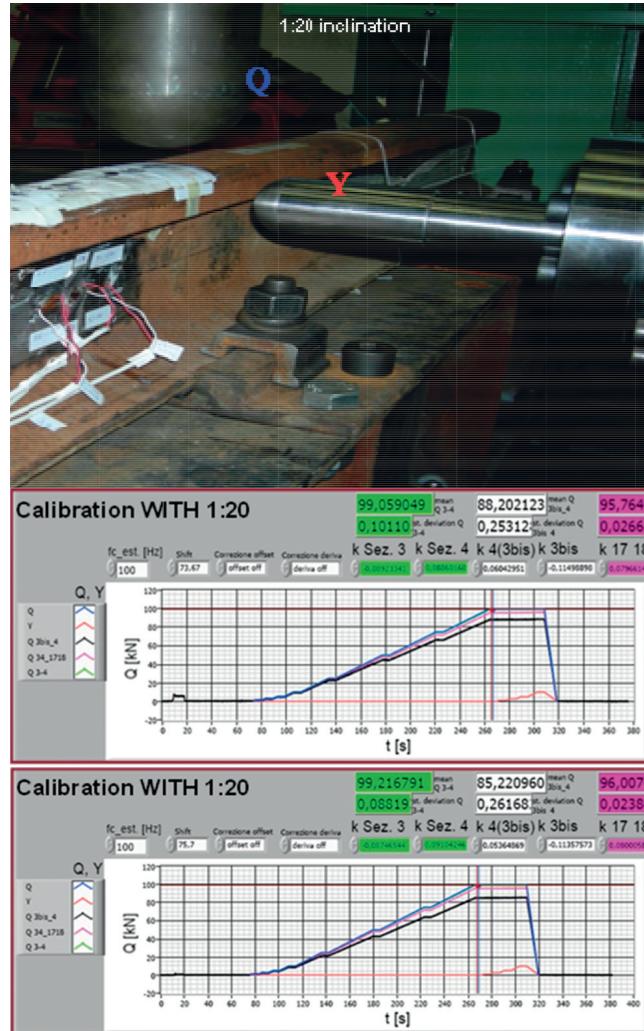


Fig. 13 - Misure effettuate senza (caso a) e con (caso b) l'interposizione di una piastra in gomma sotto attacco della rotaia: carichi misurati dalla campata di misura (in verde), carichi applicati (in blu); valori numerici (in verde) misurati in corrispondenza dei riferimenti verticali; in fucsia valori numerici non validi perché ottenuti fuori del campo di validità della misura; in bianco valori numeri non affidabili per avaria estensimetrici.
Fig. 13 - Measurements taken without (case a) and with (case b) an interposed rubber plate under the rail connection: loads measured from the measurement span (in green), applied loads (in blue); numeric values (green) measured at vertical references; in fuchsia numeric values that are not valid because obtained outside of the field of validity of the measure; in white unreliable numbers values due to faulty strain gauges.

ferro e con 7 moduli base nella stazione di Roccasecca (s. 1-2; 3-4; 5-6; 7-8; 9-10; 11-12; 13-14).

Tali estensioni permettono di rilevare l'andamento del carico applicato da ciascuna ruota durante un giro ruota. In tal modo possono essere rilevati i difetti di circolarità della ruota che provocano effetti sui carichi che si manifestano nelle zone di validità della misura (circa 1/3 della estensione dell'interasse tra le traverse).

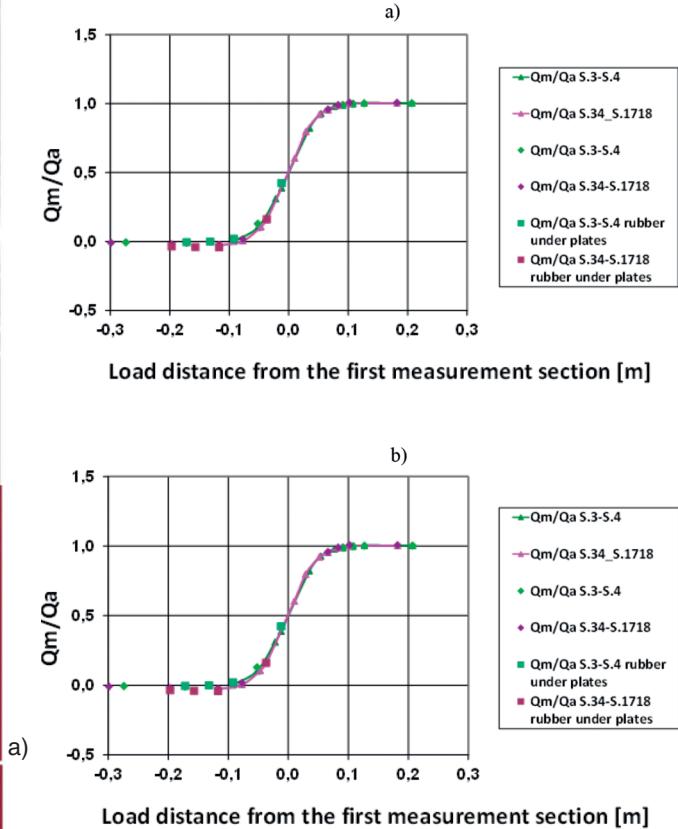


Fig. 14 - Rapporto Qm/Qa in funzione della distanza del carico dalla prima sezione di misura (sezione di riferimento). Caso a) $Q_a = 100 \text{ kN}$, $Y_a = 10 \text{ kN}$; caso b) $Q_a = 1 \text{ kN}$, $Y_a = 0 \text{ kN}$.

Fig. 14 - Q_m/Q_a Ratio as a function of the distance of the load from the first measurement section (reference section). Case a) $Q_a = 100 \text{ kN}$, $Y_a = 10 \text{ kN}$; case b) $Q_a = 1 \text{ kN}$, $Y_a = 0 \text{ kN}$.

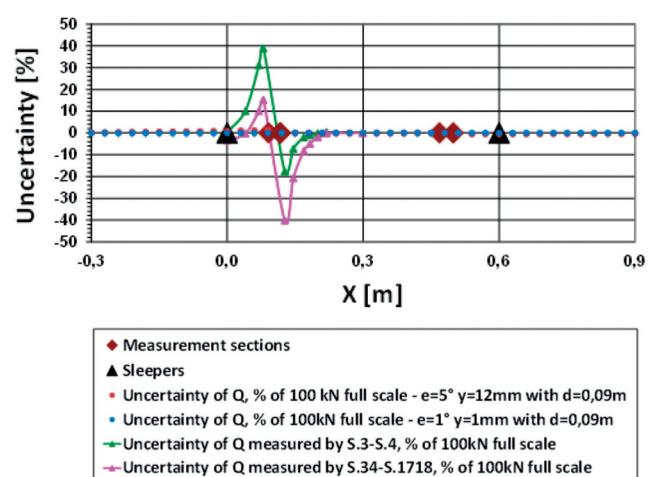


Fig. 15 - Incertezza calcolata e misurata (come scarto dal carico applicato di 100 kN) espressa come percentuale del valore di fondo scala di 100 kN.

Fig. 15 - Uncertainty calculated and measured (as difference of the load applied of 100 kN) expressed as a percentage of the end of scale value of 100 kN.



SCIENZA E TECNICA

Gli spezzoni di rotaia di circa 12 m, sono stati attrezzati e tarati in laboratorio (fig. 16). Gli scarti tra carichi applicati e carichi rilevati sono stati dell'ordine del 0,25%-0,50% a dimostrazione della precisione del sistema di misura e delle sue caratteristiche di riproducibilità e di ripetibilità.

Successivamente gli spezzoni di rotaia attrezzati sono stati installati in linea e collegati alla strumentazione di alimentazione, condizionamento ed acquisizione dei ponti estensimetrici (fig. 17).

È stata condotta una verifica della taratura mediante un martinetto idraulico attrezzato con cella di carico e secondo le modalità di seguito descritte. Il carico è stato applicato alla rotaia attraverso il martinetto idraulico attrezzato con una cella di carico (foto di fig. 18) e contemporaneamente rilevato dal sistema di misura.

Nel grafico di fig. 18 si riportano ad esempio i risultati della prova corrispondente all'applicazione del carico nella sezione 34 della rotaia. Il carico applicato (curva di colore giallo) ed il carico misurato nella sezione Q34 (curva di colore nero) praticamente coincidono. Accanto al grafico, sono riportati (in giallo) i valori numerici corrispondenti al carico massimo applicato (Q_{cella1}) e al carico misurato (Q_{sx34}).

Gli scarti riscontrati, inferiori al 2,5% del carico Q applicato, superiori a quelli ottenuti in laboratorio, si ritiene siano attribuibili alle condizioni di prova: disallineamento tra gli assi di applicazione del carico, di misura della cella e di misura del sistema attrezzato.

I dati rilevati da ciascun modulo base sono elaborati in modo da ricavare il carico di ciascuna ruota lungo il tratto attrezzato, poiché ogni ruota occupa in successione i moduli base e ogni modulo base rileva il carico di ruote successive. Per ciascuna ruota si ricava il carico statico Q_s come media dei valori rilevati dai moduli base.

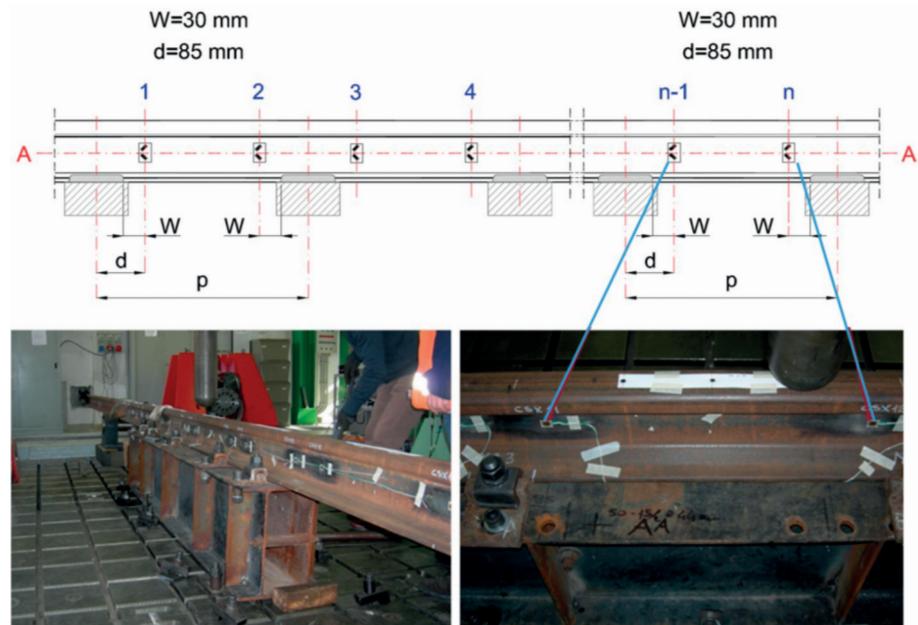


Fig. 16 - Sistema di misura e sua taratura in laboratorio.
Fig. 16 - Measurement system and its calibration in the laboratory.

The rail parts of about 12 m, have been equipped and calibrated in the laboratory (fig. 16). The differences between applied loads and loads detected were in the range of 0.25% -0.50% proving the accuracy of the measurement system and its characteristics of repeatability and reproducibility.

Subsequently the equipped rail parts were installed online and connected to the power supply, conditioning and acquisition devices of strain gauge bridges (fig. 17).

Verification of calibration by means of a hydraulic jack equipped with load cell and in the manner described below was performed. The load was applied to the rail by means of the hydraulic jack equipped with a load cell (picture in fig. 18) and simultaneously detected by the measurement system.

The graph in fig. 18 shows for example, the results of the test corresponding to the load application in section 34 of the rail. The applied load (yellow curve) and the load measured in section Q34 (black curve) practically coincide.



Fig. 17 - Installazione in linea sul sito di Roccasecca linea Roma-Cassino.
Fig. 17 - Online installation on the Roccasecca site Rome-Cassino line.



SCIENZA E TECNICA

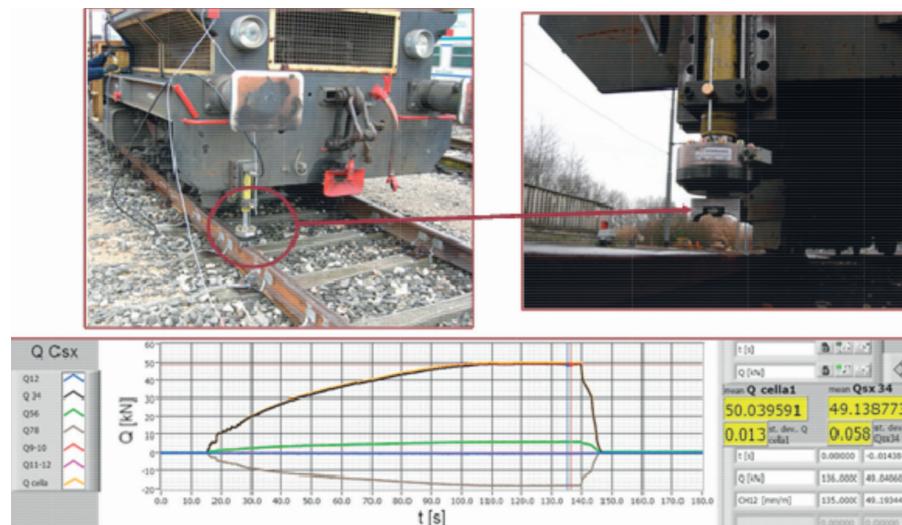


Fig. 18 - Verifica taratura in linea attraverso martinetto idraulico (foto in alto); carico applicato Qcella (in giallo), carico misurato Q34 (in nero); valori numerici (in giallo) calcolati in corrispondenza del carico massimo applicato (Qcella1) e rilevato dalla sezione (Qsx34); carichi rilevati nelle altre sezioni.

Fig. 18 - Online calibration verification through hydraulic jack (picture above); Qcell load applied (in yellow), Q34 measured load (in black); numeric values (in yellow) calculated at the maximum load applied (Qcell1) and found by the section (Qsx34); loads found in the other sections.

Le elaborazioni sono state effettuate con uno specifico programma che può fornire anche gli indicatori di monitoraggio dei carichi trasmessi dal veicolo al binario verificando la conformità a quanto previsto dalle norme (ad esempio direttive di carico UIC e PGOS) per carico per asse e sua distribuzione sulle ruote.

In fig. 19 si riportano i risultati numerici acquisiti al passaggio di una ruota sul tratto di rotaia rsx nel caso di un passaggio a bassa velocità (circa 10 km/h) e nel caso di un passaggio a una velocità maggiore (circa 120 km/h) che evidenzia l'andamento dei segnali misurati in corrispondenza ad un difetto della superficie di rotolamento di una ruota del treno in transito.

In entrambi i diagrammi di fig. 19 ciascuna delle 7 curve, di colore diverso dalle altre, rappresenta il carico Q misurato da un singolo modulo base al transito di un carro merci sui 7 moduli base del sistema. Nel diagramma in alto sono stati evidenziati con pallini neri i campioni validi, selezionati dal

The numerical values corresponding to the maximum load applied (Q_{cell1}) and to the load measured (Q_{sx34}) are shown (in yellow) next to the graph.

The differences found, less than 2.5% of the Q load applied, greater than those obtained in the laboratory, are believed to be attributable to the test conditions: misalignment between axis of load application, cell measurement and measurement of equipped system.

The data collected from each basic module are processed in order to obtain the load of each wheel along the equipped stretch, because each wheel occupies the basic modules sequentially and each basic module detects the load of subsequent wheels. The static load Q_s is obtained for each wheel as average of the values found by the basic modules.

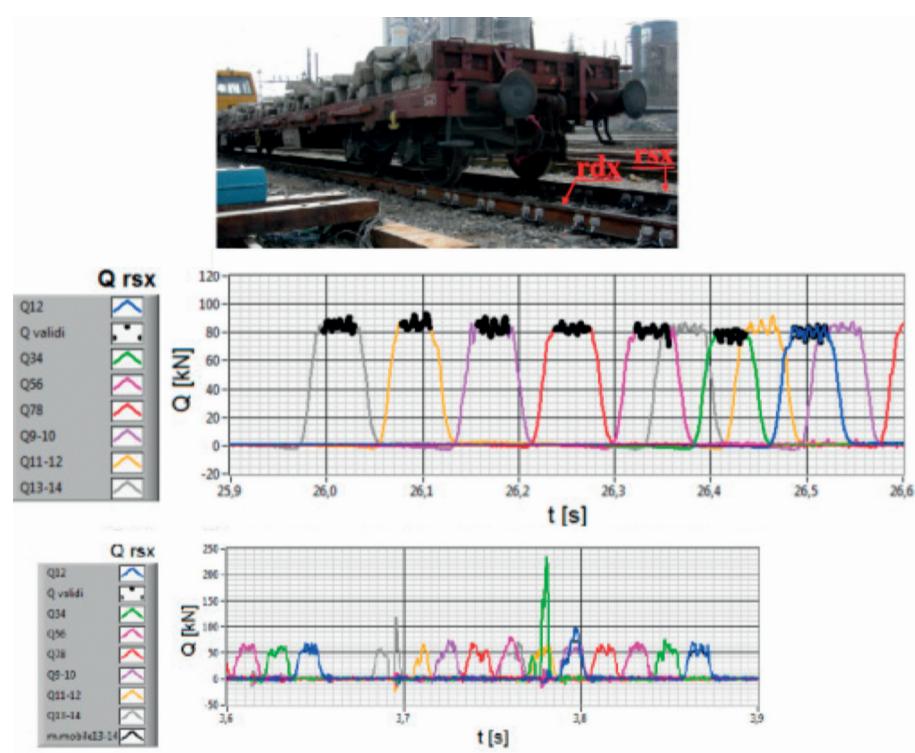


Fig. 19 - Carico rilevato (pallini neri) al transito di un carro merci a circa 10 km/h su 7 moduli base del sistema di misura (diagramma in alto); segnale misurato in corrispondenza ad un difetto della superficie di rotolamento di una ruota in transito a circa 120 km/h (diagramma in basso).

Fig. 19 - Load detected (black dots) upon the transit of a freight wagon at about 10 km/h on 7 basic modules of the measurement system (see diagram above); signal measured at a rolling surface defect of a wheel in transit at about 120 km/h (diagram below).



SCIENZA E TECNICA

programma di elaborazione, acquisiti da ciascun modulo base.

3.3.2. Ripetibilità

Per valutare la ripetibilità del sistema di misura sono state effettuate ripetute acquisizioni al transito di uno stesso convoglio composto da un carrello automotore, un carro a due assi, un carro pianale a carrelli (fig. 20).

Tutte le prove si sono svolte in un ristretto arco di tempo in cui non si sono osservati cambiamenti climatici sostanziali.

In tabella 4 si riportano i valori dei carichi Q per asse misurati in corrispondenza dei 6 transiti (da C_041 a C_051) effettuati in una stessa direzione di marcia e ad una stessa velocità di circa 20 km/h, del convoglio di prova. Gli assi n. 1 e n. 2 appartengono al carro a due assi, gli assi n. 3 e n. 4 appartengono al carrello automotore diesel e gli assi n. 5, n. 6, n. 7, n. 8 appartengono al carro pianale caricato di traverse uniformemente distribuite sia in senso longitudinale sia in senso trasversale (peso complessivo calcolato del carico pari a circa 281 kN). Nelle ultime tre righe vengono riportati i valori di Q veicolo calcolati come somma dei Q asse. Nelle ultime tre colonne le grandezze statistiche calcolate per ciascun asse e veicolo.



Fig. 20 - Convoglio di prova costituito da un carro pianale a carrelli, un carrello automotore (giallo), un carro (azzurro) a due assi.

Fig. 20 - Test train consisting of a bogie wagon, a motor car (yellow), a two-axle wagon (blue).

The calculations were made with a specific programme that can also provide monitoring indicators of the loads transmitted by the vehicle to the track by checking compliance with the provisions of rules (such as UIC and Italian PGOS load directives) for load per axle and its distribution on the wheels.

Fig. 19 shows the results obtained upon the transit of one wheel on the rsx rail section in the case of transit at low speed (about 10 km/h) and in the case of transit at faster speed (about 120 km/h) that highlights the progress of measured signals at a rolling surface defect of a wheel of a train in transit.

TABELLA 4 – TABLE 4

VALORI DEL CARICO Q PER ASSE MISURATI IN CORRISPONDENZA DEI 6 TRANSITI (DA C_041 A C_051)
EFFETTUATI IN UNA STESSA DIREZIONE DI MARCIA ALLA VELOCITÀ DI CIRCA 20 KM/H: ASSI N. 1 E N. 2
CARRO A DUE ASSI; ASSI N. 3 E N. 4 CARRELLO AUTOMOTORE; ASSI N. 5, N. 6, N. 7, N. 8 CARRO PIANALE.
NELLE ULTIME TRE RIGHE VENGONO RIPORTATI I VALORI DI Q VEICOLO CALCOLATI COME SOMMA
DEI Q ASSE MISURATI

*Q AXLE LOADS VALUES MEASURED AT 6 TRANSITS (FROM C_041 TO C_051) IN THE SAME DIRECTION
OF TRAVEL AT A SPEED OF ABOUT 20 KM/H: AXLES N° 1 AND N° 2 TWO-AXLE WAGON; AXLES N° 3 AND N° 4
MOTOR CAR; AXLES N° 5, N° 6, N° 7, N° 8 BOGIE WAGON. IN THE LAST THREE ROWS THE VALUES
OF Q VEHICLE ARE SHOWN CALCULATED AS THE SUM OF Q AXLES*

Q per asse - Repeatability of balanced vehicles									
Axle n.	C_041	C_043	C_045	C_047	C_049	C_051	average	st.dev.	st.dev. / average %
1	47,96	48,65	48,64	48,08	48,66	48,83	48,47	0,36	0,74
2	53,07	52,61	52,51	52,96	52,89	53,02	52,84	0,23	0,43
3	90,46	90,45	90,07	90,54	91,32	90,46	90,55	0,41	0,46
4	84,04	83,82	83,96	85,16	83,65	84,40	84,17	0,55	0,65
5	127,08	127,61	127,03	127,20	126,71	126,93	127,09	0,30	0,24
6	122,72	122,13	122,76	122,63	123,61	123,25	122,85	0,52	0,42
7	127,87	128,07	128,23	128,05	127,79	128,15	128,03	0,17	0,13
8	128,81	128,64	128,30	128,91	130,13	129,08	128,98	0,62	0,48
2 axle wagon load [kN]	101,03	101,26	101,15	101,04	101,55	101,85	101,31	0,33	0,32
Motor car load [kN]	174,50	174,27	174,03	175,70	174,97	174,86	174,72	0,59	0,34
Bogied wagon load [kN]	506,48	506,45	506,32	506,79	508,24	507,41	506,95	0,75	0,15



SCIENZA E TECNICA

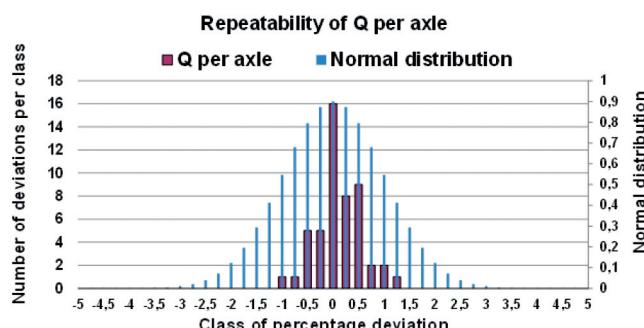


Fig. 21 - Distribuzione degli scarti tra i valori di Q per asse misurati, per ciascun asse, e il valor medio dei valori Q acquisiti al transito dello stesso asse (corse avvenute in una stessa direzione e ad una stessa velocità di circa 20 km/h) in condizioni di convoglio di prova con carro pianale caricato in maniera equilibrata, ed espressi in percentuale. In azzurro la distribuzione normale degli scarti.

Fig. 21 - Distribution of deviations between the Q values per axle measured for each axle, and the average of Q values acquired at the transit of the same axle (trips in the same direction of travel and at the same speed of about 20 km/h) in a test train conditions with bogie wagon loaded in a balanced manner, and expressed as a percentage. The normal distribution of deviations is in blue.

In fig. 21 si riporta la distribuzione percentuale degli scarti rispetto al valor medio dei valori Q per asse acquisiti in corrispondenza agli stessi transiti degli 8 assi del convoglio di prova. La distribuzione è molto stretta e i valori in % degli scarti sono bassi.

In tabella 5 si riportano i risultati relativi all'indice di squilibrio del carico calcolato come differenza di carico tra ruota sinistra e ruota destra divisa per carico Q dell'asse.

3.3.3. Riproducibilità delle misure

Per la verifica di riproducibilità sono stati effettuati numerosi transiti in tempi diversi analizzando il comportamento nei due sensi di marcia.

In tabella 6 si riportano i valori dei carichi Q per asse misurati in corrispondenza dei 6 transiti (da C_067 a C_072) del convoglio di prova, effettuati 3 in una direzione di marcia e 3 nella direzione di marcia opposta, tutti ad una stessa velocità di circa 20 km/h. Nelle ultime tre righe vengono riportati i valori di Q veicolo calcolati come somma dei Q asse misurati. Nelle ultime tre colonne le grandezze statistiche calcolate per ciascun asse e veicolo.

In fig. 22 si riporta la distribuzione degli scarti percentuali ri-

In both diagrams of fig. 19 each of the 7 curves, of a different colour from the others, represents the Q load measured by a single basic module at the transit of freight wagon on 7 basic modules of the system. Valid samples, selected by the processing programme acquired from each basic module have been highlighted with black dots at the top of the diagram.

3.3.2. Repeatability

To assess the repeatability of the measurement system repeated acquisitions were carried out upon transit of the same train composed of a motor car, a two-axle wagon, a flatbed wagon with bogies (fig. 20).

All tests were conducted in a limited period of time in which no substantial climate changes were observed.

Table 4 shows the Q axle loads values measured at 6 transits (from C_041 to C_051) in the same direction of travel and at the same speed of about 20 km/h. Axles n° 1 and n° 2 belong to the two-axle wagon, axles n° 3 and n° 4 belong to the diesel motor car and axles n° 5, n° 6, n° 7, n° 8 belong to bogie wagon loaded with sleepers uniformly distributed both longitudinally and transversally (computed total weight of the load approximately 281 kN). In the last three rows the values of Q vehicle are shown calculated as the sum of Q axis. In the last three columns statistics sizes are shown calculated for each axle and vehicle.

Fig. 21 shows the percentage distribution of differences compared to the average value of Q values per axle acquired at the same transits of the 8 axles of the test train.

TABELLA 5 – TABLE 5

VALORI DEGLI INDICI DI SQUILIBRIO DEL CARICO CALCOLATO COME DIFFERENZA DI CARICO TRA RUOTA SINISTRA E RUOTA DESTRA DIVISO PER IL Q ASSE AL TRANSITO (IN UNA STESSA DIREZIONE E AD UNA STESSA VELOCITÀ DI CIRCA 20 KM/H) DEL CONVOGLIO DI PROVA CON CARRO PIANALE CARICATO IN MANIERA EQUILIBRATA
LOAD IMBALANCE INDEX VALUES CALCULATED AS THE LOAD DIFFERENCE BETWEEN THE LEFT WHEEL AND THE RIGHT WHEEL DIVIDED BY THE Q AXLE UPON TRANSIT (IN THE SAME DIRECTION OF TRAVEL AND AT THE SAME SPEED OF ABOUT 20 KM/H) OF THE TEST TRAIN WITH BOGIE WAGON LOADED IN A BALANCED MANNER

Axle n.	DQ/Q - Repeatability of balanced vehicles							
	C_041	C_043	C_045	C_047	C_049	C_051	average	st.dev.
1	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
2	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,00
3	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
4	0,13	0,12	0,13	0,13	0,12	0,12	0,13	0,01
5	0,05	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,00
6	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
7	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,00
8	0,04	0,03	0,02	0,02	0,04	0,03	0,03	0,01



SCIENZA E TECNICA

TABELLA 6 – TABLE 6

VALORI DEL CARICO Q PER ASSE MISURATI IN CORRISPONDENZA DEI 6 TRANSITI (DA C_067 A C_072) DEL CONVOGLIO DI PROVA EFFETTUATI 3 IN UNA STESSA DIREZIONE DI MARCIA E 3 NELLA DIREZIONE OPPOSTA; TUTTI E 6 AD UNA STESSA VELOCITÀ, DI CIRCA 20 KM/H: ASSI N. 1 E N. 2 CARRO A DUE ASSI; ASSI N. 3 E N. 4 CARRELLO AUTOMOTORE; ASSI N. 5, N. 6, N. 7, N. 8 CARRO PIANALE CARICATO IN MANIERA EQUILIBRATA IN SENSO LONGITUDINALE E TRASVERSALE. NELLE ULTIME TRE RIGHE VENGONO RIPORTATI I VALORI DI Q VEICOLO CALCOLATI COME SOMMA DEI Q ASSE MISURATI

VALUES OF Q LOADS PER AXLE MEASURED AT 6 TRANSITS (FROM C_067 TO C_072) OF THE TEST TRAIN 3 CARRIED OUT IN THE SAME DIRECTION AND 3 IN THE OPPOSITE DIRECTION; SPEED OF APPROXIMATELY 20 KM/H: AXLES N° 1 AND N° 2 TWO-AXLE WAGON; AXLES N° 3 AND N° 4 MOTOR CAR; AXLES N° 5, N° 6, N° 7, N° 8 BOGIE WAGON LOADED IN LONGITUDINALLY AND TRANSVERSELY IN A BALANCED MANNER. IN THE LAST THREE ROWS THE VALUES OF Q VEHICLE ARE SHOWN CALCULATED AS THE SUM OF Q AXLES

Q per axle - Reproducibility of balanced vehicles									
Axle n.	C_067	C_068	C_069	C_070	C_071	C_072	average	st.dev.	st.dev. / average %
1	48,68	48,12	49,27	48,59	49,28	48,20	48,69	0,50	1,03
2	53,81	52,74	53,27	52,96	53,27	53,36	53,24	0,36	0,68
3	90,85	95,14	91,02	94,36	91,04	94,24	92,78	2,00	2,16
4	84,76	79,66	85,01	79,55	85,48	79,50	82,33	3,03	3,68
5	127,40	127,50	128,23	127,25	128,21	127,71	127,72	0,42	0,33
6	123,86	126,00	123,77	125,93	123,74	125,70	124,83	1,15	0,92
7	127,56	128,67	128,78	128,24	128,48	128,33	128,34	0,43	0,34
8	129,92	128,52	129,56	129,44	129,41	129,08	129,32	0,48	0,37
2 axle wagon load [kN]	102,49	100,87	102,54	101,55	102,55	101,56	101,93	0,70	0,69
Motor car load [kN]	175,61	174,80	176,03	173,91	176,52	173,74	175,10	1,14	0,65
Bogied wagon load [kN]	508,74	510,69	510,34	510,86	509,84	510,82	510,21	0,82	0,16

spetto al valor medio dei valori Q per asse. Dall'analisi dei dati si evidenzia ancora una distribuzione degli scarti percentuali concentrati intorno allo zero.

Da una analisi più approfondita dei dati dei valori degli scarti percentuali maggiori evidenziati in fig. 22 si è notato che essi corrispondono ai valori di Q asse misurati per gli assi 3 e 4 del carrello automotore che presentano valori diversi in funzione della direzione di transito del convoglio. Analizzando i carichi per asse misurati in corrispondenza

The distribution is very tight and the deviation values in % are low. Table 5 indicates the results relating to the load imbalance index calculated as the load deviation between left wheel and right wheel divided by load Q of the axle.

3.3.3. Reproducibility of measurements

Many transits at different times were carried out for reproducibility testing by analysing the behaviour in two directions of travel.

Table 6 outlines the values of Q loads per axle measured at 6 transits (from C_067 to C_072) of the test train carried out, 3 in one direction and 3 in the opposite direction, all at the same speed of about 20 km/h. In the last three rows the values of the Q vehicle are shown calculated as the sum of the Q axles. In the last three columns statistics sizes are shown calculated for each axle and vehicle.

Fig. 22 shows the distribution of the percentage differences compared to the average value of Q values per axle. From the analysis of the data there is still a distribution of the percentage deviations concentrated around zero.

From a more in-depth analysis of the values of the greater percentage deviations highlighted in fig. 22 it was observed that they correspond to the values of Q axle measured for axles 3 and 4 of the motor car that have different values depending on the direction of transit of the train. Analysing the axle loads measured at two transits in oppo-

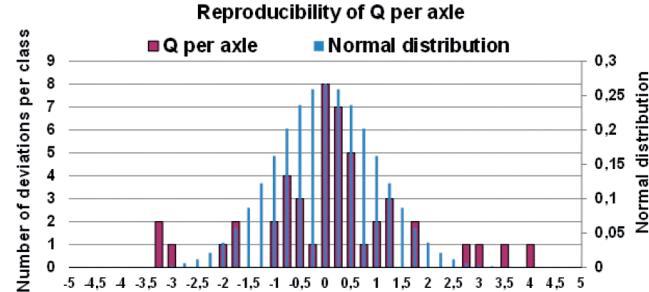


Fig. 22 - Distribuzione degli scarti in percentuale rispetto al valor medio dei valori Q per asse acquisiti nei transiti effettuati per la determinazione della riproducibilità - convoglio equilibrato.
Fig. 22 - Distribution of percentage differences compared to the average value of Q values per axle acquired in transits executed in order to determine reproducibility - balanced train.



SCIENZA E TECNICA

TABELLA 7 – TABLE 7

CARICHI Q PER ASSE MISURATI IN KN IN DUE TRANSITI EFFETTUATI IN SENSO OPPOSTO CON CARRELLO A SFORZO DI TRAZIONE AZZERATO - CONVOGLIO EQUILIBRATO
 Q LOADS PER AXLE MEASURED IN KN IN TWO TRANSITS PERFORMED IN THE OPPOSITE DIRECTION WITHOUT TRACTIVE EFFORT - BALANCED TRAIN

Axle n.	C_084	C_085	media	dev.st.
1	48,00	48,60	48,30	0,42
2	52,65	53,40	53,03	0,53
3	92,48	93,55	93,02	0,76
4	82,89	83,04	82,97	0,11
5	126,17	127,60	126,89	1,01
6	124,62	122,87	123,75	1,24
7	127,99	129,25	128,62	0,89
8	128,09	129,28	128,69	0,84
2 axles wagon load [kN]	100,66	102,00	101,33	0,95
Motor car load [kN]	175,37	176,59	175,98	0,86
Bogied wagon load [kN]	506,87	509,00	507,94	1,51

di due transiti in direzioni opposte, effettuati a sforzo di trazione nullo, si ottengono nuovamente valori paragonabili nei due sensi di marcia del carico per asse (tabella 7).

Si ritiene che i valori più alti degli scarti percentuali possano perciò essere riconducibili alla presenza dello sforzo di trazione e al conseguente cabraggio del veicolo.

Si è poi passati a caricare il carro pianale con tutte le traverse su una sola metà del pianale lato carrello automotore (fig. 23). Il rapporto tra i carichi misurati sugli assi del carrello anteriore del carro pianale rispetto a quelli misurati per gli assi del carrello posteriore arriva a valori di circa 1,7 con deviazioni standard al massimo di 0,04.

In ultimo si è provocato uno squilibrio destra/sinistra caricando solo un lato del carro pianale (fig. 24) ed ottenendo valori di $\Delta Q/Q$ compresi tra 0,4 e 0,5 con deviazioni standard massime di 0,04.

Durante l'elaborazione dei primi risultati di misura si è determinata la capacità di SMCV di misurare sia il carico per ruota istantaneo sia di calcolare, attraverso la media dei valori validi acquisiti, i valori statici dei carichi per ruota, per asse, degli indicatori di squilibrio per asse destra/sinistra, degli indicatori di squilibrio per veicolo avanti/dietro e di evidenziare difetti di rotondità delle ruote.

site directions, performed with zero traction effort, comparable values are again obtained in both directions of travel of the load per axle (table 7).

It is believed that the higher percentage differences values can therefore be due to tractive effort and consequent unbalance of the vehicle.

We then proceeded to load the bogie wagon with all the sleepers on only one half of the floor of the motor car side (fig. 23). The ratio between the loads measured on the bogie axles in front of the bogie wagon compared to those measured for the rear bogie axles reaches approximately 1.7 with standard deviations up to a maximum of 0.04.

Finally, a left/right imbalance was caused by loading only one side of the low floor (fig. 24) and obtaining Q/Q values ranging between 0.4 and 0.5 with maximum standard deviations of 0.04.

During the processing of the first measuring results the ability of SMCV to measure both the instant load per wheel and to calculate, through the average of valid acquired values, static load values for wheel, axle, unbalance indicators for left/right axles, indicators of imbalance for the vehicle forward/backwards and highlight wheel roundness defects was determined.

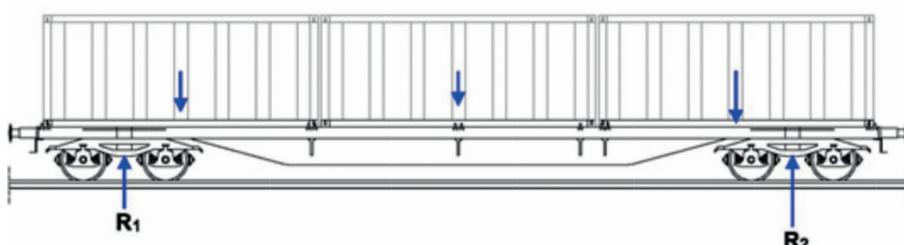


Fig. 23 - Convoglio con carro pianale squilibrato avanti/dietro.
 Fig. 23 - Train with bogie wagon unbalanced ahead/behind.



SCIENZA E TECNICA

3.3.4. Rilievi sperimentali durante l'esercizio

I rilievi sperimentali durante l'esercizio sono stati effettuati al fine di caratterizzare il sistema di misura secondo i seguenti aspetti:

- affidabilità della stazione di misura;
- efficacia delle procedure di calibrazione;
- necessità di eventuali tarature periodiche;
- manutenzione richiesta.

Sono stati acquisiti ed elaborati i dati relativi a tutti i treni che sono transitati sulla linea in un periodo di 3 mesi con velocità fino a 140 km/h.

SMCV è in grado sia di calcolare in automatico per ciascun asse in transito grandezze quali velocità di transito, direzione di marcia, distanze tra gli assi, sia di riconoscere il rodiggio dei veicoli in transito ed associare a ciascun asse il numero di veicolo senso marcia treno (s.m.t.), il numero di carrello del veicolo, il numero di asse del carrello fornendo informazioni per individuare gli assi dei treni che hanno prodotto le segnalazioni di anomalia (fig. 25).

In tabella 8 si riporta un esempio dei carichi (per ruota e per asse), degli indicatori di squilibrio (per asse e per veicolo) e di difetto ruota calcolati in automatico evidenziando i valori anomali rispetto a predeterminati valori di soglia.

In tabella 9 si riporta un esempio delle liste di segnalazioni delle anomalie per singolo treno con indicazione del corrispondente livello di anomalia.

Nelle figg. 26, 27, 28 e 29 si riportano degli esempi di analisi statistica dei dati acquisiti in una settimana.

Il sistema di misura consente in modo automatico di monitorare costantemente il comportamento di tutti i veicoli che transitano sulla stazione di misura ed elaborare indicatori sintetici legati alle forze verticali trasmesse al binario. Tale monitoraggio oltre al controllo del superamento di limiti derivanti dalla sicurezza può fornire interessanti informazioni anche per correlare il degrado del binario all'entità e alla frequenza dei carichi ad esso applicati.

Il sistema di misura è in grado di calcolare le forze di reazione verticale delle traverse in modo analogo al calcolo del carico applicato dalla ruota. Con il valore di queste reazioni è possibile calcolare degli indicatori di rigidezza di binario confrontando il valore del

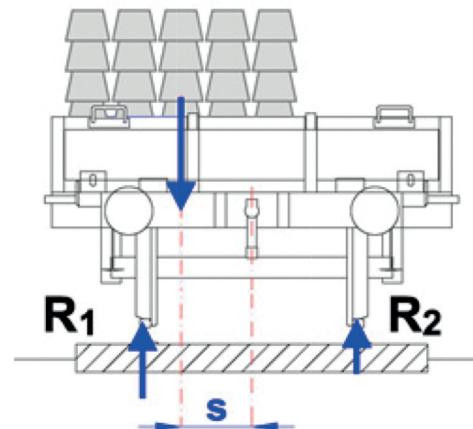


Fig. 24 - Convoglio con carro pianale squilibrato lateralmente destra/sinistra.
Fig. 24 - Vehicle with unbalanced left/right side bogie wagon.

Data e ora transito <i>Running day and time</i>	tipologia treno <i>Type of rolling stock</i>	n. asse s.m.t. <i>n. axle in running direction</i>	Direzione (1=ROMA; - 1=Napoli) <i>Running direction (1=ROME; - 1=Naples)</i>	tempo passaggio asse [s] <i>Axle running time [s]</i>	velocità calcolata da SMCV [km/h] <i>speed calculated by SMCV [km/h]</i>	distanza tra asse n+1 e n [m] <i>distance of axle (n+1) from axle (n) [m]</i>	n. veicolo s.m.t. <i>n. vehicle in running direction</i>	n. carrello del veicolo s.m.t. <i>n. vehicle bogie in running direction</i>	n. asse del carrello s.m.t. <i>n. bogie axle in running direction</i>	indice squilibrio del veicolo avanti/dietro <i>index of the imbalanc e front/back</i>	validità elaborazi on dati (0=valido ; 1=non valido) <i>acceptance of data processing (0 = good, 1 = invalid)</i>
12/4/2011, 09:02	passengeri	1	1	3.10417	127.75	2.38	1	1	1	1.00	0
12/4/2011, 09:02	passengeri	2	1	3.17125	127.75	11.87	1	1	2	1.00	0
12/4/2011, 09:02	passengeri	3	1	3.50583	127.75	2.66	1	2	1	1.11	0
12/4/2011, 09:02	passengeri	4	1	3.58083	128.24	10.79	2	1	2	1.00	0
12/4/2011, 09:02	passengeri	5	1	3.88375	127.75	2.66	2	2	1	1.00	0
12/4/2011, 09:02	passengeri	6	1	3.95875	128.24	11.92	3	1	2	1.00	0



Fig. 25 - Dati calcolati in automatico al passaggio del treno da SMCV (sopra) e relativi al riconoscimento in automatico del rodiggio del treno in transito (foto sotto – fonte rete internet) che può avere anche carrelli di tipo Jacobs (s.m.t. = senso marcia treno).
Fig. 25 - Data calculated automatically by SMCV (above) upon transit of the train and for the automatic recognition of train wheel arrangement in transit (picture below – source internet) hat can also have Jacobs type bogies (s.m.t. = travel direction of train).



SCIENZA E TECNICA

TABELLA 8 – TABLE 8

ESEMPIO DEI VALORI, CALCOLATI DA SMCV IN AUTOMATICO AL PASSAGGIO DEL TRENO, DEI CARICHI (PER RUOTA E PER ASSE), DEGLI INDICATORI DI SQUILIBRIO (PER ASSE E PER VEICOLO) E DI DIFETTO RUOTA
 EXAMPLE OF VALUES CALCULATED BY SMCV AUTOMATICALLY UPON TRANSIT OF THE TRAIN, OF THE LOADS (PER WHEEL AND AXLE), OF IMBALANCE INDICATORS (PER AXLE AND PER VEHICLE) AND WHEEL DEFECT

Qmedio ruota sx [kN] Qmean left wheel [kN]	Qmin ruota sx [kN] Qmin left wheel [kN]	Qmax ruota sx [kN] Qmax left wheel [kN]	Indice difetto ruota sx Defect index left wheel	Qmedio ruota dx [kN] Qmean right wheel [kN]	Qmin ruota dx [kN] Qmin right wheel [kN]	Qmax ruota sx [kN] Qmax right wheel [kN]	Indice difetto ruota dx Defect index right wheel	Q asse [kN] Q axle [kN]	indice squilibrio sx/dx index of the imbalance left/right	indice squilibrio del veicolo avanti/dietro index of the imbalance front/back	validità elaborazione dati (0=valido ; 1=non valido) acceptanza di data processing (0 = good, 1 = invalid)	Qmax-Qmedio ruota sx [kN] Qmax-Qmean left wheel [kN]	Qmax-Qmedio ruota dx [kN] Qmax-Qmean right wheel [kN]
54.45	32.52	71.92	1.32	58.18	37.36	78.16	1.34	112.63	0.03	1.00	0	17.47	19.99
56.13	34.87	69.91	1.25	55.68	32.10	72.64	1.30	111.81	0.00	1.00	0	13.77	16.97
56.42	40.95	73.59	1.30	56.01	41.61	71.34	1.27	112.43	0.00	1.01	0	17.17	15.33
53.33	32.27	69.80	1.31	55.90	36.19	72.70	1.30	109.23	0.02	1.00	0	16.46	16.80
55.10	-3.06	235.26	4.27	56.60	33.86	83.35	1.47	111.70	0.01	1.00	0	180.15	26.75
46.46	-5.85	74.90	1.61	58.24	30.84	75.16	1.29	104.70	0.11	1.00	0	28.44	16.93
46.26	-2.88	76.82	1.68	55.59	-3.35	143.76	2.59	101.85	0.09	1.25	0	30.56	88.17

TABELLA 9 – TABLE 9

LISTA SEGNALAZIONI ANOMALIE TRENO TRAIN ANOMALIES WARNING LIST

Livello anomalia Fault Level	Data e ora transito Running day and time	n. asse s.m.t. n. axle in running direction	Direzione (1=ROMA; -1=Napoli) Running direction (1=ROME; -1=Naples)	velocità calcolata da SMCV [km/h] speed calculated by SMCV [km/h]	Q asse [kN] Q axle [kN]	Indice difetto ruota sx Defect index left wheel	Indice difetto ruota dx Defect index right wheel	indice squilibrio sx/dx index of the imbalance left/right	n. veicolo s.m.t. n. vehicle in running direction	n. carrello del veicolo s.m.t. n. bogie axle in running direction	indice squilibrio del veicolo avanti/dietro index of the imbalance front/back	Qmedio ruota sx [kN] Qmean left wheel [kN]	Qmax ruota sx [kN] Qmax left wheel [kN]	Qmedio ruota dx [kN] Qmean right wheel [kN]	Qmax ruota dx [kN] Qmax right wheel [kN]	validità elaborazione dati (0=valido ; 1=non valido) acceptanza di data processing (0 = good, 1 = invalid)	
1	6/4/2011, 10:36	5	1	120.80	111.70	4.27	1.47	0.01	2	1	1.00	55.10	235.28	56.60	83.35	0	
1	6/4/2011, 10:36	6	1	120.80	104.70	1.61	1.29	0.11	2	1	1.00	46.46	74.90	58.24	75.16	0	
1	6/4/2011, 10:36	7	1	118.65	101.85	1.68	2.59	0.09	2	2	1	1.25	46.26	76.82	55.59	143.76	0

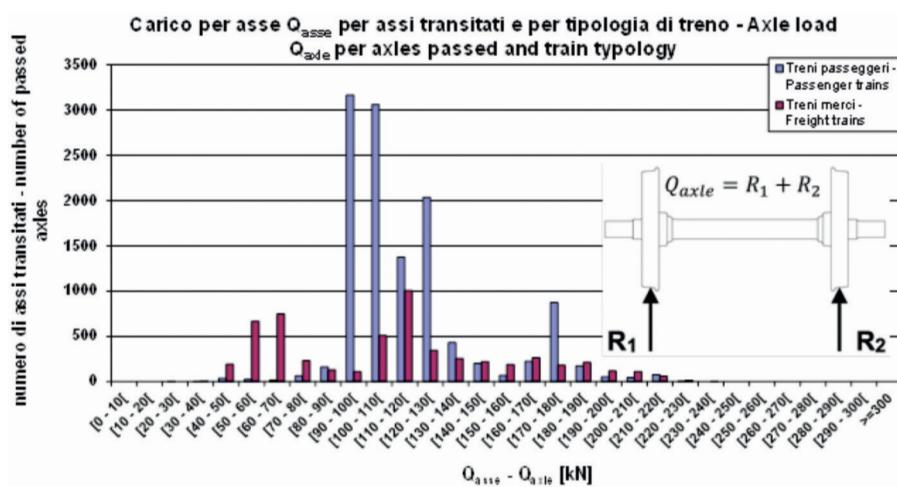


Fig. 26 - Distribuzione dei valori del carico per asse (Q_{asse}) rilevati durante una settimana di esercizio (circa 17.000 assi).

Fig. 26 - Distribution of the load values per axle (Q_{asse}) found during a week of operation (about 17.000 axles).

3.3.4. Experimental measurements during operation

Experimental measurements during operation have been carried out in order to characterise the measurement system according to the following aspects:

- Data for all trains travelled on the line over a period of 3 months with speeds up to 140 km/h were acquired and processed.

SMCV can both automatically calculate, for each axles in transit, parameters such as transit speed, direction of travel, distances between axles for each transit, and recognise the wheel arrangement of vehicles in transit and associate



SCIENZA E TECNICA

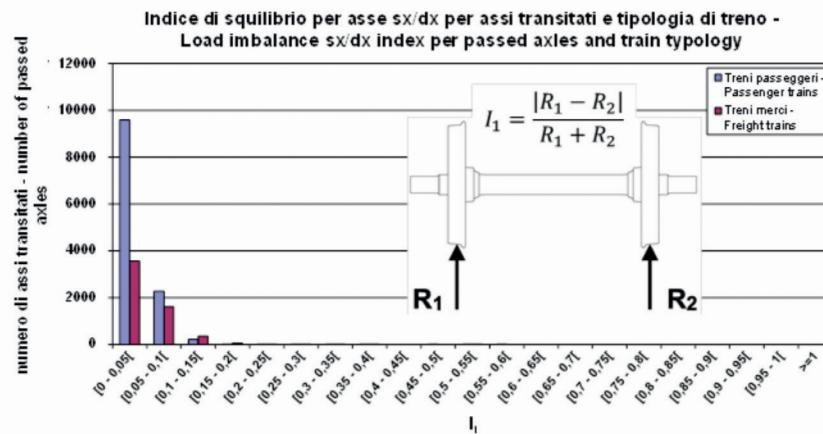


Fig. 27 - Distribuzione dei valori dello squilibrio tra le due ruote dell'asse (I_1) rilevati durante una settimana di esercizio (circa 17.000 assi).

Fig. 27 - Distribution of the imbalance values between the two wheels of the axle (I_1) found during a week of operation (approximately 17.000 axles).

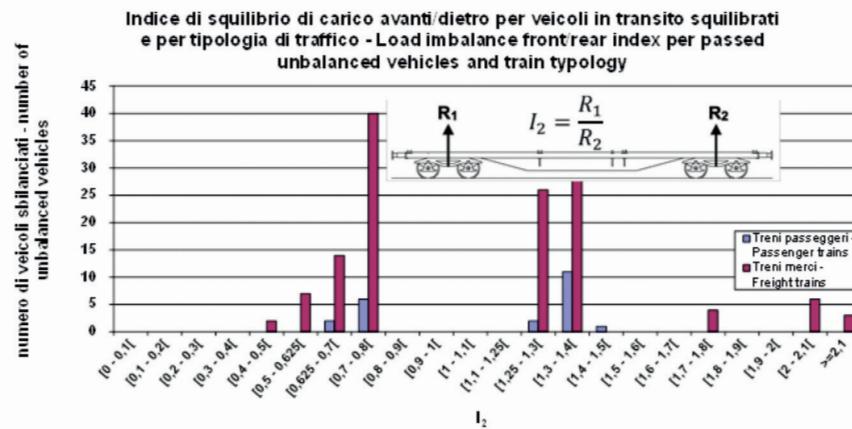


Fig. 28 - Distribuzione dei valori dello squilibrio avanti/dietro del veicolo (I_2) rilevati durante una settimana di esercizio (circa 17.000 assi).

Fig. 28 - Distribution of imbalance values ahead/behind the vehicle (I_2) found during a week of operation (approximately 17.000 axles).

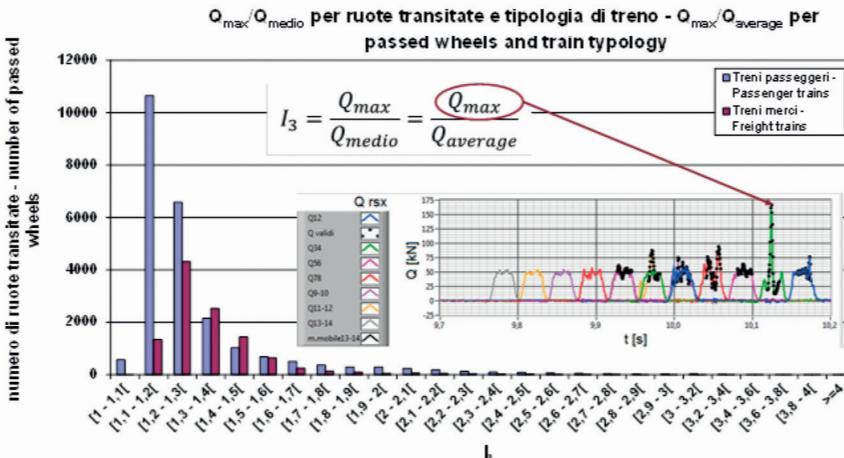


Fig. 29 - Distribuzione dei valori del difetto ruota (I_3) rilevati durante una settimana di esercizio (circa 34.000 ruote).

Fig. 29 - Distribution of wheel defect values (I_3) found during a week of operation (approximately 34.000 wheels).

with each axle the vehicle number, driving direction of the train (s.m.t.), the bogie number of the vehicle, the bogie axle number providing information to identify the train axles which have produced reports of anomaly (fig. 25).

Table 8 shows an example of the loads (per wheel and axle), of imbalance indicators (per axle and per vehicle) and of wheel defect calculated automatically highlighting abnormal values compared to predetermined threshold values.

Table 9 shows an example of the lists of reports of anomalies per individual train with indication of corresponding level of fault. Figures 26, 27, 28 and 29 show examples of statistical analysis of data acquired in a week.

The measurement system automatically allows constant monitoring of the behaviour of all vehicles that transit on a measurement station and process synthetic indicators related to vertical forces transmitted to the track.

Such monitoring in addition to inspecting the overcoming of limitations arising from safety can provide valuable information to correlate the deterioration of the rail to the magnitude and the frequency of the loads applied to it. The measurement system can calculate the vertical reaction forces of sleepers in a manner similar to the calculation of the load from the wheel. Track stiffness indicators can be calculated with the value of these reactions by comparing the value of the load between two sleepers (Q_{34} fig. 30) and the sum of reactions of the two sleepers (R_{t23} and R_{t45} fig. 30).

In fact, assuming that the contribution of the other sleepers is negligible, the Q_{34} load would be almost completely supported by reactions R_{t23} and R_{t45} adjacent to it. Their sum would be little changed and equal to about the assumed constant Q_{34} load.

In reality the track has a non-infinite stiffness, the rail deforms



SCIENZA E TECNICA

carico applicato tra due traverse (Q34 fig. 30) e la somma delle reazioni delle due traverse (Rt23 e Rt45 fig. 30).

Infatti nell'ipotesi che sia trascurabile il contributo delle altre traverse, il carico Q34 sarebbe quasi completamente sostenuto dalle reazioni ad esso adiacenti Rt23 e Rt45. La loro somma sarebbe poco variabile e circa pari al carico Q34 ipotizzato costante.

Nella realtà il binario ha una rigidezza non infinita, la rotaia si deforma e sono chiamate a reagire al carico Q34 anche le traverse adiacenti. La somma delle reazioni Rt23 e Rt45 quindi sarà inferiore al carico Q34 e tanto minore quanto minore sarà la rigidezza del binario.

Pertanto si propone come indicatore della rigidezza del binario il rapporto:

$$k = \frac{Rt23+Rt45}{Q34}$$

che sarebbe circa pari a 1 se il binario fosse infinitamente rigido, inferiore all'unità negli altri casi.

Nel grafico in basso di fig. 31 si riporta un esempio degli andamenti delle 6 reazioni Rtij agenti sulla rotaia rsx in corrispondenza delle traverse comprese tra le sezioni i e j, registrati al transito dei due assi del primo carrello di un locomotore E655; con i punti neri è indicata la somma Rtij+Rtkl delle reazioni delle traverse adiacenti al carico Qjk quando esso assume posizioni comprese nel campo di validità della misura di Q.

Infatti quando il carico Qjk è compreso nel campo di validità della misura di Q, esso non è presente nella zona tra 2 sezioni i,j di misura adiacenti ad una stessa traversa ed è sufficientemente lontano dalle sezioni di misura i e j (condizione necessaria affinché la presenza del carico Qjk non alteri la misura del taglio effettuata da quelle sezioni i e j).

Quando il carico Qjk si avvicina ad un traversa il valore della Rt misurata, dapprima cresce e poi, quando Qjk è nella zona compresa tra le due sezioni di misura (i,j adiacenti alla stessa traversa), decresce (invertendo anche il

and the adjacent sleepers are also required to react to the Q34 load. The sum of reactions Rt23 and Rt45 will therefore be lower than the Q34 load and as lower the lower the track stiffness will be.

Therefore, as indicator of the stiffness of the track the following relation is proposed:

$$k = \frac{Rt23+Rt45}{Q34}$$

that would be equal to about 1 if the track was infinitely stiff, less than one unit in other cases.

The graph at the bottom of fig. 31 shows an example of the trends of 6 Rtij reactions acting on the rsx rail at the sleepers between sections i and j, recorded at the transit of two axles of the first bogie of an E655 locomotive; the black dots indicate the Rtij + Rtkl sum of the reactions of the adjacent sleepers to the Qjk load when it takes positions in the field of validity of the measure Q-.

In fact when the Qjk load is in the field of validity of measurement of Q, it is not present in the area between 2 measurement sections i, j adjacent to the same sleeper and is sufficiently far from measuring sections i and j (prerequisite for the presence of Qjk load not to affect the shear measure made by those sections i and j).

When the Qjk load approaches a sleeper the value of Rt measured, at first grows and then, when Qjk is in the area between the two measurement sections (i, j adjacent to the same sleeper), decreases (also reversing the sign) for the simultaneous presence of the Rt reaction and Qjk load.

The chart also highlights the different behaviour of the sleepers with respect to different stiffness of the track. See for example reaction Rt45 whose performance should be due to greater subsidence of the ballast, in fact this phenomenon has decreased after the tamping performed during tests.

Applications of the measurement system were made taking into account the characteristics of durability and reliability of the sensors, using materials, protections and widely tested technical solutions.

4. Implemented and future applications within RFI

With the development of the SMCV project, RFI provides a service to railway undertakings focused on the control of rolling stock with respect to loading, overloading and/or load imbalances anomalies, beyond the limits allowed; with this RFI has also satisfied the specific request from MIT and ANSF to adopt an instrument capable of reducing the risk of introducing non-compliant rolling stock compared

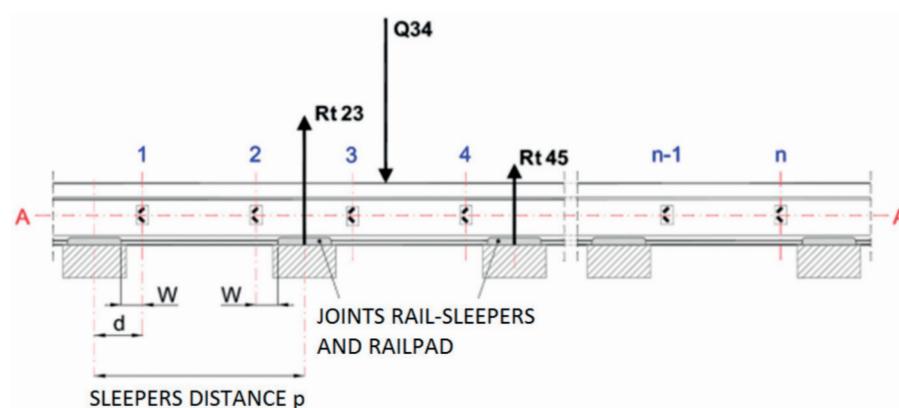


Fig. 30 - Determinazione delle reazioni Rtij in corrispondenza delle traverse.
Fig. 30 - Determination of Rtij reactions at sleepers.



SCIENZA E TECNICA

segno) per la contemporanea presenza della reazione R_t e del carico Q_{jk} .

Il grafico mette in evidenzia anche il diverso comportamento delle traverse in relazione alla diversa rigidezza del binario. Si veda ad esempio la reazione R_{t45} il cui andamento dovrebbe essere dovuto a maggiori sedimenti del ballast, infatti tale fenomeno si è ridotto dopo la rincalzatura effettuata durante le prove.

Le applicazioni del sistema di misura sono state realizzate tenendo conto delle caratteristiche di durata e affidabilità dei sensori, utilizzando materiali, protezioni e soluzioni tecniche ampiamente sperimentate.

4. Applicazioni attuati e future in ambito RFI

Con lo sviluppo del progetto SMCV, RFI fornisce un servizio alle Imprese Ferroviarie focalizzato al controllo dei rotabili rispetto alle anomalie di carico, sovraccarichi e/o squilibri di carico, oltre i limiti ammessi; con ciò RFI ha soddisfatto anche alla specifica richiesta avanzata dal MIT e dall'ANSF di dotarsi di uno strumento capace di ridurre il rischio di immissione, da parte delle Imprese Ferroviarie, sulla rete ferroviaria nazionale di rotabili non conformi rispetto al carico.

Nello sviluppare il sistema SMCV è stata tenuta in conto l'esigenza di disporre di un sistema che fosse rigoroso da un punto di vista tecnico-scientifico, ma comunque robusto e affidabile, cioè in grado, necessariamente, di rispettare anche le seguenti condizioni:

- installazione non invasiva nei confronti del binario e dei sistemi di segnalamento;
- semplicità di realizzazione, di elaborazione dei dati e di mantenimento in funzione;
- indipendenza dalle caratteristiche del sottofondo (rigidezza della via);
- elevate caratteristiche metrologiche, di affidabilità e robustezza della misura.

La sperimentazione condotta ha prodotto come primo risultato la definizione di una Specifica Tecnica di Fornitura, relativa al prodotto SMCV, con la quale disciplinare le forniture a RFI dei sistemi di misura.

Nella Specifica Tecnica sono state definite in modo dettagliato le caratteristiche del dispositivo di misura, delle logiche di funzionamento e dell'elaborazione del dato grezzo.

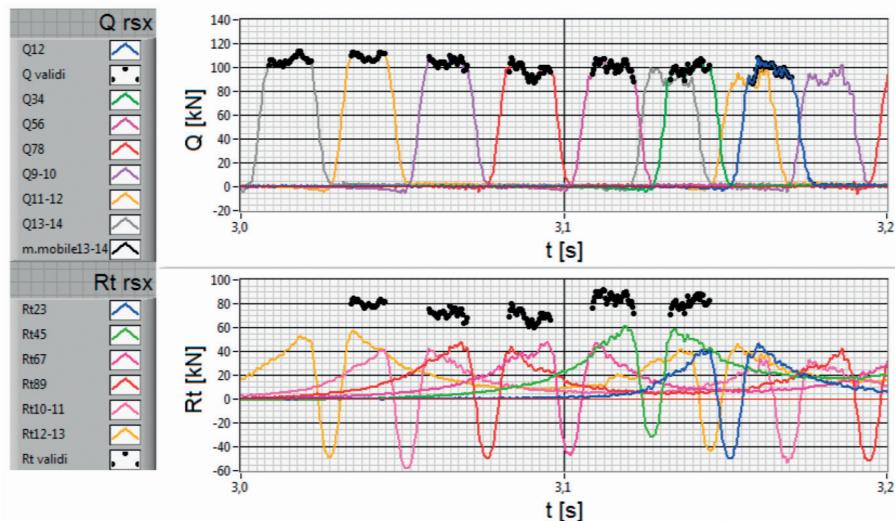


Fig. 31 - Andamento del carico Q e delle reazioni R_t in corrispondenza delle traverse misurate al transito dei due assi del primo carrello di un locomotore E655.

Fig. 31 - Q load and R_t reactions trend at the sleeper measured upon transit of the two axles of the first bogie of an E655 locomotive.

to the load on the national railway network by railway undertakings.

In developing the SMCV system the need to have a system that from the technical and scientific point of view is rigorous, but still robust and reliable was taken into account, i.e. able, necessarily, to comply with the following conditions:

- non-invasive installation against the track and signalling systems;
- easiness of implementation, data processing and maintenance in operation;
- independence from substrate characteristics (stiffness of the way);
- high metrological, reliability and robustness of the measure characteristics.

Testing conducted has produced as a first result the definition of a Supply Technical Specification relating to the SMCV product, to discipline measurement systems provisions to RFI.

The characteristics of the measurement systems, operating logic and processing of the raw data have been defined in detail in the Technical Specifications.

4.1. System description

The SMCV measurement station consists of the following devices:

1. Measuring device;
2. UAD device (Data Acquisition Unit);
3. SATR device (Reporting of Anomalies of the Transit of Rolling Stock).



SCIENZA E TECNICA

4.1. Descrizione del sistema

La stazione di misura SMCV è costituita dai seguenti dispositivi:

1. Dispositivo di misura;
2. Dispositivo UAD (Unità di Acquisizione Dati);
3. Dispositivo SATR (Segnalazione delle Anomalie del Transito dei Rotabili).

Il sistema SMCV:

- rileva i valori del carico dinamico istantaneo Q trasmesso dalla singola ruota al dispositivo di misura;
- elabora i valori del carico verticale di ciascuna ruota e di ciascun asse dei convogli che transitano sul dispositivo di misura (dispositivo UAD);
- elabora lo sbilanciamento in senso trasversale del singolo asse di ciascun rotabile che transita sul dispositivo di misura (dispositivo UAD);
- trasmette in automatico mediante appositi sistemi la segnalazione delle anomalie (dispositivo SATR).

4.1.1. Dispositivo di misura

Il dispositivo di misura è costituito dalle due rotaie strumentate come descritto nel dettaglio nei paragrafi precedenti. Per le prime applicazioni descritte, le rotaie strumentate sono state preparate direttamente da RFI, con proprio personale, presso l'Officina Nazionale Arma-mento di Pontassieve e successivamente tarate presso i laboratori di prove e misure di Italcertifer.

Il dispositivo di misura è realizzato utilizzando componenti di armamento di tipo standard. In particolare sono utilizzate due rotaie da 12 m, profilo 60E1 in acciaio R260, conformi alle Specifiche Tecniche di Fornitura di RFI, sulle quali sono applicati mediante incollaggio gli estensimetri.

Il dispositivo di misura è installato su un binario armato con traverse poste ad un interasse pari a 0,6 m. Per la protezione dei cavi che collegano gli estensimetri alle Unità di Acquisizione Dati sono utilizzate 8 traverse in cap di tipo passacavi per Giunti Isolanti Incollati tipo RFI230, RFI240 o RFI260, già utilizzate da RFI ed equipaggiate con sistema di attacco costituito da piastre 60UNI 1/20, piastrine 50-60 o molle tipo Skl 12 e piastre in gomma sotto rotaia PGS 64, cioè con l'attacco standard su questo tipo di traverse.

Sul gambo delle rotaie sono applicate delle protezioni meccaniche per i cavi e per le connessioni elettriche che consentono le normali operazioni di rincalzatura del binario con le macchine operatrici usualmente adoperate.

Per la definizione di dettaglio della localizzazione del dispositivo di misura necessita individuare un tratto di binario in retta ed in piano.

Il dispositivo di misura, pur avendo la caratteristica di essere indipendente dalla rigidezza verticale della via,

The SMCV system:

- detects the instantaneous Q values of the dynamic load transmitted by the single wheel to the measurement device;
- processes the values of the vertical load of each wheel and each axle of convoys transiting on the measurement device (UAD device);
- processes the transversal unbalance of the single axle of each rolling stock transiting on the measurement device (UAD device);
- automatically transmits signalling of anomalies through special systems (SATR device).

4.1.1. Measurement device

Two rails instrumented as described in detail in the previous paragraphs constitute the measurement device. For the first applications, the instrumented rails were prepared directly by RFI, with its own staff at the National Permanent Way Workshop of Pontassieve and then calibrated in a test and measurement laboratory of Italcertifer.

The measuring device is built using standard type permanent way components. In particular, two 12 m rails are used with 60E1 profile in R260 steel, in accordance with RFI Technical Specifications for Supply, on which they are applied by bonding the strain gauges.

The measuring device is installed on a reinforced rail with sleepers placed at a distance of 0.6 m. 8 concrete cable-gland-type sleepers are used for Glued Insulating Joints type RFI230, RFI240 or RFI260 to protect the cables that connect the strain gauges to the Data Acquisition Unit already employed by RFI and equipped with mounting system consisting of 60UNI 1/20 plates, 50-60 platelets or Skl 12 type springs and rubber PGS 64 under rail plates, that is with the standard connection on this type of sleepers.

Mechanical protections for cables and electrical connections are applied on the web of the rails that allow normal track tamping operations with the machines regularly used.

For the definition of the detail of the position of the measuring device the identification of a straight and level section of track is required.

The measuring device, while having the characteristic of being independent of the vertical stiffness of the way, may suffer accentuated conditions of non-uniformity of the geometrical quality of the track that can generate dynamic effects on vehicles that influence the measurement of the load itself. The installation of the SMCV system is avoided at points where there is a change in vertical stiffness of the track, such as bridge/raised, raised/gallery transitions.

The SMCV system can be inserted into the long welded rail without any restriction as it is made with materials that conform to the standards for this type of construction and being the measurement independent from this aspect.



SCIENZA E TECNICA

può risentire di accentuate condizioni di disuniformità della qualità geometrica del binario che possono generare sui veicoli effetti dinamici che influenzano la misura del carico stesso. Viene pertanto evitato di installare il sistema SMCV in corrispondenza di punti dove è presente una variazione di rigidezza verticale del binario, quali transizioni ponte/rilevato, rilevato/galleria.

Il Sistema SMCV può essere inserito in lunga rotaia saldata senza alcuna limitazione essendo realizzato con materiali conformi agli standard per questo tipo di costruzione ed essendo la misura indipendente da questo aspetto.

4.1.2. Dispositivo UAD

Il dispositivo Unità di Acquisizione Dati è una postazione periferica capace di rilevare e gestire i dati grezzi acquisiti dal dispositivo di misura.

L'UAD è realizzata in modo da poter condizionare ed acquisire i 28 ponti estensimetrici completi del dispositivo di misura (14 per ciascuna rotaia attrezzata), memorizzarli e rendere disponibili i relativi dati alla SATR.

4.1.3. Dispositivo SATR

Il dispositivo per la Segnalazione delle Anomalie del Transito dei Rotabili deve elaborare i dati grezzi trasmessi dalla UAD e deve produrre due differenti liste di segnalazioni di anomalia, legate al superamento di determinate soglie impostabili (fig. 32).

4.2. Architettura di sistema

Il Sistema nel suo complesso (fig. 33) è costituito da:

- un Posto di Controllo (PCO) composto da:



Fig. 32 - Rotaie strumentate e armadio contenente i dispositivi UAD e SATR.

Fig. 32 - Instrumented rails and cabinet containing the UAD and SATR devices.

4.1.2. UAD device

The Data Acquisition Unit device is a terminal device capable of detecting and handling the raw data acquired by the measuring device.

The UAD is built so as to condition and acquire the 28 strain gauge bridges with the measuring device (14 for each equipped rail), store them and make the related data available to the SATR.

4.1.3. SATR Device

The device for Reporting of Anomalies of the Transit of Rolling Stock must process the raw data transmitted by the UAD and must produce two different anomaly reporting lists, related to exceeding certain set thresholds (Fig. 32).

4.2. System architecture

As a whole the system (Fig. 33) consists of:

- *an Inspection Site (PCO) consisting of:*
 - *a PC for data processing and for interfacing with the system;*
 - *an application that, through a graphical interface, allows the control and management of the acquired data;*
- *one or more Detection Sites (PR) consisting of:*
 - *measuring devices (strain gauges/sensors) installed on the rail to detect the vertical load;*
 - *two or more data acquisition units (UAD) intended for the acquisition of signals and for storage, encoding and transmission of signals acquired;*
 - *a signalling device of anomalies (SATR) for the processing of raw signals acquired, by comparison with the thresholds set and the processing of any threshold exceedance upon transit of rolling stock;*
 - *a GPS device to maintain the system temporal reference.*

The PCO and the PR communicate via modems and data can be transmitted through different types of media such as twisted pair, fibre optic or GSM-R.

4.3. Development of the SMCV

As a result of testing, RFI decided to develop the SMCV product proceeding to the engineering of the system, the definition of the type of installation and management modes.

To do this it was decided to install some SMCV systems in some pilot sites of the Italian railway network; for the choice of these points, criteria that take into account both the importance of the volume of rail traffic and the geographical location of the checkpoints/verification stations locations have been adopted.

The ultimate goal is to establish a general development plan of the detection inspection sites network of load anom-



SCIENZA E TECNICA

- un PC per l'elaborazione dei dati e per l'interfacciamento con il sistema;
- un applicativo che, attraverso un'interfaccia grafica, consente il controllo e la gestione dei dati acquisiti;
- uno o più Posti di Rilevamento (PR) composti da:
 - dei dispositivi di misura (estensimetri/sensori) installati sulla rotaia per rilevare il carico verticale;
 - due o più unità di acquisizione dati (UAD) destinate all'acquisizione dei segnali e alla memorizzazione, codifica e trasmissione dei segnali acquisiti;
 - un dispositivo di segnalazione delle anomalie (SATR) destinato all'elaborazione dei segnali grezzi acquisiti, al confronto con determinate soglie impostate e alla elaborazione di eventuali superamenti delle soglie al transito dei rotabili;
 - un dispositivo GPS per mantenere il riferimento temporale del sistema.

Il PCO e il PR comunicano attraverso dei modem e i dati possono essere trasmessi attraverso diverse tipologie di supporto quali doppino telefonico, fibra ottica o GSM-R.

4.3. Sviluppo del SMCV

RFI, a seguito della sperimentazione, ha deciso di sviluppare il prodotto SMCV procedendo all'ingegnerizzazione del sistema, alla definizione delle tipologie di installazione e delle modalità di gestione.

Allo scopo è stato deciso di installare alcuni sistemi SMCV in alcuni siti pilota della rete ferroviaria italiana; per la scelta di detti punti sono stati adottati criteri che tengono conto sia dell'importanza del volume di traffico ferroviario sia della posizione geografica delle stazioni sedi di posto di controllo/verifica.

L'obiettivo finale è definire un Piano Regolatore del network di check points di rilevamento di anomalie di carico dei rotabili da installare presso i più importanti punti di ingresso, o di immissione, di traffico merci nella rete: porti, scali merci, impianti di smistamento, valichi di transito internazionale.

Da un primo esame, è stato perciò stralciato un primo gruppo di punti significativi da realizzare, rappresentato in fig. 34, al quale seguirà poi il completamento del network di intera rete.

4.4. Tipologie di impianti SMCV

In funzione della localizzazione e della velocità di impegno da parte dei rotabili, i sistemi di misura dei carichi verticali si distinguono in:

- SMCV di tipo "quasi statico";
- SMCV di tipo "dinamico".

Il SMCV "quasi statico" è installato su binari posti nelle località di servizio o di generazione del traffico dove

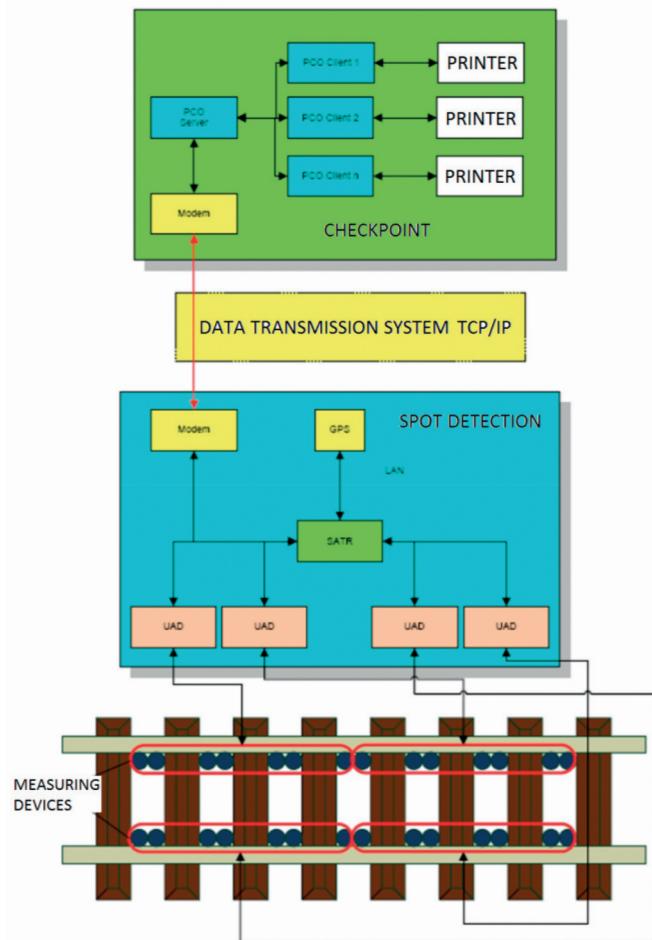


Fig. 33 - Architettura del sistema SMCV.
Fig. 33 - SMCV System Architecture.

alias of the rolling stock to be installed at major entry points, or entry of freight traffic in the network: ports, freight terminals, shunting systems, international border crossings.

From an initial assessment, a first group of significant points to be achieved was therefore deleted, represented in fig. 34, which will then be followed by the completion of the network of the entire railway network.

4.4. SMCV systems types

Depending on the location and speed of the rolling stock, the measurement systems of vertical loads are distinguished by:

- "steady state" type SMCV;
- "dynamic" type SMCV.

The "steady state" SMCV is installed on tracks in service or traffic generation areas where transit takes place at reduced speed, usually below 30 km/h.

The "dynamic" SMCV is installed on running tracks or open tracks. The measurement takes place at full speed.



SCIENZA E TECNICA

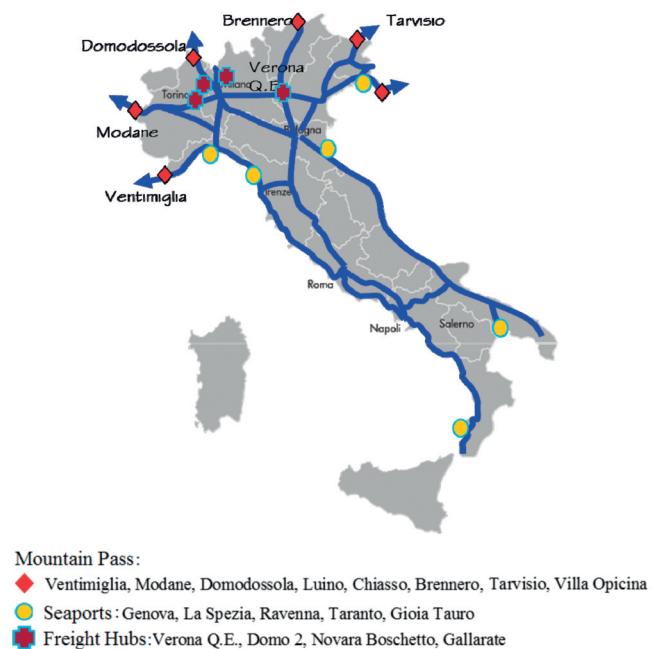


Fig. 34 - Primi siti di installazione dei sistemi SMCV.
Fig. 34 - First SMCV systems installation sites.

il transito avviene a velocità ridotta, normalmente al di sotto dei 30 km/h.

Il SMCV "dinamico" è installato su binari di corsa o di piena linea e la misura avviene a piena velocità.

Dal punto di vista realizzativo i due SMCV, quasi statico e dinamico, sono identici; ciò che li differenzia sono i soli valori di soglia degli indici rilevati, impostabili sul dispositivo SATR, per tener conto dell'influenza degli effetti di dinamica di marcia dei treni sui valori di Q che si verificano al transito sul sistema SMCV.

Grazie alle caratteristiche tecniche del sistema adottato per la misura del carico verticale, non ci sono particolari limitazioni riguardo alla velocità massima per la quale gli impianti SMCV sono in grado di effettuare una misura efficace.

Per velocità molto elevate, al di là delle velocità massime più comunemente riscontrabili sulla rete convenzionale (160-180 km/h), potrebbero solo rendersi opportune: una più elevata frequenza di campionamento del segnale proveniente dai ponti estensimetrici, così da assicurare comunque una sufficiente scansione del peso trasmesso alla ruota lungo ogni singolo modulo base di misura (Cfr. fig. 28), nonché la ripartizione dei 7 moduli base su una lunghezza maggiore (per esempio su una lunghezza doppia o tripla, cioè un modulo base ogni due oppure ogni tre spartiti) per meglio tenere in conto le dinamiche di marcia dei rotabili.

Per ogni indice rilevato sono previsti due livelli di soglia L1 ed L2; il livello L1 è sostanzialmente legato all'al-

From the execution point of view, static and dynamic SMCVs are identical. Differences are the threshold values only of the indices found, settable on the SATR device, to take into account the influence of dynamic train operation effects on Q values, which occur in transit on the SMCV system.

Thanks to the technical characteristics of the system adopted for the measurement of the vertical load, there are no limitations regarding the maximum speed for which the SMCV systems can measure effectively.

For very high speeds, beyond the maximum speed more commonly encountered on conventional network (160-180 km/h), a higher sampling rate of the signal from strain gauge bridges ensures a sufficient scan of the weight transmitted to the wheel on each basic measurement module may only be appropriate (see fig. 28). The setup of 7 basic modules on a greater length (for example on a double or triple length, i.e. a basic module every two or every three apportioned) allows to better take into account the operation dynamics of rolling stock.

There are two threshold levels L1 and L2 for each index found; level L1 is substantially related to the actual alarm while level L2 can be used for signalling system degradation or indications of quality levels of rolling stock such as faceted wheels.

The threshold levels and the corresponding indications can be defined by the operator on the basis of legislation, experience feedback and operation monitoring criteria.

Some indexes found are referred to the train control (loads, imbalances, wheel defect) and others to the SMCV (weight quality, zero offset).

Depending on the characteristics of the system to be equipped with checkpoints of the rolling stock load, two system types have been defined.

The standard configuration defined for traffic generation systems or for service areas provides for one or more "almost static" SMCVs installed within the system or on the stretch of access and exit track from the same. When the train is ready to be sent to the departure tracks it is measured making it transit on the SMCV.

The standard configuration defined for line SMCV systems provides an open track installation, at a suitable distance from first attended station downstream ("dynamic" SMCV) and can be complemented by an installation on a running track of the above station by an "almost static" type SMCV. At the transit of the train, if the "dynamic" SMCV detects an anomaly the system transmits an alarm to the DM of the identified station and the train is received in the station to be checked and, if necessary, measured again by an "almost static" SMCV.

4.5. SMCV installations on the RFI network

At present the following systems have been implemented (or are being installed):



SCIENZA E TECNICA

larne vero e proprio mentre il livello L2 può essere utilizzato per la segnalazione di degrado del sistema o per indicazioni di livelli di qualità del materiale rotabile come ad esempio ruote sfaccettate. I livelli di soglia e le corrispondenti indicazioni possono essere definiti dal gestore sulla base della normativa, dei ritorni di esperienza e dei criteri di monitoraggio dell'esercizio.

Alcuni indici rilevati sono riferiti al controllo del treno (carichi, squilibri, difetto ruota) e altri al SMCV (qualità pesa, zero offset).

A seconda delle caratteristiche dell'impianto da attrezzare con sistemi di check points del carico dei rotabili, sono state definite due tipologie di impianto.

La configurazione standard definita per gli impianti di generazione del traffico o per le località di servizio prevede uno o più SMCV "quasi statico" installato all'interno dell'impianto o sul tratto di binario di accesso e uscita dallo stesso. Quando il treno è pronto per essere inviato verso i binari di partenza viene misurato facendolo transitare sul SMCV.

La configurazione standard definita per gli impianti SMCV di linea prevede una installazione in piena linea, a distanza idonea dalla prima stazione a valle presenziata (SMCV "dinamico") e può essere integrata dall'installazione su un binario di circolazione della stazione suddetta da un SMCV di tipo "quasi statico". Al passaggio del treno, se SMCV "dinamico" rileva un'anomalia il sistema trasmette un allarme al DM della stazione individuata e il treno viene ricevuto in stazione per essere verificato ed eventualmente nuovamente misurato con SMCV "quasi statico".

4.5. Installazioni SMCV sulla rete RFI

Allo stato attuale sono stati realizzati (o sono in fase di installazione) i seguenti impianti:

- Verona Quadrante Europa (due SMCV di tipo "quasi statico");
- Valico di Domodossola:
 - Domo 2 (un SMCV di tipo "quasi statico");
 - Varzo (due SMCV di tipo "dinamico");
- Novara Boschetto (tre SMCV di tipo "quasi statico");
- Roccasecca (due SMCV prototipali di cui uno di tipo "dinamico" in linea e uno di tipo "quasi statico" su un binario di circolazione).

4.5.1. Impianti SMCV di Verona Quadrante Europa (Q.E.)

Gli impianti SMCV installati al terminal di Verona Q.E. sono i primi in configu-

- Verona Quadrante Europa (two "steady-state" type SMCVs);
- Domodossola mountain pass:
 - Domo 2 (an "steady-state" type SMCV);
 - Varzo (two "dynamic" type SMCVs);
- Novara Boschetto (three "steady-state" type SMCVs);
- Roccasecca (two prototype SMCVs one open track "dynamic" type and one "steady-state" type on a running track).

4.5.1. Verona Quadrante Europa SMCV Systems

SMCV systems installed at the terminal in E. Q. Verona are the first with non-prototype configuration to be installed and have been put in operation on November 13, 2013.

The systems consists of two "steady-state" SMCVs located in positions such as to weigh most of the wagon columns destined to become trains moving from the terminal to the departure tracks (figures 35 e 36).

Fig 37 represents the information flow concerning the alarmed wagon notifications and their actions for the regularisation and re-routing of the wagon.

4.5.2. Domodossola SMCV systems

The Domodossola mountain pass was equipped with a set of checkpoints deployed as follows (figures 38 and 39):

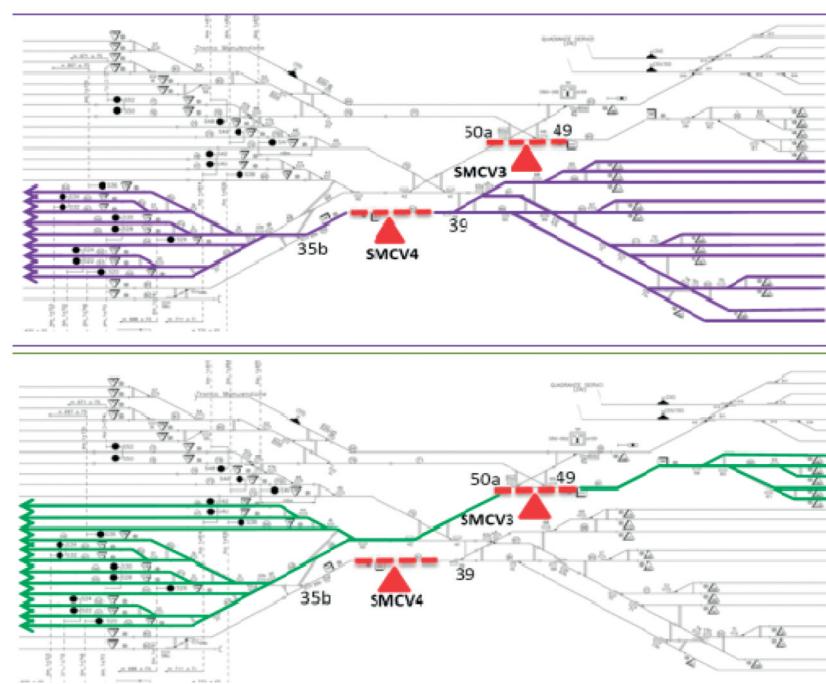


Fig. 35 - Punti di installazione ed itinerari interessati - SMCV Verona Q.E.: a sinistra delle figure, i binari delle partenze; a destra delle figure il fascio terminal e ZAI.
Fig. 35 - Installation points and routes affected - Verona Q.E. SMCV: to the left of the figures, departure tracks; to the right of the figures terminal sidings and ZAI.



SCIENZA E TECNICA



Fig. 36 - Verona Quadrante Europa - SMCV "quasi statici" 3 - 4.
Fig. 36 - European Quadrant Verona - "steady-state" SMCV 3 - 4.

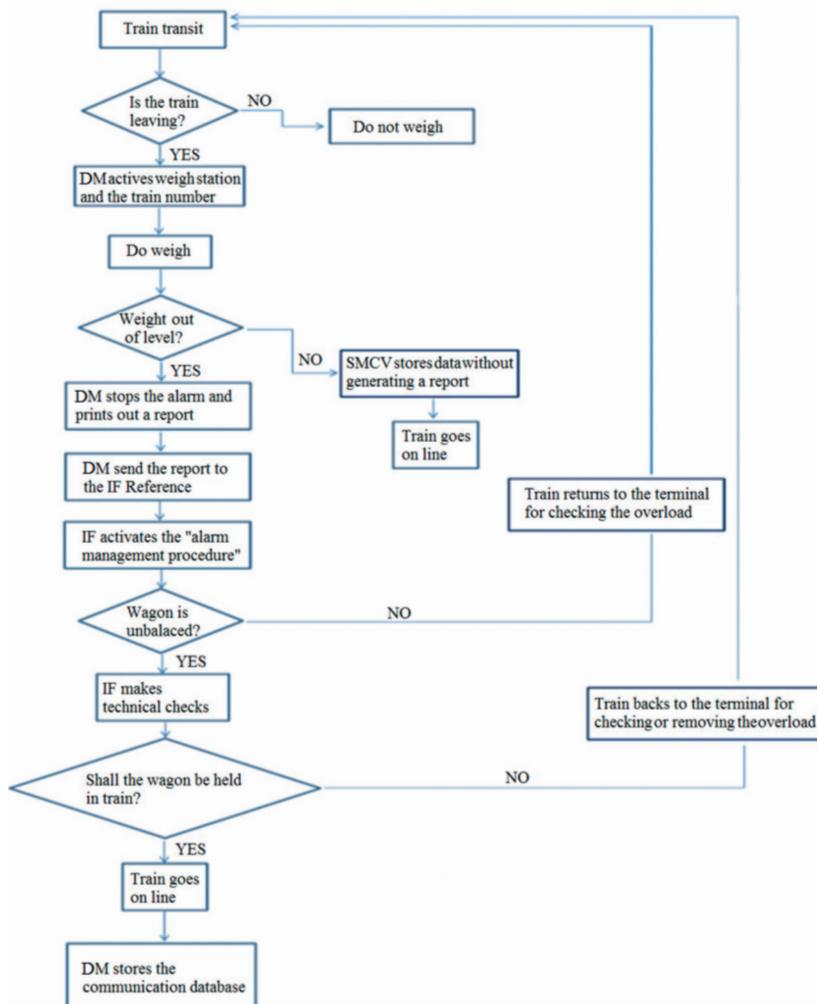


Fig. 37 - Verona Quadrante Europa - Flusso informativo e azioni per la regolarizzazione di carichi non conformi (DM = Dirigente di Movimento; IF = Impresa Ferroviaria; SMCV = Stazione di Misura dei Carichi Verticali).
Fig. 37 - European Quadrant Verona - Information flow and actions for the regularization of non-compliant loads (DM = Movements Inspector; IF = Railway Undertaking; SMCV = Measurement Station of Vertical Loads).

two "dynamic" SMCVs on operation tracks of Varzo station (to measure odd trains) and a "steady-state" SMCV on the Domodossola/Domo2 bypass (to measure even and odd trains).

At present the system has been completed and the commissioning of the plant is planned for July 2014.

The set of checkpoints that constitute the Domodossola mountain crossing will be completed with two SMCVs at Valley Junction, South of Domo 2, to measure even and odd trains inbound and outbound, on the south side, from the Domo 2 plant.

4.5.3. SMCV systems of Novara Boschetto

The installation of three "steady-state" type SMCVs to measure trains outbound from the rail station is underway at the plant in Novara Boschetto.

5. Conclusions

Theoretical research, experimental verification and first applications in operation have proved the validity of the principle for the measurement of actual applied loads, main objective of the research, as well as the ability to provide the values of the reactions at sleepers.

In particular, the main findings are as follows:

1. The results show how the measurement principle in question, using the properties of the full-bridge configuration of Wheatstone allows to systematically



SCIENZA E TECNICA

razione non prototipali ad essere stati installati e sono stati attivati all'esercizio il 13 novembre 2013.

L'impianto si compone di due SMCV "quasi statici" ubicati in posizioni tali da pesare la maggior parte delle colonne di carri destinati a divenire treni che si muovono dal terminal ai binari di partenza (figg. 35 e 36).

Il flusso informativo riguardo alle notifiche di carro allarmato e le relative azioni per la regolarizzazione e reinoltro del carro è rappresentato in fig. 37.

4.5.2. Impianti SMCV di Domodossola

Il valico di Domodossola è stato attrezzato con un complesso di check points così dislocati (figg. 38 e 39): due SMCV "dinamici" sui binari di corsa della stazione di Varzo (per la misura dei treni dispari) e un SMCV "quasi statico" sul passante Domodossola/Domo2 (per la misura dei treni pari e dispari).

Allo stato attuale l'impianto è completato e l'entrata in esercizio dell'impianto è programmata per luglio 2014.

Il complesso di check points che costituiscono il valico di Domodossola si completerà con due SMCV presso Bivio Valle, a sud di Domo 2, per la misura dei treni pari e dispari in ingresso ed in uscita, lato sud, dall'Impianto di Domo 2.

4.5.3. SMCV di Novara Boschetto

Presso l'Impianto di Novara Boschetto è in corso l'installazione di tre SMCV di tipo "quasi statico" per la misura dei treni in uscita dallo scalo.

5. Conclusioni

La ricerca teorica, la verifica sperimentale e le prime applicazioni in esercizio hanno dimostrato la validità del principio per la misura dei carichi effettivi applicati, obiettivo principale della ricerca, nonché l'attitudine a fornire i valori delle reazioni in corrispondenza delle traverse.

In particolare i risultati principali sono i seguenti:

- I risultati evidenziano come il principio di misura considerato, utilizzando le proprietà della configurazione a ponte completo di Wheatstone permetta di eli-

ticamente eliminare gli effetti della deformazione del binario causata dal torsionamento e dal piegamento che, per le imperfezioni inevitabili dei supporti reali, agiscono sulla tratta anche in presenza del carico Q solo. Il calcolo di una costante di calibrazione per ogni sezione di misurazione consente anche di compensare per eventuali errori di posizionamento delle ghiere di tensione della sezione individuale. La piccola variazione di valori calcolati per le costanti di calibrazione di molte sezioni simili è considerata una conferma che le incertezze di misurazione calcolate sono veramente realistiche. Le incertezze di misurazione calcolate sono confermate dai risultati degli esperimenti di laboratorio che mostrano piccole variazioni di costante di calibrazione e come tante deviazioni tra i valori misurati e i carichi applicati.

2. The shear measure allows measuring loads regardless of track stiffness. However differences in the stiffness of the track at the support points of the vehicle and the vehicle anomalies in relation to the load distribution on wheels (e.g. faulty suspensions), if of significant entity, can affect the distribution of loads applied by the wheels because of the support hyperstaticity of the vehicle itself on the rail. In any case the measuring system detects the load actually transmitted to the track, which is among the leading causes of deterioration of the track. The measurement system is also capable of detecting the vertical reaction forces at the sleepers that could provide indications on the differences of vertical stiffness of the rail at the measuring station.
3. At the moment 12 measuring stations close to the frontier and in freight stations are installed or being installed. The data currently acquired can also be used to establish more appropriate threshold values and vehicle control criteria than those based on static loads or derived therefrom.
4. An interesting development perspective may be the use of the measuring station for the identification of possible correlations between the loads transmitted to the track and its degradation over time, an aspect not dealt with here.

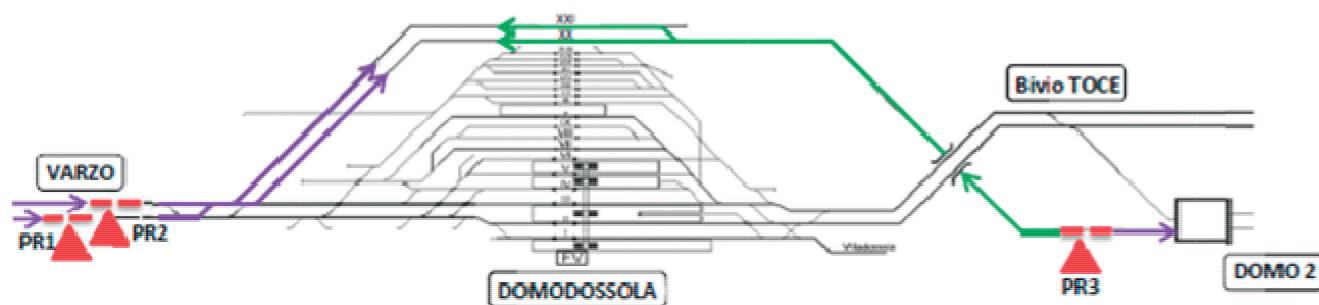


Fig. 38 - Punti di installazione ed itinerari interessati. Impianti SMCV di Domodossola).
Fig. 38 - Installation points and routes concerned. Domodossola SMCV systems.



SCIENZA E TECNICA

minare sistematicamente gli effetti delle deformazioni della rotaia dovute a torsione e flessione che, per la inevitabile imperfezione degli appoggi reali, agiscono sulla rotaia anche in presenza del solo carico Q . Il calcolo di una costante di taratura per ogni sezione di misura permette inoltre di compensare eventuali errori di posizionamento degli estensimetri della singola sezione. La piccola variazione dei valori calcolati per le costanti di taratura di molte sezioni simili è ritenuta una conferma che le incertezze di misura calcolate siano davvero realistiche. Le incertezze di misura calcolate sono state confermate dai risultati sperimentali di laboratorio, che hanno evidenziato piccole variazioni dei valori delle costanti di taratura calcolate e altrettanto piccoli valori degli scostamenti tra carichi misurati e carichi applicati.

2. La misura del taglio consente di misurare i carichi indipendentemente dalla rigidezza del binario. Tuttavia le differenze di rigidezza del binario in corrispondenza dei punti di appoggio del veicolo e le anomalie del veicolo in relazione alla ripartizione del carico sulle ruote (es. sospensioni difettose), se di entità rilevante, possono influenzare la ripartizione dei carichi applicati dalle ruote a causa della iperstaticità dell'appoggio del veicolo stesso sul binario. In ogni caso il sistema di misura rileva il carico effettivamente trasmesso al binario, che è tra le cause principali di degrado del binario. Il sistema di misura è in grado di rilevare inoltre le forze di reazione verticale in corrispondenza delle traverse che potrebbero fornire indicazioni sulle differenze di rigidezza verticale del binario in corrispondenza della stazione di misura.
3. Allo stato attuale sono installate o in corso di installazione 12 stazioni di misura in prossimità dei passi di frontiera e negli scali merci. I dati acquisiti attualmente possono essere usati anche per stabilire valori di soglia e criteri di controllo dei veicoli più appropriati di quelli basati sui carichi statici o da essi derivati.
4. Un prospettiva di sviluppo interessante potrebbe essere l'utilizzo della stazione di misura per l'individuazione di possibili correlazioni tra i carichi trasmessi al binario ed il suo degrado nel tempo, aspetto qui non trattato.

Il principio adottato può essere applicato anche per sviluppare sistemi di misura in grado di rilevare anche i carichi trasversali applicati al binario [15]. Si otterebbe in tal modo una stazione di misura che consente di valutare il comportamento dinamico di veicoli diversi in corrispondenza delle stesse condizioni di tracciato sia per ottenere indicazioni nei riguardi delle sollecitazioni effettivamente applicate alle rotaie sia per valutare in esercizio il rispetto dei criteri adottati in sede di messa in servizio dei veicoli per la verifica della sicurezza allo svio a bassa velocità (cfr. par. 3.1.3.2 Method 1: Test on twisted test track of EN14363:2005). Le stazioni di misura sarebbero in questo caso mirate ad individuare eventuali problemi di rodiggio.



Fig. 39 - SMCV "dinamico" Varzo.
Fig. 39 - "Dynamic" SMCV of Varzo.

The adopted principle can also be applied to develop measurement systems capable of detecting even transverse loads applied to the track [15]. A measuring station could thus be obtained that allows evaluating the dynamic behaviour of different vehicles at the same route conditions both to obtain indications with regard to stresses actually applied to rails and to evaluate the compliance with the criteria adopted in the commissioning of vehicles for safety check at slow speed derailments during operation (see par. 3.1.3.2 Method 1: Test on twisted test track of EN14363:2005). Measuring stations are in this case aimed at identifying wheel arrangement problems.

The behaviour of the same vehicle in different route conditions can be studied through measuring systems in the vehicle that however at present are characterised by uncertainty of measurement that varies from system to system [16], [17]. The land measurement system may constitute an effective test bench for evaluating the accuracy and precision of on-board measurement systems.

APPENDIX I Representation of the measuring system through FEM calculations

The behaviour of the measurement system and of signal processing associated with it has been studied using a parametric and static finite element model (FEM), representing the characteristics of strain in the measurement sections as the x position of the Q load varies similar to those obtained from experimental measurements.

To get the expected progress of recordings for individual shear measurement sections over time, a Q load was ap-



SCIENZA E TECNICA

Il comportamento di uno stesso veicolo in diverse condizioni di tracciato può essere studiato mediante i sistemi di misura a bordo del veicolo che tuttavia allo stato attuale sono caratterizzati da incertezze di misura che variano da sistema a sistema [16], [17]. Il sistema di misura di terra può costituire un efficace banco prova per la valutazione della accuratezza e precisione dei sistemi di misura di bordo.

APPENDICE I Rappresentazione del sistema di misura attraverso calcoli FEM

Il comportamento del sistema di misura e delle elaborazioni dei segnali ad esso associato è stato studiato tramite un modello ad elementi finiti (FEM), statico e parametrico, che rappresenta le caratteristiche di sollecitazione nelle sezioni di misura al variare della posizione x del carico Q simili a quelle che si ottengono dai rilievi sperimentali.

Per ricostruire l'andamento atteso delle registrazioni delle singole sezioni di misura del taglio nel tempo si è applicato il carico Q (supposto di valore costante pari a 100 kN) in posizioni longitudinali x successive con passo di variazione pari a 0,03m. Sono state calcolate le caratteristiche di sollecitazione, in corrispondenza di ogni posizione x del carico Q, per le sezioni di misura 1 e 2 di fig. 4.

Lo studio ha permesso di verificare, le procedure di elaborazione dei segnali per riconoscere il carico di ciascuna ruota partendo dai segnali misurati dai moduli posizionati in successione lungo il binario: infatti uno stesso asse occupa successivamente i diversi moduli di misura e uno stesso modulo di misura rileva i carichi di diverse ruote che lo impegnano in successione. Spesso i modelli di armamento proposti in letteratura sono modelli indefiniti di binario su letti continui di molle per ogni stadio di sospensione considerato e quindi a parametri distribuiti. Tale approccio seppure fornisca risultati rispondenti alla realtà non permetterebbe di rappresentare correttamente

plied (assumed constant value of 100 kN) in x subsequent longitudinal positions with variation pace equal to 0.03 m. The stress characteristics were calculated for each x position of the Q load, for measurement sections 1 and 2 in fig. 4.

The study allowed verifying the signal processing procedures to recognise the load of each wheel starting from measured signals from the modules placed in succession along the track: in fact the same axle subsequently occupies the different measurement modules and a single measurement module detects the different wheel loads that engage it in succession.

Often permanent way models proposed in literature are undefined track models on continuous spring beds for every suspension stage considered and hence with distributed parameters. This approach while providing results congruous with reality would not represent correctly the behaviour of the measurement system proposed which is based on the measuring trend of the shear in precise sections and depends on its variation at the same sections and at the supports between the sleeper and rail (distance d in fig. 4). The ZIMMERMANN model could have been used [18], but, for ease of data processing and management, in order to simulate the behaviour of the measurement system and calculate the uncertainty, an FEM model was built with reasonable supports.

A very simple FEM model was therefore chosen for the determination of rail shears that reconstructs a 60 UNI track using girder elements (associating the mass and geometric properties in its section to each element). The rail is connected to an odd number of spring elements at the sleepers (15 in simulations carried out) spaced at step p (0.6 m in simulations carried out) and k_d vertical stiffness.

Fig. 40 a) shows the results of the static calculation made with $k_d = 130.000 \text{ N/mm}$, which provides the maximum yield values of 0.34 mm with two vertical load $Q = 85.840 \text{ N}$ spaced at 2.7 m between them.

Fig. 40b) shows the results of the static calculation made with $k_d = 12.000 \text{ N/mm}$, which provides the maximum yield values of 2.05 mm, with two vertical loads $Q = 85.840 \text{ N}$ spaced at 2.7 m between them, to simulate a much more yielding track condition.

Fig. 41, for each graph, shows the shear value in the ordinate detected by the two measurement sections T_1 and T_2 , depending on the x position assumed by the Q load = 100 kN.

Below is the Q load calculated derived as the difference between the shear values.

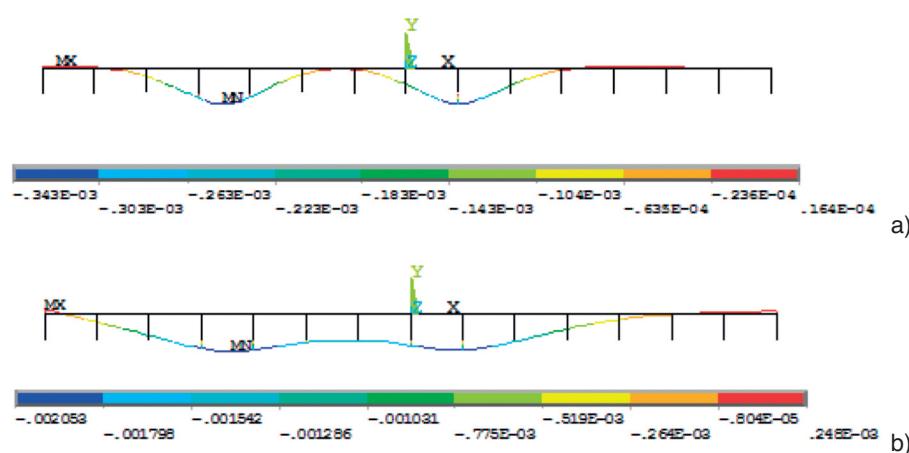


Fig. 40 - Deformata della rotaia calcolata (ed espressa in m) con carichi verticali $Q = 85.840 \text{ N}$ distanziati tra loro di 2,7m; rigidezza $k_d = 130.000 \text{ N/mm}$ in a) e $k_d = 12.000 \text{ N/mm}$ in b).
Fig. 40 - Calculated rail deformation (expressed in m) with vertical loads $Q = 85.840 \text{ N}$ spaced at 2.7 m between them; stiffness $k_d = 130.000 \text{ N/mm}$ in a) and $k_d = 12.000 \text{ N/mm}$ in b).



SCIENZA E TECNICA

il comportamento del sistema di misura proposto che si basa sulla misura dell'andamento del taglio in precise sezioni e dipende dalla sua variazione in corrispondenza delle sezioni stesse e degli appoggi tra traversa e rotaia (distanza d di fig. 4). Si sarebbe potuto utilizzare il modello di ZIMMERMANN [18], ma, per comodità di elaborazione e gestione dei dati, al fine di simulare il comportamento del sistema di misura e per il calcolo dell'incertezza, è stato costruito un modello FEM ad appoggi discreti. Per la determinazione dei tagli nella rotaia si è scelto quindi un modello FEM molto semplice che ricostruisce tramite elementi trave una rotaia 60 UNI (associando a ciascun elemento le proprietà di massa e geometriche della sua sezione). La rotaia è collegata ad un numero dispari di elementi molla in corrispondenza delle traverse (15 nelle simulazioni effettuate) distanziati di un passo p (0,6 m nelle simulazioni effettuate) e di rigidezza verticale k_d . In fig. 40 a) si riportano i risultati del calcolo statico effettuato con $k_d = 130.000 \text{ N/mm}$, che fornisce valori dei sedimenti massimi pari a 0,34 mm con due carichi verticali $Q = 85.840 \text{ N}$ distanziati tra loro di 2,7 m. In fig. 40b) si riportano i risultati del calcolo statico effettuato con $k_d = 12.000 \text{ N/mm}$, che fornisce valori dei sedimenti massimi pari a 2,05 mm, con due carichi verticali $Q = 85.840 \text{ N}$ distanziati tra loro di 2,7 m, per simulare una condizione di binario molto più cedevole.

In fig. 41, per ogni grafico, in ordinata viene riportato il valore del taglio rilevato dalle due sezioni di misura T_1 e T_2 , in funzione della posizione x assunta dal carico $Q = 100 \text{ kN}$.

In basso è riportato il carico Q calcolato ricavato come differenza tra i valori del taglio. I risultati confermano la validità teorica del sistema proposto e forniscono un esempio di visualizzazione dei segnali che dovrebbero essere acquisiti durante il transito di un carico in linea. La rigidezza non ha effetto sulla misura della forza Q . Tale assunto si evidenzia nelle Fig. 41 a) e b), corrispondenti a due valori di rigidezza diversi, il primo rappresentativo di un binario tradizionale su ballast con sottofondo molto rigido (ad esempio l'impalcato di un viadotto) e l'altro rappresentativo di un binario tradizionale su ballast con l'interposizione di materassini resilienti tra alcuni elementi della sovrastruttura e il sottofondo; entrambe sono situazioni che rappresentano i valori estremi della scala delle rigidità di binario in direzione verticale (in letteratura sono citati valori della rigidezza del binario tra i 50.000 e i 180.000 N/mm, cfr. EN 13848-1). La rigidezza influenza i diagrammi del taglio ma non la loro differenza che corrisponde al carico Q .

The results confirm the theoretical validity of the proposed system and provide an example of visualisation of signals that should be acquired during the transit online.

The stiffness has no effect on the measurement of Q force. This assumption (Fig. 41 a) and b)), corresponds to two different stiffness values, the first representative of a traditional track on ballast with very stiff sub-base (such as the decking of a viaduct), and the other is representative of a traditional track on ballast with interposed resilient mats between some elements of the superstructure and the foundation; both are situations that represent the extreme values of the track rigidity scale in the vertical direction (track stiffness values are mentioned in literature between 50.000 and 180.000 N/mm, see EN 13848-1).

Rigidity affects the shear diagrams but not their difference that corresponds to the Q load.

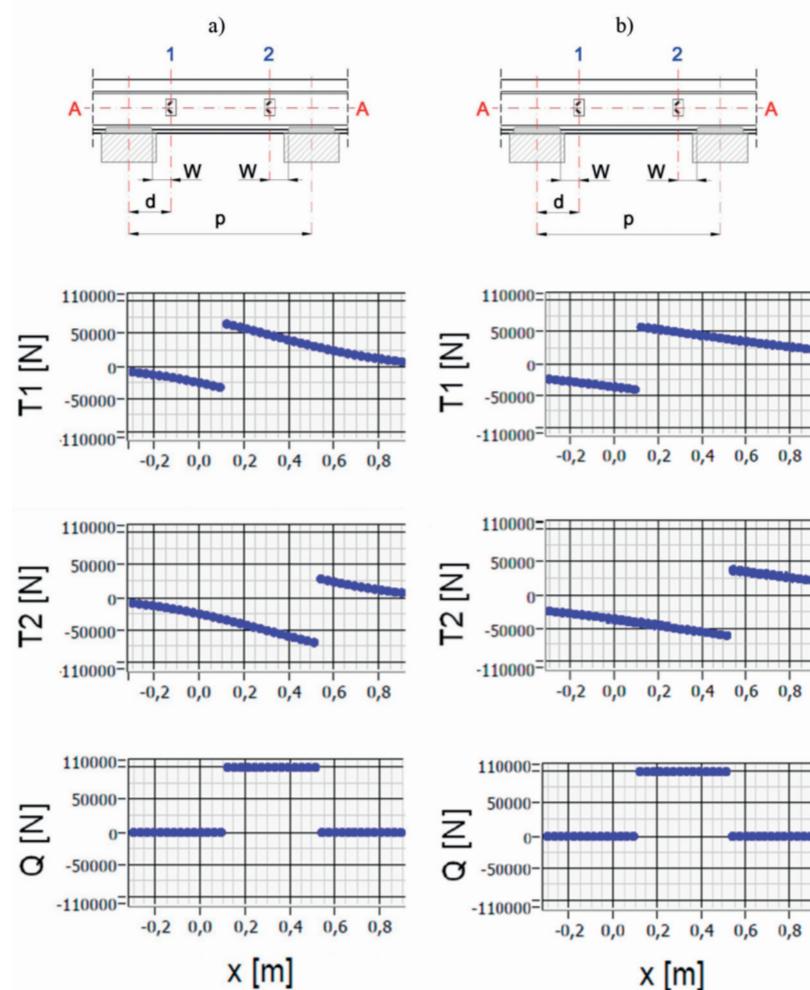


Fig. 41 - Sollecitazioni di taglio T calcolate nelle sezioni 1 e 2 in funzione della posizione del carico isolato $Q = 100 \text{ kN}$: con rigidezza $k_d = 130.000 \text{ N/mm}$ in a) e $k_d = 12.000 \text{ N/mm}$ in b). Il diagramma in basso riporta il carico Q calcolato.

Fig. 41 - T shear stresses calculated in sections 1 and 2 depending on the position of the isolated Q load = 100 kN: with k_d rigidity = 130.000 N/mm in a) and k_d = 12.000 N/mm in b). The diagram below shows the calculated Q load.



SCIENZA E TECNICA

Ringraziamenti

Hanno contribuito in maniera attiva, con la loro esperienza, competenza e disponibilità, allo svolgimento delle verifiche di laboratorio e in linea: Filippo BADIGLIO, Silvano CAMPANARI, Antonio CREATURA, Stefano DEL BUONO, Sergio GIULIANI, Roberto GIZZI, ing. Pietro MORESCHINI, Roberto VENDITTI (dell'Istituto Sperimentale di RFI), il personale del Compartimento RFI di Roma che ha supportato le sperimentazioni in linea, Michele MODESTI (di Sapienza Università di Roma), Giorgio MALAVASI e Sandro PIZZUTI (di Itema srl).

Acknowledgements

The following persons have contributed in a more proactive way, with their experience, competence and willingness in performing laboratory and on-line testing: Filippo BADIGLIO, Silvano CAMPANARI, Antonio CREATURA, Stefano DEL BUONO, Sergio GIULIANI, Roberto GIZZI, Eng. Pietro MORESCHINI, Roberto VENDITTI (RFI Experimental Institute), the staff of RFI Compartment of Rome that has supported online trials, Michele MODESTI (Sapienza University of Rome), Giorgio MALAVASI and Sandro PIZZUTI (Itema srl).

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] M. ZACHER, J.M. REINECKE, "Vertikale Kräfte am Oberbau. Messung und Rechnung", ETR, gennaio-febbraio 1996, pagg. 75-82, errata corrigé pag. 231.
- [2] A. MOREAU, "La vérification de la sécurité contre le déraillement", RGCF Avril 1987.
- [3] "Axe Load Checkpoints – State of the Art", UIC Report, 20.02.2009.
- [4] J. STEPHANIDES, G. PRESLE, P. MITTERMAYR, W. ZOTTL, "Örtliches Messstellen des Zuglaufes Stand der Technik", ETR, dicembre 2009, pagg. 694-703.
- [5] D. MAICZ, P. MITTERMAYR, G. PRESLE, J. STEPHANIDES, "Muster im chaotischen dynamischen System Eisenbahn - Bildung von Strukturen", ZEVrail, Sonderheft Tagungsband, novembre 2008, pagg. 190-201.
- [6] A. SEGER, I. NERLICH, "Q-Messstellen Osogna, Messergebnisse aus den SBB-Pilotversuchen", ZEVrail, Sonderheft Tagungsband, novembre 2008, pagg. 40-55.
- [7] R. CATALINI, S. PACCANI, M. PAGLIARI, "Sistema di rilevamento del carico dinamico (RICAD) trasmesso alla traversa dai treni in transito sul binario", Ingegneria Ferroviaria, settembre 2003, pagg. 823-828.
- [8] Materiale pubblicitario HBM, Schenk e VAE.
- [9] LE DOSQUET, PAWELLEK, MULLER-BORUTTAU, "Mobiles Messsystem LASCA zum Monitoring von Fahrzeugqualität und Inanspruchnahme Fahrweg", ETR, ottobre 2006, pagg. 720-726.
- [10] ENV 13005:1999, Guide to the expression of uncertainty in measurement.
- [11] G. SAUVAGE, J. P. FORTIN, "La traînée de roulement des véhicules de chemin de fer", Revue Générale des Chemins de Fer, juillet-août 1982.
- [12] PRUD'HOMME, "La résistance de la voie aux efforts transversaux exercés par le matériel roulant", Revue Générale des Chemins de Fer, gennaio 1967, pag. 1-23.
- [13] B. LICHTBERGER, "Track Compendium", 2005, EurailPress, Amburgo.
- [14] C. ESVELD, "Modern Railway Track", 2001, II Ed., Ed. MRT Production, Zaltbommel.
- [15] M. BRUNER, E. CARANO, G. MALAVASI, "The rail: a sensor for measurement of forces applied by the wheel", Railways 2014, The Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, Ajaccio 2014.
- [16] M. ALESSANDRIA, B. DOTTA, R. LICCIARDELLO, "Long-term contact force measurements with the CML method", Ingegneria Ferroviaria, p. 929-948, November 2011.
- [17] G. MALAVASI, "Contact Forces and Running Stability of Railway Vehicles", Railways 2014, The Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, Ajaccio 2014.
- [18] H. ZIMMERMANN, "Die Berechnung des Eisenbahn-Oberbaues", Berlino 1888, Ernst&Kora.



SCIENZA E TECNICA

Sommaire

MESURE DES CHARGES VERTICALES TRANSMISES À LA ROUE

L'objectif d'étude dans cette recherche c'est et la réalisation d'une "Station de Mesure des Charges Verticales" (SMVC) transférées des roues des trains aux rails pendant le roulement.

La recherche a été développée à travers des modèles théoriques, des simulations numériques, des essais en laboratoire et en service normal, en collaboration entre "Rete Ferroviaria Italiana" (RFI) et l'Université "La Sapienza" de Rome (Département d'Ingénierie Civile, Edile et Environnementale - "DICEA").

La calibration du système de mesure, les incertitudes, la répétabilité et la reproductibilité des reliefs ont été vérifiés en laboratoire et sur un rail d'essai.

Les essais sur un rail en service avec analyse automatique des données pour l'identification du type de train de roulement des véhicules, des essieux des roues et des indicateurs de charge transférée, absolu et relatif (déséquilibrés) ont permis de vérifier l'efficacité de la station de mesure et de son attitude à relever dépassements des valeurs de seuil envisageables pour les charges maximales et les déséquilibres relatifs.

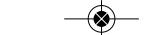
Zusammenfassung

MESSUNG DER Q LASTEN AUF SCHIENEN

Der italienische Netzbetreiber RFI und die Universität Rom "La Sapienza" (Dep.t DICEA) haben eine gemeinsame Forschung durchgeführt. Das Forschungsziel war das Studium, die Realisierung und die vollständige Prüfung einer Meßstelle der Q Lasten unter betrieblichen Zuständen.

Beschreibung von der weitläufigen Rechnungen, Simulationen, Labor- und Gleismeßungen und Eichungsverfahren wie auch Resultatvorstellung.

Die Resultaten und deren Verarbeitung erlauben auch die Identifizierung der Radsatzanordnung in Fahrzeugen, die Grenzlastenüberschreitung, die ungleiche Verteilung der Lasten in einem Fahrwerk zu erfassen. Erreichung der nachgestrebten Zielen von Wirksamkeit, Dauerhaftigkeit und Präzision. Einsetzungsspiele in verschiedenen Bahnanlagen werden vorgestellt.



CAMPAGNA STRAORDINARIA DI ABBONAMENTO ALLE RIVISTE INGEGNERIA FERROVIARIA E LA TECNICA PROFESSIONALE

A tutti coloro che sottoscriveranno un nuovo abbonamento che pervenga al CIFI entro il 20 gennaio 2015, verrà praticato un costo per il 2015 (un anno, 11 numeri)

per Ingegneria Ferroviaria	di € 50,00 (cinquanta/00) anziché € 80,00
per La Tecnica Professionale	di € 30,00 (trenta/00) anziché € 35,00

Gli interessati sono pregati, per consentire al CIFI di ricevere tempestivamente la sottoscrizione dell'abbonamento e inserire il nominativo nella lista di distribuzione già per il numero di gennaio, di utilizzare preferibilmente il pagamento on-line (www.cifishop.it), **trasmettendo successivamente al CIFI copia dell'avviso di avvenuto pagamento, bonifico o ricevuta del versamento postale, entro la suddetta data del 20 gennaio 2015, accompagnandolo dai seguenti dati:**

Cognome e Nome

Indirizzo dove si desidera ricevere la Rivista

Rivista per la quale si desidera sottoscrivere l'abbonamento

Telefono (fisso e cellulare)

e-mail

Naturalmente restano valide le condizioni già in atto per i Soci del CIFI e i dipendenti delle Società FS e del Ministero

Coordinate per l'effettuazione dei pagamenti

- pagamento on line collegandosi al sito www.cifishop.it
- c.c.p. n. 31569007 intestato al Cifi – V. Giolitti, 48 – 00185 Roma
- bonifico bancario sul conto intestato al CIFI UNICREDIT BANCA – Ag. ROMA ORLANDO, Via Vittorio Emanuele Orlando, 70 – 00185 Roma IBAN: IT 29 U 02008 05203 000101180047 Codice BIC SWIFT: UNCRITM1704
- tramite CARTA BANCOMAT presso la Sede Centrale del Collegio

Contatti ai quali inviare i dati relativi all'abbonamento sottoscritto

per Ingegneria Ferroviaria: Sig.ra SILVI - redazioneif@cifi.it (tel. 06.4827116 – Fax 06.4742987)

per La Tecnica Professionale: Sig.ra MANNA - redazionetp@cifi.it (tel. 06.4742986 – FS 970.67819 – Fax 06.4742987)