

DIAGNOSI DELLE CONDIZIONI DI MARCIA DI UN ROTABILE CON UN SISTEMA DI MISURA DELLE FORZE LATERALI E VERTICALI AL CONTATTO RUOTA-ROTAIA

L. Di Benedetto, A. Bracciali, T. De Cicco, F. Piccioli

*Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali,
via di Santa Marta 3 – 50139 Firenze, e-mail: andrea.bracciali@unifi.it*

Sommario

Nel presente lavoro viene affrontato lo sviluppo e la messa a punto di un trasduttore estensimetrico, sviluppato in passato da due degli autori, al fine della messa in produzione per misurare, contemporaneamente, le forze verticali e laterali di interazione veicolo-binario al passaggio di un convoglio su una tratta strumentata.

Il sistema costituito da un certo numero di trasduttori posti sulle due rotaie a distanza opportuna può infatti fornire la diagnosi delle condizioni dinamiche di marcia del rotabile non solo per quanto riguarda il peso (cosiddette “pese dinamiche”) ma anche per quanto riguarda le spinte laterali sulle rotaie che rivestono notevole importanza ai fini delle usure e della sicurezza allo svio ed allo slineamento del binario.

Nella memoria vengono analizzati i miglioramenti ottenuti rispetto alle versioni precedentemente sviluppate, con particolare riferimento alla taratura del sistema ed all'ingegnerizzazione della catena di misura.

Abstract

This study is about the development and the tuning of a strain gage transducer, developed in the past by two of the authors, in view of the extensive application to measure at the same time vertical and lateral interaction forces generated during the trains pass-by over an instrumented track.

The system is made of a number of transducers mounted on the rails at a proper distance between them and is able to diagnose the running dynamics of a vehicle not only in terms of weight (so called “weigh-in-motion”) but also in terms on lateral thrusts that are so important for wear and for safety about derailment and track lateral stability.

The paper shown the improvements to previously available versions of the sensor, with particular reference to system calibration and the technology improvements in the measuring chain.

Parole chiave: materiale rotabile, diagnostica, contatto ruota-rotaia, dinamica di marcia, svio, instabilità del binario, segnalamento.

1. INTRODUZIONE

La conoscenza delle forze di interazione fra ruota e rotaia è alla base dell'identificazione del comportamento dinamico del veicolo. Tali forze sono responsabili della stabilità di marcia e contemporaneamente anche di una serie di effetti indesiderati, sul rotabile e sulla rotaia, quali l'usura, il rumore e le vibrazioni trasmesse attraverso l'armamento e nel veicolo [1].

Le irregolarità nella marcia del veicolo sono dovute tipicamente a danneggiamenti o irregolarità nelle sospensioni, usure anomale dei profili, eccessive tolleranze costruttive o di montaggio, errato caricamento dei carri merci. Nei casi più critici possono insorgere di fenomeni di instabilità dinamica, ossia oscillazioni che non si smorzano nel tempo, più noti con il nome di “serpeggio”.

Giova ricordare che nel caso del serpeggio il moto è di tipo periodico e come tale è ottenibile come sovrapposizione di lunghezze d'onda sottomultiple della fondamentale; per motivi di semplificazione e di unificazione nel settore si parla di “conicità equivalente”, ossia la conicità delle ruote di una sala montata ideale con ruote coniche che marcia con moto puramente sinusoidale su un binario costituito da rotaie a coltelli e che dà la stessa lunghezza d'onda delle sale reali marcianti sulle rotaie reali (moto alla Klingel).

Come si può facilmente intuire la diagnostica delle forze al contatto ruota-rotaia riveste un ruolo fondamentale per la definizione di limiti di circolabilità e di sicurezza: il carico verticale Q transitato può essere preso come indicatore per il degrado della geometria della linea, mentre le forze laterali Y influenzano, oltre al comfort di marcia del passeggero, le usure e la sicurezza. Il rapporto Y/Q fra le forze laterali Y e verticali Q , per ogni ruota, è l'indicatore universalmente scelto quale indicatore della sicurezza contro lo svio (criterio di Nadal).

Al fine di effettuare una diagnostica la più completa ed affidabile è necessario disporre di un sensore affidabile ed ingegnerizzato, che soddisfi le stringenti richieste delle normative ferroviarie per quanto riguarda gli standard di sicurezza e le proibitive condizioni ambientali. A puro titolo di esempio, si consideri che il *range* di temperature che si possono riscontrare su una rotaia va da -30 a $+70$ °C e che vi sono frequenti urti con accelerazioni di picco assai superiori a 50 g.

Nel presente lavoro vengono indicate le considerazioni generali sull'impiego del trasduttore nonché le linee guida per l'installazione e la taratura del sistema di diagnostica.

2. ANALISI DELLE FORZE AGENTI SULLA ROTAIA

2.1 Premessa

Le rotaie ferroviarie sono assimilabili a travi rettilinee vincolate in più punti (le traverse) tipicamente equidistanti. La Figura 1 mostra una sezione di rotaia (in Italia vengono normalmente utilizzati profili tipo UNI60 [2] o l'equivalente 60E1 [3]) nella quale si identificano le forze esterne agenti sulla rotaia derivanti dal passaggio di una ruota variamente caricata:

1. la *forza verticale* Q , dovuta al peso, responsabile di sforzi di taglio e momenti flettenti nel piano verticale;
2. la *forza laterale* Y , la cui presenza è dovuta a moti di serpeggio o al transito in tratto curvo, responsabile di sforzi di taglio e momenti flettenti sul piano orizzontale;
3. la *forza longitudinale* N che agisce longitudinalmente alla rotaia, dovuta al gradiente termico ed alle condizioni di vincolo con l'infrastruttura; più specificatamente le forze vincolari contrastano gli sforzi generati dalle dilatazioni termiche generando stati di coazione distribuiti i quali sono responsabili di gravi fenomeni di instabilità elastica laterale del binario nella stagione estiva.

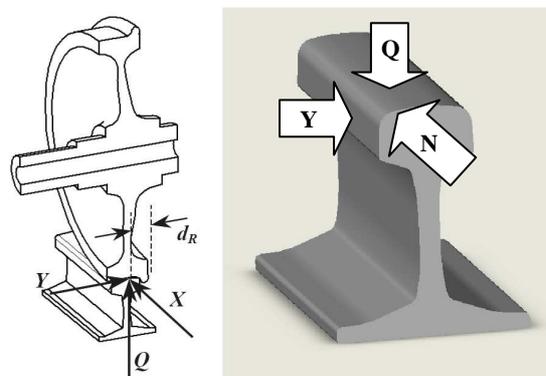


Figura 1: Identificazione e denominazione delle forze agenti su una rotaia ferroviaria

Le sollecitazioni imposte dal veicolo possono essere di tipo statico o dinamico, in particolare queste ultime sono tanto più intense quanto più elevata è la velocità di transito e quanto peggiore è la dinamica del veicolo.

Il campo delle tensioni nelle rotaie sottoposte a sforzi verticali è analizzato in letteratura in [4], interessante pubblicazione dalla quale è estratta la Figura 2 che mostra come l'andamento reale della tensione nel piano della sezione sia ottenibile come sovrapposizione di più stati di sollecitazione localizzate nelle varie zone della sezione. Come si può osservare, il fatto che la testa della rotaia sia di fatto assai più tozza del gambo (o anima) della rotaia induce dei picchi di tensione non trascurabili. Apparentemente, quindi vi sono zone nelle quali si hanno tensioni superficiali longitudinali di flessioni non trascurabili che potrebbero essere candidate per una possibile applicazione di estensimetri elettrici a resistenza.

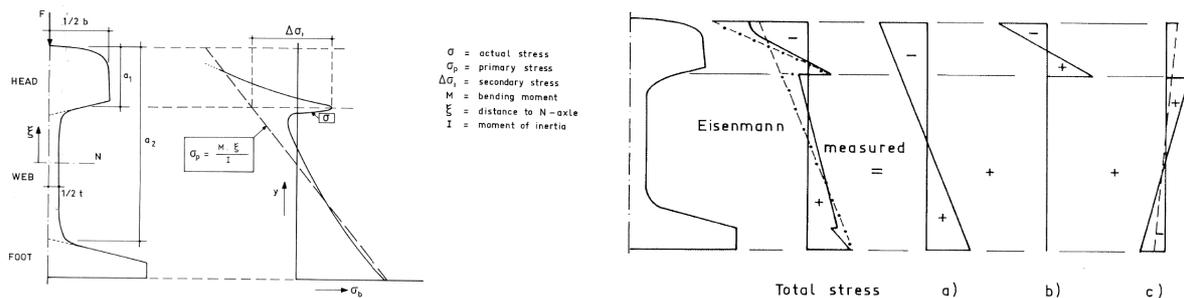


Figura 2: Andamenti reali delle tensioni nella sezione trasversale di una rotaia soggetto a carichi verticali [4]

3. LA VALUTAZIONE DEI CARICHI APPLICATI

Due degli autori hanno sviluppato un sensore per la misura del carico verticale i cui risultati sono stati mostrati al convegno AIAS di Alghero (2001) [5].

Il principio di funzionamento del sensore consiste nell'inserimento di una bussola strumentata con estensimetri elettrici a resistenza in un foro praticato sul gambo della rotaia, unica lavorazione consentita su un binario in esercizio.

Combinando opportunamente una serie di sensori è possibile rilevare il carico dinamico al passaggio del treno (realizzando la cosiddetta "pesa dinamica") individuando carichi sbilanciati o difetti nel sistema di sospensioni del veicolo.

Il limite intrinseco del sistema, ossia l'impossibilità di misurare le forze laterali, è stato successivamente affrontato da uno degli autori in due lavori [6, 7] nei quali viene descritto lo sviluppo e la prova in linea di una variante alla configurazione sopra indicata comprendente due ponti estensimetrici affacciati reciprocamente, per un totale di quattro elementi per traversa. Tale configurazione offre il vantaggio di poter separare i contributi delle forze Q ed Y mantenendo un ingombro praticamente invariato rispetto al tipo precedente.

Lo schema di principio del trasduttore utilizzato nel lavoro oggetto della presente memoria è sostanzialmente quello indicato in [6, 7], anche se con modifiche meccaniche non trascurabili, e viene riportato in Figura 3.

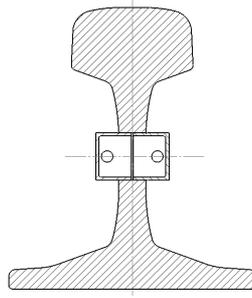


Figura 3: Configurazione dei sensori utilizzati mediante forzamento delle bussole sulla rotaia.

Utilizzando considerazioni di equilibrio per la rotaia nel piano trasversale si ottiene che, al transito del k -esimo asse sull' i -esimo foro, la somma dei segnali dei due trasduttori sarà proporzionale all'azione del carico verticale alla mentre la loro differenza sarà proporzionale al momento prodotto dalla forza laterale secondo le (1) e (2):

$$Q_i(k) = k_{Q_i} * [S_{i1}(k) + S_{i2}(k)] \quad (1)$$

$$Y_i(k) = k_{Y_i} * [S_{i1}(k) - S_{i2}(k)] \quad (2)$$

dove $Q_i(k)$ e $Y_i(k)$ sono rispettivamente le forze verticali e laterali, $S_{i1}(k)$ e $S_{i2}(k)$ i segnali rilevati dai trasduttori e k_{Q_i} e k_{Y_i} le due costanti di proporzionalità per la coppia di trasduttori.

L'applicazione delle (1) e (2) restituisce quindi, per ogni coppia di sensori installati su un foro, la stima del carico verticale e laterale per ogni ruote transitata. Installando un'altra coppia di sensori sulla rotaia opposta (stessa traversa) è possibile quindi stimare il carico verticale totale gravante, i valori delle forze laterali e verticali per ciascuna rotaia, i coefficienti di svio $Y_i(k)/Q_i(k)$ e la forza di *ripagge*, denominata usualmente con H , pari alla somma delle forze laterali date dalle due ruote della stessa sala.

Montando i sensori su una serie di n traverse strumentate, e quindi praticando $2n$ fori nei quali inserire $4n$ trasduttori, è possibile osservare come le forze sopra indicate variano lungo il percorso. Queste rilevazioni sono alla base delle considerazioni di diagnostica sulla qualità del veicolo in transito e sulla valutazione delle sue caratteristiche dinamiche.

Ovviamente è possibile calcolare la velocità di transito [m/s] monitorando due punti di misura distinti lungo l'asse del binario misurando l'intervallo di tempo fra i picchi di un asse sui due sensori consecutivi, eventualmente montati sulla stessa rotaia:

$$v = L f_s / \Delta N(k)_{12} \quad (3)$$

dove L è la distanza fra i trasduttori omologhi nelle due traverse [m], f_s la frequenza di campionamento [Hz] e $\Delta N(k)_{12}$ è il numero di campioni di sfasamento fra i due segnali. Per l'identificazione del tipo di convoglio, eventualmente limitandosi al solo locomotore che è facilmente identificabile, si potrebbe ricorrere all'analisi dell'interasse. Osservando i primi due picchi di segnale registrati da un trasduttore è possibile infatti calcolare la distanza fra gli assi del primo carrello:

$$d = v \Delta N(k)_{11} / f_s \quad (4)$$

dove d è l'interasse del primo carrello [m], v la velocità del treno [m/s], f_s la frequenza di campionamento [Hz] e $\Delta N(k)_{11}$ il numero di campioni fra i due picchi del segnale. Sostituendo la (3) nella (4) si ottiene la relazione:

$$d / \Delta N(k)_{11} = L / \Delta N(k)_{12} = v / f_s \quad (5)$$

la quale mostra come il rapporto v/f_s rappresenti la “dimensione caratteristica” del complesso convoglio-sistema di acquisizione; tale quantità, come noto dal teorema di Shannon, può essere presa come indice di bontà del campionamento e deve essere molto inferiore all’unità.

4. MODELLAZIONE FEM DEL COMPORTAMENTO DEL TRASDUTTORE

Al fine di stimare la robustezza del sistema di acquisizione ai parametri di costruzione (tolleranze sul posizionamento del sensore) è stata effettuata una serie di simulazioni agli elementi finiti per identificare la funzione teorica con cui confrontare i segnali acquisiti.

Anzitutto si è valutato il differente comportamento delle deformazioni in un foro posizionato in campata (tratto di rotaia fra due traversine consecutive) rispetto a quello montato sopra traversa. Questa simulazione è giustificata dal fatto che, ipoteticamente, il sistema qui descritto potrebbe essere utilizzato in fori disposti lungo la campata, eventualmente in quelli che fossero già presenti per la preesistente installazione di sistemi contaassi che utilizzano pedali bloccati alla rotaia mediante ganasce forate.

Come è logico, vi sono nei due casi comportamenti differenti nella distribuzione delle deformazioni circolari. Infatti sulla campata le sollecitazioni di taglio, dovute alla forza esterna, saranno accompagnate a quelle flessionali della rotaia, schematizzabile in prima approssimazione come una trave su più appoggi.

Più specificatamente, per il modello FEM è stato considerato un tratto di rotaia lungo circa 10 m incastrato agli estremi, in cui i rail pads sono stati schematizzati con vincoli elastici di rigidità 11 N/mm^3 (Figura 4). Il carico verticale, fissato in 9810 N (equivalente ad 1 t), è stato via via spostato in successive posizioni nell’intervallo $\pm 4.8 \text{ m}$ rispetto all’asse del foro.

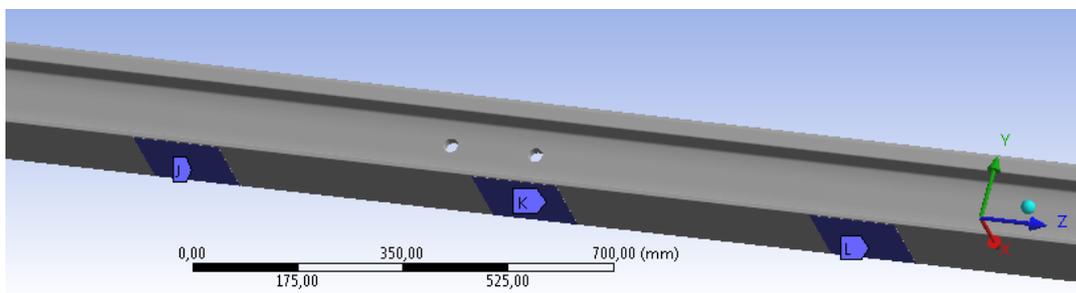


Figura 4: modello della rotaia vincolata con indicazione dei fori realizzati sull’asse della traversa e ad 1/4 di campata.

Coerentemente con le sollecitazioni, vengono calcolate le deformazioni circolari all’interno del foro nelle due configurazioni testate, ossia:

- sensore su traversa con estensimetri nel piano orizzontale in posizione orizzontale (0° e 180°);
- sensore ad 1/4 di campata con estensimetri in un piano inclinato a 45° (45° e 225°).

Il confronto fra i risultati delle deformazioni circolari nei due casi è mostrato in Figura 5. Come si può osservare, i fori posizionati sulla traversa offrono un segnale che non si inverte, dovuto alla comparsa della concentrazione di tensione al nascere della forza vincolare al passaggio della ruota; per il foro ad un quarto di campata invece il segnale presenta un’inversione di segno, tipica della discontinuità del taglio in corrispondenza della forza esterna.

Dato che il segnale ha una intensità più alta di circa il 15-20%, non presenta inversioni rapide e si presta ad una identificazione meno ambigua avendo un solo picco massimo e quindi una maggiore ripetibilità, si è deciso di posizionare il foro su traversa nella successiva fase sperimentale.

A completamento dell'analisi è stata eseguita un'indagine sulla sensibilità del sensore agli errori di posizionamento (incollaggio) degli estensimetri elettrici a resistenza all'interno della bussola stimando le deformazioni circonferenziali in 10 posizioni angolari (Tabella 1), all'interno del foro, per errori contenuti in $\pm 5^\circ$ nell'intorno della posizione orizzontale (0° e 180°). L'errore si aggira attorno al 3%, il che garantisce una adeguata insensibilità al posizionamento d'incollaggio degli estensimetri, operazione che viene eseguita a mano e quindi soggetta ad inevitabili imprecisioni.

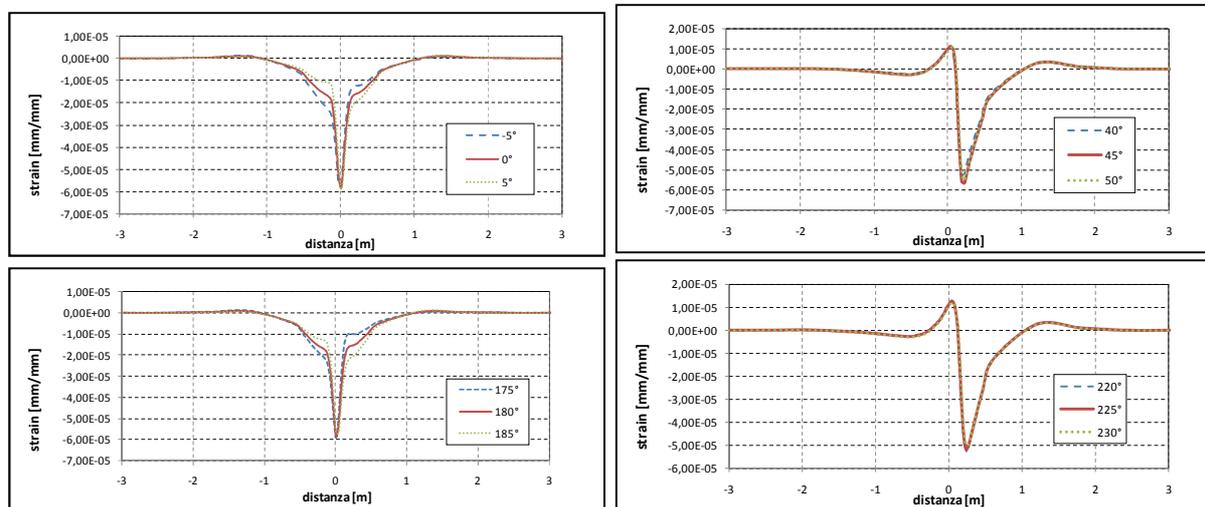


Figura 5: Stima delle deformazioni circonferenziali al passaggio di un carico di 9810 N per un foro realizzato su traversa (a sinistra) e per un foro realizzato ad 1/4 di campata (a destra).

Tabella 1: Errori introdotti nella misura da errori angolari nel posizionamento degli estensimetri elettrici montati su traversa nell'intorno di 0° o 180° .

Errore di montaggio [deg]	Deformazione circonferenziale $\epsilon(\alpha)$ [mm/mm]	err% rispetto a 0°	err dB rispetto a 0° [dB]
-5 (175)	-5.58E-05	2.88	-0.13
-4 (176)	-5.63E-05	1.99	-0.09
-3 (177)	-5.68E-05	1.04	-0.05
-2 (178)	-5.70E-05	0.67	-0.03
-1 (179)	-5.72E-05	0.38	-0.02
0 (180)	-5.74E-05	0.00	0.00
+1 (181)	-5.77E-05	0.46	0.02
+2 (182)	-5.80E-05	1.00	0.04
+3 (183)	-5.79E-05	0.83	0.04
+4 (184)	-5.78E-05	0.75	0.03
+5 (185)	-5.78E-05	0.74	0.03

4. IMPLEMENTAZIONE DI UN SISTEMA DIMOSTRATORE

4.1 Considerazioni sull'uso degli estensimetri e descrizione del sensore

Un sensore cilindrico cavo inserito in un foro deformabile fornisce, come ben noto dalla meccanica sperimentale, una variazione di tensione elettrica proporzionale allo schiacciamento circonferenziale del cilindro. La disposizione degli estensimetri prevede l'utilizzo di un ponte di Wheatstone alimentato in corrente continua o alternata e la rilevazione con un galvanometro dello sbilanciamento del ponte derivante dalla deformazione della griglia dell'estensimetro.

La Figura 6 mostra i collegamenti interni alla bussola strumentata. Come si può osservare sono presenti dei conduttori aggiuntivi a quelli strettamente necessari, che vengono utilizzati per effettuare il *sensing* remoto della tensione effettiva di alimentazione del trasduttore che può essere lontano anche varie decine di metri dalla sorgente di alimentazione. In questo modo le perdite nel circuito di alimentazione non influenzano la qualità della misura.

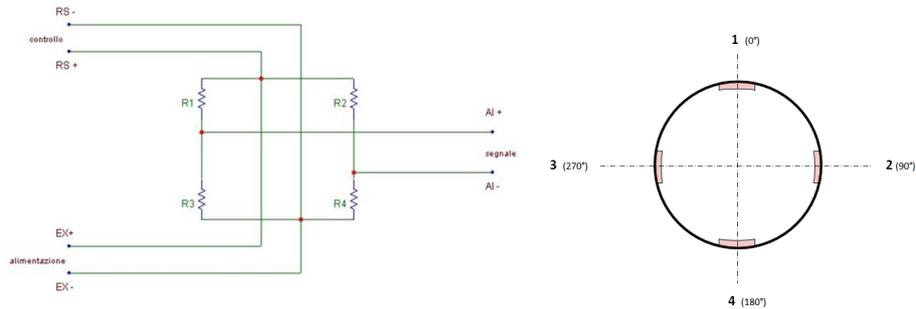


Figura 6: Ponte di Wheatstone con conduttori di *sensing* (a sinistra) e connessioni interne fra gli estensimetri montati nella bussola (a destra).

Nella tecnica estensimetrica i valori delle variazioni di resistenza degli estensimetri metallici sono generalmente molto piccoli, nell'ordine di grandezze di circa il 5-10%, il che giustifica l'utilizzo della formula approssimata per il campo delle piccole deformazioni:

$$V_d/V_{cc} = k/4 * (\Delta R_1/R_1 - \Delta R_2/R_2 + \Delta R_3/R_3 - \Delta R_4/R_4) \quad (5)$$

dove \$R_i\$ sono le resistenze nominali del ponte (350 \$\Omega\$), \$\Delta R_i\$ le relative variazioni indotte dallo stato di deformazione, \$V_d\$ il segnale elettrico del ponte di Wheatstone e \$V_{cc}\$ è la tensione d'alimentazione. Ricordando inoltre che, per ogni estensimetro, vale la relazione costitutiva:

$$\Delta R_i/R_i = k_i \varepsilon_i \quad (6)$$

in cui \$\varepsilon_i\$ è la deformazione longitudinale e \$k_i\$ il gage factor dell'estensimetro, si perviene alla funzione che lega la tensione elettrica \$V_d\$ alle deformazioni \$\varepsilon_i\$, valida utilizzando quattro estensimetri tutti uguali e con lo stesso gage factor:

$$V_d/V_{cc} = k/4 * (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (7)$$

4.2 Realizzazione del trasduttore

La realizzazione del traduttore (bussola strumentata) ha richiesto notevole perizia per il posizionamento e l'incollaggio degli estensimetri soprattutto a causa del ridotto spazio a disposizione. La bussola consiste in un cilindretto cavo (Figura 7) di diametro esterno pari a 29 mm e spessore 2 mm, con opportune appendici esterne con funzione di battuta durante l'inserimento e per il passaggio del cavo con serraggio mediante relativo passacavo.

All'interno della superficie cilindrica viene installato un ponte intero di quattro estensimetri elettrici a resistenza da 350 \$\Omega\$, collegati come indicato al paragrafo precedente, al fine di fornire un segnale negativo al passaggio del carico verticale sulla rotaia. La scelta del ponte intero permette la reiezione dei disturbi a modo comune e dei precarichi radiali uniformi.

Le connessioni elettriche, realizzate tramite saldature a stagno, hanno richiesto particolare attenzione sia sul piano termico, per evitare la fusione della griglia degli estensimetri, sia su quello topologico per avere collegamenti più corti possibili. Infine il sensore è stato sigillato prima con opportune colle a base di resina indurente e poi con mescole siliconiche per la protezione contro gli agenti atmosferici e chimici.

Il kit per estensimetria, idoneo per la sperimentazione, garantisce un vita media del prototipo fino ad un massimo di cinque anni. Nella industrializzazione del sensore sarà quindi necessario adottare accorgimenti e materiali diversi per garantire una maggiore durabilità nel tempo.



Figura 7: Bussola grezza e trasduttore ultimato.

4.3 Descrizione del sito di prova

Un sistema ridotto con funzione di dimostratore, comprendente 8 sensori (due traverse strumentate distanti 1.8 m), è stato installato l'8.4.2010 immediatamente a monte del deviatore 4b posizionato sul binario pari nell'ambito della stazione RFI di S. Benedetto Val di Sambro (Bo) della linea Direttissima Prato – Bologna. Il binario in questo tratto ha un raggio di curvatura pari ad $R=735$ m e sopraelevazione $h=140$ mm.

La scelta del sito è stata dettata dalla necessità di individuare un tratto di linea con traffico elevato e variegato, con facile accesso per il montaggio della catena di misura e per lo scarico periodico dei dati nonché il verificarsi di notevoli escursioni termiche stagionali e giornaliere che permettono di testare l'impianto in condizioni climatiche rigide e molto calde.

Per l'installazione sono stati eseguiti quattro fori passanti con $d=29$ mm nell'anima della rotaia in corrispondenza dell'asse neutro. Rilevati i diametri con micrometro millesimale per interni, sono state lavorate bussole con opportuna tolleranza per garantire un forzamento stabile e sicuro.

E' stata disegnata, costruita ed utilizzata un'attrezzatura di montaggio comprendente una morsa per trapano forata rotaie ed un cilindro idraulico. Le forze di piantaggio, ricavate indirettamente dalla pressione indicata dal cilindro idraulico, sono risultate in linea con i valori attesi.

4.4 Descrizione della catena di misura

Il sistema implementa la classica catena di acquisizione per la lettura di segnali da sensori analogici e comprende:

- 8 trasduttori estensimetrici completi;
- 8 cavi ad 8 poli schermati, cat5 SFTP;
- 2 schede di acquisizione di catene estensimetriche National Instruments NI9237;
- 1 chassis CompactDAQ cDAQ9178 per 8 slot;
- PC per la registrazione dei dati con software LabVIEW.

Le schede di acquisizione effettuano il condizionamento, il campionamento a 5 kHz e la conversione in digitale a 24 bit, interfacciandosi al PC mediante il software LabVIEW della National Instruments. Sempre via software viene gestita la calibrazione elettrica e il *remote sensing* degli otto trasduttori.

Per automatizzare il processo di acquisizione è stata installata in prossimità del binario, circa 40 m prima della zona strumentata, una fotocellula con funzione di *trigger* del sistema di acquisizione. Lo

scarico dati, in questa fase di dimostrazione, è realizzato manualmente recandosi di tanto in tanto presso la stazione di San Benedetto Val di Sambro.



Figura 8: Vista generale del sito nel quale è stato installato il dimostratore (a sinistra). Operazione di montaggio (forzamento) con attrezzatura dedicata (al centro). Viste finali di sensori montati in opera (a destra).

5. RISULTATI OTTENUTI E TARATURA DEL SISTEMA DIMOSTRATORE

Il sistema, installato ed avviato il 8.4.2010, è risultato immediatamente funzionante ed ha iniziato a registrare in automatico tutti i treni transitati.

In Figura 9 vengono mostrati, a titolo di esempio, le elaborazioni dei segnali registrati al passaggio di un convoglio composto da una locomotiva E464 e 9 vetture MDVC. I grafici mostrano rispettivamente la somma dei segnali dei due trasduttori, proporzionale al carico verticale Q in transito sulla rotaia, e la differenza fra i due trasduttori, proporzionale al carico laterale Y .

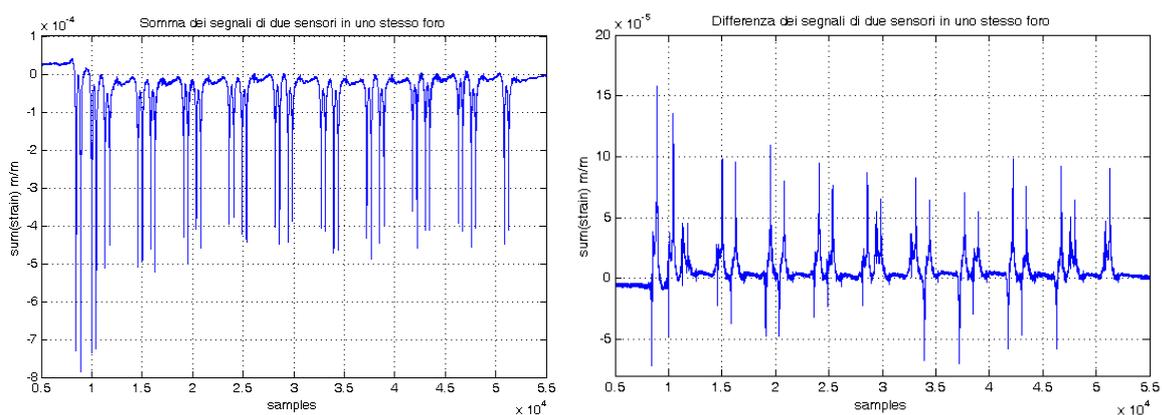


Figura 9. Andamento dei segnali somma e differenza per i sensori inseriti in un foro sulla rotaia interna.

Ovviamente, ancorché i trasduttori siano stati costruiti con la massima cura, il sistema necessita una taratura, ossia la determinazione dei coefficienti k_Q e k_Y presenti nelle (1) e (2), nell'ipotesi che il sistema si comporti in maniera lineare.

In prima battuta è possibile effettuare una valutazione delle costanti suddette considerando che le locomotive hanno, in generale, massa ben nota a parte minime differenze (sabbia, olio). Misurando le forze verticali e laterali risultanti dal transito della sola locomotiva occorre soddisfare le seguenti condizioni:

- somma dei carichi verticali = massa della locomotiva, aumentata della componente verticale all'asse del binario derivante dalla forza centrifuga;
- somma dei carichi laterali = forza centrifuga agente sulla locomotiva, diminuita per effetto della sopraelevazione del binario.

Al momento quindi i coefficienti k_Q e k_Y vengono ricalcolati per ogni treno acquisito; determinando velocità e interasse, si risale tramite quest'ultimo al modello di locomotiva e si calcola un solo valore di k_Q e k_Y per ciascuna delle due traverse strumentate utilizzando le citate condizioni di equilibrio sugli assi verticale e trasversale del binario determinando le forze globali Q ed Y provocate dal veicolo. Infine da queste, note le costanti, calcola le effettive forze verticali e orizzontali per ogni sala e i relativi rapporti Y/Q .

Purtroppo questa modalità, che porta in casi apparentemente simili a risultati leggermente diversi, non è tracciabile, il che è in contrasto con il concetto di taratura di un sistema di misura. L'approssimazione introdotta è fortemente limitativa (analisi della sola locomotiva) e l'autotaratura permette solo uno studio qualitativo dei segnali raccolti.

Si è quindi proceduto alla progettazione ed alla costruzione di due sistemi di taratura, uno per la forza verticale ed uno per la forza laterale, che impiegano una cella di carico per la misura della forza (Figura 10).

Il sistema per la misura della forza laterale comprende una barra di reazione e la cella di carico nonché il medesimo cilindro idraulico utilizzato nella specifica attrezzatura realizzata per il forzamento delle bussole nei fori realizzati nell'anima delle rotaie. Nel caso viceversa della taratura a carico verticale, non esistendo un punto di reazione posto sopra il binario, ci si è limitati alla costruzione di un'attrezzatura comprendente un appoggio specifico per la rotaia ed una cella di carico. Il carico verticale necessario per la taratura verrà molto verosimilmente imposto dalla gru idraulica installata a bordo di un mezzo di servizio strada/rotaia che imporrà un carico verticale sufficiente.



Figura 10. Apparecchiature di taratura per le catene di misura installate in linea per quanto concerne i carichi laterali (a sinistra) ed i carichi verticali (a destra, durante la fase di taratura con martinetto idraulico utilizzato sotto una struttura di contrasto, non illustrata).

6. POSSIBILI SVILUPPI DEL SISTEMA DIAGNOSTICO

Come fatto notare anche nei precedenti lavori, lo stato di coazione della rotaia per effetto della temperatura agisce in direzione longitudinale generando un carico normale che dovrebbe risultare misurabile rilevando l'*offset* del segnale che dovrebbe essere in relazione con la temperatura locale della rotaia. Il grande vantaggio di questo sistema è che misurerebbe direttamente la tensione nella rotaia, che è la responsabile delle instabilità laterali del binario, senza doverla desumere dal valore di temperatura della stessa.

Ovviamente questa potenzialità del sistema andrebbe verificata mediante confronti con misure dirette di temperatura e o di tensione effettuate in altro modo.

L'uso del sistema a fini di segnalamento, quindi come pedale da utilizzarsi in un sistema di blocco contaassi, si scontra con le esigenze di sicurezza di tali apparecchiature. In particolare, le norme prescrivono un approccio *fail safe*, ossia una qualunque condizione di malfunzionamento deve portare alla sicurezza del sistema. In particolare, non è ammesso che il conteggio degli assi risulti errato a causa di mancata alimentazione, distacco di un filo, distacco interno di uno degli estensimetri, etc.

Una delle condizioni più difficili da realizzare è la verifica che il sensore sia ancora in posizione e che, per vandalismo o vibrazioni ripetute, esso sia ancora elettricamente collegato ma non più forzato nella sua posizione di lavoro. Occorrerebbe quindi monitorare frequentemente il precarico statico dato all'atto del montaggio; a tale scopo si potrebbe pensare di modificare la configurazione interna aggiungendo un terzo ramo (di due estensimetri) in parallelo al ponte. Questi, incollati su parti scariche, funzionerebbero solo da resistenze di riferimento ed effettuando una lettura differenziale fra un ramo del ponte e questo si otterrebbe un segnale di tensione proporzionale al precarico della cella. La misura diretta della corrente assorbita dal ponte non è tecnicamente possibile in quanto disturberebbe elettricamente il ponte e verrebbe continuamente alterata dall'acquisitore con l'operazione di *remote sensing*.

Nonostante questo, è ferma convinzione degli autori che la stabilità dell'accoppiamento con il foro e la robustezza meccanica intrinseca del trasduttore rendano il trasduttore praticamente non smontabile senza distruggerlo, e proprio in virtù di tale convinzione il trasduttore è stato concepito come elemento "usa e getta" non riparabile in caso di guasto. Questo renderebbe quindi il sensore applicabile anche come apparecchiatura per il segnalamento, una volta messi a punto gli algoritmi di conteggio assi e l'individuazione del tipo di convoglio. Quest'ultima continua ad essere l'aspetto più critico data la mancanza di *tag reader*, ossia di elementi trasmettitori o lettori ottici in grado di identificare istantaneamente il materiale rotabile in transito.

7. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono stati illustrati lo sviluppo del sensore ideato dagli autori e la sua applicazione in linea nell'ambito di un sistema di monitoraggio permanente.

Il sistema diagnostico usa sensori estensimetrici per la misurazione simultanea delle forze orizzontali e verticali al transito di ogni ruota. L'architettura multipunto permette la misura contemporanea degli effetti prodotti dalle forze laterali Y e verticali Q consentendone una loro stima e la determinazione del rapporto Y/Q per ogni sala transitata, rendendo possibile una diagnosi delle condizioni di marcia.

E' stata mostrata l'ingegnerizzazione del traduttore impostata su estensimetri elettrici ed il principio di funzionamento, basato sulla misura delle deformazioni all'interno di una bussola che sono correlabili ai carichi esterni.

Il sistema, perfettamente operativo alla data di chiusura del presente articolo (25.7.2010), è visitabile contattando gli autori.

L'attività proseguirà con le attività di taratura e di sviluppo di un sistema più completo (maggiore numero di traverse strumentate) per evidenziare i fenomeni di instabilità di marcia (serpeggio) con lunghezze d'onda maggiori.

RINGRAZIAMENTI

Attività condotta dal primo autore nell'ambito del corso di Dottorato di Ricerca in Progetto e Sviluppo di Prodotti e Processi Industriali finanziato dalla società Mermec SpA. Gli autori desiderano ringraziare il sig. Giuliano Monini per aver messo a disposizione la sua preziosa esperienza per la realizzazione pratica dei trasduttori.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Bracciali, G. Cascini: "Forze ed accelerazioni al contatto ruota-rotaia", *Ingegneria Ferroviaria*, 3, 2000, 77-89.
- [2] Tabella UNI 3141-1991, Rotaie per linee ferroviarie, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano
- [3] EN 13674-1:2003, Railway applications - Track - Rail - Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above. European Committee for Standardization (CEN), Brussels.
- [4] A.J. Kolvoort and T. Woestenburg: "Investigation of the stress in rails", *Heron* Vol. 27 (1982) No. 2, pp. 21-35.
- [5] A. Bracciali, R. Ciuffi, F. Piccioli: "Progetto e validazione di un sensore estensi metrico multifunzione per il binario ferroviario", XXX Convegno AIAS, Alghero, 12-15.9.2001, 901-912.
- [6] A. Bracciali, C. Delprete, A. Pezzati: "Diagnostica e monitoraggio delle rotaie ferroviarie", Convegno CIFI 2003, Napoli, vol. 1, 199-203.
- [7] A. Bracciali, P. Folgarait: "New Sensor For Lateral & Vertical Wheel-Rail Forces Measurements", *Railway Engineering 2004*, London, 6-7 July 2004 (on CD)