



## Rilievi in linea di lunga durata delle forze di contatto con il metodo CML

## Long-term contact force measurements with the CML method

Dott. Ing. Marco ALESSANDRIA<sup>(\*)</sup>, Dott. Ing. Bernardino DOTTA<sup>(\*\*)</sup>,  
Dott. Ing. Riccardo V. LICCIARDELLO<sup>(\*\*\*)</sup>

**SOMMARIO** – L'articolo riferisce dei risultati ottenuti da una ricerca decennale attraverso la quale, partendo dallo studio delle proprietà fondamentali dello stato di deformazione di 5 tipi di ruote ferroviarie, sono stati stabiliti semplici principi per ricavare le forze di contatto da misure di deformazione (metodo CML) e si è giunti alla realizzazione di una sala montata strumentata per la misura delle forze di contatto  $Q$  e  $Y$ , quest'ultima in maniera continua, corretta per le variazioni della forza  $Q$  nonché della posizione della retta d'azione di quest'ultima componente, e praticamente esente da derive, consentendo così rilievi di lunga durata senza necessità di allineamenti. Si elimina così lo svantaggio principale dei metodi analoghi, mantenendo invece tutti i vantaggi della misura su ruote: scarsi effetti dell'inerzia del materiale compreso tra contatto ed estensimetri; possibilità di misura anche su carrelli a ruote indipendenti; possibilità di misura in presenza di trazione e frenatura; catena di misura, procedimento di elaborazione dati, taratura, calibrazione, allineamento relativamente semplici, il tutto con un numero ridotto di canali di acquisizione.

### 1. Il contesto europeo

#### 1.1. Accesso al mercato e immissione in servizio

1.1.1.) La misura sperimentale delle componenti della risultante delle azioni al contatto sulle ruote di un rotabile ferroviario (“forze di contatto o di interazione”) attraverso sale montate appositamente strumentate è un’attività complessa, le cui origini risalgono soltanto a poco più di cinquant’anni fa.

La sala montata strumentata è un oggetto preziosissimo per la ricerca sull’interazione ruota-rotaia. Negli anni ‘80 e ‘90 il grado di sviluppo delle metodologie di misura, nonché l’innegabile importanza delle forze di contatto co-

**SUMMARY** – The results of research activities performed in a ten year period on the measurement of contact forces are reported in this article. Activities firstly addressed the fundamental properties of the state of strain of 5 different railway wheel types. On this basis, simple principles through which contact forces can be derived from strain measurements were established (CML method) and an instrumented wheelset for the measurement of vertical and lateral contact forces  $Q$  and  $Y$  was developed. With this wheelset, the  $Y$  force is measured continuously and is corrected for variations of magnitude and lateral position of the  $Q$  force. The measurement is practically unaffected by signal drift and thus allows long-term measurements without the need for zeroing the measurement chain. The main disadvantages of wheel-based measurements are thus eliminated, whereas all advantages are retained: low effect of the inertia of the material between contact zone and strain gauges; possibility to measure on bogies with independently rotating wheels; possibility to measure during traction and braking; relatively simple measurement chain, data processing, calibration, zeroing, all with a low number of acquisition channels.

### 1. The European context

#### 1.1. Market access and rolling stock authorisation

1.1.1.) The measurement with instrumented wheelsets of the components of the contact actions on the wheels of a railway vehicle (“contact forces” or “interaction forces”) is a complex activity whose origins date back to only fifty years or so.

The instrumented wheelset is an extremely valuable object when it comes to performing research on wheel-rail interaction. In the ‘80s and ‘90s the instrumented wheelset became an essential element for placing rolling stock into

<sup>(\*)</sup> Ex dipendente ALSTOM Ferroviaria S.p.A., Savigliano.

<sup>(\*\*)</sup> ALSTOM Ferroviaria S.p.A., Savigliano.

<sup>(\*\*\*)</sup> SAPIENZA Università di Roma, DICEA Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Area Trasporti.

<sup>(\*)</sup> Ex dipendente ALSTOM Ferroviaria S.p.A., Savigliano.

<sup>(\*\*)</sup> ALSTOM Ferroviaria S.p.A., Savigliano.

<sup>(\*\*\*)</sup> SAPIENZA Università di Roma, DICEA Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Area Trasporti.

me indice delle prestazioni di un rotabile, hanno fatto sì che la sala strumentata sia inoltre divenuta un elemento essenziale dei processi di autorizzazione alla messa in servizio e, in particolare, del processo di autorizzazione delineato nella Direttiva 2008/57/CE [1] ("direttiva interoperabilità"), destinato ad evolvere, nelle intenzioni del legislatore, nel processo unico della rete ferroviaria europea del futuro. All'interno del processo della direttiva, la valutazione del comportamento dinamico del materiale rotabile è oggetto di specifiche clausole delle STI (Specifiche Tecniche di Interoperabilità) Materiale Rotabile (ad esempio quella relativa al materiale Alta Velocità [2]), che a loro volta si appoggiano alla Norma Europea EN 14363:2005 [3] per i dettagli sulle condizioni di prova e le grandezze da misurare, tra le quali le componenti **Y** (laterale) e **Q** (radiale) delle forze di contatto (fig. 1).

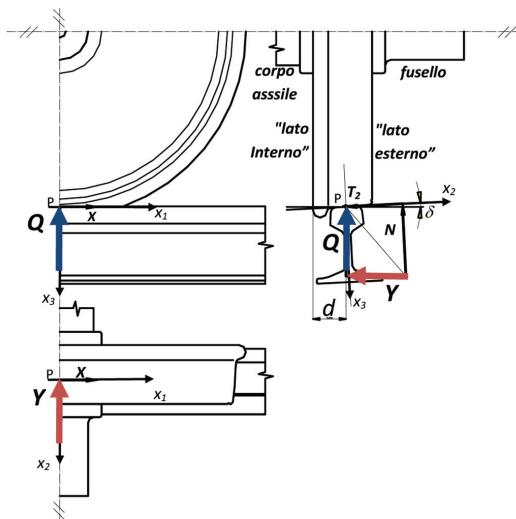


Fig. 1 - Le componenti della risultante delle azioni di contatto agenti su una ruota ferroviaria, tra cui **Y** ("forza laterale") e **Q** ("carico radiale"). *The components of the contact actions on a railway wheel, among which **Y** ("lateral force") and **Q** ("wheel load" or "radial force"). ("corpo assiale" = "axle shaft"; "fusello" = "journal"; "lato interno" = "gauge side"; "lato esterno" = "field side").*

1.1.2.) La trasparenza dei processi di valutazione di conformità alle norme, per quanto riguarda le forze di contatto, è un requisito di crescente importanza nell'attuale assetto del settore ferroviario. Tali processi, facenti parte del processo di autorizzazione alla messa in servizio, sono evoluti da processi interni delle ferrovie statali del passato a processi che coinvolgono più attori, la cui indipendenza reciproca e competenza è garanzia di sicurezza (Ministero dei Trasporti, Agenzia Nazionale per la Sicurezza Ferroviaria, Verificatori Indipendenti di Sicurezza e Organismi Notificati/Designati, costruttori di materiale rotabile, esercenti e gestori delle infrastrutture) e i

service (see in particular the process defined in the "interoperability directive" 2008/57/EC [1], destined to evolve in the future into the single EU process according to the legislator's intentions). This is due to the undeniable importance of the contact forces as rolling stock performance indicators and to the advancements in measurement technology. Within the EU process, the assessment of the dynamic behaviour of rolling stock is addressed by specific clauses of the Rolling Stock TSIs (Technical Specifications for Interoperability). The High Speed Rolling Stock TSI [2], for example, regulates the issue and refers to European Norm EN 14363:2005 [3] for the details on test conditions and assessment quantities, among which the lateral component **Y** and the radial (usually referred to as "vertical") component **Q** of the contact forces (fig. 1).

1.1.2.) The transparency of the processes for assessment of conformity to the applicable norms in terms of contact forces is an increasingly important requirement in the current organisational situation of the railway sector. Such processes are a part of the rolling stock authorisation process. They have evolved from internal processes of the former state railways to processes that involve numerous stakeholders, whose reciprocal independence and competence ensure the safety of the rail system (Transport Ministry, National Safety Authority, Independent Safety Authorities and Notified / Designated Bodies, rolling stock manufacturers, railway undertakings and infrastructure managers). The roles and interactions of these stakeholders are regulated by the "safety directive" [4], among others. Furthermore, several studies (see e.g. EC DG-TREN [5] and related references) have shown that the insufficient transparency of such sub-processes and of the entire rolling stock authorisation process constitute one of the most important barriers to free access to the individual national markets in Europe. Therefore, insufficient transparency hinders the direction chosen by the legislator to define the structure of the future European rail sector.

1.1.3.) Within this context the availability on the market of numerous and reliable interaction force measurement methods is of great importance.

With the current state-of-the-art the methods that find practical application are not numerous (see 0). The research described in this paper is not simply limited to the addition of a method to the existing ones. Rather it brings a practical implementation with numerous advantages such as the simplicity of signal processing and calibration, the absence of requirements regarding preliminary machining of the wheelset, the practical absence of signal drift in spite of the measurement being based on the wheel.

### 1.2. Main existing force measurement methods

1.2.1.) All existing contact force measurement methods are based on the measurement of the mechanical effects of the forces on components of the vehicle or of the

## SCIENZA E TECNICA

cui ruoli ed interazioni sono regolati anche dall'apposita "direttiva sicurezza" [4]. Per di più, diversi studi (vedi ad es. CE DG-TREN [5] e relativa bibliografia) hanno mostrato che l'insufficiente trasparenza di tali sottoprocessi e dell'intero processo di autorizzazione alla messa in servizio costituiscono una delle barriere più importanti al libero accesso ai singoli mercati nazionali europei, e quindi alla direzione scelta dal legislatore per definire il futuro assetto del settore ferroviario europeo.

1.1.3.) All'interno del quadro sopra delineato, la disponibilità sul mercato di numerosi ed affidabili metodi di misura delle forze di interazione per la caratterizzazione del comportamento dinamico dei rotabili assume rilevanza notevole.

Allo stato attuale dell'arte, i metodi che trovano pratica applicazione non sono numerosissimi (vedi 1.2). La ricerca descritta in questo lavoro non si limita all'aggiunta di un metodo a quelli esistenti ma apporta una realizzazione con numerosi vantaggi quali la semplicità dell'elaborazione dei segnali e di taratura, l'assenza di lavorazioni alla sala montata da strumentare, la misura praticamente priva di derive pur trattandosi di metodo basato su rilievi sulle ruote.

### 1.2. Principali metodi esistenti per la misura delle forze

1.2.1.) Tutti i metodi esistenti per la misura delle forze di contatto si basano sul rilievo degli effetti meccanici delle stesse forze su componenti del veicolo o dell'infrastruttura. In questo articolo ci si limita alle misure a bordo.

1.2.2.) Tra i metodi che non si basano su proprietà della sala montata si citano i seguenti. Essi hanno entrambi il vantaggio di non necessitare di telemetria per la trasmissione dei segnali a bordo.

- Metodo della deflessione della sospensione primaria per il rilievo dei carichi radiali  $\mathbf{Q}$ . Si tratta di ricorrere a trasduttori lineari di spostamento applicati tra telaio del carrello e boccole in corrispondenza della sospensione primaria. Deflessione della primaria e carichi radiali sulle due ruote di una sala sono correlati in maniera piuttosto semplice in caso di molle a comportamento lineare e smorzamento primario ridotto. Volendo mantenere lineare questa relazione, occorre limitare la banda passante ben al di sotto della frequenza propria di oscillazione delle masse primarie, quindi intorno ai 5 Hz. La misura risulta praticamente impossibile in presenza di elementi ad attrito e per disegni complicati. Non è possibile ricavare le forze laterali  $\mathbf{Y}$ .
- Metodo della forza scambiata tra sala e boccole ( $\mathbf{H}$ ) (si veda ad. es. AFNOR [25]). Si tratta di interporre un trasduttore di forza all'interno di ciascuna boccola di una sala montata così da rilevare la forza laterale complessivamente scambiata. Tale forza è correlata alla risultante delle forze laterali agenti sulle ruote. La banda passante è elevata; tuttavia non si riesce a risolvere per le forze sulle singole ruote. Il metodo è accettato

infrastructure. This paper is limited to on-board measurements.

1.2.2.) Among the methods that are based on mechanical properties other than those of the wheelset itself, the following two have the advantage of not requiring a telemetry system.

- Primary suspension deflection method for the measurement of wheel loads  $\mathbf{Q}$ . Linear displacement transducers are applied between bogie frame and axleboxes along the vertical line of action of the suspension. Primary suspension deflection and wheel loads on the two wheels of a wheelset are correlated quite simply in the case of springs with linear behaviour and of low primary damping. In order to maintain a linear relationship, the bandwidth is limited to well under the natural frequencies of the primary masses, thus to a maximum of around 5 Hz. This type of measurement is practically impossible in the presence of friction elements and for complex designs. It is not possible to measure the lateral  $\mathbf{Y}$  forces.
  - Wheelset-axlebox force ( $\mathbf{H}$ ) method (see e.g. AFNOR [25]). A force transducer is applied in each axlebox so as to determine the total axial force exchanged with the wheelset. Such force is correlated to the sum of the lateral forces acting on the wheels. The bandwidth of the system is high; however the forces on the individual wheelsets cannot be resolved. The method is accepted for rolling stock authorisation in some cases (see EN 14363:2005 [3]).
- 1.2.3.) The following methods are based on the mechanical properties of the wheelset, in particular on the relationship between applied forces and mechanical strain, which is measured by means of strain gauges. The basic principle is that the acting forces determine a part of the state of strain of the wheelset. From the state of strain the acting forces can be determined, provided the other influence quantities are taken into account (by means of compensation, correction, or as uncertainty).
- Axle strain method. The axle is fitted with strain gauges connected in a way as to provide signals that are correlated to the state of strain generated on the axle by the contact forces. A signal transmission system is required to transmit the signals on board from the rotating wheelset (typically slip-rings or various types of telemetry). In this way all three contact force components  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{Y}$  and  $\mathbf{Q}$  can be measured on both wheels.
  - Wheel strain method<sup>(1)</sup>. According to the type of wheel, either the spokes (rarely present nowadays) or the disc

<sup>(1)</sup> Over time, there is a tendency to apply transducers closer to the contact point, i.e. on the wheel, even in systems originally based only on axle strain (see e.g. [26]), with the additional advantage of reducing the inertia of the material situated between contact and transducers and to increase bandwidth.

## SCIENZA E TECNICA

per l'autorizzazione alla messa in servizio in alcuni casi (v. EN 14363:2005 [3]).

1.2.3.) Passando ai metodi basati sulle proprietà della sala montata si citano i seguenti, basati sul rilievo di deformazioni tramite estensimetri elettrici a resistenza. Il principio fondamentale è che le forze determinano una parte dello stato di deformazione della sala e, da questo, tenuto conto delle altre grandezze d'influenza (tramite compensazione, correzione, o come incertezza) si può risalire alle forze stesse.

- Metodo della misura di deformazioni dell'assile. Si tratta di attrezzare un assile con estensimetri, collegarli opportunamente in modo da fornire segnali correlati allo stato di deformazione generato sull'assile dalle forze di contatto e predisporre un sistema di trasmissione dei segnali in cassa (tipicamente contatti strisciati o telemetrie di vario tipo). Si riesce così ad ottenere la misura di tutte e tre le componenti  $X$ ,  $Y$  e  $Q$  delle azioni al contatto su entrambe le ruote.
- Metodo della misura di deformazioni della ruota<sup>(1)</sup>. A seconda del tipo di ruota vengono attrezzate le razze (ormai raramente presenti) o il disco con estensimetri, cablati opportunamente e collegati ad una telemetria. Il presente articolo descrive un esempio di questo tipo. Si riesce così ad ottenere almeno le componenti  $Y$  e  $Q$  delle azioni al contatto su entrambe le ruote. Da questo principio derivano numerose realizzazioni diverse.

1.2.4.) *Metodi basati sulla misura di deformazioni dell'assile.* Si possono citare le seguenti applicazioni.

- il primo in ordine di tempo è il cosiddetto "metodo dell'assile" (o "metodo DB", "metodo Minden", "metodo tedesco") descritto da OSTERMEYER et al. [32], e ZEILHOFER et al. [33], applicato anche in Italia negli anni '80 da BIANCHI et al. [29]. Esso prevede nelle ultime versioni descritte in letteratura 6 sezioni di misura, distribuite lungo l'assile, con mezzi-ponti di Wheatstone costituiti da due estensimetri assiali applicati in posizioni diametralmente opposte, in modo da risentire dei momenti flettenti provocati dalle forze di contatto. Il segnale proveniente da ogni singolo ponte risulta quindi alternato. Per rendere continuo il segnale, la scelta è stata quella della "correzione di guadagno", ossia l'introduzione nella catena di misura di un guadagno variabile in modo tale che, se le forze applicate sono costanti nel tempo, lo risultino anche i segnali. Questa scelta consente il campionamento a base temporale fissa (nel seguito "Campionamento Temporale" o CT), ad esempio l'acquisizione di 200 campioni al secondo. La sensibilità della misura (ossia i mV di se-

are fitted with strain gauges, suitably connected to one another and to a telemetry system. This paper describes an implementation of this method. It is possible to obtain at least components  $Y$  and  $Q$  of the contact forces on both wheels of a wheelset. This principle has led to several different implementations.

1.2.4.) *Axle strain methods.* The following implementations can be cited.

- The first to appear was the so-called "axle method" (or "DB method", "Minden method", "German method") described by OSTERMEYER et al. [32], and ZEILHOFER et al. [33]. This method was applied also in Italy in the '80s by BIANCHI et al. [29]. In the more recent versions described in the literature, the method calls for 6 measurement sections along the axle, each consisting of two Wheatstone half-bridges made up of two axially-oriented strain gauges applied in diametrically opposite points of the axle surface. In this way the bridges are sensitive to the bending moments generated by the contact forces. Each bridge supplies an alternating signal during wheelset rotation. In order to obtain a continuous signal, the choice is that of "gain correction": the measurement chain includes a gain that is variable so that the output signals are constant over time when constant contact forces are acting on the wheels. This choice allows sampling of the signals with a fixed frequency (hereafter TBS or "Time-Based Sampling"), for example the acquisition of 200 samples per second. Measurement chain sensitivity (i.e. the ratio of the signal in mV to the force in kN) is thus variable during rotation. An implementation based on similar principles but with a fixed spatial sampling frequency (hereafter DBS or "Distance-Based Sampling") is described in [15], [21] by BRAGHIN et al.
- Torsional axle strain allows the determination in a relatively simple way of the longitudinal  $X$  components of the contact forces on the two wheels of a wheelset. (LICCIARDELLO [20]). Since the first torsional natural frequency is quite low, the bandwidth of such systems is low (maximum about 10 Hz).
- Methods based on axle strain but with simultaneous measurement of wheel disc strain have been developed by DB in Germany (BERG et al. [19], BREUER et al. [26]), so as to correct the effects of the variation of the lateral position of the wheel-load line-of-action while running. In fact, without wheel strain measurements such a variation is necessarily treated as a source of measurement uncertainty.

1.2.5.) *Wheel strain methods.* It is possible to classify these methods in:

- methods whose Wheatstone bridges supply "continuous" signals (i.e. that during rotation with constant contact forces supply constant signals) - today such a possibility exists only for contact force component  $Y$ ;
- methods whose bridges supply alternating signals (i.e. that during rotation with constant contact forces sup-

<sup>(1)</sup> Nel tempo si è manifestata una tendenza all'avvicinamento dei trasduttori al punto di contatto, cioè sulla ruota, anche nei sistemi originariamente basati solo sulle deformazioni dell'assile (v. [26]), con il vantaggio ulteriore di poter di ridurre l'inerzia del materiale compreso tra il contatto e i trasduttori ed elevare la banda passante.

## SCIENZA E TECNICA

- gnale corrispondenti al kN di forza) risulta quindi variabile durante la rotazione. Una realizzazione basata su principi simili ma con base spaziale fissa (o a "Campionamento Spaziale" CS) è descritta in [15], [21] da BRAGHIN et al.;
- le deformazioni torsionali dell'assile consentono di ricavare in maniera relativamente semplice le componenti longitudinali  $X$  delle forze di contatto sulle ruote di un assile (LICCIARDELLO [20]). Dato che la prima frequenza propria torsionale è piuttosto bassa, la banda passante di sistemi di misura simili è ridotta (massimo 10 Hz);

- metodi basati sull'assile ma con rilievo contemporaneo di deformazioni delle ruote sono stati sviluppati dalle Ferrovie Tedesche DB (BERG et al. [19], BREUER et al. [26]), così da poter correggere gli effetti sulla misura della variazione della posizione della retta di azione di  $Q$  durante la marcia. Prescindendo dalla misura sulle ruote, infatti, tale variazione deve essere trattata come causa di incertezza di misura.

1.2.5.) *Metodi basati sulla misura di deformazioni della ruota.* Si possono distinguere:

- metodi i cui ponti estensimetrici danno segnali "continui" (cioè che durante una rotazione con forze di contatto costanti danno un segnale costante) - tale possibilità esiste al momento soltanto per la componente  $Y$ ;
- metodi i cui ponti danno segnali alternati (cioè che durante una rotazione con forze costanti danno un segnale alternato, più o meno vicino alla forma sinusoidale, che necessita di essere "raddrizzato").

Si può distinguere ulteriormente in metodi a:

- campionamento temporale CT - per i sistemi continui si opera senza ulteriori alterazioni della forma del segnale campionando direttamente i segnali dei ponti; per i sistemi con segnali alternati occorre in questo caso agire con correzione di guadagno sui segnali dei ponti;
- campionamento spaziale CS, che richiede il rilievo dei picchi dei segnali nel caso questi siano alternati.

1.2.6.) Lo stato di deformazione provocato dalle forze di contatto su un disco di ruota ferroviaria è più complesso di quello di un assile. Quest'ultimo può essere assimilato con sufficiente approssimazione ad una trave, e quindi l'andamento delle deformazioni è legato ai carichi in maniera individuabile anche con i metodi classici della scienza delle costruzioni. Al contrario, lo stato di deformazione di un disco richiede studi sperimentali e/o con modelli agli elementi finiti (si veda ad esempio BROGGIATO et al. [12], [13], [16], CORAZZA et al. [23], [24]). Per sintetizzare le proprietà essenziali sfruttate in tutte le ruote di misura, se ci si riferisce soltanto alle deformazioni "radiali"<sup>(2)</sup>, lo stato di

ply signals that are alternating more or less as a sine-wave, and thus need to be "rectified".

It is possible to distinguish further in:

- TBS (Time-Based Sampling) methods - if the method is continuous (as described above) the bridge signals are sampled directly without any need for further alterations of signal shape; for methods with alternating signals gain correction is required;
- DBS (Distance-Based Sampling) methods, that require peak detection algorithms in the case of alternating signals.

1.2.6.) The state of strain generated by the contact forces on a wheel disc is more complex than that generated on the axle. The axle behaves approximately as a beam, thus the relationship between state of strain and applied loads can be determined even with classical methods. On the other hand, to determine the state of strain of a wheel disc experimental and/or numerical techniques are required (see e.g. BROGGIATO et al. [12], [13], [16], CORAZZA et al. [23], [24]). In terms of the basic properties exploited in all instrumented wheels, and referring only to "radial"<sup>(2)</sup> strain, the state of strain of a wheel disc is characterised by two zones (fig. 2):

A. zone in which the maximum sensitivity to the lateral  $Y$  force occurs; for most simple disc shapes this zone is situated close to the hub in the area in which disc thickness starts to increase rapidly, thus reducing the effect of the growing bending moment due to  $Y$ ; this is the zone in which strain gauges for the measurement of  $Y$  are typically applied;

B. zone in which the minimum sensitivity to the axial  $Y$  force occurs (sensitivity that for practical purposes can be considered zero for certain implementations); this zone is situated close to the wheel rim; it is the zone in which the strain gauges for the measurement of  $Q$  and  $d$  are normally situated.

The lateral displacement  $d$  of the line-of-action of  $Q$  can be considered as an additional moment with respect to a reference condition with  $Q$  applied at a fixed lateral position. This moment generates a strain "unbalance" between field and gauge sides of the disc, which is the property by means of which  $d$  can be measured.

The general properties described are useful both for Distance-Based Sampling and Time-Based Sampling TBS methods. For DBS the areas of interest are only the ones close to the ideal plane containing components  $Y$  and  $Q$ , area in which the strain samples are usually taken. For TBS the areas of interest are extended to the whole circumference, since the strain gauges have to be applied "in a crown" in order to provide a continuous signal.

<sup>(2)</sup> Raramente le deformazioni in questione sono effettivamente radiali, in quanto le superfici dei dischi sono raramente perfettamente ortogonali all'asse della ruota. Si continuerà nonostante ciò ad usare la denominazione tradizionale.

<sup>(2)</sup> The strain is rarely an actual "radial strain", since for most wheel types the surfaces of the disc are rarely perpendicular to the wheel axis. The traditional nomenclature will be used for the sake of simplicity.

## SCIENZA E TECNICA

deformazione (fig. 2) di un disco può essere caratterizzata da due zone:

A. zona dove si ha la massima sensibilità alla forza asiale  $Y$ , situata per forme di disco semplici in prossimità del mozzo dove lo spessore comincia a crescere rapidamente, riducendo l'effetto dell'aumento del braccio della forza; è la zona nella quale si collocano gli estensimetri per la misura di  $Y$ ;

B. zona dove si ha la minima sensibilità ad  $Y$  (sensibilità che ai fini pratici si riduce in certe configurazioni a zero), situata in prossimità del cerchio; è la zona dove si collocano gli estensimetri per la misura di  $Q$  e di  $d$ .

Lo spostamento  $d$  della retta di azione di  $Q$  si può vedere come un momento aggiuntivo rispetto ad una condizione ideale di  $Q$  applicata in un punto fisso, che provoca uno "squilibrio" di deformazioni tra facce interna ed esterna del disco. Questa è la proprietà attraverso la quale si può misurare  $d$ .

Le proprietà generali appena citate sono valide sia che si utilizzi il campionamento spaziale, per cui la zona di interesse è soltanto il piano ideale contenente le componenti  $Y$  e  $Q$ , in corrispondenza del quale si rilevano solitamente i campioni, sia che si utilizzi il campionamento temporale, per cui interessano le deformazioni su tutto il disco visto che per ottenere un segnale continuo gli estensimetri devono essere disposti "a corona".

1.2.7.) Le proprietà di cui al paragrafo precedente, sebbene spesso non enunciate esplicitamente nelle descrizioni, sono state sfruttate in molte diverse maniere in varie realizzazioni.

Con il metodo di Baldwin a CT per la misura di  $Y$ , si applicano estensimetri su un lato del disco in zona "A", a formare una corona. Gli estensimetri, assieme a due estensimetri compensatori (ossia posti in luoghi che non risentono idealmente delle forze di contatto), si collegano in modo da formare un unico ponte, che fornisce un segnale pressoché indipendente dall'angolo di rotazione della ruota e proporzionale, sebbene non in maniera accuratissima, alla forza  $Y$ . Il metodo risente significativamente delle derive termiche ed inerziali derivanti dal riscaldamento del cerchione durante la marcia e dalla sollecitazione centrifuga, che vanno corrette in maniera empirica, ma offre il vantaggio di dover trasmettere soltanto un segnale in tensione a bordo (un solo "canale rotante"). Questa configurazione viene usata nel metodo di cui al presente articolo per ottenere la *continuità* nella misura di  $Y$ , mentre l'accuratezza è garantita dal rilievo a CS.

In altri metodi (metodo francese normato [25] derivato dagli studi di COURTIN, MARMORET [30]; metodi giapponesi di KANEHARA, OHNO [18] e ISHIDA et al. [27]; metodo statunitense di HIGGINS et al. [28]) si ricorre a ponti che forniscono segnali alternati, che vanno combinati (ad esempio sommati) e/o soggetti a correzione di guadagno per fornire un segnale continuo proporzionale alla  $Y$ . Con i primi due metodi la forza  $Q$  viene misurata con ponti formati da estensimetri inseriti in fori praticati nel disco in zona "B",

1.2.7.) The properties just described have been exploited in many different manners in different implementations, although the properties are seldom stated explicitly.

With the so-called Baldwin method, which is a TBS method for the measurement of  $Y$ , strain gauges are applied on one side of the disc so as to form a crown. These gauges, along with two compensation gauges (i.e. gauges in zones that ideally are not sensitive to the contact forces such as a small steel plate that rotates with the wheelset), are connected so as to form a single Wheatstone bridge that provides a signal that is practically independent of

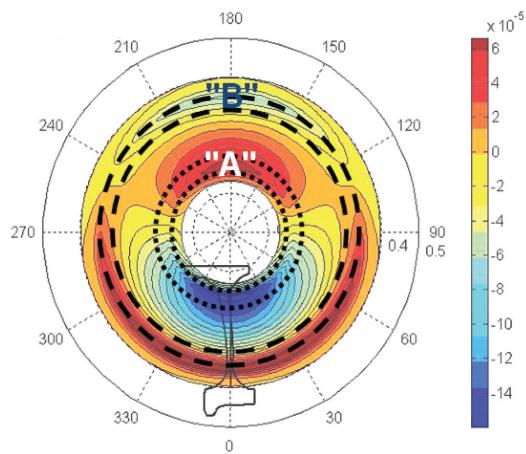


Fig. 2 - Deformazione radiale del disco della ruota dovuta alla forza  $Y$  e zone di applicazione degli estensimetri. *Wheel-disc radial strain due to the lateral force  $Y$  and strain-gauge application zones.*

the angle of rotation of the wheelset and proportional, although not with extreme accuracy, to the lateral force  $Y$ . The method is affected significantly by thermal and inertial signal drift. These are caused respectively by contact surface heating and centrifugal loading when running, and need to be corrected empirically. The main advantage is that only one "rotating signal" is required for each lateral force measured. This configuration is used in the implementation described in this paper to obtain the continuity of the measurement of  $Y$ , while accuracy is ensured by DBS measurement.

In other methods (standard French method [25] derived from the studies of COURTIN, MARMORET [30]; Japanese methods of KANEHARA, OHNO [18] and ISHIDA et al. [27]; USA method of HIGGINS et al. [28]) the bridges supply alternating signals that need to be combined (e.g. summed) and/or altered through gain correction so as to reconstruct a continuous signal proportional to  $Y$ . With the first two methods, wheel load  $Q$  is measured by means of bridges formed by gauges placed in holes drilled in zone "B" of the disc. With the third method, perhaps thanks to

## SCIENZA E TECNICA

mentre con il terzo, grazie forse alla forma particolare della ruota considerata, i fori non sono praticati.

Altri metodi sono descritti in articoli citati in bibliografia e una rassegna comparativa è presentata da LICCIARDELLO et al. [9].

### 2. La ricerca ALSTOM-SAPIENZA

#### 2.1. Riepilogo della ricerca

2.1.1.) La ricerca effettuata da ALSTOM Ferroviaria S.p.A. e SAPIENZA Università di Roma sulla misura delle forze di contatto a partire dalle proprietà della ruota ha portato in pochi anni ad eliminare l'influenza della continua variazione della posizione  $d$  della retta di azione della forza  $\mathbf{Q}$  dai risultati di misura della  $\mathbf{Y}$ , assieme alle derive di segnale correlate alla velocità di rotazione della ruota ed al riscaldamento del cerchione. Ne è risultato un sistema di misura continuo della forza  $\mathbf{Y}$  di accuratezza migliorata, nonché un sistema di misura discontinuo della forza  $\mathbf{Q}$  che sfrutta appieno le proprietà metrologiche dei moderni sistemi di condizionamento di segnale.

2.1.2.) Basandosi sull'esperienza della SAPIENZA in campagne di misura precedenti, tra cui con il "metodo dell'assile" (BIANCHI et al. [29], CORAZZA [35]) la ricerca è stata indirizzata sin dall'inizio all'utilizzo della ruota a disco, che è quella più diffusa, come sensore delle forze di interazione. Il primo passo è stato quello di caratterizzare nel dettaglio le proprietà di deformazione delle ruote, di individuarne quelle sfruttabili per la determinazione delle forze impresse e di definire dei principi generali per legare lo stato di deformazione alle forze di contatto (CORAZZA et al. [24], [23]). Primo risultato importante è stato che i dischi di tutte le ruote studiate risultano essere sensibili alla posizione  $d$  della retta di azione della forza  $\mathbf{Q}$  (correlata alla posizione delle aree di contatto sulla ruota) e che, di conseguenza, tale grandezza è piuttosto un misurando e non una grandezza di disturbo.

2.1.3.) Una prima esperienza in linea è stata condotta da SAPIENZA sulla linea B della Metropolitana di Roma con il supporto di Met.Ro. Metropolitane di Roma S.p.A. (LICCIARDELLO [20], BRUNER et al. [17], [14]). Sono state effettuate registrazioni su oltre 150 km di percorso. La bontà dei principi di misura è stata confermata dalla pratica, in particolare la possibilità di misura della posizione  $d$  della retta di azione di  $\mathbf{Q}$ . I principi consolidati sono stati battezzati "metodo CML"<sup>(3)</sup>. Tali principi comprendono le regole di base per l'identificazione dei punti di applicazione degli estensimetri nonché quelle per l'elaborazione dei segnali in modo da estrarre le quote parte correlate alle forze di interazione. Nella campagna metro B, i ponti estensimetrici sono stati configurati nel modo più semplice, per mettere ben

the particular shape of the wheel considered, holes are not necessary.

Other methods are described in the references provided and a comparative review is presented by LICCIARDELLO et al. in [9].

### 2. The ALSTOM-SAPIENZA research

#### 2.1. Summary of the research

2.1.1.) The research conducted by ALSTOM Ferroviaria S.p.A. and SAPIENZA Università di Roma on contact force measurement based on wheel strain properties has led to the elimination of the influence of the continual variations of the lateral position  $d$  of the wheel-load line-of-action on the measurement of lateral force  $Y$ , along with the signal drifts correlated to rotation speed and contact surface heating. The result is a continuous system with improved accuracy for the measurement of  $Y$ , as well as a DBS system for the measurement of  $Q$  that fully exploits the metrological characteristics of modern signal conditioning systems.

2.1.2.) Based on the experience of SAPIENZA in previous measurement campaigns, among which one with the "axle method" (BIANCHI et al. [29], CORAZZA [35]), the research was directed right from the start to the exploitation of the disc wheel (the most common) as sensor of wheel-rail interaction forces. The first step was to characterise in detail the strain-state properties, to identify the ones that are exploitable to determine the applied loads and to define general principles to relate the strain-state to the contact forces (CORAZZA et al. [24], [23]). A first important result was that all the wheel discs studied show sensitivity to the lateral position  $d$  of the wheel-load line-of-action (correlated in turn to the position of the contact areas on the wheel profile) and that, consequently, such quantity is rather a measurand and not a disturbance factor.

2.1.3.) A first on-track tests was conducted by SAPIENZA on the B-line of Rome's underground railways with the support of Met.Ro. Metropolitane di Roma S.p.A. (LICCIARDELLO [20], BRUNER et al. [17], [14]). Signals were recorded on over 150 km of track. The validity of the measurement principles was confirmed by the practical experience, in particular the possibility to measure the position of the line-of-action of the wheel load. The consolidated principles were given the name "CML method"<sup>(3)</sup>. These principles comprise the ground rules for the identification of the points in which to apply gauges as well as the rules for the processing necessary to extract from the signals the information related to the interaction forces. In the metro B campaign, the strain gauge bridges were configured in the

<sup>(3)</sup> Metodo CORAZZA, MALAVASI, LICCIARDELLO.

<sup>(3)</sup> CORAZZA, MALAVASI, LICCIARDELLO method.

## SCIENZA E TECNICA

in evidenza le derive di origine termica ed inerziale e di studiarne gli andamenti. Tale scelta è stata operata nell'ottica di disporre di dati utili per la futura definizione delle migliori strategie di eliminazione delle derive.

2.1.4.) Lo studio delle proprietà dello stato di deformazione della ruota è stato proseguito ed approfondito attraverso l'uso di modelli agli elementi finiti (BROGGIATO et al. [16], BROGGIATO, COSCIOTTI [8]). I principi di misura sono stati analizzati dal punto di vista teorico e sono stati generalizzati ancora. È stata sviluppata una metodologia di ricerca dei punti di applicazione degli estensimetri con tecniche di ottimizzazione.

2.1.5.) In base ai progressi conseguiti con le attività precedenti, è stata realizzata nei laboratori SAPIENZA una sala di misura attrezzata con le realizzazioni più promettenti dei principi CML. I risultati di prove statiche e quasi-statiche presso SAPIENZA e ALSTOM hanno consentito di convergere verso una versione di sala strumentata che si era certi avrebbe permesso la misura della forza  $Y$  a campionamento temporale (e quindi con una frequenza di campionamento a piacere non legata alla frequenza di rotazione della ruota), per di più priva, ai fini pratici, di qualunque tipo di deriva di segnale derivante dai ponti estensimetrici, anche per rilievi di lunga durata. La sala avrebbe consentito altresì la misura a campionamento spaziale della forza  $Q$  e della sua posizione laterale  $d$ , con l'incognita del corretto funzionamento dell'algoritmo di rilievo dei picchi di segnale fino alle velocità elevate, essendo stato l'algoritmo fino ad allora utilizzato per velocità fino ad 80 km/h (Metro B).

2.1.6.) Sulla base dei risultati positivi della sperimentazione sopra descritta, nei laboratori ALSTOM è stata realizzata una replica utilizzata per il progetto di ricerca europeo WIDEM (Wheelset Integrated Design and Effective Maintenance). La ricerca aveva lo scopo di costruire spettri di carico affidabili per il dimensionamento a fatica delle sale montate, dunque la misura dei carichi richiedeva 1. buona accuratezza in tutto il campo di misura (anche ai bassi carichi) e 2. possibilità di misurare a lungo senza interventi esterni. Per una ruota di misura, questo è un problema soprattutto per la forza laterale, essendo richiesti corrispondentemente 1. la correzione per la variabilità di modulo e posizione laterale della forza  $Q$  e 2. la correzione completa delle derive. La sala strumentata in via di sviluppo si adattava perfettamente allo scopo, avendo entrambe le caratteristiche. In ALSTOM si è provveduto a mettere a punto la catena di misura più idonea, avente caratteristiche metrologiche innovative per il periodo. Le prove in linea hanno condotto ai risultati richiesti in termini di precisione e attitudine alle lunghe durate di misura e, soprattutto, hanno confermato la bontà della direzione di ricerca scelta. Hanno tra l'altro mostrato che le misure a campionamento spaziale delle forze  $Q$ , già affidabili ai fini della correzione della  $Y$ , sono in sé di discreta qualità e suscettibili di essere pienamente affidabili con poco ulteriore sviluppo anche per velocità elevate. Nel seguito del presente articolo si descriveranno con maggior

simplest possible way so as to highlight the thermal and inertial signal drifts and study their properties. Such a choice provided useful data for the definition of the best strategy for the elimination of these signal drifts.

2.1.4.) The study of the properties of wheel strain-state was continued by means of finite element methods (BROGGIATO et al. [16], BROGGIATO, COSCIOTTI [8]). It was possible to improve the theoretical analysis of the measurement principles and to generalise them further. A methodology for the identification of strain gauge application points based on optimisation techniques was developed.

2.1.5.) On the basis of the progress secured through the previous activities, a wheelset was instrumented in the SAPIENZA laboratories with the most promising implementations of the CML principles. The results of static and quasi-static tests at SAPIENZA then at ALSTOM allowed to converge towards a version of the instrumented wheelset for which there was confidence on the possibility to measure during on-track tests the lateral force  $Y$  with Time-Based Sampling (and thus with a sampling frequency independent of wheel rotation frequency) and practically without signal drift due to the strain gauge bridges even for long-term measurements. The wheelset would have allowed also the DBS measurement of the wheel load  $Q$  and of the lateral position  $d$  of its line of action, for which the correct functioning of the peak detection algorithm was not proven, for high speeds, since it had been used for speeds only up to 80 km/h (Metro B).

2.1.6.) On the basis of the positive results of the experiments described above, a replica was created in the ALSTOM laboratories for the European research project WIDEM (Wheelset Integrated Design and Effective Maintenance). The aim of this research was to construct reliable load spectra for the fatigue design of wheelsets. Therefore, the contact force measurement required 1. high accuracy throughout the measuring range (even at low loads) and 2. possibility to measure for a long time without external intervention. For an instrumented wheel this is a most of all a problem for the lateral force, since correspondingly there are requirements for 1. the correction for the variability of magnitude and lateral position of the  $Q$  force and 2. the complete correction of signal drift. The instrumented wheelset under development was perfectly suited to these purposes as it possessed both characteristics. ALSTOM proceeded to set up a suitable measurement chain, with metrological characteristics that were innovative for the time. On-track tests led to the expected results in terms of accuracy and suitability for long-term measurements and, most of all, confirmed the validity of the chosen research approach. The tests showed also that DBS measurements of the wheel loads  $Q$ , already considered reliable for the correction of the lateral force  $Y$ , are themselves of good quality and liable to be completely reliable with little further development even up to high speeds. In the following, the working

dettaglio i principi di funzionamento di questa ultima versione di sala strumentata.

### 2.2. La versione più recente

2.2.1.) *Principi di funzionamento.* Innanzitutto si sintetizzano qui i principi CML per la scelta della posizione degli estensimetri e per l'elaborazione dei segnali.

La chiave di tale metodo sta nella separazione degli effetti di  $\mathbf{Q}$ ,  $d$  da quelli di  $\mathbf{Y}$ , che sono sovrapposti tra loro e con le altre cause di deformazione del disco, allo scopo di ottenere una misura continua di  $\mathbf{Y}$  indipendente dagli effetti della  $\mathbf{Q}$ . Tale operazione è possibile grazie al fatto, provato sperimentalmente (CORAZZA et al. [24]) e teoricamente (BRUNER et al. [17]), che al variare della quota radiale di applicazione degli estensimetri posti in zona "B" si osserva un'inversione di segno del contributo della forza  $\mathbf{Y}$ . Tale contributo passa quindi per lo zero ad una certa quota radiale, dipendente dalla scelta delle configurazioni del circuito del ponte estensimetrico, per cui si può affermare che il segnale di un ponte con estensimetri collocati a tale quota è indipendente da  $\mathbf{Y}$ . L'affermazione è valida con grado di approssimazione che è funzione della configurazione del ponte, in particolare del numero di estensimetri disposti lungo la circonferenza. L'approssimazione è ottima nel caso di un estensimetro soltanto o due diametralmente opposti. L'utilizzo di questa proprietà consente di creare un sistema di misura dotato di immediatezza notevole, nel senso che è relativamente facile capire in tempo reale la correttezza del legame tra segnali in ingresso e forze in uscita.

Il principio è applicabile praticamente in molti modi diversi. L'architettura del sistema di cui al presente lavoro è descritta nella fig. 3, in cui sono schematizzate le configurazioni dei ponti, e nella fig. 4, che illustra il legame ingresso-

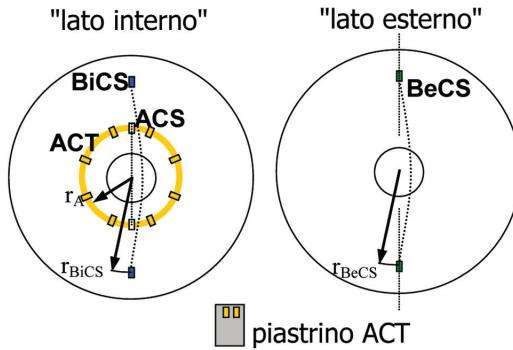


Fig. 3 - Schema di principio semplificato della ruota di misura. Una ruota è sede di tre ponti CS (ACS, BiCS, BeCS) e un ponte CT di Baldwin ACT. Simplified layout of the instrumented wheel. Each wheel is equipped with three DBS bridges (ACS, BiCS, BeCS) and one TBS Baldwin bridge (ACT). ("lato interno" = "gauge side"; "lato esterno" = "field side"; CS = DBS; CT = TBS; "piastrino" = "steel plate").

principles of this most recent version of instrumented wheelset are described in more detail.

### 2.2. The most recent version

2.2.1.) *Working principles.* First of all the CML principles for the choice of strain gauge positions and for signal processing are summarised here.

The key characteristic of the method is the separation of the effects of  $\mathbf{Q}$ ,  $d$  from those of  $\mathbf{Y}$ , so as to obtain a continuous measurement of  $\mathbf{Y}$  independent of the effects of  $\mathbf{Q}$ . These effects are superposed also with the other causes of wheel-disc strain. This is possible thanks to the fact, proven experimentally (CORAZZA et al. [24]) and theoretically (BRUNER et al. [17]), that a sign inversion of the contribution of the lateral force occurs when the radial distance of the strain gauges in zone "B" from the wheel's axis is varied. The contribution of  $\mathbf{Y}$  is thus zero for a certain radius, depending on the choice of the circuit configuration of the Wheatstone bridge. It is thus possible to consider the signal of a bridge with gauges at such a radius independent of  $\mathbf{Y}$ . This statement is valid with a degree of approximation which depends on the configuration of the bridges, in particular of the number of gauges present along a circumference. The approximation is very good in the case of one gauge only or two applied in opposite positions on the same diameter. The use of this property allows the creation of a measurement system for which it is relatively straightforward to understand the correctness of the input-output relationships even in real time.

The principle is practically applicable in many different ways. The layout of the system reported in this paper is shown in fig. 3 (bridge configurations) and in fig. 4 (input-output relationships, i.e. the processing undergone by the four signals of the four bridges required for each wheel).

The bridges (fig. 3) are made up of gauges applied to a specific radius in zone "A", only on one side of the disc, and to specific radii in zone "B", on both sides of the disc. The zone "B" gauges are connected with gauges that are in opposite positions on the same diameter and applied at a radius such that the signals are practically independent of the  $\mathbf{Y}$  component, as described above, as well as practically unaffected by signal drift (see also ORE report [34]). The bridges in zone "B" provide alternating signals with two "peaks" for each wheel rotation. These signals are functions of  $\mathbf{Q}$  and  $d$ . Therefore, they allow both the measurement of  $\mathbf{Q}$  and the determination of the correction for the signal of the corresponding bridge in zone "A" for the effects of the variations of  $\mathbf{Q}$  and  $d$  (this bridge signal is dependent on all three quantities  $\mathbf{Q}$ ,  $d$ ,  $\mathbf{Y}$ ). A Baldwin bridge with strain gauges at the same radius in zone "A" completes the configuration.

With reference to fig. 4, the voltage signals of the DBS bridges are first sampled at high frequency in the time window containing the "peaks". The peaks are then iden-

## SCIENZA E TECNICA

so-uscita, cioè le elaborazioni a cui sono assoggettati i quattro segnali dei quattro punti necessari per ogni ruota.

I punti (fig. 3) sono costituiti da estensimetri posti a raggi opportuni nella zona "A", solo su una faccia del disco, e nella zona "B", su entrambe le facce del disco. Gli estensimetri della zona "B" sono collegati con estensimetri diametralmente opposti e posti in punti a quote radiali tali da fornire segnali praticamente indipendenti dalla componente  $Y$ , come descritto sopra, nonché praticamente esenti da deriva (rapporto ORE [34]). I segnali forniti dai punti "B" sono alternati e presentano due "picchi" per ogni rotazione della ruota. Essi sono funzioni di  $Q$  e  $d$ , cioè consentono la misura di  $Q$  e consentono di correggere il segnale dell'analogico ponte in zona "A", dipendente da  $Q$ ,  $d$ ,  $Y$ , per gli effetti delle variazioni di  $Q$  e  $d$ . Un ponte a corona di Baldwin con estensimetri alla stessa quota radiale "A" completa la configurazione.

Con riferimento alla fig. 4, i segnali in tensione dei punti "CS" vanno prima campionati ad elevata frequenza in corrispondenza dei "picchi", i quali vengono poi identificati e i cui valori (con correzione di segno) vanno a costituire i due campioni ad ogni giro ("Campionamento Spaziale"). I campioni così ottenuti vengono quindi elaborati in tempo reale secondo le relazioni funzionali visibili in figura, le quali sono tutte lineari, a patto di considerare (BROGGIATO et al. [8]) l'effetto della variazione di  $d$  come momento aggiuntivo rispetto ad una configurazione presa a riferimento (ad es. quella con forza  $Q$  posizionata a 70 mm dal piano di riferimento della ruota).

tified and their values (with sign correction) constitute the two samples per revolution of the "Distance-Based Sampling" DBS. The samples obtain are then processed in real time according to the functional relationships shown in the block diagram, which are all linear if the effect of the variation of  $d$  is considered (BROGGIATO et al. [8]) as an additional moment with respect to a reference configuration (e.g. the one in which the wheel load  $Q$  is situated 70 mm from the reference plane of the wheel).

Such relationships are used to determine the correction  $A_0$  to be applied to the ADBS signal. The resulting signal, proportional to  $Y$  and made up of two samples per revolution, is used to align the signal coming from the Baldwin bridge ATBS, which is less accurate but can be sampled at higher frequencies (fig. 5).

**2.2.2.) Instrumentation.** The configuration described requires 4 rotating channels per wheel, for a total of 8 rotating channels per wheelset. The Time-Based Sampling with Baldwin bridge does not require any novel technique. On the other hand the Distance-Based Sampling requires a higher sampling frequency than usual in order to acquire correctly the peaks of the signals of the zone "B" bridges.

In the specific case of the measurements described in §2.4, a traditional multi-channel telemetry was used, capable of providing the bridge excitation voltage and transmitting a continuous high level output voltage propor-

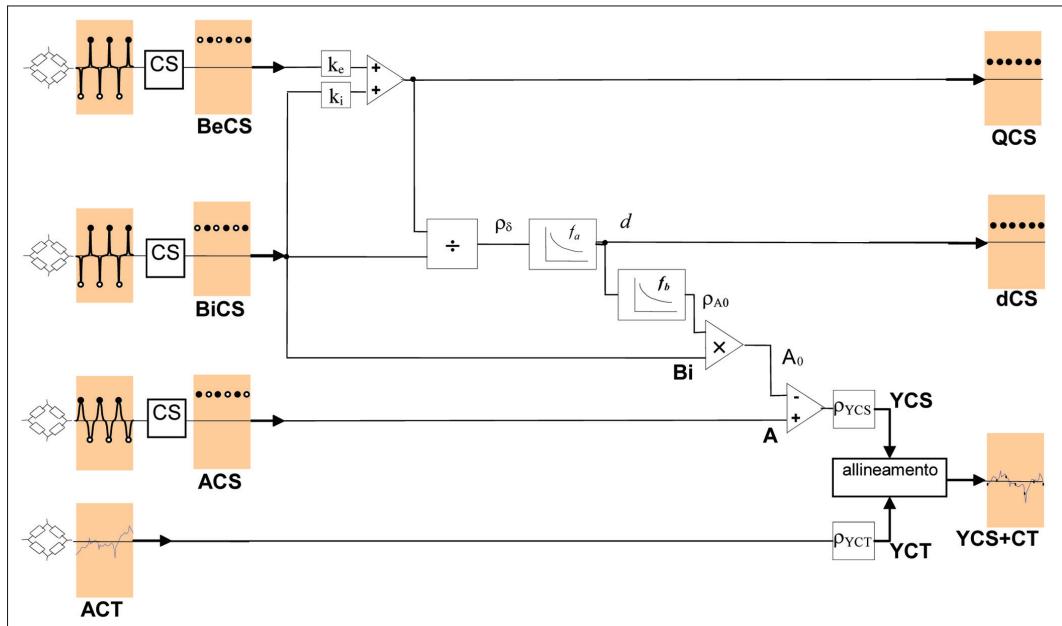


Fig. 4 - Schema a blocchi del trattamento dei segnali secondo il metodo CML. Block diagram of signal processing according to the CML method. 'Allineamento' = 'alignment'; CS = DBS; CT = TBS.

## SCIENZA E TECNICA

Tali relazioni sono utilizzate per determinare la correzione  $A_0$  da apportare al segnale del ponte "ACS" a campionamento spaziale. Al segnale proporzionale a  $Y$  che ne risulta, costituito da due campioni per giro, viene allineato il segnale, meno accurato ma a frequenza di campionamento più elevata (costante, nel dominio del tempo), proveniente dal ponte di Baldwin "ACT" (fig. 5).

**2.2.2.) Strumentazione.** La configurazione descritta richiede 4 canali rotanti per ruota, per un totale di 8 canali rotanti sulla sala montata. Il rilievo a campionamento temporale non richiede particolari accortezze. Il rilievo a campionamento spaziale richiede invece, rispetto alle situazioni usuali, un'elevata frequenza di campionamento in acquisizione allo scopo di acquisire correttamente i picchi dei segnali dei ponti in zona "B".

Nel caso specifico dei rilievi riportati nel successivo §2.4, per il condizionamento dei segnali è stato utilizzato un sistema telemetrico multicanale tradizionale, in grado alimentare i ponti estensimetrici e fornire un'uscita continua in tensione di alto livello proporzionale alle deformazioni rilevate dagli estensimetri di misura. Questi segnali in tensione, insieme con segnali di deflessione della sospensione primaria (utilizzati per la determinazione del carico verticale  $Q$  con il metodo "tradizionale" CT descritto all'1.2.2) sono stati campionati ad alta frequenza (5000 Hz) tramite un sistema di acquisizione dedicato, in grado di correlare le misurazioni effettuate con la posizione del veicolo sulle linee di prova.

Per la determinazione dei "picchi" nel dominio spaziale "CS" è stato utilizzato un algoritmo di ricerca automatica della "finestratura" per l'isolamento degli stessi e per ripulire il segnale da eventuali "oscillazioni" indesiderate dovute, per esempio, a vibrazioni proprie del disco ruota. Allo stesso scopo ai segnali di tipo "CT" è stato applicato un filtro passa basso di 40 Hz.

**2.2.3.) Incertezze di misura.** La determinazione delle incertezze di misura delle forze di contatto misurate attraverso sale montate strumentate non è un processo semplice. Quale documento guida, specifico per le sale di misura, risulta noto agli autori soltanto il rapporto ORE B10/14 [34] del 1974. Esso richiede di esprimere un certo numero di caratteristiche metrologiche separatamente. L'orientamento più recente relativamente all'espressione delle incertezze (v. ad esempio la norma europea sperimentale ENV 13005:2000 [5]) richiede invece, per ciascuna grandezza fisica misurata (nel caso specifico una forza di contatto), di fornire piuttosto un solo valore, l'incertezza tipo combinata, calcolata combinando le diverse fonti di incertezza utilizzando le classiche formule di "propagazione degli errori". Per le sale di misura, che vengono comunque sottoposte a prove su un banco apposito prima di essere utilizzate, è utile un approssimativo in due o tre stadi:

- 1) determinazione dell'incertezza della sala strumentata nella misura della forza di interesse nelle condizioni di prova al banco;

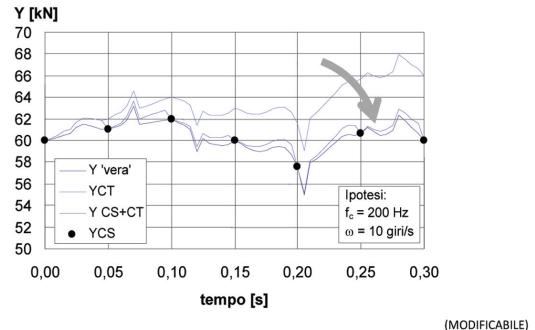


Fig. 5 - Esempio qualitativo dell'allineamento del segnale YCT al segnale YCS, in presenza di una fortissima deriva del primo (esagerata allo scopo di evidenziare il tipo di errore commesso con questa operazione). Qualitative example of the alignment of the YTBS signal to the YDBS signal, when the former is affected by a huge signal drift (exaggerated so as to highlight the type of error associated with this operation). ( $Y$  'vera' =  $Y$  true'; CT = TBS; CS = DBS).

tional to the strain under the gauges. These voltages, together with the primary suspension deflection signals (used for the determination of wheel load  $Q$  with the traditional TBS method described in 1.2.2) were sampled at high frequency (5000 Hz) by means of a dedicated acquisition system capable of correlating the measurements with the position of the vehicle along the test tracks.

For the determination of the "peaks" in the spatial domain (DBS) a specific peak detection algorithm was used. This algorithm automatically windowed the bridge signals in order to isolate the peaks and then eliminated eventual undesired oscillations, such as those caused by natural wheel vibrations, all in real time. For the same purpose the TBS signals were low-pass filtered with a 40 Hz cut-off frequency.

**2.2.3.) Measurement uncertainties.** The determination of the uncertainties associated with the measurement of contact forces by means of instrumented wheelsets is not a simple process. The only specific guideline document known to the authors is the ORE report B10/14 [34] of 1974. It requires the expression of a certain number of metrological characteristics separately. On the other hand, the more recent approach to the expression of uncertainties (see e.g. European experimental norm ENV 13005:2000 [5]) requires the provision of a single value of uncertainty, the combined standard uncertainty, for each measured physical quantity (specifically, contact force). This value of uncertainty is calculated by combining the different sources of uncertainty with the classical error propagation formulae. For instrumented wheelsets, that in any case undergo tests on a suitable test bench before being used for on-track tests, a two or three stage approach is useful for the determination of uncertainties:

- 1) determination of the uncertainty of the forces measured by the instrumented wheelset in the conditions of the bench tests;

## SCIENZA E TECNICA

2) combinazione dell'incertezza 1) con l'incertezza associata alle fonti che differenziano le condizioni di misura in linea da quelle di prova al banco;

3) a seconda della configurazione del carrello di misura, il calcolo può essere poi integrato dalla verifica in linea di alcune semplici relazioni fisiche quali l'equilibrio nella direzione laterale  $y$  (ad esempio, in rettilineo la somma dei valori medi delle forze  $Y$  su un carrello deve essere nulla con buona approssimazione).

Le difficoltà associate al passo 1) sono legate al fatto che nessun banco di taratura può essere dotato di un'accuratezza di almeno un ordine di grandezza migliore di quella dello strumento in taratura, come richiesto dalla teoria. La valutazione deriva quindi dall'esame degli scarti tra due strumenti di misura (sala e banco) ugualmente accurati, considerando il fatto che le funzioni di graduazione della sala sono ricostruite in funzione dei carichi misurati dal banco, per cui non sono due misure indipendenti. Nel presente lavoro la media quadratica degli scarti in condizioni di carico variabili viene presa come quantificazione approssimata dell'incertezza tipo dovuta a questo primo contributo. Con i banchi utilizzati da ALSTOM e SAPIENZA, tale media è pari a circa 0,5 kN per le forze  $Y$  e  $Q$ , che costituisce un contributo indipendente dal metodo di misura adottato e anche piuttosto significativo.

Il passo 2), nel caso specifico, ha dato luogo all'identificazione delle seguenti sorgenti di incertezza che non sono presenti al banco:

- rilievo dei picchi dei segnali "CS": è funzione della velocità di marcia, e delle frequenze di campionamento e di filtraggio scelte; la stima di questo contributo, basato sulla forma dei segnali stessi, è quantificata in 0,1 kN;
- inerzia lineare: è dovuta al fatto che le forze di contatto non si traducono soltanto in deformazione in corrispondenza degli estensimetri ma sono necessarie per sostenere le accelerazioni del materiale della ruota, dando luogo ad un errore che è proporzionale al quadrato della frequenza di oscillazione; una quantificazione accurata richiede uno studio teorico-sperimentale approfondito; sulla base dell'esperienza e con considerazioni qualitative che, partendo dalla massa della sala, consentono di stimare la massa interessata nella misura, si ottiene un valore massimo per la forza  $Y$  dell'ordine di 0,5 kN, ed un'incertezza tipo dell'ordine di 0,2 - 0,3 kN, con un contributo praticamente trascurabile per la forza  $Q$ ;
- deriva nel mezzo giro ruota tra un allineamento e l'altro: è il contributo caratteristico del metodo descritto per il rilievo di  $Y$  ed è valutabile nell'ordine di 0,01 kN, considerando le derive osservate dei segnali CT;
- angolo di attacco della sala montata: lo spostamento in avanti della forza  $Y$  che si ha in curva dà luogo a lievi alterazioni dello stato di deformazione; il contributo è stato considerato di un ordine di grandezza minore di quello generato dalla variabilità radiale del braccio della  $Y$  stessa al variare della posizione del contatto (incluso nella valutazione 1) per cui è stato trascurato;

2) combination of uncertainty 1) with the uncertainty associated with the sources that differentiate the on-track test-conditions from the bench test-conditions;

3) depending on the configuration of the instrumented bogie, the uncertainty calculation can be integrated by the verification during the on-track tests of simple physical relationships such as the equilibrium condition in the lateral direction  $y$  (for example, on straight track the sum of the mean values of the forces  $Y$  on a bogie should be zero with good approximation).

The difficulties associated with step 1) derive from the fact that no existing test bench has an accuracy that is of an order of magnitude better than that of the instrumented wheelset that is being calibrated, as the theory would require. The assessment of uncertainty thus derives from the analysis of the matching errors between two instruments - instrumented wheelset and bench - that are equally accurate, considering also the fact that the wheelset force-signal relationships are reconstructed on the basis of loads applied and measured by the bench, therefore the two measurements of the applied loads are not independent. For the instrumented wheelset described here, the variance of the matching errors under variable load conditions is taken as an approximate quantification of the uncertainty due to this first contribution. With the benches used by ALSTOM and SAPIENZA, this amounts to about 0.5 kN for forces  $Y$  and  $Q$ . This is a contribution that does not depend on the adopted measurement system and it proves to be quite significant.

Step 2), in the specific case dealt with here, gives rise to the following uncertainty sources that are not present on the bench:

- peak detection for DBS signals: the uncertainty is a function of running speed and of the chosen sampling and filtering frequencies; an estimation of the contribution based on the shape of the signals leads to a value of about 0.1 kN;
- linear inertia: it derives from the fact that the contact forces do not contribute only to generate strain under the gauges but also to sustain the acceleration of the wheel material, giving rise to an error that is proportional to the square of the oscillation frequency; an accurate quantification requires in-depth theoretical and experimental studies; on the basis of experience and qualitative considerations on the mass of material interested in the measurement, a maximum value of error on the lateral force  $Y$  of the order of 0.5 kN is obtained, which corresponds to a standard uncertainty of the order of 0.2 - 0.3 kN, while the contribution is practically negligible on wheel load  $Q$ ;
- signal drift during the semi-rotation occurring between alignments: this is the characteristic contribution of the method described here for the measurement of  $Y$  and it is estimated at about 0.01 kN on the basis of the observed signal drifts on TBS signals;
- wheelset angle of attack: the forward displacement of the lateral force  $Y$  that occurs on curved track generates slight alterations to the wheel-disc strain-state; this contribution is considered negligible, of an order of magni-

## SCIENZA E TECNICA

- derive proprie della strumentazione utilizzata (indipendente dal metodo di misura).

Componendo i contributi di cui sopra, si può stimare in circa 0,6 kN l'incertezza tipo combinata di misura della  $Y$  di cui alla ENV 13005:2000.

È da notare che, come in molte sale di misura, l'errore commesso è variabile in funzione dell'angolo di rotazione della ruota. In particolare, lo è, per la sala qui descritta, quello sulla forza  $Y$ , anche se in maniera molto leggera. Infatti, l'errore dovuto alla deriva è di pochissimo più elevato negli istanti precedenti un allineamento. Per i sistemi con correzione di guadagno, le variazioni di errore di questo tipo sono di entità molto maggiore - si pensi agli istanti in cui la sensibilità del segnale alternato alle forze è intorno allo zero e quindi la correzione di guadagno è elevata. In ogni caso, per il caso qui presentato il calcolo dell'incertezza tipo combinata tiene in considerazione questa variabilità nella funzione di densità di probabilità attribuita a ciascuna fonte di errore.

Si può osservare che i contributi principali all'incertezza complessiva sono quello dovuto al banco di taratura, indipendente dal metodo utilizzato e funzione della qualità del banco, e quello dovuto all'inerzia del materiale tra contatto e trasduttori, già piuttosto ridotto visto che si misura sulla ruota.

Riguardo al contributo del banco, quelli statici sono capaci di offrire, a parità di accuratezza dei trasduttori, accuratezze di misura delle forze impresse generalmente migliori di quelli dinamici, nei quali occorre tenere in conto la maggiore complessità della misura (necessità di correzioni per l'inerzia degli elementi interposti tra trasduttori e punti di applicazione delle forze, maggiori difficoltà di realizzazione delle misure su organi rotanti del banco, maggior numero di elaborazioni necessarie e quindi di errori che si propagano). L'incertezza associata al passo 1), ossia quella propria del banco, è dunque, in linea di principio, migliore per i banchi statici, mentre per essi l'incertezza di cui al punto 2), ossia quella corrispondente alle fonti che differenziano le condizioni di misura in linea da quelle di prova al banco, comprende una fonte in più, costituita dalla rotazione della sala che sul banco non può essere realizzata. Non ci si attendono quindi grosse differenze nelle incertezze di misura in linea associate ai due casi di taratura al banco statico o dinamico.

### 2.3. Vantaggi

La ricerca svolta è stata mossa dalla necessità di migliorare la qualità della misura delle forze di interazione in termini di rapporto costi / efficacia. A dimostrazione del successo della ricerca, il sistema presentato in questo articolo mostra una serie di vantaggi difficilmente riscontrabili contemporaneamente su una sola sala di misura. Essi sono riassunti ai seguenti punti.

- I principi del metodo sono applicabili senza modifiche ad un gran numero di tipi di ruota (vedi CORAZZA [23]). Non è necessario studiare configurazioni particolari a

tude less than that generated by the radial movement of the lateral force line-of-action as contact moves from tread to flange (contribution which is included in step 1);

- signal drifts due to measurement chain characteristics (independent of the measurement method).

The contributions listed above result in a value of 0.6 kN for the combined standard uncertainty of the lateral force  $Y$  according to ENV 13005:2000.

It is important to note that measurement error is variable during wheelset rotation, as in most instrumented wheelsets. In particular, for the wheelset described here a very slight variability occurs for the lateral force  $Y$ . In fact, the error due to signal drift is very slightly higher in the instants preceding an alignment. For systems with gain correction this type of error can be much higher - for example during the instants in which the alternating bridge signals are crossing zero volts the intrinsic sensitivity is very low and has to be compensated with high gain. In any case, this error is considered here in the probability density function attributed to each error source in the calculation of combined standard uncertainty.

In conclusion the main contributions to the overall measurement uncertainty are those connected with the test bench, which is independent of the method used and is rather a function of the quality of the bench, and the inertia of the material between the contact and the transducers which is relatively low due to the fact that the measurement is wheel-based.

As to the test bench contribution, static benches are capable of providing generally better accuracy on the applied forces with respect to dynamic benches. In fact, for the latter there is a higher measurement complexity (need for correction for the inertia of the elements between transducers and force application points, greater difficulty of the measurements on rotating parts of the bench, longer error propagation chain). The uncertainty associated with step 1) - intrinsic in the bench - is therefore in general better for static benches, whereas for these the uncertainty associated with step 2) - due to the differences between bench test conditions and on-track conditions - comprises an additional uncertainty source due to wheelset rotation that cannot be realised on the bench. Therefore, the overall uncertainties associated to static benches and dynamic benches cannot be expected to be very different.

### 2.3. Advantages

The research described here was driven by the need to improve the quality of interaction force measurements in terms of cost / effectiveness ratio. The success of the research is testified by the series of advantages offered by the system presented in this article. It is hard to find these advantages simultaneously on a single type of instrumented wheelset. The main advantages are listed in the following points.

- The principles of the method are applicable without modifications to a wide variety of wheel types (see CORAZZA [23]). It is not necessary to devise specific

## SCIENZA E TECNICA

seconda del tipo di ruota, come accade invece in altre realizzazioni.

- Le derive di segnale sono bassissime, paragonabili a quelle ottenibili con rilievi sull'assile, con tutti i vantaggi della misura su ruote (banda passante più elevata e ridotto contributo dell'inerzia del materiale data la vicinanza dei trasduttori alla zona di contatto, possibilità di applicazione a veicoli con ruote indipendenti, riduzione delle difficoltà di collocazione degli estensimetri sulle sale motrici, facilità nel tenere conto della posizione della retta di azione di  $Q$ , possibilità di misura durante le fasi di trazione e frenatura<sup>(4)</sup>).
- L'accuratezza della misura della forza  $Y$  è elevata, essendo i) ridotte le derive di segnale; ii) non necessaria alcuna correzione dei segnali in funzione dell'angolo di rotazione; iii) corretto in maniera sistematica l'effetto delle variazioni dell'entità e della posizione del carico  $Q$ ; iv) ridotto il contributo dell'inerzia.
- L'elaborazione dei segnali è relativamente semplice e consente pertanto una diagnostica altrettanto semplificata. La correttezza dei segnali grezzi è determinabile facilmente anche a occhio durante i rilievi. Questo consente di capire facilmente, durante le prove di tattatura quali siano le eventuali modifiche da adottare per migliorare l'accuratezza della misura.
- I raggi di incollaggio degli estensimetri possono essere determinati con mezzi sperimentali semplici e senza necessità di lavorazione della ruota. Addirittura, ricerche effettuate relativamente alla possibilità di tarare una salla montata senza l'utilizzazione del banco (cioè con martinetto interposto tra le ruote per la forza  $Y$  + analisi numerica FEM) hanno dato risultati promettenti.
- Il principio del metodo può dar luogo a numerose varianti realizzative in funzione delle risorse a disposizione, con un numero di canali richiesti che rimane comunque relativamente ridotto. La configurazione minima se si vuole misurare sia  $Q$  che  $Y$  prevede 3 punti estensimetrici per ruota, con i quali si possono ottenere l'entità delle due forze due volte al giro di ruota. Con un quarto ponte si ottiene la continuità della misura di  $Y$ . Con ulteriori punti si può aumentare a piacere il numero di campioni per giro della  $Q$ . A seconda dei fini della misura, quindi, possono essere realizzate sale economiche con caratteristiche metrologiche sufficienti per arrezzare un numero elevato di veicoli o sale più costose, con caratteristiche metrologiche migliori, più adatte a misure su un solo rotabile<sup>(5)</sup>.

<sup>(4)</sup> L'effetto delle forze longitudinali alle ruote sulle deformazioni radiali dei dischi ruota è infatti trascurabile, e le sollecitazioni introdotte sulla sala montata da parte della corona della trasmissione o dei dischi freno non hanno praticamente influenza.

<sup>(5)</sup> Ad esempio ai fini dell'autorizzazione alla messa in servizio si possono prevedere, per la misura di  $Q$ , 4 ulteriori punti per ruota per ottenere un numero sufficiente di campioni sulla distanza richiesta dalle norme di 2 m.

configurations according to the type of wheel, differently from other implementations.

- Signal drift is extremely low and comparable with that obtainable with axle-based measurements. At the same time, all advantages of wheel based measurements are present (higher bandwidth, low contribution of inertia thanks to the proximity of the transducers to the contact zone, possibility of application to vehicles with independently rotating wheels, lower difficulty to apply strain gauges on powered wheelsets, ease in accounting for lateral position of wheel-load line-of-action, possibility to measure during traction and braking)<sup>(4)</sup>.
- The measurement accuracy of the lateral force  $Y$  is high, due to i) low signal drift; ii) absence of signal correction for wheelset rotation angle; iii) systematic correction for the effects of variations in lateral position of wheel-load line-of-action; iv) low inertia contribution.
- Signal processing is relatively simple and requires a consequently simple diagnostic system. The correctness of raw signals can be determined easily just by looking at them during the measurements. This also allows to understand easily the modifications needed to improve measurement accuracy when calibrating the wheelset.
- Strain gauge application points can be determined with simple experimental tools and without the need to machine the wheel beforehand. Moreover, the research performed to determine the possibility to develop and calibrate a wheelset without a test bench (e.g. with a hydraulic jack between the wheels for the lateral force + numerical FEM analysis) has shown promising results.
- The principle of the method can give rise to numerous implementations on the basis of the available resources, with a number of channels required that remains in any case relatively low. The minimum configuration for the measurement of both  $Q$  and  $Y$  requires 3 Wheatstone bridges per wheel, with which the value of the two forces can be obtained twice every wheelset revolution. With a fourth bridge the continuity in the measurement of  $Y$  is obtained. With additional bridges the number of samples per revolution for the wheel load can be increased to any desired number. Therefore, depending on the purposes of the measurement it is possible to realise inexpensive wheelsets with acceptable metrological characteristics to fit a large number of vehicles or, rather, more expensive wheelsets with improved metrological characteristics more suitable for measurements on a single vehicle<sup>(5)</sup>.
- No alterations to the wheelset are required.

<sup>(4)</sup> The effect of the longitudinal forces acting on the wheels on wheel-disc radial strain is in fact negligible, and the loads introduced on the wheelset by transmission gear-wheels or braking discs have practically no influence.

<sup>(5)</sup> For example, for the purpose of rolling stock authorisation it is possible to consider 4 additional bridges per wheel to obtain a sufficient number of samples on the required distance of 2 m for the measurement of  $Q$ .

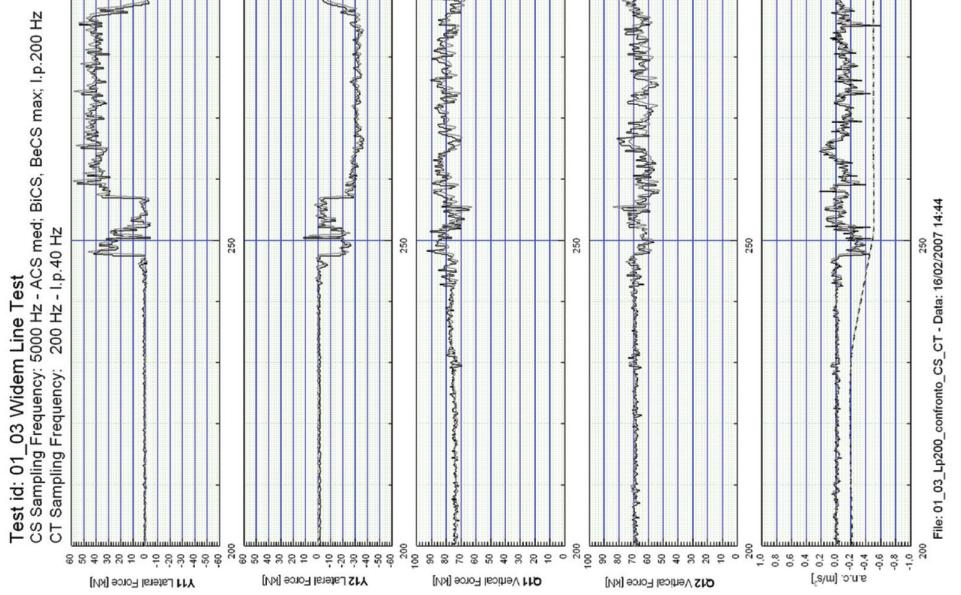


Fig. 6 - Registrazione delle forze laterali e verticali rilevate dalla sala di misura in posizione anteriore. Tratto percorso in posizione di contatto. Recording of lateral and vertical forces measured by the instrumented wheelset in the leading position. Track section run at low speed and unbalanced lateral acceleration, chosen among the ones with high contact force variability.

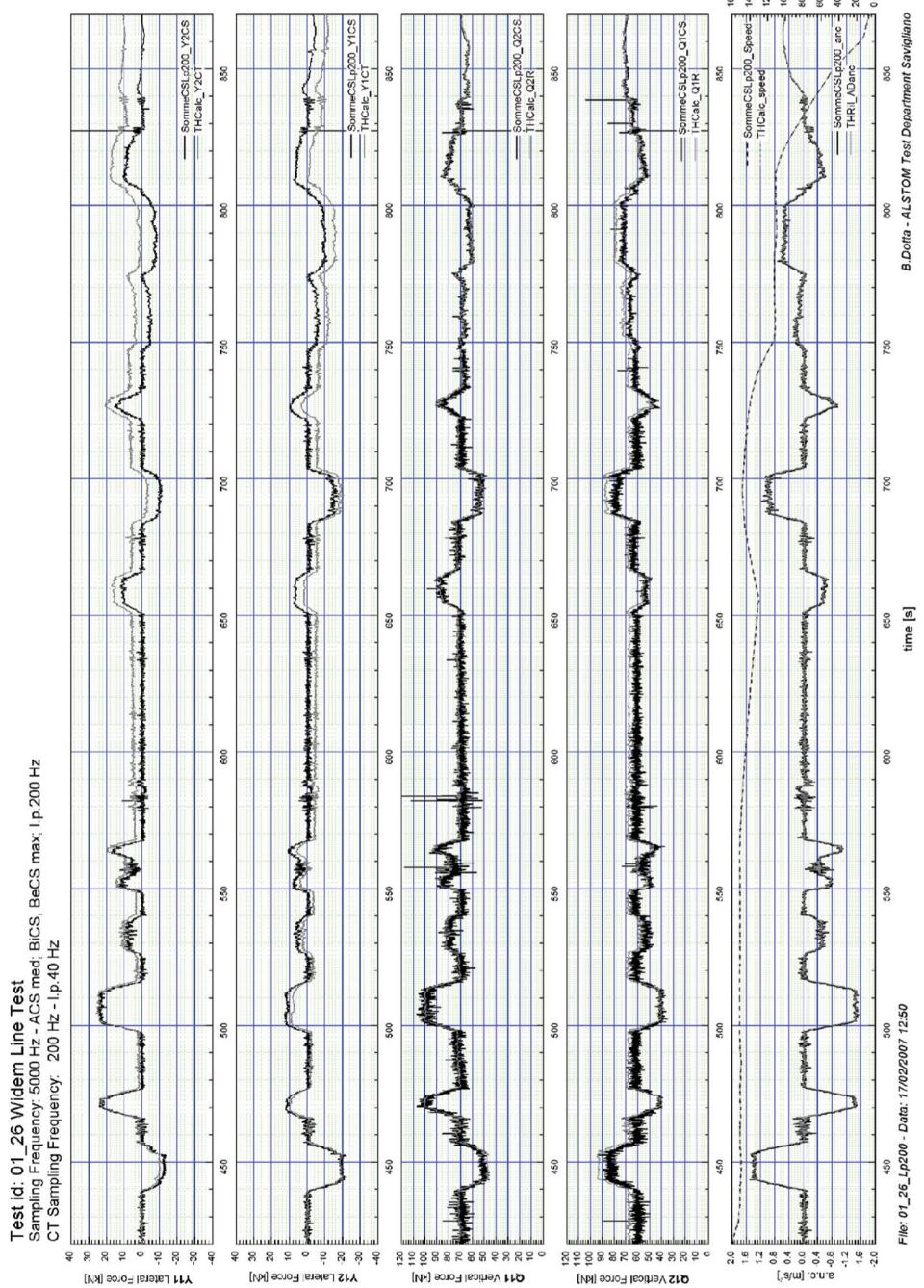


Fig. 7 – Registrazione delle forze laterali e verticali rilevate dalla sala di misura in posizione posteriore (si precisa che, essendo una la sala di misura, è impossibile associare ad ognuna delle due figure le corrispondenti relative all'altra posizione rispetto al senso di marcia). Tratto percorso a media velocità e alta accelerazione non compensata.  
*Recording of the lateral and vertical forces measured by the instrumented wheelset in the trailing position (note that there is only one instrumented wheelset, thus it is not possible to associate the two figures). Track section run at medium speed and high unbalanced lateral acceleration - instrumented wheelset trailing.*

## SCIENZA E TECNICA

### 2.4. Esempi di rilievi

Le figg. 6 e 7 mostrano delle registrazioni di alcuni minuti relativi alle forze rilevate dalla sala di misura. La sala è stata montata sotto il treno di misura ad inizio del mese di giugno 2006 ed ha circolato durante l'estate, percorrendo circa 10.000 km, sulla rete della Repubblica Ceca (le figure si riferiscono alla linea Prerov-Petrovice, in tratti caratterizzati da curve di piccolo raggio, scelti tra quelli che mostravano un'elevata variabilità delle forze di contatto). Allo smontaggio la sala risultava in buono stato con tutti i canali funzionanti.

Relativamente a ciascuna figura, nei due grafici in alto sono sovrapposti i segnali YCS a campionamento spaziale e i segnali YCT a campionamento temporale delle due ruote di misura. Nei due grafici intermedi sono riportati i segnali QCS a campionamento spaziale, rilevati dalle ruote di misura, e i segnali QCT a campionamento temporale, rilevati tramite la sospensione primaria. Nel grafico in basso sono riportate velocità di marcia e accelerazione non compensata, quest'ultima misurata tramite inclinometro montato sul corpo boccola. I segnali YCT sono volutamente non corretti, in modo da evidenziare le derive termiche e inerziali. I segnali di forza sono quelli acquisiti, senza alcuna correzione a posteriori.

La fig. 6 si riferisce ad un tratto di binario con difettosità piuttosto elevata percorso a bassa velocità, mentre la fig. 7 si riferisce a un tratto con difettosità inferiore percorso a velocità più elevata.

Si possono fare le seguenti osservazioni.

- I segnali YCS (neri) hanno gli stessi andamenti di quelli YCT (grigi) ma sono praticamente privi di deriva. Ciò si osserva anche in condizioni di binario di qualità non elevata, come per esempio nel primo tratto di curva della fig. 6, caratterizzato da sollecitazioni quasi impulsive. Anche nei tratti immediatamente a valle degli istanti 250s e 350s, caratterizzati da brusche variazioni di forze (dovute molto probabilmente a irregolarità di curvatura), le anomalie di segnale sono ridottissime.
- Nella Fig. 7 l'arresto del treno avviene all'inizio di una curva. Poco prima dell'arresto viene percorso un breve tratto di rettilineo, nel quale i segnali CS tornano regolarmente ai loro valori iniziali, a testimonianza della assenza di deriva. La misura di  $Y$  appare corretta al momento dell'arresto.
- I segnali QCS (neri) hanno gli stessi andamenti di quelli QCT (grigi). Anche in questo caso le anomalie di segnale sono ridottissime. Si osservano in fig. 7, in velocità e su una sola ruota, delle sottostime del valore di carico verticale che vanno ulteriormente indagate.

### 3. Conclusioni

Messi di fronte alla scelta di un sistema di misura estensimetrico delle forze di interazione ruota-rotaia, occorreva, fino allo stato attuale dell'arte, scendere ad alcuni compromessi.

### 2.4. Examples of measurements

The following charts show recordings of a few minutes of the forces measured by the instrumented wheelset. The wheelset was fitted under the measurement train in early June 2006 and travelled during the summer for about 10,000 km on the Czech network (the charts refer to the Prerov-Petrovice line, in section characterised by low-radius curves, chosen among the ones that showed a high variability of contact forces). Once removed from the train the wheelset was in good order with all channels functioning.

In each chart the two top graphs show the lateral force TBS and DBS signals overlapped for the two wheels. The middle graphs show the same for the wheel loads Q measured by the instrumented wheels in DBS and through the primary suspension through TBS. The bottom graph shows running speed and unbalanced lateral acceleration, the latter measured with an inclinometer on the axlebox. The YTBS signals are intentionally not corrected so as to highlight the thermal and inertial signal drift. The force signals are exactly the ones acquired, with no post-processing.

Fig. 6 refers to a section of track with quite a high geometric irregularity traversed at low speed, while fig. 7 refers to a section with lower irregularity and higher running speed.

The following remarks can be made.

- The YDBS signals (black) have the same overall shape as the YTBS signals (grey) but they are practically unaffected by signal drift. This can be observed even with fairly uneven track, such as in the first part of the first curve in fig. 6, characterised by loads that are almost impulsive. Even in the sections of track traversed immediately after times 250 s and 350 s, characterised by rapid force variations (most probably due to irregularities in the curvature), signal anomalies are almost absent.
- In fig. 7 the train stops at the beginning of a curve. Just before the stop a short section of straight track is traversed, in which the DBS signals regularly return to their initial values and testify the absence of signal drift. The measured lateral force appears to be correct even at the moment of the stop.
- The wheel-load DBS signals (black) show the same overall shape of the TBS signals (grey). Even in signal anomalies are extremely low. In fig. 7 underestimates of the value of the wheel load were evident at speed and on one wheel, requiring further investigation.

### 3. Conclusions

When put in front of the choice of a wheel-rail interaction force measurement system based on strain-gauges, up till today it was necessary to make some compromises.

The first choice to be made was between wheel and axle. Measurement on the axle rules out the possibility of measuring lateral force and wheel load on vehicles with indepen-

## SCIENZA E TECNICA

La prima scelta consisteva nello scegliere se misurare sulla ruota o sull'assile. La misura sull'assile esclude la possibilità di misurare le forze laterali  $Y$  e verticali  $Q$  su veicoli a ruote indipendenti e rende difficile la corretta misura delle stesse in presenza di coppie di trazione o frenatura applicate all'assile, nonché di considerare con buona accuratezza l'effetto della posizione della retta di azione di  $Q$ . Essa è affetta anche dall'influenza non trascurabile dell'inerzia del materiale compreso tra punti di contatto e trasduttori.

Volendo scegliere la ruota, occorreva scegliere tra:

- sistemi a segnali alternati, praticamente privi di derive ma necessitanti di correzioni, complesse e causa di incertezze aggiuntive, dei segnali in funzione dell'angolo di rotazione della ruota, nonché di complessi algoritmi di elaborazione e di diagnostica;
- sistemi a segnali continui, dall'elaborazione e diagnostica semplificate ma necessitanti di correzioni semi-empiriche delle derive, durante la marcia o a posteriori.

La versione del metodo CML presentata in questo lavoro si annovera tra i sistemi a segnali continui per la misura della forza  $Y$ , con la novità di avere la correzione delle derive intrinseca e ad elevata frequenza (almeno 2 volte a giro ruota). Essa presenta pertanto tutti i vantaggi della misura sulla ruota, caratterizzata da relativa semplicità di taratura, elaborazione e diagnostica utilizzando un numero di canali non eccessivo. Si conferma inoltre come buona metodologia per il rilievo diretto delle forze verticali a campionamento spaziale, le cui difficoltà, che si ritengono superabili, sono compensate dall'entità ridottissima del contributo inerziale all'incertezza.

Con questa versione, ed anche con versioni ulteriormente semplificate (dall'accuratezza minore ma dal costo ridotto), si possono prospettare, vista la lunga durata possibile per i rilievi senza interventi esterni, applicazioni a fini di diagnostica oppure, come per il progetto WIDEM, rilievi di spettri di carico. La sala di misura è altresì adatta all'autorizzazione alla messa in servizio, a patto di prevedere un numero sufficiente di ponti estensimetri a campionamento spaziale per la misura della forza  $Q$ .

dently rotating wheels and leads to difficulties in measuring correctly when there are traction or braking loads applied to the axle. It is also difficult to consider accurately the lateral position of the wheel-load line-of-action. The measurement is also affected by the non negligible influence of the inertia of the material comprised between contact and transducers.

Having chosen the wheel, it was necessary then to choose between:

- systems with alternating bridge signals, practically unaffected by signal drift but requiring complex corrections of the signals depending on wheel rotation, moreover causing additional uncertainty, as well as complex processing and diagnostics algorithms;
- systems with continuous bridge signals, with simplified processing and diagnostics but requiring semi-empirical corrections of signal drift, while running or in the post-processing phase.

The version of the CML method presented in this paper is a system with continuous bridge signals for the measurement of the lateral force  $Y$ , with the novelty of intrinsic high-frequency signal drift correction (at least twice per revolution). Therefore it has all the advantages of wheel-based systems, such as relatively simple calibration, signal processing and diagnostics with a low number of channels. This implementation also confirms the validity of the methodology for the direct Distance-Based Sampling measurement of the wheel load  $Q$ . The difficulties of this measurement, that can be reasonably overcome in the near future, are compensated by the extremely low inertial contribution in the measurement uncertainty.

Thanks to the long periods without the need for external intervention during measurements, this version and the simpler but less expensive versions derived from it are suitable for example for condition monitoring and, as in the WIDEM project, for the reconstruction of load spectra. Moreover, the instrumented wheelset is suitable for rolling stock authorisation as long as a sufficient number of Distance-Based Sampling bridges for the measurement of wheel load  $Q$  are fitted. ad und Schiene", Glasers Annalen, pp. 153-161, 1959.

### BIBLIOGRAFIA – REFERENCES

- [1] "Direttiva Interoperabilità" – Direttiva 2008/57/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 17 giugno 2008 relativa all'interoperabilità del sistema ferroviario comunitario (rifusione).
- [2] "STI Materiale Rotabile Alta Velocità" – 2008/232/CE: Decisione della Commissione, del 21 febbraio 2008, relativa una specifica tecnica di interoperabilità per il sottosistema materiale rotabile del sistema ferroviario transeuropeo ad alta velocità [notificata con il numero C(2008) 648].
- [3] EN 14363:2005 "Railway applications – Testing for the acceptance of running characteristics of railway vehicles – Testing of running behaviour and stationary tests".
- [4] "Direttiva Sicurezza" – Direttiva 2004/49/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 29 aprile 2004 relativa alla sicurezza delle ferrovie comunitarie e recante modifica della direttiva 95/18/CE del Consiglio relativa alle licenze delle imprese ferroviarie e della direttiva 2001/14/CE relativa alla ripartizione della capacità di infrastruttura

## SCIENZA E TECNICA

ferroviaria, all'imposizione dei diritti per l'utilizzo dell'infrastruttura ferroviaria e alla certificazione di sicurezza ("Direttiva sulla sicurezza delle ferrovie").

- [5] Impact Assessment Study on amendments to the rail access legislation in the framework of the recast of the 1<sup>st</sup> railway package, Contract No TREN-08-ST-SI2.502764, Final Report.
- [6] ENV 13005:2000 "Guide to the expression of uncertainty in measurement".
- [7] E. GÓMEZ MARTÍN, "Desarrollo de Técnica Avanzadas para la Medición de Esfuerzos Rueda/Carril en Trenes de Alta Velocidad", tesi di dottorato, Universidad de Navarra, San Sebastián, 2007.
- [8] G.B. BROGGIATO, E. COSCIOTTI, "Ottimizzazione della disposizione di ponti estensimetrici sulle sale ferroviarie nella misura delle forze di contatto ruota-rotaia", Ingegneria Ferroviaria, n. 11, pp. 879-889, 2006.
- [9] R.V. LICCIARDELLO, G.B. BROGGIATO, M. BRUNER, G.R. CORAZZA, E. COSCIOTTI, G. MALAVASI, "A Comparative Study of the Results of Field Tests carried out with different Contact Force Measurement methods", Proceedings of the World Congress on Railway Research (WCRR'06), 2006.
- [10] R.V. LICCIARDELLO, "Introduction to the Experimental Evaluation of the Dynamics of Railway Vehicles", Monograph, Rail Vehicle Dynamics and associated Problems, Aleksander Sładek Editor, pp.89-113, Gliwice, 2005.
- [11] J. ROMEN, "A Wheelset for the Study of Railway Vehicle and Track Interaction Forces". Monograph, Rail Vehicle Dynamics and associated Problems, Aleksander Sładek Editor, pp.115-121, Gliwice, 2005.
- [12] G.B. BROGGIATO, "Costruzione di un modello numerico di supporto al confronto tra diverse configurazioni estensimetriche per la misura delle forze di contatto ruota-rotaia". AIAS (Associazione Italiana Analisi delle Sollecitazioni), XXXIV Convegno Nazionale, Milano, 2005.
- [13] G.B. BROGGIATO, E. COSCIOTTI, M. AURELI, "Modellazione FEM del comportamento statico e dinamico delle sale ferroviarie di misura", Seminario Tecnico sull'utilizzo del software Ansys/CivilFEM nell'analisi strutturale di problematiche avanzate, [http://www.harpaeas.it/sito/simple.nsf/PagOK/Presentazioni\\_Ansys\\_Roma\\_11\\_11\\_2005](http://www.harpaeas.it/sito/simple.nsf/PagOK/Presentazioni_Ansys_Roma_11_11_2005), Roma, 11 novembre 2005.
- [14] M. BRUNER, G.R. CORAZZA, E. COSCIOTTI, R.V. LICCIARDELLO, G. MALAVASI, "Y- und Q-Kraftmessung – Analyse und Felderfahrungen eines neuen Verfahrens", ZEV+DET Glasers Annalen, Sonderheft Tagungsband 35. Tagung Moderne Schienenfahrzeuge Graz Austria, giugno 2004.
- [15] F. BRAGHIN, S. BRUNI, S. CERVELLO, A. CIGADA, F. RESTA, "A New Method for the Measure of Wheel-Rail Contact Forces", Proceedings of the 6th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2003), Gothenburg, Sweden, Vol. II, pp. 313-320, 2003.
- [16] G.B. BROGGIATO, M. BRUNER, R.V. LICCIARDELLO, "Studio numerico-sperimentale delle deformazioni di una sala ferrovia di misura", AIAS (Associazione Italiana Analisi delle Sollecitazioni), XXXII Convegno Nazionale, Salerno, 2003.
- [17] M. BRUNER, E. COSCIOTTI, R.V. LICCIARDELLO, "On-board Measurement of Wheel/Rail Contact Forces for Research Purposes", International Seminar on Railway Axles, Imperial College, London, settembre 2003.
- [18] H. KANEHARA, K. OHNO, "Development of a Continuous Measuring System for Contact Position between Wheel and Rail toward Clarification of Derailment Mechanism", JR EAST Technical Review No. 2, pp. 54-60, 2003.
- [19] W. BREUER, P.J. GAEDE, "Die Querkräfte der Hochleistungslokomotiven der Reihe 1016/1116", ZEV - Glasers Annalen, Vol. 126, N. 5, pp. 190-199, 2002.
- [20] R.V. LICCIARDELLO: "Il rilievo in linea dei parametri di interazione ruota/rotaia come strumento di ricerca – Identificazione sperimentale dei parametri fondamentali dei modelli teorici di simulazione", tesi di dottorato, Università degli Studi "La Sapienza", Roma, dicembre 2002.
- [21] E. BENIGNI, F. BRAGHIN, S. CERVELLO, A. CIGADA, F. RESTA, "Determinazione delle forze di contatto tra ruota e rotaia a partire da misure di deformazione dell'assile", Ingegneria Ferroviaria, n. 12, p. 1059-1075, 2002.
- [22] V.M. MIKHAILENKO, S.V. MYAMLIN, D.A. YAGODA. "On the Problem of Measurement of Wheel/Rail Interaction Forces", 10th International Conference on the Problems of Railway Transport Mechanics, Dnepropetrovsk, Ukraine, 2000.
- [23] G.R. CORAZZA, R.V. LICCIARDELLO, G. MALAVASI, "The Wheel as Sensor of Interaction between Wheel and Rail", World Congress on Railway Research (WCRR'99), 1999.
- [24] G.R. CORAZZA, G. MALAVASI, R. LICCIARDELLO, M. MARCONE, "La ruota come sensore di interazione ruota-rotaia", Ingegneria Ferroviaria, n. 3, 1999.
- [25] AFNOR, "Application ferroviaires. Comportement dynamique des véhicules vis-à-vis de la voie. Méthodes de mesure des forces". Norma francese, 1998.

## SCIENZA E TECNICA

- [26] H. BERG, G. GöRLING, H. ZÜCK, "Radsatzwelle und Radscheibe - die richtige Kombination zur Messung der Kräfte zwischen Rad und Schiene", ZEV - Glasers Annalen, Vol. 120, n. 2, pp. 40-47, 1996.
- [27] H. ISHIDA, K. FUKAZAWA, M. MATSUO, K. UEKI, K. TEZUKA, "A New Continuous Measuring Method of Wheel/Rail Contact Forces", Quarterly Reports of RTRI, Vol. 35, n. 2, pp. 105-111, 1994.
- [28] R.L. HIGGINS, D.E. OTTER, R.W. MARTIN, "High Accuracy Load Measuring Wheelset", Proceedings of the International Wheelset Congress, Sydney, Australia, pp. 181-187, 1992.
- [29] C. BIANCHI, G.R. CORAZZA, G. MALAVASI, G. MALAVASI, "Problemi della ricerca sperimentale sulle interazioni fra ruota e rotaia", Ingegneria Ferroviaria, n. 8, 1986.
- [30] J. COURTIN, B. MARMORET, "L'évolution de la mesure des efforts d'interaction roue/rail", Revue Générale des Chemins de Fer (R.G.C.F.), Vol. 105, pp. 235-242, 1986.
- [31] G.R. CORAZZA, "Possibilité de mesure directe de la poussée du boudin", Rail International, pp. 30-36, 1985.
- [32] M. OSTERMEYER, H. BERG, H.H. ZUCK, "Der heutige Entwicklungsstand der Meßmethode Radsatzwellenverfahren zur Bestimmung der Kräfte zwischen Rad und Schiene", ZEV - Glasers Annalen, Vol. 102, nr. 2, pp. 53-61, 1978.
- [33] M. ZEILHOFER, G. SÜHSMUTH, G. von PIWENITZKY, "Ermittlung der Kräfte zwischen Rad und Schiene aus den Biegedehnungen der Radsatzwelle", ZEV - Glasers Annalen, Vol. 96, Nr. 12, pp. 373-385 1972. Glasers Annalen, Letter from Dr. WEBER, p. 276, 7-8/1973.
- [34] O.R.E. (Office de Recherches et d'Essais – U.I.C. Union Internationale des Chemins de Fer), "Mesure des forces agissant entre la roue et le rail" Question B10, Rapport N. 14, 1973.
- [35] G.R. CORAZZA, "Rilievi di comportamento di ruote elastiche in condizioni reali", Ingegneria Ferroviaria, n. 6, 1972.
- [36] P.E. OLSON, S. JOHNSSON, "Seitenkräfte zwischen Rad und Schiene", Glasers Annalen, pp. 153-161, 1959.

---

### Sommaire

#### MESURES EN LIGNE DE LONGUE DURÉE DES FORCES DE CONTACTE AVEC LA MÉTHODE CML

Cet article présente des résultats obtenus par une recherche sur dix ans, à travers laquelle on a pu établir des principes simples permettant de calculer les forces de contacte sur la base des mesures des déformations (méthode CML), en partant de l'étude des propriétés fondamentales de l'état de déformation de 5 types de roues ferroviaires. La recherche a abouti dans la réalisation d'une salle instrumentale pour la mesure des forces de contacte **Q** et **Y**, cette dernière de façon continue, corrigée par rapport aux variations de la force **Q** ainsi que de la position de l'axe d'action de cette composante, pratiquement sans déviations, permettant ainsi des mesures de longue durée et sans nécessité d'alignements successifs. On élimine ainsi le désavantage principale des méthodes similaires, tout en conservant les avantages des mesures sur roues : des faibles effets d'inertie du matériel situé entre le contact et les extensomètres; des possibilités de mesure aussi sur des voitures ferroviaires à roues indépendantes; possibilité de mesure en présence de traction et freinage; chêne de mesure, procédure d'élaboration des données, réglage, calibrage et alignement relativement simples, le tout avec un numéro réduit de canaux d'acquisition.

### Zusammenfassung

#### DAUERMESUREMENTEN DER BERÜHRUNGSKRÄFTEN ZWISCHEN RAD UND SCHIENE MIT DEM VERFAHREN CML

Eine zehnjährige Forschung wurde dazu gerichtet die elastischen Eigenschaften von 5 Radscheiben Typen zu erforschen. Damit wurde die Kenntnis von einfachen grundsätzlichen, die die Messung der Kräften **Q** und **Y** mittels zweckmäßig gerüsteten Rädern erlauben. Die Beeinflussung der Kraft **Q** auf **Y** ist deutlich in Kauf genommen um stetig die notwendigen Korrekturen einzusetzen. Es wird die Stellung des Berührungs punkt der Kraft **Q** auf dem Rollprofil stetig ermittelt. Das System ist von Abtrift fast frei, was Messungen von langen Dauer ohne Korrekturen erlaubt. In diesem Verfahren ist die Trägheitswirkung des Materials zwischen Berührungs punkt und Dehnungsmesspunkten an ein Minimum geführt. Mit solchen Merkmalen werden Hauptnachteilen anderen Maßsystemen vermeidet. Das Verfahren funktioniert auch in Anwesenheit von Zug- und Bremskräften und es ist auch anwendbar mit Losrädern. Datenverarbeitung und Kalibrierung sind einfacher und alles benötigt eine minimale Zahl von Erwerbungskanäle. Es werden auch einige Messbeispiele vorgestellt.