



Campagna sperimentale di misura delle accelerazioni sulle boccole delle sale di un treno ETR 220 della Ferrovia Circumvesuviana

Experimental measurement campaign of accelerations on a Circumvesuviana's ETR 220 train on axle-bearings

Dott. Ing. Francesco MANNARA^(), Dott. Nunzio BARBATI^(*)*

1. Introduzione

La misura delle vibrazioni è da sempre utilizzata a scopo diagnostico nei più svariati campi. Si pensi alle tecniche di auscultazione in campo geologico e strutturale, che vengono ancora molto usate, e come si vanno sostituendo sempre di più con tecniche strumentali, che pur si basano su principi analoghi.

La tecnologia della misura si sta evolvendo in questi anni in modo così rapido da offrire sensori di dimensioni sempre più ridotte, precisioni maggiori e a costi molto più bassi rispetto a pochi anni fa. Tutto ciò rappresenta una vera e propria rivoluzione che si sta concretizzando nella diffusione massiccia di sensori in tutti gli oggetti che utilizziamo quotidianamente. Questo ha portato sistemi più complessi, quale ad esempio l'automobile, ad avere a bordo un numero di sensori ormai dell'ordine delle varie decine.

A bordo treno sono molteplici le misure che possono essere condotte, di cui alcune sono state finora sperimentate già da sofisticati treni diagnostici. Basti pensare ai treni Aldebaran e Archimede di RFI in grado di valutare le caratteristiche della dinamica di marcia e numerosi altri parametri di interesse per la diagnostica e la sicurezza.

Oggi, grazie allo sviluppo tecnologico, è ipotizzabile che alcune di queste misure si possano estendere in maniera diffusa anche a bordo di treni di linea utilizzando sistemi a basso costo ma comunque ad elevata affidabilità.

Ad esempio, un sistema che potrebbe fornire indicazioni di grande utilità ai fini diagnostici, attraverso lo studio dell'interazione ruota-rotella, potrebbe basarsi sulla misura delle vibrazioni a bordo treno. Allo scopo di mettere a punto un sistema diagnostico è stata condotta una campagna di misura sperimentale installando alcuni sensori accelerometrici sulle boccole di un treno ETR FE 220 di Circumvesuviana s.r.l.. Tale treno è normalmente in esercizio attrezzato

1. Introduction

The measurement of vibrations has always been used for diagnostic purposes in various fields. Think of auscultation techniques in the field of geological and structural, that are still widely used, and how they are replacing more and more with instrumental techniques, though based on similar principles.

The technology of measurement has been evolving over the years so quick as to offer ever-smaller sensors, increased accuracy and much lower costs compared to a few years ago. All this represents a real revolution that is being accomplished in the widespread distribution of sensors in all the objects that we use every day. This has brought more complex systems, such as an automobile, carrying on board a number of sensors in the order of several tens.

Many measures can be conducted aboard the train, some of which have been already tested by sophisticated diagnostic trains. Just think RFI's Aldebaran and Archimede trains, able to evaluate the characteristics of the dynamics of running and many other parameters of interest for diagnostics and security. Today, thanks to technological development, it is conceivable for some of these measures to be extended very widely even on trains using low-cost but high reliability systems.

For example, a system that could provide indications of great use for diagnostic purposes, through the study of wheel-rail could be based on the measurement of vibration on board the train. In order to develop a diagnostic system a campaign of experimental measurement was conducted installing some accelerometer sensors on a Circumvesuviana's ETR FE 220 train. This train is normally in operation equipped with a complex Plasser instrumentation (POS-TG system), that include an inertial and an

^(*) STRAGO Ricerche s.r.l., Pozzuoli (NA).

^(*) STRAGO Ricerche s.r.l., Pozzuoli (NA).

zato con una complessa strumentazione della Plasser (sistema POS-TG), dotata di sistemi inerziale e odometrico, con cui abbiamo potuto ricavare alcune informazioni fondamentali per lo sviluppo della campagna sperimentale:

- georeferenziazione della marcia treno (1 dato ogni 25cm);
- velocità puntuale (1 dato ogni 25cm).

Per le misure di vibrazione sono stati utilizzati accelerometri a tecnologia MEMS (*Micro-Electro-Mechanical-System*) perché consentono di realizzare un sistema di misura sufficientemente miniaturizzato ed economico da poter essere installato in più punti del treno.

Inoltre, Strago Ricerche ha sviluppato un opportuno sistema, installabile direttamente sulla boccola, che consente di acquisire le accelerazioni in modo diretto, piuttosto che, ad esempio, a valle di una sospensione primaria e di fornire una misura di vibrazioni indipendente dai modi di vibrare di altri elementi, e quindi sicuramente più adatta ad individuare problematiche della ruota e della rotaia.

È ragionevole supporre che attraverso lo sviluppo e un'applicazione diffusa di questo sistema di misura, una campagna di monitoraggio in continuo, su uno o più treni che percorrano sempre la stessa tratta, potrebbe tra l'altro consentire di individuare:

- le sollecitazioni standard e anomale che si registrano lungo il tracciato;
- la ripetibilità dei picchi, ossia di presumibili irregolarità, alle stesse progressive;
- l'eventuale presenza di difetti delle ruote (sfaccettature, ovalizzazione);
- l'accelerazione non compensata reale in curva;
- la presenza di sghembo di binario e gli effetti sulla marcia del treno.

Gli scopi di questa campagna sperimentale di prove con questo sistema di misura innovativo possono sintetizzarsi in:

- verifica dell'affidabilità e dei vantaggi della tecnologia impiegata;
- ricerca di fenomeni, tra quelli appena elencati, che possono essere individuati dalle registrazioni effettuate su un treno di linea.

2. Descrizione del sistema di misura

2.1. Sensoristica a tecnologia MEMS

La tecnologia MEMS consente di incorporare dispositivi meccanici di dimensioni micrometriche – ad esempio sensori, valvole, ingranaggi, specchi, attuatori – in un substrato di semiconduttore, integrandoli quindi in normali

odometric systems, by which we could get some basic information for the development of the experimental campaign:

- georeferencing of the running train (1 given every 25cm);
- speed time (1 datum every 25cm).

For vibration measurements were used accelerometers based on MEMS (*Micro-Electro-Mechanical-System*) technology, because they permit the construction of a sufficiently miniaturized and low cost measurement, so that they can be installed at various points of the train.

Furthermore, Strago Ricerche has developed a genuine system to be installed directly on the axle-bearing, which allows to acquire the acceleration directly, rather than, for example, downstream of a primary suspension and to provide a vibration measure independent of vibration modes of other elements, and therefore well suited to identify problems of wheel and rail.

It's reasonable to assume that through the development and widespread application of this measurement system, a campaign of continuous monitoring, on one or more trains that drive the same route, may also enables to identify:

- the standard and anomalous stresses that occur along the train path;
- the repeatability of the peaks, that means presumed irregularities, at the same line mileage;
- the possible presence of defects (wheel flats, out of roundness);
- the real uncompensated acceleration in curve;
- the presence of distortion of the track and the effects of the running of the train.

The goals of these experimental campaign test with this innovative measuring system can be summarized in:

- verify the reliability and advantages of the technology used;
- research of phenomena, including those just listed, which can be identified from recordings made on a railway line.

2. Description of measurement system

2.1. MEMS sensor technology

MEMS technology allows the incorporation of micrometer-sized mechanical devices – such as sensors, valves, gears, mirrors, actuators – into a semiconductor substrate, thereby integrating into normal chips and thus provide a useful and both slim and effective device for measurement of physical quantities. The interface of electronic type, sometimes already in digital form, can directly use

chip e fornendo così uno strumento utile ed al tempo stesso snello ed efficace per la misura di grandezze fisiche. L'interfaccia di tipo elettronico, talvolta addirittura già in forma digitale grazie ad appositi convertitori A/D integrati sullo stesso chip, consente di utilizzare direttamente il dispositivo all'interno di un circuito stampato.

2.2. Unità funzionale

La recente introduzione dei dispositivi MEMS (*Micro Electro-Mechanical Systems*) ha aperto un vasto campo di studi ed applicazioni in diversi settori dell'ingegneria. L'integrazione degli elementi meccanici ed elettronici sul substrato di silicio avviene attraverso processi di "microfabbricazione"; mentre tipicamente i dispositivi elettronici sono realizzati utilizzando sequenze di processi di integrazione (bipolari, CMOS, BiCMOS), i componenti micromeccanici vengono fabbricati utilizzando "micromacchine" che selettivamente eliminano parti del wafer di silicio o aggiungono layer strutturali per formare i dispositivi meccanici ed elettromeccanici.

Utilizzando un sensore accelerometrico MEMS, si è progettata e realizzata una scheda integrata, denominata Unità Funzionale (U.F.) con capacità di acquisizione, elaborazione e trasmissione dati accelerometrici (fig. 1); tale scheda è costituita da:

- un accelerometro a tecnologia MEMS triassiale con interfaccia digitale;
- un microcontrollore a 8 bit per la gestione del sistema;
- 2MB di RAM;
- un sistema di trasmissione dati wired (interfaccia di comunicazione seriale RS485) o wireless;
- un sistema di alimentazione a batteria;
- sensore di temperatura;
- orologio di sistema.

Ciascuna UF è dunque uno strumento di misura delle vibrazioni completamente autonomo. Occorre precisare che l'accelerometro impiegato misura anche le componenti statiche delle accelerazioni e quindi in assenza di movimento, misura comunque le componenti dell'accelerazione di gravità sui 3 assi; in pratica questo consente anche di calcolare l'inclinazione del sensore rispetto alla verticale, agendo quindi anche da inclinometro.

Il sistema è stato progettato e realizzato per poter funzionare in completa autonomia; esso può essere alimentato da un pacco batterie oppure da un alimentatore esterno.

the device in a circuit board thanks to dedicated A / D converters integrated on the same chip.

2.2. Functional unit

The recent introduction of MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) has opened a vast field of studies and applications in various fields of engineering. The integration of mechanical and electronic elements on the silicon substrate occurs through processes of "micromanufacturing"; while electronic devices are typically made using sequences of integration processes (bipolar, CMOS, BiCMOS), the micromechanical components are manufactured using "micromachines" which selectively remove parts of the silicon wafer or add structural layers to form mechanical and electromechanical devices.

Using a MEMS accelerometer sensor, an integrated card was designed and built, called the Functional Unit (FU) with ability of data capture, processing and transmitting accelerometers data (fig. 1); this board is made up of:

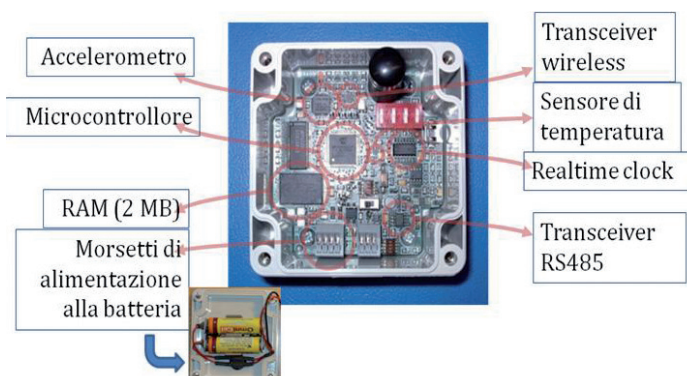


Fig. 1 - Foto dell'UF con l'indicazione delle principali componenti. *UF picture identifying the main components.*

- a triaxial MEMS accelerometer with digital interface;
- an 8-bit microcontroller to manage the system;
- 2MB of RAM;
- a data transmission system wired (serial communication interface RS485) or wireless;
- a system of battery power;
- system clock.

Each UF is thus a tool for completely autonomous vibration measuring. It should be specified that the used accelerometer measures also components of the static acceleration and thus in the absence of movement, however, measure the components of the acceleration of gravity on the 3 axes; in practice, this also allows us to calculate the tilt angle of the sensor from the vertical, thus acting also

Le capacità del sistema consentono l'acquisizione di dati accelerometrici in scala ± 2 g oppure ± 6 g a 40, 160, 640 o 2560 Hz a 12 bit, contemporaneamente sui tre assi. La capacità di memorizzazione complessiva è di 983.040 campioni, ed il sistema è in grado di acquisire su trigger (con durata di pre-trigger programmabile), a comando oppure ad orari prefissati. Il box contenente l'elettronica e il pacco batterie è il modello Euromas M210, prodotto dalla Bopla. Si tratta di una scatola di polycarbonato di dimensioni 82 x 80 x 55 mm e grado di protezione IP65, dotata di fori interni per il fissaggio della scheda e di fori esterni all'involucro della scheda (ma interni al perimetro della scatola) per il fissaggio.

I dati acquisiti possono essere elaborati e/o trasmessi verso altre unità o verso un computer centrale, in modalità wired (RS485) o wireless (adottando un protocollo proprietario); la portata della connessione wireless è di circa 100 metri in campo aperto. Il protocollo di comunicazione consente di convogliare verso il computer centrale i dati elaborati da tutte le unità. Il computer centrale potrà poi mettere in relazione i dati di tutte le schede sulla base delle funzionalità richieste dall'applicazione.

Il sistema è altamente configurabile attraverso un'interfaccia sviluppata appositamente; è possibile infatti variare:

- i parametri di acquisizione: numero di assi, fondo scala, frequenza;
- le modalità di acquisizione: timeout, trigger, a comando, con impostazioni dei timeout, dei livelli di trigger, e delle tipologie di comandi accettati;
- la durata complessiva del pre-trigger (se presente) e dell'acquisizione stessa;
- la tipologia di elaborazione da effettuare;
- i parametri da trasferire mediante le interfacce di comunicazione.

3. Veicolo ed apparato di misura sperimentale

Il treno ETR FE 220 di Circumvesuviana che è stato utilizzato per la prova è di tipo articolato, composto da 2 vetture ciascuna di lunghezza complessiva di 40 m. La continuità della trazione è assicurata da un'articolazione composta da snodi sferici e piattaforme con settori circolari. Ogni treno è sostenuto da 4 carrelli.

Sono stati strumentati i due assili del primo e dell'ultimo carrello con 4 unità funzionali, a coppie, sull'assile posteriore del primo carrello, e sull'assile anteriore dell'ultimo carrello, di cui 2 sul coperchio boccola e altre 2 su un piatto di copertura. La strumentazione non è stata posta su un unico carrello in quanto l'assile anteriore del primo carrello era già occupato da altri sistemi.

Nella fig. 4 si può valutare l'orientamento degli assi. Ovviamente i sensori che nella corsa di andata sono con-

si inclinometro. The system was designed and built to operate in complete autonomy; it may be powered by a battery pack or by an external power supply.

Capabilities of the system allow accelerometer data acquisition in scale of ± 2 g or ± 6 g at 40, 160, 640 or 2560 Hz at 12 bits, simultaneously on three axes. The total storage capacity is 983,040 samples, and the system is able to acquire data on trigger (with duration of pre-trigger programmable), on command or at scheduled time. The box containing the electronics and the battery pack is the model EUROMAS M210, produced by Bopla. This is a polycarbonate box of size 82x80x55 mm and the degree of protection IP65, with inside holes for mounting the board and outside holes at board case (but inside the perimeter of the box) for fixing.

The acquired data can be processed and/or transferred to other units or to a central computer, in wired (RS485) or wireless (adopting a proprietary protocol) mode; the range of the wireless connection is about 100 meters in open fields. The communication protocol allows to convey the data processed by all units to the central computer. The central computer can then correlate the data from all the boards on the basis of functionality required by the application.

The system is highly configurable through a specially developed interface; it is possible to vary:

- the acquisition parameters: number of axes, scale, frequency;
- form of acquisition: timeout, trigger, on command, with timeout settings, triggers levels, and types of commands accepted;
- the total duration of the pre-trigger (if any) and the same acquisition;
- the type of processing to be performed;
- parameters to be transferred through the communication interfaces.

3. Vehicle and experimental measurement system

The Circumvesuviana's ETR 220 FE train that was used for the test is an articulated type, consisting of 2 coaches each with an overall length of 40m. The continuity of traction is ensured by a joint composed of spherical bearings and platforms with circular sectors. Each coach is supported by 4 bogies.

The two axles of the first and last bogie were instrumented with 4 functional units, in pairs, on the rear axle of the first bogie, and on the front axle of the last bogie, 2 on the axle-box cover and 2 more on the speed sensor covering plate. Instrumentation has not been installed on one bogie because the front axle of the first bogie was already occupied by other systems.

In the fig. 4 you can evaluate the orientation of the axes. Obviously, the sensors that are considered in front po-

siderati gli anteriori, durante il viaggio di ritorno sono da considerare posteriori e viceversa.

Nelle figg. 2 e 3 è possibile avere un'idea di come sono state installate le unità funzionali.



Fig. 2 - UF installata sul piatto del sensore di velocità. *FU installed on the plate of the speed sensor.*



Fig. 3 - UF installata sul coperchio boccola. *FU installed on the cover of the axle-bearing.*

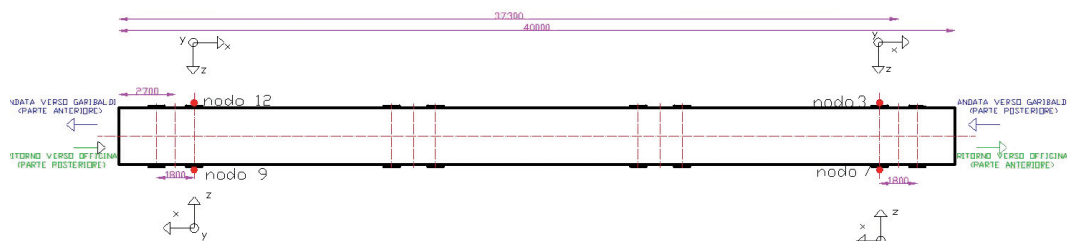


Fig. 4 - Schema montaggio UF sugli assi del treno (vista dall'alto). *Schematic FU mounting on axles of the train (view from the up side).*

Come prima descritto, inoltre, i sensori misurano le accelerazioni statiche (gravità) anche a treno fermo. In teoria la componente Y verticale dovrebbe misurare $-1g$ mentre le altre due componenti X e Z dovrebbero fornire valori nulli. In pratica, invece, poiché i supporti per il montaggio sulle boccole sono state costruiti artigianalmente, non è garantita la perfetta verticalità dell'asse Y del sensore, e quindi nelle risposte in accelerazione del sensore vi sono delle piccole differenze rispetto allo zero sugli assi X e Z dovute al fatto che anch'essi risentono della componente gravitazionale.

Ciò implica un valore non nullo della componente dell'accelerazione di gravità lungo tutti e tre gli assi.

Ogni UF comprensiva dei sistemi impiegati per l'installazione raggiunge al massimo un peso di 1 kg; è stato verificato che la frequenza di oscillazione del supporto non influenza negativamente la risposta del sensore ed è compresa in un campo di frequenze che, come sarà chiaro nel seguito, non risulta di interesse per le elaborazioni dei dati.

tion, the sensors measure the static acceleration (gravity) even when the train is stationary. In theory, the Y vertical component should measure $-1g$ while the other two components X and Z should provide null values. In practice, however, as supports for mounting on axle-bearing were built on the contrary handmade, it is not guaranteed a perfect vertical of the Y-axis sensor, and therefore in response acceleration sensor, there are small differences compared to zero on the axes X and Z due to the fact that they are also affected from the component of gravity.

This implies a non-zero component of the gravity acceleration along all three axes.

Each UF, including the systems used for installation, reach a maximum weight of 1 kg; it was verified that the frequency of oscillation of the support does not adversely affect the sensor response and is included in a field of frequencies, as will be explained hereafter, that is not of interest to data processing.

4. Le prove sperimentali in linea

Sono state effettuate due prove lungo una tratta di circa 9.5 km totali (considerando il percorso di andata e ritorno), partendo dalla sede dell'officina di Circumvesuviana, sita in Ponticelli, e percorrendo il tracciato fino alla stazione di Napoli Piazza Garibaldi. La prima prova è servita per mettere a punto e configurare correttamente il sistema, mentre in quella definitiva si sono ottenute delle registrazioni caratteristiche per la tratta esaminata. Per l'esecuzione della prova tutte le UF sono state configurate come di seguito indicato:

- acquisizione sui tre assi x, y e z;
- frequenza di acquisizione di 160 Hz;
- range di misura di $\pm 6g$.

Con un campionamento di 160 Hz è possibile indagare correttamente su fenomeni con frequenza caratteristica fino a 40 Hz. Ogni unità funzionale dispone di una memoria di 2MB. Considerando i parametri di configurazione scelti, il tempo massimo di acquisizione è pari a 2013 s, tempo che è stato più che sufficiente a coprire i 9.5 km della tratta percorsa e i tempi morti di arresto treno durante la prova.

4. Experimental tests in railway line

Two tests were carried out along a 9.5 km total (considering the outward and return journey), starting from Circumvesuviana workshop, located in Ponticelli, and along the route to the Piazza Garibaldi station in Naples. The first test was used to develop and properly configure the system, while in the definitive one characteristics of the recordings were obtained for the case examined. For the execution of the test all the UF were configured as follows:

- acquisition of the three axes x, y and z;
- acquisition frequency of 160 Hz;
- measurement range of $\pm 6g$.

With a sampling of 160 Hz it is possible to properly investigate this phenomena with characteristic frequency up to 40 Hz. Each functional unit has a memory of 2MB. Considering the configuration chosen, the maximum time of acquisition is equal to 2013 s, a time that was more than enough to cover the 9.5 km of the journey and the no operating times of the train during the test.

In fig. 5 we can see the sampling points that are representative of geo-referenced distance. This was possible



Fig. 5 - Tratta percorsa con il treno di prova. (Officina Ponticelli-Napoli Piazza Garibaldi e ritorno). Route traveled by train test. (Workshop Ponticelli-Naples Piazza Garibaldi outward and return journey).

Nella fig. 5 si può vedere il campionamento dei punti georeferenziati rappresentativi della tratta considerata. Ciò è stato possibile grazie al GPS montato sull'apparecchiatura già presente sul treno, che acquisisce un punto ogni 25 cm, con relative coordinate (latitudine, longitudine, altitudine). Il vantaggio di applicare le UF su un treno così attrezzato con l'apparecchiatura Plasser, permette inoltre, di conoscere la velocità puntuale ogni 25 cm e i valori di sopraelevazione in ogni curva, oltre al raggio di curvatura.

5. Analisi dei dati nel dominio del tempo

5.1. Punti notevoli

La fig. 6 è rappresentativa dell'intera acquisizione sui tre assi relativa al nodo 7. Gli intervalli temporali in cui il treno è fermo e quelli in cui è in movimento si riconoscono nei valori misurati durante la prova. Il segnale rosso rappresentativo dell'asse verticale Y ha come zero di riferimento $-1g$ poiché misura l'accelerazione di gravità. In tutti i grafici successivi si è provveduto ad eliminare tale componente continua così da avere lo zero di riferimento coincidente con il valore nullo. Quando i segnali si trovano intorno allo zero di riferimento ovviamente il treno è fermo.

È stato possibile calcolare infatti la sopraelevazione presente nelle curve (a treno fermo) considerando l'angolo di inclinazione rispetto alla verticale e tenendo conto dello scartamento di 950 mm.

In tabella 1 è riportata la sequenza temporale della prova finale effettuata.

5.2. Analisi delle accelerazioni verticali: prime valutazioni

Poiché nella fase di ritorno da Piazza Garibaldi all'of-

thanks to the GPS mounted on the equipment already on the train, which takes a point every 25 cm, with their coordinates (latitude, longitude, altitude). Applying the UF on a train so equipped with the equipment Plasser, also allows to know the precise speed every 25 cm and values of elevation in each curve, beyond the radius of curvature.

5. Time domain data analysis

5.1. Remarkable points

The fig. 6 is representative of the entire data acquisition on the three axes relative to the node 7. It's possible to recognize, with the values measured during the test, the intervals in which the train is in intermediate stop-off points and those where it is moving. The red signal representative of the vertical axis Y has as its zero reference the value $-1g$ because it measures the gravity acceleration. All subsequent graphs were arranged eliminating this continue component to have the zero reference coincident with zero value. Of course when the signals are located around the zero value reference, the train is stationary.

It was also possible to calculate the elevation in these curves (when the train is stationary) considering the angle of inclination relative to the vertical and taking into account the gauge of 950 mm.

Table 1 shows the temporal sequence of the final test carried out.

5.2. Analysis of vertical accelerations: first evaluations

Since in the return journey from Piazza Garibaldi to the workshop in Ponticelli the train has not made any intermediate stops, it was preferred examining the data

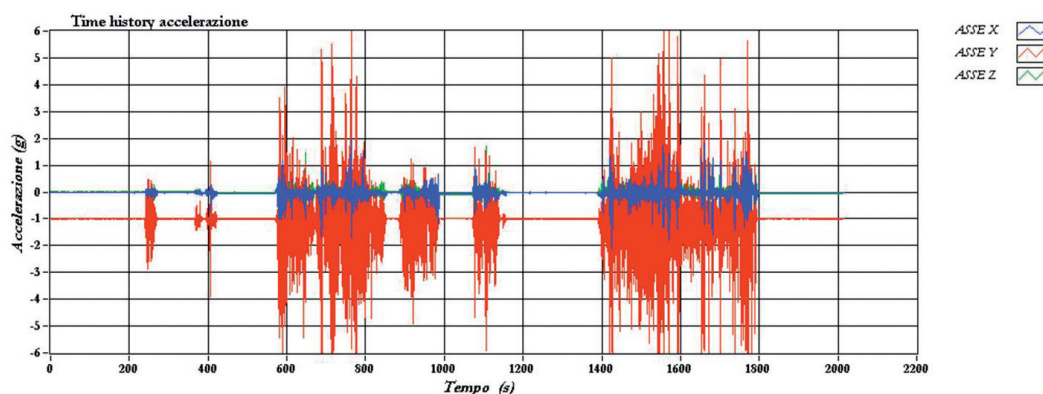


Fig. 6 - Accelerogramma dell'intera prova nel nodo 7. Accelerogram of the entire test in the node 7.

ficina di Ponticelli il treno non ha effettuato alcuna fermata intermedia, si è preferito effettuare l'analisi dei dati in questa porzione del percorso di prova piuttosto che nella fase di andata.

Si considera inizialmente un estratto relativo ad una porzione di tracciato in rettilineo che il treno percorre a velocità costante di circa 62 km/h.

Valutando la fig. 7, in questo tratto di rettilineo a velocità costante si nota un'anomala successione di alcuni picchi sull'asse Y verticale.

La ripetibilità di questi picchi lungo la direzione Y (verticale) nel tempo è evidente. Si è applicato quindi un filtro in ampiezza al fine di individuarne con più precisione la ricorrenza.

Dall'analisi temporale di questi picchi, spaziali tra loro temporalmente di circa 1 secondo, (fig. 8), valutando la velocità costante in questo tratto di 62 km/h circa, pari a 17.22 m/s, si è dedotto che questi fenomeni avvengono circa ogni 18 m. È probabile che i picchi siano rappresentativi della regolarità del fenomeno ipotizzato. Tali considerazioni si sono svolte su più tratti in rettilineo anche a diverse velocità. Inoltre le coppie di sensori, viste sullo stesso lato, presentano gli stessi picchi di accelerazione, ma con uno sfasamento legato alla distanza degli assi su cui sono montati. Pertanto tale fenomeno è probabilmente attribuibile alle saldature presenti sulla rotaia, che per la lunga rotaia saldata UNI 50 di cui è composta la rete Circumvesuviana sono poste proprio ogni 18 m circa.

I picchi verticali che si registrano in corrispondenza della saldatura sono dovuti alla differente deformazione che la rotaia subisce al passaggio del treno. Infatti, la saldatura è più rigida rispetto alla parte non saldata. Di fatto essendo la parte saldata della rotaia meno deformabile rispetto a quella non saldata, ogni saldatura si presenta alle ruote come un piccolo "scalino".

Sul diagramma temporale precedentemente riportato in fig. 7, si è poi effettuata un'analisi di Fourier (fig. 9) con una procedura di media nel tempo su intervalli di durata fissata al fine di evidenziare altri effetti sul segnale. Quest'analisi è stata condotta in termini di spettro di potenza in ampiezza (g^2) in funzione di un intervallo di frequenza dove si ritiene possibile ritrovare qualche fenomeno di in-

TABELLA 1 – TABLE 1

Intervalli temporali <i>Time intervals</i>	Sequenza prova <i>Test sequence</i>
0-240s	Treno fermo <i>Train stationary</i>
240-265s	Il treno esce dall'officina per agganciarsi al convoglio Plasser, per poi percorrere una rampa di raccordo <i>Train exits from the workshop to attach to Plasser's coaches, and then run on an access ramp</i>
265-360s	Una volta terminato il raccordo il treno resta fermo per 95 s circa in posizione obliqua su un tratto in curva appena fuori dall'officina, prima dei deviatori, con sopraelevazione calcolata di 19 mm circa <i>Once ended the access ramp, the train has an intermediate stop of approximately 95 s in oblique position in a curve just outside the workshop, before the switch points, with a computed canting of the rail of about 19 mm</i>
360-420s	Il treno riparte, affronta i deviatori presenti appena dopo la prima curva per poi fermarsi in corrispondenza del semaforo posto all'ingresso del tracciato vero e proprio <i>The train restarts, covers the switch points just after the first curve for then hold on in correspondence of the train-protecting signal placed at the entrance of the railway line</i>
420-575s	Il treno resta fermo al segnale di protezione, e si nota che l'asse Z laterale per i nodi 9 e 12 non presenta sopraelevazione apprezzabile, mentre per i nodi 3 e 7 è stata calcolata una sopraelevazione di circa 4mm, mentre lungo la direzione del moto X si può pensare di vedere una zona in pendenza dato che l'angolo calcolato $\alpha = 0.99^\circ$ nel nodo 7, e valori poco diversi negli altri nodi <i>The train remain stationary at the train-protecting signal, and we note that Z lateral axis for nodes 9 and 12 shall not present an appreciable canting of the rail while for nodes 3 and 7 it was calculated a canting of the rail approximately of 4mm, while along direction of motion X it is possible to expect a slope, because it was calculated an angle $\alpha = 0.99^\circ$ for the node 7, and little different values in other nodes</i>
575-850s	Treno in movimento <i>Train in motion</i>
850-875s	Treno fermo in corrispondenza della curva 3-4 <i>Waiting train in correspondence of curve 3-4</i>
875-990s	Treno in movimento <i>Train in motion</i>
990-1075s	Treno fermo prima dell'ingresso nella stazione di P.zza Garibaldi <i>Waiting train before entering in P.zza Garibaldi station</i>
1075-1155s	Treno in movimento in ingresso nella stazione <i>Train in motion entry into the station</i>
1155-1390s	Treno fermo sul binario 1 della stazione di P.zza Garibaldi <i>Waiting train on track 1 of P.zza Garibaldi station</i>
1390-1800s	Ritorno in officina senza alcuna fermata <i>Return journey to the workshop without stopping points</i>
1800-2013s	Treno fermo e fine acquisizione <i>Waiting train and end of data acquisition</i>

analysis in this portion of the test run, rather than during the outward journey.

We initially considered an extract of a straight-line portion of the track that the train travels at a constant speed of about 62 km/h.

Considering picture 7, in this stretch of straight track at constant speed you notice an unusual succession of some peaks on the Y axis vertical.

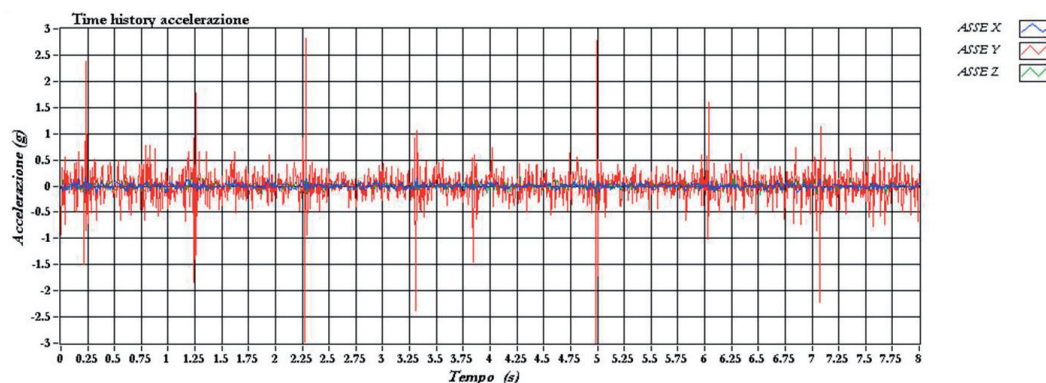


Fig. 7 - Estratto di 8 secondi per un tratto in rettilineo in funzione del tempo. Extract of 8 seconds for a stretch of straight track in function of time.

Segnale modificato Filtro 1

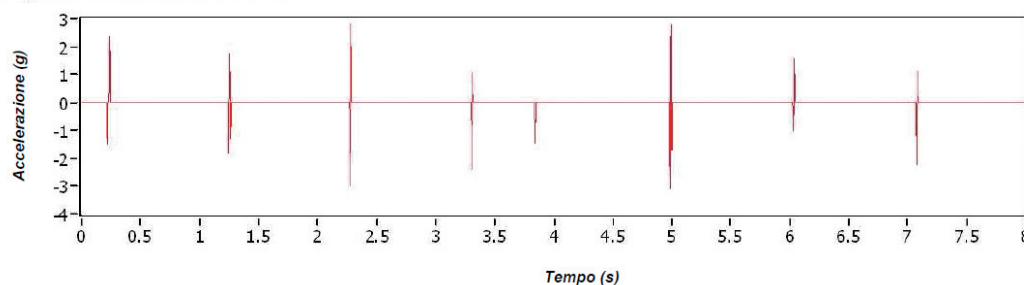


Fig. 8 - Estratto in rettilineo filtrato in ampiezza (Ascisse in s, ordinate in g). Extract from the straight track filtered in amplitude (x-axis in s, y-axis in g)

teresse. Da risultati ricavati in letteratura per l'armamento della Circumvesuviana risulta una frequenza caratteristica di circa 90 Hz, per cui al di fuori del nostro range massimo di misura.

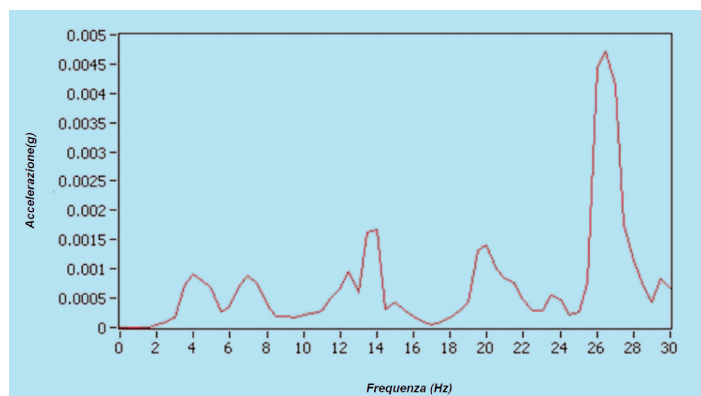
Si nota la presenza di alcuni componenti spettrali che si ripetono in maniera regolare. Certamente alcuni di questi possono essere legati a sfaccettature, a rugosità o ad altre tipologie di fenomeni non ancora individuati.

In particolare considerando il diametro nominale della ruota di 750 mm, per un'eventuale sfaccettatura si dovrebbe individuare (per questo tratto in rettilineo e per questa velocità) un segnale ricorrente ogni 0.14 s, corrispondente alla frequenza di 7.5 Hz; come si può notare tale picco è presente sul grafico. In futuro, la presenza di sfaccettature sulle ruote potrà essere verificata dai tecnici della manutenzione ordinaria di Circumvesuviana.

In un altro tratto (fig. 10), percorso alla velocità di 64.8 km/h, è stato possibile individuare con chiarezza il feno-

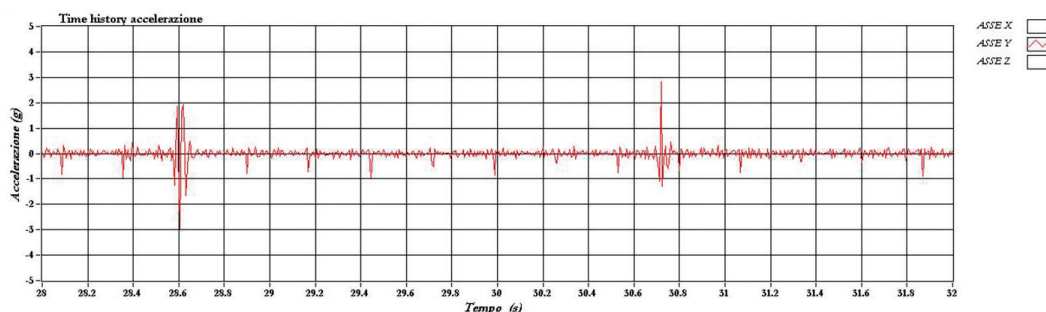
The repeatability in time of these peaks along the Y direction (vertical) is evident. It was then applied an amplitude filter in order to identify the recurrence more precisely.

By temporal analysis of these peaks, spaced in time of about 1 second, (fig. 8), considering the constant speed along this stretch of approximately 62 km/h, equal to 17.22 m/s, it was concluded that these phenomena occur approximately every 18 m. It's presumable that the peaks are representative of the regularity of the phenomenon assumed. These considerations have been held on multiple traits in straight track even at different speeds. Furthermore the pairs of sensors, on the same side, have the same acceleration peak values, but with a dephasing related to the distance of the axles on which they are mounted. Therefore, this phenomenon is probably attributable to the weldings on the rail. They are placed just about every 18m on the long welded rail UNI 50 that form the Circumvesuviana network.

Fig. 9 - Spettro del segnale. *Spectrum Signal.*

meno di una possibile sfaccettatura anche nella time history.

Si nota infatti come i valori picco-picco di accelerazione intorno ai 4 g di accelerazione presenti dopo 28.6 s e a 30.7 s (quindi circa ogni 2 s), siano attribuibili alle saldature di cui sopra, mentre si notano anche altri valori di picco-picco di intensità minore (circa 1g), presenti ogni circa 0.24 s.

Fig. 10 - Estratto del segnale con evidenze della sfaccettatura-Nodo 7. *Extract from the signal with obviousness of wheel flat-node 7.*

Avendo a disposizione il diametro nominale della ruota e la velocità di percorrenza del treno, è possibile effettuare un calcolo per valutare le ricorrenze temporali dei fenomeni. Dai conti effettuati e dal confronto con le ricorrenze sperimentali, appare probabile la presenza di una sfaccettatura. Inoltre, confrontando allo stesso modo i segnali corrispondenti degli altri 3 nodi di misura, nelle stesse condizioni, si ritrova la presenza di picchi ricorrenti allo stesso modo anche per il nodo 9, mentre per i nodi 3 e 12 tale difetto non appare presente. Un'altra ipotesi probabile è quella che, poiché i nodi 9 e 7 si trovano sullo stesso lato, il difetto potrebbe essere associabile alla rotaia piuttosto che legato a sfaccettature delle ruote.

The vertical spikes that occur at the welding are due to the different deformation that the rail undergoes at the transition of the train. In fact, welding is more rigid than the non-welded. De facto being the welded part of a rail less deformable than the non-welded one, any welding comes to wheels as a small "step". On the timing diagram previously reported in picture 7, it was then performed a Fourier analysis (fig. 9) with an average procedure in time on intervals of fixed length in order to highlight other effects on the signal. This analysis was conducted in terms of amplitude power spectrum (g^2) in function of a frequency range where it is thought possible to find some phenomena of interest. From the results obtained in

the literature for the Circumvesuviana's track equipment, comes out a characteristic frequency of 90 Hz, so outside of our maximum range of measurement.

We note the presence of some spectral components repeated on a regular way. Certainly some of these may be due to wheel flats, roughness, or other types of phenomena not yet identified.

Considering in particular the nominal wheel diameter of 750 mm, for any possible wheel flat (for this section on the straight track and at this speed) a recurrent signal each 0.14 s should be found, which corresponds to the frequency of 7.5 Hz; as it can be seen, that peak is present on the graph. In the future, the presence of wheel flats may be checked by the technicians of maintenance of Circumvesuviana.

In another section (fig. 10), covered at a speed of 64.8 km/h, it was possible to identify clearly the phenomenon of a possible wheel flat also in the time history.

It's possible to see in fact that the peak to peak values of

OSSERVATORIO

Anche in questi grafici (figg. 11, 12 e 13) si possono individuare i picchi dovuti alle saldature e sono presenti

acceleration at around 4g are present after 28.6 s and at 30.7s (approximately every 2 s), are attributable to weldings,

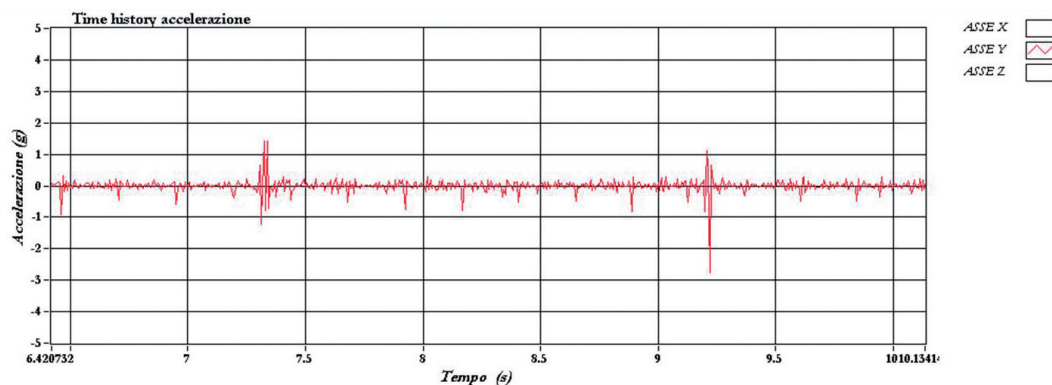


Fig. 11 - Estratto del segnale con evidenze della sfaccettatura NODO 9. *Extract from the signal with evidence of wheel-flat-NODE 9.*

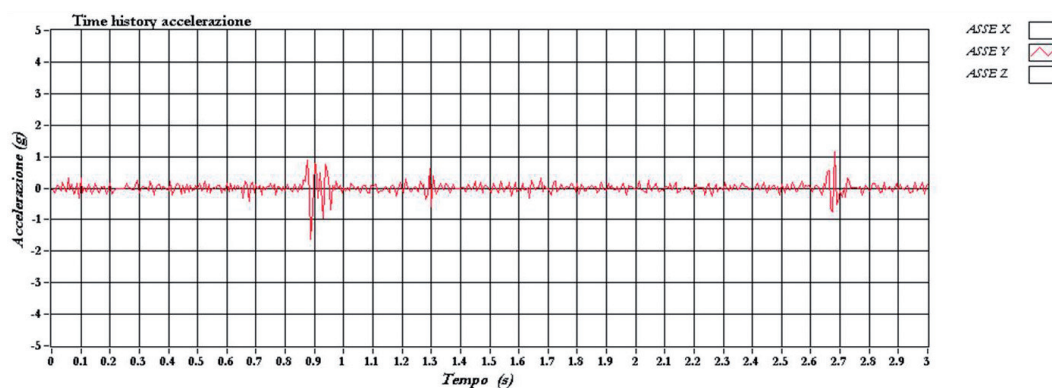


Fig. 12 - Estratto del segnale NODO 3. *Extract from the signal node 3.*

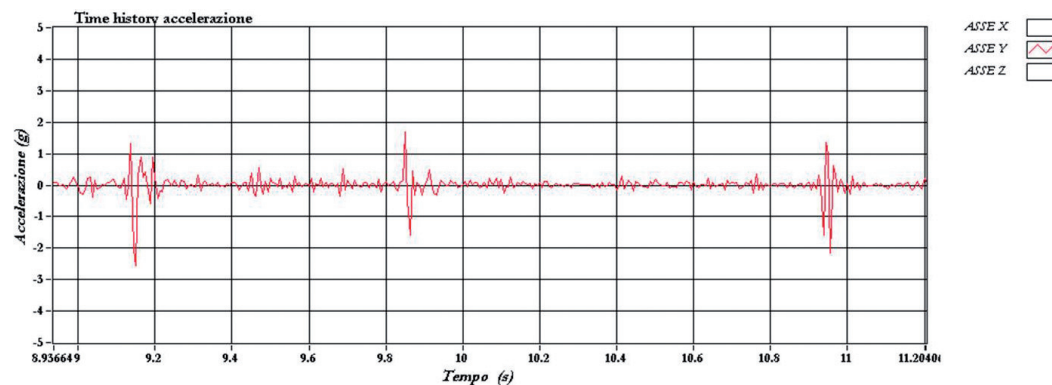


Fig. 13 - Estratto del segnale NODO 12. *Extract from the signal NODE 12.*

inoltre, per i soli nodi 3 e 12, dei picchi di intensità molto bassa che si ripetono con una certa continuità che sembrerebbero essere attribuibili a fenomeni di rugosità.

5.3. Analisi delle accelerazioni trasversali

Passando all'analisi delle accelerazioni laterali, è stata scelta una porzione del segnale rilevato durante la corsa di ritorno (da 1380 s + 190 s), perché è la fascia di segnale dove il treno percorre il tracciato a velocità sostenute e pressoché costanti, fig. 14/A.

while you can also notice other values of peak to peak of lesser intensity (approximately 1 g), present all around 0.24 s.

Since you have the nominal diameter of the wheel and the traveling speed of the train, you can perform a calculation to assess the temporal occurrences of the phenomena. From calculations conducted and the comparison with experimental occurrences, it appears likely the presence of a wheel-flat. Moreover, comparing in the same way the signals correspondence of the other 3 measure nodes in the same conditions, you can find the recurring presence of peaks in the same way also for node 9, while for the nodes 3 and 12 the defect is not present. Another likely hypothesis is that sin-

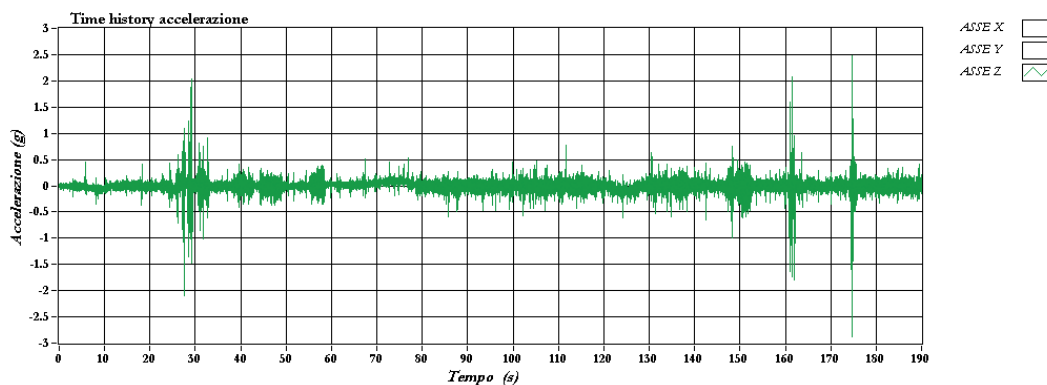


Fig. 14/A - Estratto di time history: diagramma originario. *Extract of time history: the original diagram.*

La fig. 14/B, invece, non mostra il diagramma originario delle accelerazioni, bensì un grafico “compresso” con tempo di integrazione di 1 s. Questa operazione di compressione, denominata tipicamente integrazione, esegue una media della frequenza di campionamento fornendo un unico punto per ogni secondo di acquisizione⁽¹⁾. Si tenga presente che tale procedura d'integrazione è del tutto distinta dal processo d'integrazione numerica che si utilizza per ricavare la velocità dall'accelerazione.

Quando la velocità è sostenuta le accelerazioni centrifughe che il sensore misura sono maggiori a parità di altre condizioni, e di fatto maggiormente visibili nel grafico. L'analisi delle accelerazioni laterali consente di ricavare la composizione del tracciato. Infatti essendo il segnale mostrato nella fig. 14/B rappresentativo delle accelerazioni lungo l'asse Z nel nostro riferimento, mostra di fatto dove siamo in tratti in rettilineo quando ci si ritrova vicino allo zero di riferimento, mentre i picchi che si discostano sono rappresentativi dei raccordi parabolici e dei tratti di curva a raggio costante.

ce the nodes 9 and 7 are on the same side, the defect might be associated with the rail rather than linked to wheel-flats.

Even in these graphs it is possible to identify the peaks due to weldings, and are present in addition, only for the nodes 3 and 12, some peaks of very low intensity which are repeated with a certain continuity that would seem to be attributable to roughness phenomena.

5.3. Analysis of the transverse acceleration

Regarding now the analysis of lateral acceleration, it was selected a portion of the signal detected during the return journey (from 1380s +190 s), because it is the band signal where the train crosses the track at high and almost constant speed, fig. 14/A.

Fig. 14/B, however, does not show the original graph of accelerations, but a “compressed” graph, with integration time of 1 s. This compression operation, typically referred to as integration, runs an average of sampling by providing a single point for each second of acquisition⁽¹⁾. Note

⁽¹⁾ Tale procedura è abbastanza consueta nell'analisi di fenomeni di vibrator e consente di eliminare fenomeni di breve durata (impulsi) evidenziando quelli che variano più lentamente ma ripetuta nel tempo.

⁽¹⁾ This is quite usual in the analysis of vibrating phenomena and allows to delete short duration phenomena (pulse), highlighting those that vary more slowly, but repeated over time.

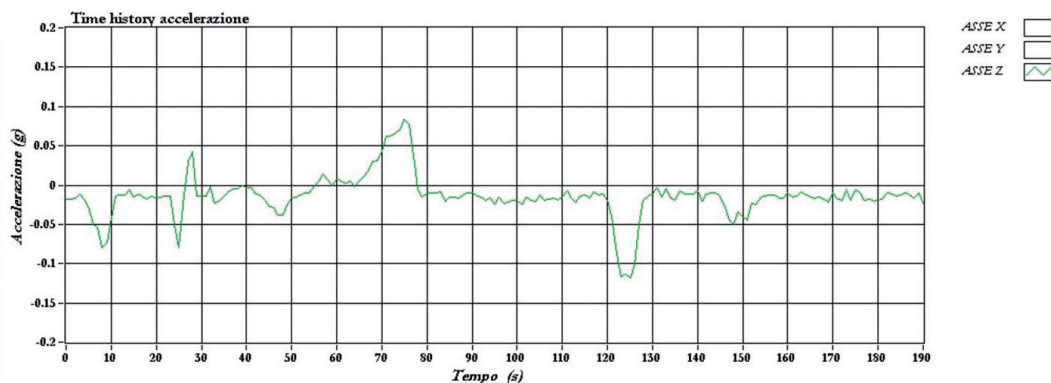


Fig. 14/B - Estratto di time history con procedura di integrazione. *Extract time history by integration proceedings*

6. Analisi dei dati nello spazio

Avendo a disposizione le velocità di percorrenza in funzione della progressiva ogni 0.25 m si sono ricavate le accelerazioni anche in funzione dello spazio e non più del tempo.

Si riporta quindi nella fig. 15, il grafico delle accelerazioni acquisite durante tutta la corsa di ritorno (l'intera

that this integration proceedings is completely separate from the numerical integration proceedings that is used to derive the speed by acceleration.

When there is high speed, the sensor measures centrifugal accelerations that are larger; other conditions being equal, and in fact more visible in the graph. Lateral acceleration analysis allows to obtain the composition of the track. Infact, since the signal shown in fig. 14/B is repre-

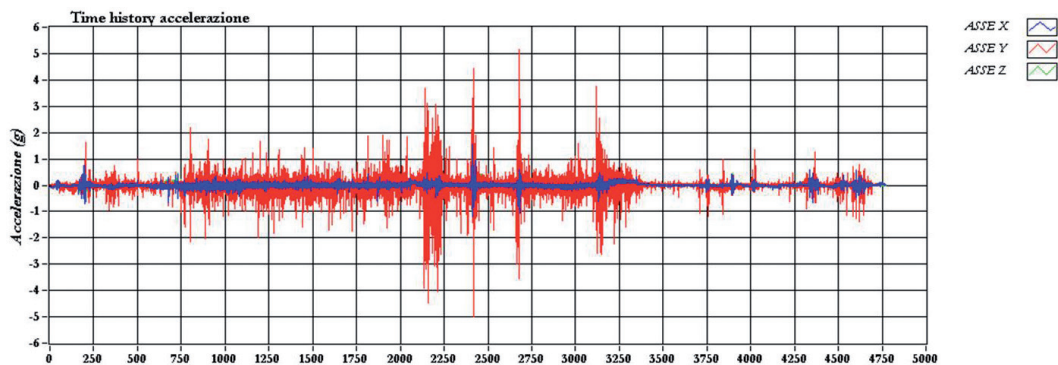


Fig. 15 - Accelerazione (g) in funzione dello spazio percorso (m). *Acceleration (g) as a function of the distance covered (m).*

tratta riportata in fig. 5) al nodo 7, questa volta espresso in metri sulle ascisse.

Anche in questo caso si può effettuare un'operazione di integrazione al fine di valutare la composizione del tracciato.

Anche in funzione dello spazio, il grafico in fig. 16 dell'asse z laterale mostra allo stesso modo di prima i diversi tratti del tracciato in curva e in rettilineo.

Nella fig. 17 invece sono stati messi a confronto i gra-

sentative of accelerations along the Z axis in our reference, shows de facto where we are in the straight track sections when you find it close to the zero reference, while the departed peaks are representative of parabolic transition curves and of curve sections with constant radius.

6. Space domain data analysis

Having at disposal the speed of the path covered depending on the kilometric every 0.25m were obtained ac-

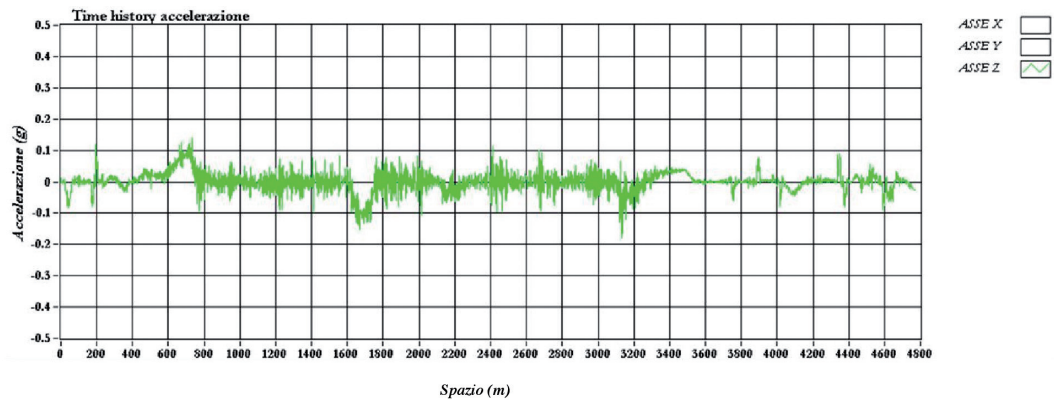


Fig. 16 - Accelerazione (g) integrata in funzione dello spazio percorso (m). *Acceleration (g) integrated as a function of distance covered (m).*

fici del segnale integrato rispetto allo spazio, riportato nelle ascisse in metri, con l'immagine importata dei punti

celerations in function of the space and no more in function of the time.

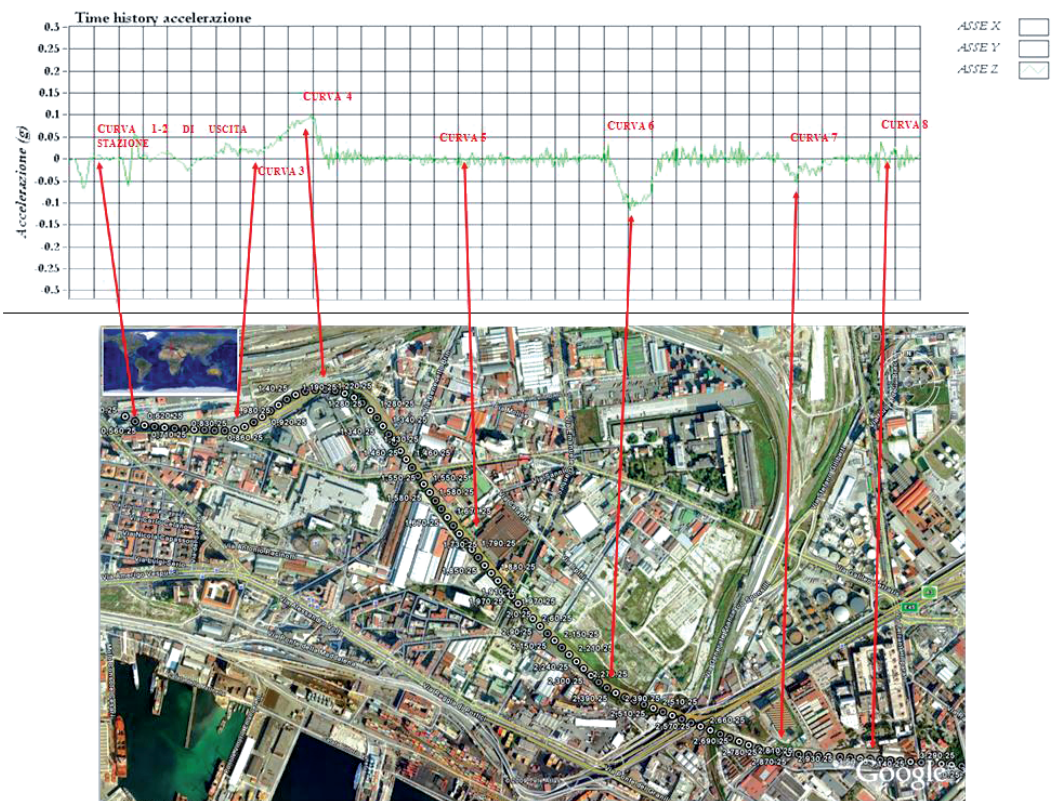


Fig. 17 - Correlazione accelerazioni laterali curve tracciato. *Correlation between span wire acceleration-curves of the track.*

GPS del tracciato da Piazza Garibaldi fino al rettilineo dopo la curva 8 in modo da evidenziare la correlazione tra le curve e i dati che rileva il sensore. Tale confronto tra i due grafici è da intendersi di carattere puramente indicativo in quanto non è stato possibile riprodurre i grafici con una stessa scala. Ciò che è importante valutare è tuttavia che quanto più una curva è percorsa a velocità sostenuta, tanto maggiori sono le accelerazioni centrifughe che vengono a crearsi e quindi risultano maggiormente visibili sul grafico.

Di fianco sono riportate, in tabella 2, i parametri cinematici e geometrici di ogni curva e le accelerazioni non compensate calcolate con le formule canoniche per le ferrovie a scartamento ridotto. È possibile confrontare l'ampiezza dei picchi (dovuti all'accelerazione non compensata) nel grafico di fig. 17 delle curve con le accelerazioni non compensate calcolate di ogni curva in tabella.

TABELLA 2 – TABLE 2

Numero curve Curve No.	Raggio Radius of curvature [m]	Velocità Speed [km/h]	Sopraelevazione h Cant of the track h [mm]	a.n.c. Cant of the track h [m/s ²]
1	112	30	25	0.38
2	285	28.7	5	0.17
3	162	32.3	50	0.02
4	200	45.9	20	0.62
5	2500	85.5	15	0.08
6	287	78.2	65	0.99
7	335	62.9	55	0.38
8	2083	62	10	0.05

Per mostrare più in dettaglio la correlazione tra i parametri cinematici e geometrici di curva e i picchi dovuti all'accelerazione non compensata, si è individuato un tratto relativo alla curva 6, che ha i seguenti parametri geometrici costruttivi:

- raggio di curvatura (r) = 290 m;
- sopraelevazione (h) = 65 mm.

In questa curva la velocità di percorrenza è di 78 km/h. Utilizzando l'espressione analitica per la determinazione dell'accelerazione non compensata per ferrovie a scartamento ridotto:

$$v^2/12.96r = h/104 + \Delta h/104$$

dove l'accelerazione non compensata è il termine $\Delta h/104$, ci si ritrova un valore calcolato di a.n.c. = 0.99 m/s².

Calcolato analiticamente il valore dell'accelerazione non compensata, noti i valori di raggio di curvatura, sopraelevazione e velocità, si è provveduto a confrontare tale valore calcolato con quello individuato dall'accelerometro lungo la direzione Z. Il valore minimo del grafico, -1.03 m/s², risulta perfettamente confrontabile con quello calcolato (fig. 18).

Inoltre, avendo a disposizione le progressive del trac-

In fig. 15 it is reported the graph of accelerations acquired during the return journey (the whole route is shown in fig. 5) to the node 7, this time on the X-axis in meters.

Even in this case you can perform an integration operation in order to estimate the composition of the track.

Also in space function, the graph in picture 16 of the lateral z-axis shows, in the same way as before, the various sections of the track in curves and straight.

In the fig. 17 instead were compared the graphs of the signal integrated with respect to space, reported in the abscissa in meters with the imported image of the GPS points of the route from Piazza Garibaldi to the straight after the curve 8 so as to highlight the correlation between curves and the data detected by sensor.

This comparison between the two graphs is intended purely indicative as it has not been possible to reproduce the graphs with the same scale. What is important to consider however is that the more a curve is traveled at high speed, the greater the centrifugal acceleration which has been obtained and are therefore more visible on the graph.

Alongside are shown in table 2, the kinematical and geometrical parameters of each curve and the uncompensated accelerations calculated with the canonical formulas for the narrow-track gauge railways. It's possible to compare the magnitude of the peaks (due to not compensated acceleration) in the graph of the curves in fig. 17 with no acceleration offset calculated for each curve in the table.

To show more in detail the correlation between the geometric and kinematic parameters of the curve and peaks due to uncompensated acceleration, it has been identified a section in the curve 6, which has the following constructive geometric parameters:

- radius of curvature (r) = 290 m;
- cant of the track (h) = 65 mm.

In this curve, the traveling speed is 78km/h. Using the analytical expression for the determination of the uncompensated acceleration for narrow-track gauge railways:

$$v^2/12.96r = h/104 + \Delta h/104$$

where the uncompensated acceleration is the term $\Delta h/104$, has been found a calculated value of a.n.c. = 0.99 m/s².

After having analytically calculated the value of uncompensated acceleration, known values of radius of curvature, cant of the track and speed, it has properly compared this calculated value with the one identified from the sensor along the Z direction. The minimum value of the graph - 1.03 m/s² is perfectly comparable with that calculated (fig. 18).

Furthermore, having at disposal the progressive track

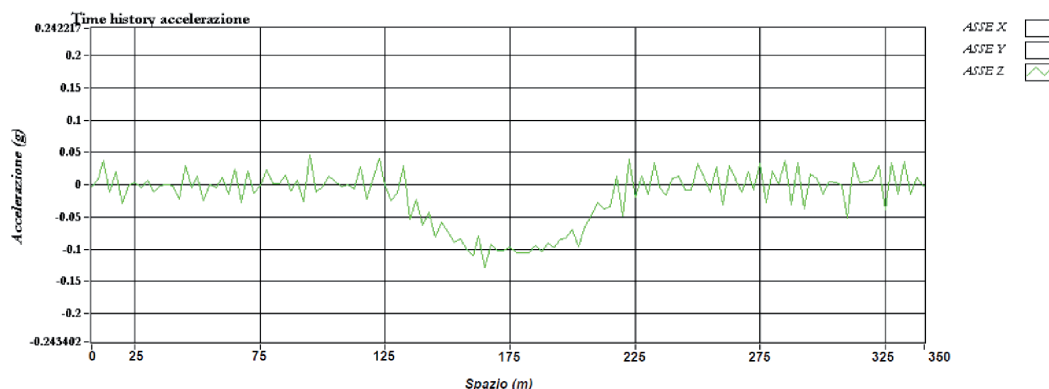


Fig. 18 - Accelerazione non compensata misurata. *Uncompensated acceleration measured.*

ciato in metri, si è voluto controllare l'effetto della presenza dei deviatori sull'andamento dei grafici delle accelerazioni, depurate della componente continua.

I grafici in fig. 19 sono rappresentativi dei deviatori posti nei pressi della stazione di S.Giovanni a Teduccio.

Analizzando il segnale sul deviatore, in particolare nella direzione Y verticale, è possibile distinguere 3 picchi significativi acquisiti dall'accelerometro. Il picco centrale è in realtà la somma degli effetti di 2 picchi molto ravvicinati dovuti al passaggio del treno sul cuore del deviatore.

Si considera adesso il tratto di rettilineo tra 150 e 300 metri per evidenziare eventuali difetti (v. fig. 21). Alcuni picchi prevalenti si trovano proprio a distanza di 18 m come previsto dall'analisi temporale nell'individuazione delle saldature.

Quindi anche nell'analisi dei dati in funzione dello spazio si ritrovano gli stessi risultati ipotizzati precedentemente nell'analisi in funzione del tempo.

7. Conclusioni

Lo scopo di queste prove è stato da un lato di testare il funzionamento di un innovativo sistema di misura delle accelerazioni installato su un treno di normale esercizio, e dall'altro di provare a ricavare informazioni su eventuali difetti del binario e del materiale rotabile, partendo da queste registrazioni e da altre informazioni di supporto legate esclusivamente alla georeferenziazione del treno durante la marcia.

In quest'ottica è possibile affermare che la campagna di prove effettuate ha raggiunto gli obiettivi prefissati con esito positivo. Infatti la tecnologia impiegata ha fornito le risposte attese ed ha mostrato di essere adeguata agli scopi della misura. Inoltre l'elaborazione dei dati ha evidenziato che esiste e può essere estratto un elevato contenuto di informazioni da un segnale accelerometrico. Resta tut-

in meters, it was decided to monitor the effect of the presence of switch points on the trend of the graphs of acceleration, depurate of the DC component.

The graphs in fig. 19 are representative of the switch points located near the San Giovanni a Teduccio station. By analyzing the signal on the switch point, especially in the vertical direction Y, it is possible to distinguish 3 significant peaks acquired by the sensor. The central peak is actually the sum of the effects of 2 peaks very close together due to the passage of the train on the heart of the switch point.

Let's consider now the straight rail between 150 and 300 meters to highlight any faults (fig. 21). Some dominant peaks are at the right distance of 18 m as expected from the analysis of time for identifying the weldings.

So even in the analysis of data in function of the space you can find the same results as previously assumed in the analysis as a function of time.

7. Conclusions

The purpose of these tests has been on one hand testing the operation of an innovative system to measure the accelerations installed on a train of normal operating, and on the other hand trying to get information on possible defects in the track and rolling stock, starting from these records and other supporting information related exclusively to the georeferencing of the train during the march.

In this scenario it can be argued that the campaign of tests has achieved its objectives successfully. Moreover the data elaboration has provided the answers expected and has been shown to be adequate for the purposes of the measure. Furthermore, the data processing showed that a high content of information from a signal accelerometers exists and can be extracted. We must however emphasize that the results extrapolated from the data are the result

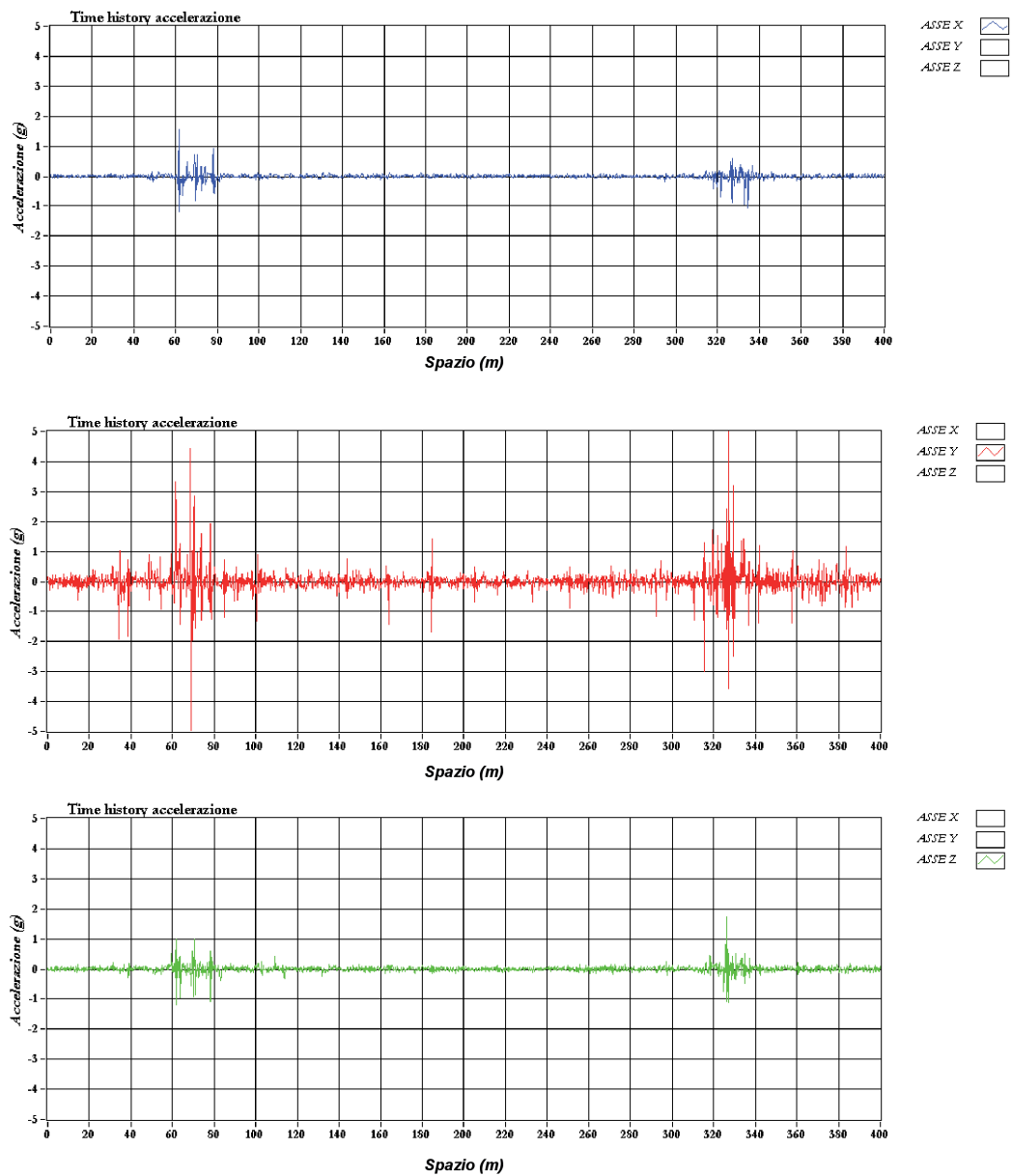


Fig. 19 - Estratti accelerazione in funzione dello spazio sui tre assi, evidenza dei deviatori. *Extracts acceleration as a function of space on the three axes, evidence of switch points.*



Fig. 20 - Nella foto è possibile riconoscere i deviatori in questione, e la distanza di 260m circa tra il primo deviatore di ingresso in stazione e il secondo di uscita. *In the picture you can recognize the switches in question, and the distance of about 260m between the first switch point at station entrance and the second behind station exit.*

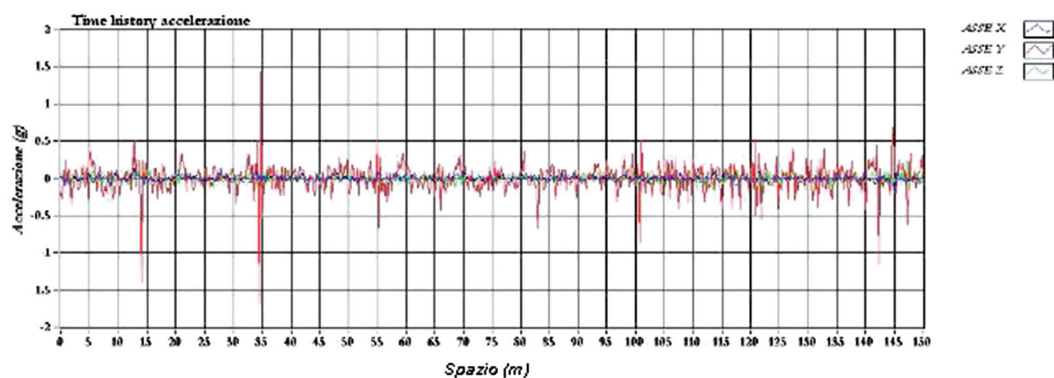


Fig. 21 - Estratto accelerazione in funzione dello spazio (m). Evidenza delle saldature. *An extract of acceleration as a function of space (m). Evidence of weldings*

tavia da sottolineare che i risultati estrapolati dai dati sono il risultato di una prima elaborazione dove ci si è soffermati soltanto sull'individuazione dei fenomeni che risultavano maggiormente evidenti all'analisi; per cui è ra-

of a first elaboration where we got dwelled only on the identification of phenomena that were most obvious to the analysis; so it is reasonable to assume that with further study, also from a theoretical point of view, of some

gionevole supporre che con uno studio più approfondito, anche dal punto di vista teorico di alcuni fenomeni d'interesse, sarà possibile ottenere risposte ancora più esaurienti.

Le prossime azioni da compiere nella direzione della messa a punto di uno strumento da adottare in modo diffuso sui vettori ferroviari dovranno essere:

- strumentare un intero carrello con 4 accelerometri così da valutare eventuali condizioni di appoggio anomalo sulla rotaia;
- verificare la risposta del sistema accelerometrico in alcune condizioni dell'armamento e del materiale rotabile prossime alle critiche;
- associare con elevata precisione il valore misurato con la progressiva lungo linea così da poter effettuare confronti, anche con tecniche avanzate tipo reti neurali, fra diverse misure eseguite in tempi diversi negli stessi punti di una tratta.

Quest'ultimo punto potrebbe essere di particolare importanza come ausilio diagnostico alla manutenzione di reti e dei rotabili stessi, soprattutto a sviluppo locale dove lo stesso materiale rotabile transita ripetutamente sulle stesse linee. Sarà possibile, attrezzando più treni che percorrono la stessa tratta, valutare anche eventuali difetti del binario, studiando la ripetitività delle risposte dei dati accelerometrici dei diversi treni, in modo da sfruttare successivamente anche tecniche di tipo statistico.

Infine, altri problemi ancora da affrontare riguarderanno poi sia lo sviluppo ulteriore della tecnologia di misura così da essere indipendenti da altra strumentazione di bordo, e sia lo sviluppo di algoritmi e relativi software idonei ad una elaborazione automatica dei dati.

Ringraziamenti

Si ringrazia la società Circumvesuviana s.r.l. per la disponibilità delle attrezzature e dei siti, e per il supporto operativo dei tecnici.

phenomena of interest, you will be able to answers even more comprehensive.

The next steps to be taken in the direction of the development of an instrument to be adopted widely on the rail carriers should be:

- equipping an entire bogie with 4 accelerometers in order to assess possible abnormal conditions of support on the rail;
- checking the accelerometric response of the system in some conditions of track equipment and rolling stock close to the criticism;
- linking with high precision the value measured with the kilometric long of the line so you can make comparisons, even with advanced techniques like neural networks, between different measurements executed at different times in the same points of a route.

The latter point could be of particular importance as a diagnostic aid in the maintenance of networks and rolling stock themselves, especially in local development where the same rolling stock passes repeatedly on the same lines. It will be possible, by equipping more trains that travel the same route, evaluate the defects of the track, studying the repeatability of the responses of accelerometer data of different trains, in order to exploit even statistical techniques in the future.

Finally, other problems still to be addressed will concern both the further development of measurement technology so as to be independent from other instruments on board, and both the development of algorithms and related software suitable to an automatic data processing.

Acknowledgements

Thanks to the Circumvesuviana Company s.r.l. for the availability of equipment and sites, and the operational support of the technicians.