

SCIENZA E TECNICA



Analisi sperimentale sulla stabilità e la conicità equivalente di un rotabile ferroviario

Experimental investigation on stability and equivalent conicity of a rolling stock

Daniele MASSINI^(*)
 Luca PUGI^(*)
 Luca BOCCOLINI^(**)
 Fabio PICCIOLI^(**)
 Carmine ZAPPACOSTA^(**)

Sommario - La norma EN-14363 prevede la possibilità di verificare la stabilità di marcia di un rotabile anche attraverso un metodo semplificato “accelerometrico” basato su una misura di natura prevalentemente cinematica. In questo lavoro si applica tale metodo alla verifica di stabilità di un veicolo a carrelli, trainato, per trasporto passeggeri.

Tali prove sono state integrate con il rilievo della geometria del binario, ed in particolare dei profili delle rotaie, utilizzando un apposito sistema di ispezione e misura.

Anche i profili delle ruote delle sale monitorate sono stati misurati, in tal modo è stato possibile calcolare la conicità equivalente sulla base della combinazione dei profili reali sia di ruota che di rotaia.

Il veicolo è stato testato sulla linea tirrenica nella tratta Grosseto-Campiglia, nelle zone di rettilineo e curva di grande raggio, con una massima velocità raggiunta di 176 km/h, così come definite nella EN 14363.

Il complesso sistema di misura ed elaborazione dati utilizzato ha permesso di sincronizzare le diverse acquisizioni e comparare, per ogni posizione della progressiva, i valori misurati dagli accelerometri e la relativa conicità equivalente reale. In tal modo è stato possibile valutare l'effetto di quest'ultima sull'instabilità del veicolo.

1. Introduzione

La valutazione di sicurezza e qualità di marcia è stata affrontata fin dalle origini del trasporto ferroviario. Tuttavia, il continuo progresso del pensiero scientifico, in sintonia con quello tecnologico, ha prodotto e sta producendo un miglioramento dei risultati ottenibili sperimental-

Summary - The EN-14363 standard states the possibility of verifying the rail vehicles stability by means of an accelerometric simplified method, based on kinematic measurements.

In this work this method is applied to the stability verification of a two-bogies vehicle for passenger transportation.

Tests have been carried out together with the railway track geometry and rail profile survey using a dedicated measurement system.

For the monitored wheelsets, wheels profiles have been measured as well, in such a way it was possible to calculate the equivalent conicity using a combination of real profiles both of wheel and rail.

The vehicle was tested on Tyrrhenian line, in the section Grosseto-Campiglia, in straight and large radius zones, with maximum speed of 176 km/h, as required by standard EN 14363.

The complex measurement system and data post-processing allowed signals synchronization, obtained from different acquisitions, and the comparison, for each point of the line, of the data acquired from accelerometers with the real equivalent conicity. It was hence possible to evaluate how it affects the vehicle stability.

1. Introduction

The evaluation of comfort and running safety was faced up since the beginning of the rail transportation. Nevertheless, the continuous progress of the scientific thought, in synergy with the technologic one, has produced and is producing an improvement of experimental results [1], [2].

^(*) DIEF, Università di Firenze.

^(**) Italcertifier S.p.A.

^(*) DIEF, University of Florence.

^(**) Italcertifier S.p.A.

SCIENZA E TECNICA

talmente [1], [2]. Insieme allo sviluppo di modelli teorici sulla dinamica dei veicoli ferroviari è cresciuta la necessità di metodi di misura sempre più accurati per accelerazioni e forze interagenti fra veicoli e binari, ad esempio attraverso l'utilizzo di sale strumentate [3], [4], [5].

Italcertfer S.p.A. è uno dei principali attori nel campo dei test su materiale rotabile. La strumentazione di misura in dotazione all'azienda permette di effettuare test di alto livello, con lo scopo valutare la sicurezza e qualità di marcia dei rotabili in prova seguendo i criteri stabiliti nella norma EN14363 [6].

Per quanto riguarda le prove di stabilità, l'ultima versione della norma riporta numerose differenze rispetto alla precedente. In particolare, richiede che i risultati dei test di stabilità siano riportati insieme alle informazioni sulla conicità equivalente, il cui metodo di calcolo è riportato in [7].

L'uso del concetto di conicità equivalente per la valutazione della dinamica di marcia non è certo concetto nuovo [8]; i limiti di questo approccio sono ampiamente dibattuti [9], [10], tuttavia la disponibilità di moderni sistemi di misura ottici [11], [12] e la possibilità di geo-referenziare con precisione assoluta le misure ottenute rende questo tipo di misure estremamente utili per svariate tipologie di applicazioni diagnostiche.

Grazie alla strumentazione in dotazione a Italcertfer S.p.A. è stato possibile effettuare, sulla linea scelta, una prova di stabilità di un rotabile campione in parallelo al calcolo della conicità equivalente attraverso le misure dei profili delle rotaie e delle ruote delle sale analizzate.

La sperimentazione è stata condotta nell'ottica di valutare le condizioni di conicità equivalente ammissibili per un veicolo ferroviario già in esercizio con lo scopo di capire che valore di conicità può essere raggiunto prima di dover tornire le ruote.

I dati ottenuti sono stati elaborati secondo le norme [6] e [7] sopra citate.

In questo modo è stato possibile verificare come le attuali metodologie e tecnologie consentano di ottenere una buona correlazione tra misure accelerometriche e corrispondenti variazioni della conicità equivalente osservata, con tutti i vantaggi che tale correlazione offre sulla valutazione delle effettive condizioni di prova e quindi sugli stessi risultati ottenuti.

1.1. Il fenomeno dell'instabilità

Si parla di stabilità di un rotabile ferroviario fintanto che le accelerazioni del moto di serpeggio dei carrelli rimane all'interno di valori prefissati, ritenuti accettabili, senza urti ripetuti a frequenza di 3-10 Hz fra bordino e rotaia.

La teoria sviluppata da Klingel nel 1883 [13] descrive il sistema sala-binario attraverso un modello cinematico semplificato. I profili delle ruote sono approssimati a co-

Together with the development of theoretical models on rail vehicles dynamics it has grown the necessity of more and more accurate measurement methods for accelerations and interaction forces between vehicles and rail tracks, for instance by means of instrumented wheelsets [3], [4], [5].

Italcertfer S.p.A. is one of the main actors in the field of testing on rolling stock. The measuring devices held by the company allow high level testing for rolling stock running safety and ride quality, following criterions stated in the standard EN14363 [6].

Concerning the vehicle stability tests, the last version of the standard reports many differences with respect to the preceding one. In particular, it requires the results of the stability analysis to be reported together with the corresponding equivalent conicity, whose calculation method is reported in [7].

The concept of equivalent conicity for stability evaluation is not new [8]; the limits of this approach are widely discussed [9], [10], nevertheless the availability of modern optical measuring systems [11], [12], and the possibility of georeferencing the obtained measurements with absolute precision, makes this kind of measurements extremely useful for different diagnostic applications.

Thanks to the instrumentation devices held by Italcertfer S.p.A. it was possible to carry out, on the chosen line, a sample rolling stock stability test together with the calculation of the equivalent conicity through the track and wheels profile measurements.

The experiments were carried out in order to evaluating the equivalent conicity admissible conditions for a rail vehicle with the goal of understanding which is the conicity value that can be reached before having to turn the wheels back.

Acquired data were post-processed according to the abovementioned standards [6] and [7].

In such a way it was possible to verify how the present methodologies and technologies allow to obtain a very good correlation among accelerometer measurements and the corresponding variation of the observed equivalent conicity, bringing many advantages on the evaluation of the test conditions and hence on the results.

1.1. Hunting oscillation phenomenon

It is possible to talk about rolling stock stability as long as the accelerations due to hunting oscillations of the bogies remain within predetermined, retained acceptable, values, without repeated shocks at frequencies of 3-10 Hz between wheel flange and rail.

The theory developed by Klingel in 1883 [13], describes the wheelset-track system through a simplified kinematic model. The wheel profiles are approximated to cones so, if the wheelset is not centered, its rotating axis is not parallel to the rail level and the rolling radius difference tends to center the wheelset, an oscillating movement is hence gen-

SCIENZA E TECNICA

ni per cui, se la sala non è centrata, il suo asse di rotazione non è parallelo al piano del ferro e la differenza di raggio di rotolamento tende a riportare la sala al centro, generando così un moto oscillatorio con frequenza proporzionale alla velocità e alla conicità del profilo.

In Fig. 1 è riportato uno schema del moto oscillatorio di una sala secondo la teoria di Klingel insieme alle definizioni fondamentali di scartamento del binario (s), raggio di rotolamento nominale (r), conicità della ruota (γ), velocità (V); questi parametri vengono utilizzati per calcolare la lunghezza d'onda dell'oscillazione (L) e la sua frequenza (f).

Nella realtà tale moto è influenzato anche dal sistema di forze intorno alla sala: collegamento con il carrello [16] e forze d'attrito con la rotaia.

Quest'ultime hanno un effetto smorzante, ma tendono a ridursi all'aumentare della velocità.

La cosiddetta velocità critica di instabilità del veicolo (V_c) è quella velocità per cui l'effetto smorzante dell'attrito è talmente basso che l'oscillazione della sala tende ad amplificarsi ed è fermata solamente dal contatto del bordino sul fianco interno della rotaia. In questa situazione si genera un moto di percussione che può ridurre il confort del veicolo, danneggiare la linea e accorciare la vita del veicolo, fino a portare, nei casi più gravi, allo svio.

È importante che in fase di progettazione la velocità critica sia superiore della massima velocità di esercizio del veicolo [14]. Va tenuto conto che l'usura del profilo delle ruote durante l'esercizio può causare un incremento della conicità equivalente e quindi una riduzione della velocità critica.

2. Caratteristiche di veicolo e tracciato

In Fig. 2 è riportato uno schema del convoglio utilizzato: una locomotiva posta ad un'estremità permette la trazione, i veicoli in prova sono carrozze, ognuna delle quali è stata strumentata con accelerometri come successivamente spiegato nel Capitolo 4.3. I carrelli delle carrozze testate hanno una massa di circa 7 t, un passo di 2500 mm, un diametro ruota nominale di 920 mm.

La locomotiva è collegata al primo rotabile testato dalla carrozza misure, dotata di sistemi ottici per il rilevo del profilo dei binari ed utilizzata come laboratorio mobile durante le prove.

Il veicolo è stato testato nella trat-

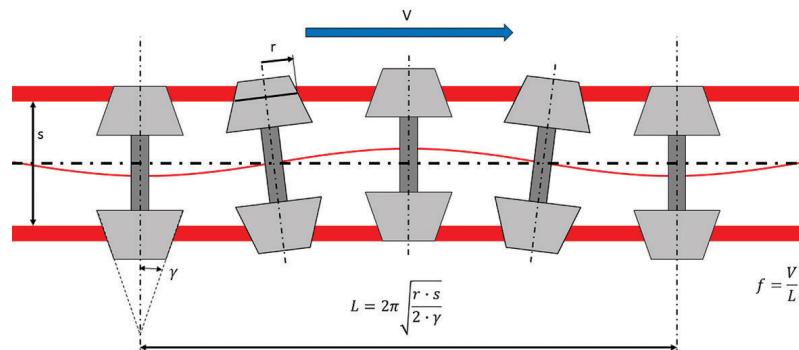


Figura 1 - Oscillazione di una sala - teoria di Klingel [13].

Figure 1 - Wheelset oscillation - Klingel theory [13].

erated, with a frequency proportional with speed and profile conicity.

In Fig. 1 a sketch of the wheelset's path according to the Klingel theory is reported together with the fundamental definitions of track gauge (s), nominal rolling radius (r), wheel conicity (γ), velocity (V); these parameters are used to calculate the wavelength (L) of said oscillations and its frequency (f).

In real conditions the movement is also affected by the system of forces around the wheelset: bogie connections [16] and creep wheel-rail forces.

Creep forces have a damping effect but tend to reduce as speed increases.

The so-called "instability critical velocity of the vehicle (V_c)" is that speed for which the damping effect of creep friction forces is low enough that the wheelset oscillation is only stopped when the wheel rim hits the railhead.

In this condition a percussive motion is set, responsible for comfort reduction, track damage and vehicle life drop, up to, in the worst cases, derailment.

It is hence important in design phase to set the critical speed higher than the maximum operating speed of the vehicle [14]. It is indeed important to take into account that the wheel usury can cause a rise in equivalent conicity and hence a reduction of the critical velocity.

2. Vehicle and track characteristics

In Fig. 2 a sketch of the convoy is reported: a locomotive is placed at one end allowing the traction, the tested vehicles

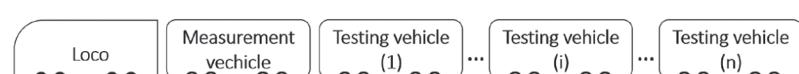


Figura 2 - Schema della composizione del convoglio composto da locomotiva, carrozza di misura della geometria del binario e veicoli in prova.

Figure 2 - Sketch of the vehicle composition composed of locomotive, track geometry measurement vehicle and testing vehicles.

SCIENZA E TECNICA

ta Grosseto-Campiglia della linea tirrenica, i dati riportati nell'articolo sono relativi al binario pari della linea, le cui caratteristiche di tracciato sono riportate in Fig. 3. Nello schema in questione i valori -1, 1 e 0 indicano curvature a sinistra, a destra e rettilinei rispettivamente; i flag riportano il valore del raggio di curvatura relativo alla curva in questione. Come si può osservare tutte le curve cadono in zona 1 o 2 secondo la norma EN14363 [6], curve di grande raggio ($R>600m$).

3. Sistema di misura

Nel presente paragrafo viene mostrato il sistema di misura utilizzato, che può essere suddiviso in due componenti principali: sistema di misura della geometria del binario e misure accelerometriche dei veicoli.

3.1. Misura della geometria del binario

Il sistema di misura è posizionato a bordo di un'apposita carrozza di misura (Figg. 4-5) sulla quale è presente un sistema di controllo a bordo e un sistema di misura laser/telecamera installato sotto cassa, sul telaio del carrello. Uno schema del posizionamento del sistema è riportato in Fig. 4.

Nella boccola è installato un encoder incrementale a rilevamento ottico che restituisce 1000 impulsi al giro.

Oltre all'encoder, è presente un sistema di localizzazione GPS (la cui antenna è installata sul tetto della carrozza di misura stessa) che permette la sincronizzazione delle misure con la posizione sulla linea.

Il sistema di rilevamento della geometria del binario è costituito dal modulo TGMS (Track Geometry Measurement System) il quale è a sua volta composto da tre componenti rigidamente connessi: due box contenenti ciascuno un modulo di misura laser camera (L/C), separati da una piattaforma inerziale (IMU).

Il modulo TGMS è collegato tramite un supporto elastico ad un telaio solidale con il carrello.

Una cabina di controllo è situata all'interno dell'elemento, è dotata di tutti i sistemi di alimentazione per i moduli di misura, dell'elettronica per la sincronizzazione

are coaches, every one of them equipped with accelerometers as subsequently explained in chapter 4.3. The bogies of the tested coaches have a mass of 7 tons circa, wheel base of 2500 mm, wheel nominal diameter of 920mm.

The measurement coach links the locomotive to the first measuring coach, it is equipped with optical devices for track profile detection and serves as a mobile laboratory during tests.

The vehicles were tested in the line Grosseto-Campiglia of the Tyrrhenian line, data reported in the present paper were acquired from tests on the even track, which curvature characteristics are reported in Fig. 3. In the graph, values -1, 1 and 0 mean left curve, right curve and straight track respectively, flags indicate the curve radius.

It is possible to note that every curve falls in the zones 1 or 2, as defined in the standard EN14363 [6], high radius curves ($R>600m$).

3. Measurement system

In this chapter the measurement system used will be described, it can be divided in two main components: track geometry detection system and vehicles accelerations measurement system.

3.1. Track geometry measurement

The measurement system is placed on a dedicated measurement vehicle (Figs. 4-5) equipped with an on-board control system and a laser-camera measuring system placed under the coach, on the bogie frame. A sketch of the system layout is reported in Fig. 4.

An incremental optical encoder is installed in one axle box, giving 1000 pulses per round.

Besides the encoder, a GPS system (antenna is placed on the coach's roof) is present and allows the synchronization between measurements and train position on the line.

The Track Geometry Measurement System (TGMS) is composed of three components rigidly connected: two boxes containing a laser camera module (L/C) each, separated by an Inertial Measurement Unit (IMU).

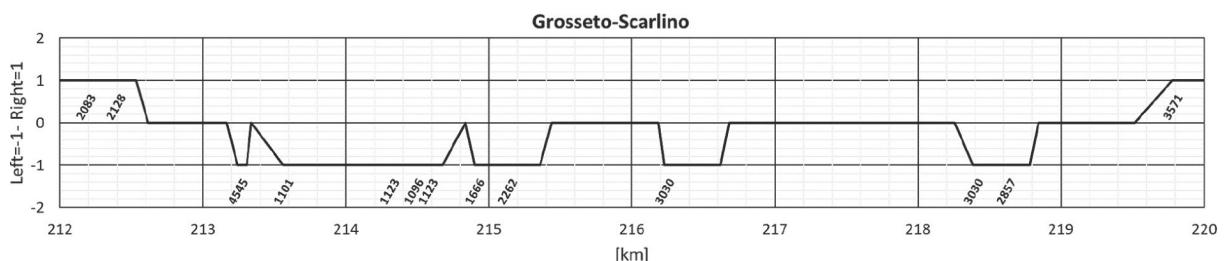


Figura 3 - Descrizione linea.
Figure 3 - Track description.

SCIENZA E TECNICA

dei segnali ottici e odometrici, di un refrigeratore per i laser, di un PC per l'acquisizione, elaborazione e memorizzazione dei dati.

Una vista della postazione di controllo misure e di un'acquisizione del profilo dei binari è riportata in Fig. 6.

I parametri geometrici acquisiti dal sistema sono di seguito elencati: livello longitudinale, sopraelevazione, allineamento, sghembo, raggio di curvatura, profili rotaia, usura rotaia.

Il sistema di misura è inoltre in grado di rilevare la forma delle due rotaie (profili) posizionando le stesse in un sistema di riferimento tale da poter fornire anche la misura dello scartamento.

Al sistema è attribuita un'incertezza di misura pari a $\pm 1\text{mm}$ per quanto riguarda lo scartamento, di $\pm 0.5\text{mm}$ per il profilo della rotaia.

Il sistema è conforme agli standard RFI per la misura della qualità geometrica del binario ed è stato verificato secondo la norma EN 13848-2 [15].

Il rilievo dei profili delle rotaie e dello scartamento permette di simulare l'accoppiamento con una generica sala montata in modo da calcolare la conicità equivalente secondo quanto descritto nella norma EN 15302 [7].

Sia i parametri geometrici sia i profili della rotaia sono acquisiti con un passo spaziale costante di 0.25 metri.

3.2. Misura del profilo della ruota/

Il profilo delle ruote è stato misurato utilizzando un calibro a contatto in dotazione Italcertifer S.p.A., Fig. 7.

Lo strumento è costituito da una trave alla quale sono collegate due teste di misura, ognuna delle quali è composta da un tastatore, comandato manualmente, grazie ad un'apposita manopola di azionamento. La distanza relativa fra le testine può essere variata in base allo scartamento.

Grazie ad una slitta e a due cilindri di appoggio è possibile posizionare lo strumento in modo tale che la coordinata Z sia perfettamente radiale e la Y assiale.



Figura 5 - Vista esterna della carrozza misura.
Figure 5 - External view of the measurement vehicle.

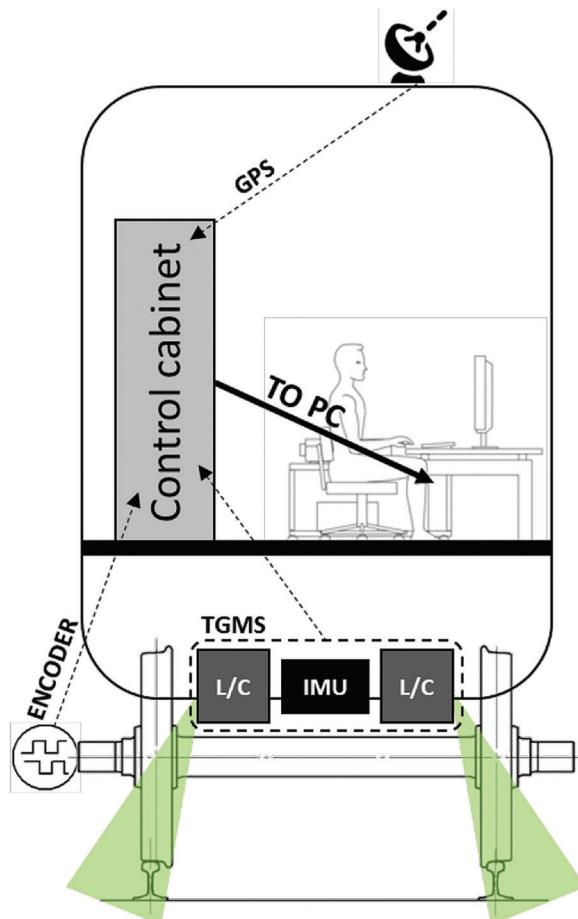


Figura 4 - Schema del sistema di misura per rilevamento geometria binario.

Figure 4 - Sketch of the track geometry measurement system.

The TGMS is connected to a frame, united with the bogie, by means of an elastic joint.

A control cabin is placed within the vehicle, it is equipped with the power supply system for every measurement module, synchronization electronics for optical and odometry signals, chiller for laser cooling, PC for data acquisition, post-processing and data storing.

An internal view of the cabin during track profile acquisition is visible in Fig. 6.

The geometrical parameters acquired by the system are the following: longitudinal level, cant, alignment, twist, curve radius, rail profile, rail usury.

SCIENZA E TECNICA



Figura 6 - Esempio di acquisizione sulla carrozza misura.
Figure 6 - Example of acquisition on the measurement vehicle.



Figura 7 - Vista del calibro a contatto.
Figure 7 - View of the contactgauge.

L'utilizzo di questo strumento, con due teste di misura, permette di rilevare i due profili delle ruote in un sistema di riferimento comune, tenendo conto della flessione dell'assiale sotto carico.

In Fig. 8 è riportato un particolare del posizionamento dei cilindri e il tastatore pronto per il rilevamento del profilo. Una visione d'insieme del calibratore è invece riportata in Fig. 7.

3.3. Misura accelerazioni e odometria

Ogni sala del veicolo in esame è stata monitorata attraverso il posizionamento sul carrello in corrispondenza delle due boccole di due accelerometri laterali.

Un inclinometro posizionato su una boccola permette la misura dell'accelerazione non compensata.

Un inclinometro posizionato su una boccola permette la misura dell'accelerazione non compensata.

Tutti i segnali sono acquisiti con una frequenza di ac-

The measurement system is also able to detect the rails profile and combine the measurements in order to obtain the gauge value.

Measurement uncertainty is stated as $\pm 1\text{mm}$ concerning the gauge, $\pm 0.5\text{mm}$ for the rail profile.

The system complies with RFI standards for measuring the geometric quality of the track and has been verified according to the standard EN 13848-2 [15].

The rails profile and gauge allows to simulate the coupling with a generic wheelset and consequently calculate the equivalent conicity function, following the methods described in the standard EN 15302 [7].

Both geometrical parameters and rail profiles are acquired with a constant spatial pitch of 0.25m.

3.2. Wheel profile measurement

The wheels' profile was measured using a contact gauge held by Italcerifer S.p.A., Fig. 7.

The device is composed of a beam linking two measuring heads, everyone is equipped with a probe, manually guided by means of an actuation knob. Depending on the wheel gauge, the heads distance can be varied.

A sled and two support cylinders allow to place the device in such a way the Z coordinate is perfectly radial and the Y axial.



Figura 8 - Tastatore del calibro a contatto.
Figure 8 - Contact gauge measurement head.

SCIENZA E TECNICA

quisizione pari a 500 Hz e una frequenza di filtro anti-aliasing di 100 Hz, sufficienti allo scopo, tenendo presente che le tipiche frequenze di serpeggio dei carrelli non superano i 10 Hz trovandosi nella maggioranza dei casi nel range 4-6 Hz.

4. Elaborazione dati

4.1. Criterio per l'instabilità

La stabilità del veicolo si valuta in zone di rettilineo e curve di grande raggio, secondo quanto riportato al § 7.6.3.1 di [6]. I segnali sono stati filtrati con filtro passa banda intorno alla frequenza di serpeggio individuata nella banda 4-8 Hz, è quindi calcolato il valore rms su finestra mobile di 100 m con passo 10 m.

Il valore limite di accelerazione laterale sul carrello è stato calcolato in accordo con la norma EN 14363 [6].

4.2. Criterio di calcolo della conicità equivalente

La conicità equivalente (γ_e) è stata calcolata sulla base della combinazione dei profili reali di ruota e rotaia.

Il metodo di calcolo utilizzato per la conicità equivalente è quello riportato in [7], la conicità equivalente è calcolata per spostamenti y valutati come segue per ogni sezione di binario in funzione dello scartamento (TG) e della distanza tra le facce attive del bordino (RD), secondo [6]:

- $y = 3 \text{ mm}$ se $(\text{TG}-\text{RD}) \geq 7 \text{ mm}$
- $y = \left(\frac{(\text{TG}-\text{RD})-1}{2} \right)$ se $5 \text{ mm} \leq (\text{TG}-\text{RD}) \leq 7 \text{ mm}$
- $y = 2 \text{ mm}$ se $(\text{TG}-\text{RD}) \leq 5 \text{ mm}$

Nei casi che verranno presi in esame è stata sempre verificata la prima condizione.

Secondo quanto riportato in [6] il valore limite per la conicità è calcolato, per velocità comprese fra 120 e 300 km/h, utilizzando la seguente formula:

$$\tan \gamma_{lim} = 0.534 - \frac{V}{900}$$

Dove V (espressa in km/h) è la velocità di omologazione del veicolo maggiorata del 10%.

Per poter effettuare un corretto confronto con i valori di accelerazione, la conicità è stata analogamente valutata come media mobile su una finestra di 100m con passo di 10m.

4.3. Sincronizzazione dei risultati

I segnali di accelerazione e i dati geometrici del binario vengono registrati ognuno con un proprio sistema odometrico, essendo in genere il rilievo della linea effettuato in un momento diverso rispetto alla prova di stabi-

The use of this device, with two measurement heads, allows to detect the wheels' profiles in a common reference system, considering the axle inflexion in loaded conditions.

In Fig. 8 a view of the cylinders and probe ready for profile detection is reported. An overall view of the contact gauge is reported in Fig. 7.

3.3. Acceleration measurement and odometry

Every wheelset of the tested vehicle was monitored by means of two lateral accelerometers, placed on the bogie.

A pulse signal originated by a phonic wheel was used to evaluate vehicle position along the track. The same signal allowed to measure the speed.

An inclinometer placed on a bogie allowed the measurement of the uncompensated lateral acceleration.

All the signals were acquired with a sample frequency of 500 Hz and an anti-aliasing filter of 100 Hz, enough for the purpose, considering that typical bogie hunting frequencies are lower than 10 Hz, being usually in the range of 4-6 Hz.

4. Post-processing

4.1. Hunting oscillation criterion

The vehicle stability is evaluated in straight tracks and high radius curves, following what is stated in chapter § 7.6.3.1 of standard [6]. Signals are filtered with band-pass filter around the hunting frequency observed in the range 4-8 Hz, the rms value is then calculated on sliding window of 100m with 10m pitch.

The limit for the lateral acceleration is calculated following the indications of standard EN 14363 [6].

4.2. Criterion for equivalent conicity calculation

The equivalent conicity (γ_e) was calculated using real rails and wheels profiles.

The calculation method used is the one reported in [7], the equivalent conicity is calculated for displacements y evaluated as follows for every track section depending on the track gauge (TG) and the wheel flange distance (RD), according to [6]:

- $y = 3 \text{ mm}$ se $(\text{TG}-\text{RD}) \geq 7 \text{ mm}$
- $y = \left(\frac{(\text{TG}-\text{RD})-1}{2} \right)$ se $5 \text{ mm} \leq (\text{TG}-\text{RD}) \leq 7 \text{ mm}$
- $y = 2 \text{ mm}$ se $(\text{TG}-\text{RD}) \leq 5 \text{ mm}$

In the cases examined the first condition was always verified.

Following as reported in [6] the conicity limit value is calculated, for speeds comprised between 120 and 300 km/h, using the equation:

SCIENZA E TECNICA

lità. Questo può essere fonte di piccoli disallineamenti, dovuti ad eventuali slittamenti delle ruote dei rispettivi assi di misura.

Per individuare e correggere eventuali disallineamenti di questo genere, un programma di sincronizzazione, in ambiente Matlab®, è stato sviluppato appositamente per questa applicazione.

Il programma permette di confrontare il segnale di curvatura ($1/R$) proveniente dal sistema TGMS con l'accelerazione non compensata (Anc) misurata sul veicolo in prova.

Per sincronizzare i due segnali vengono scelti come punti di riferimento i picchi delle loro derivate rispetto al tempo, presenti nelle zone di curva: sia l'accelerazione non compensata che la curvatura crescono infatti velocemente in queste zone.

Tutto il segnale acquisito durante la prova viene quindi diviso in zone aventi almeno due picchi di derivata: uno positivo in ingresso curva, e uno negativo, un esempio è riportato in Fig. 9.

Nei grafici qui riportati i segnali della curvatura e dell'accelerazione non compensata sono riportati insieme alle rispettive derivate, per semplificare la visualizzazione entrambi i segnali sono stati adimensionalizzati rispetto al valore massimo ottenuto durante la prova. I punti di riferimento sono evidenziati in figura dai cerchietti neri.

Una volta individuati i picchi, le loro coordinate vengono confrontate e utilizzate per effettuare una correzione di tipo lineare su uno dei due vettori che definiscono la progressiva e che verrà quindi preso come riferimento. Sappiamo infatti che le coordinate dei picchi di derivata devono coincidere.

Consideriamo come riferimento la coordinata dell'accelerazione non compensata (x_{anc}), in quanto sincronizzata con le misure di accelerazione ed effettuiamo la correzione sulla coordinata della conicità equivalente (x_{eqc}).

La nuova coordinata corretta (x_{corr}) è ottenuta applicando la trasformazione lineare decritta nella seguente formula:

$$\frac{x_{corr} - x_{Anc1}}{x_{eqc} - x_{eqc1}} = \frac{x_{Anc2} - x_{Anc1}}{x_{eqc2} - x_{eqc1}}$$

Un esempio del buon funzionamento della correzione applicata è osservabile in Fig. 10.

In questo grafico si osserva come il segnale di curvatura con ascissa da correggere (curva blu) sia in leggero anticipo rispetto al segnale Anc (curva nera) di riferimento, l'applicazione della correzione (curva rossa) riporta in fase i due segnali.

La nuova progressiva è stata quindi utilizzata a monte di tutte le successive elaborazioni relative alla conicità equivalente.

Where V (expressed in km/h) is the homologation velocity increased of the 10 %.

In order to correctly compare equivalent conicity and acceleration, the conicity was similarly evaluated as a moving average on a window of 100m with 10m pitch.

4.3. Results synchronization

Acceleration and track geometry signals are acquired each with a different odometry system, being the track detection performed usually not contemporarily with the stability test.

This can be source for misalignments, due to wheel slips.

In order to detect and correct such kind of misalignments, a synchronization routine, in Matlab® environment, was developed on purpose for this application.

The routine allows to compare the curvature ($1/R$) signal, coming from TGMS, with the non-compensated lateral acceleration (Anc) measured on the tested vehicle.

In order to synchronize the signals, their derivative peaks, present before and after curves, are chosen as reference points: both uncompensated acceleration and curvature quickly grow indeed approaching a curve.

The whole acquired signal is hence split in zones having two peaks: one positive, when entering the curve, and one negative, when exiting, an example is reported in Fig. 9.

In the graphs the curvature and uncompensated acceleration are plotted together with their derivatives, in order to simplify the visualization, signals were expressed in dimensionless terms with respect to the maximum value observed during the test. The reference points are highlighted by black circles.

Once found the peaks, their coordinates are compared and used to provide a linear correction on one of the placement vectors, used as reference from now on. It is well known indeed that the derivative peaks must coincide.

Considering as reference the uncompensated acceleration coordinate (x_{anc}), because synchronized with acceleration signals, it is possible to correct the curvature coordinate (x_{eqc}).

The new corrected coordinate (x_{corr}) is calculated applying the linear transformation described by the following equation:

$$\frac{x_{corr} - x_{Anc1}}{x_{eqc} - x_{eqc1}} = \frac{x_{Anc2} - x_{Anc1}}{x_{eqc2} - x_{eqc1}}$$

Fig. 10 shows the good quality of the correction.

In this graph it is possible to note that the curvature signal plotted against the uncorrected abscissa (blue line) is slightly forward with respect to the Anc signal (black line),

SCIENZA E TECNICA

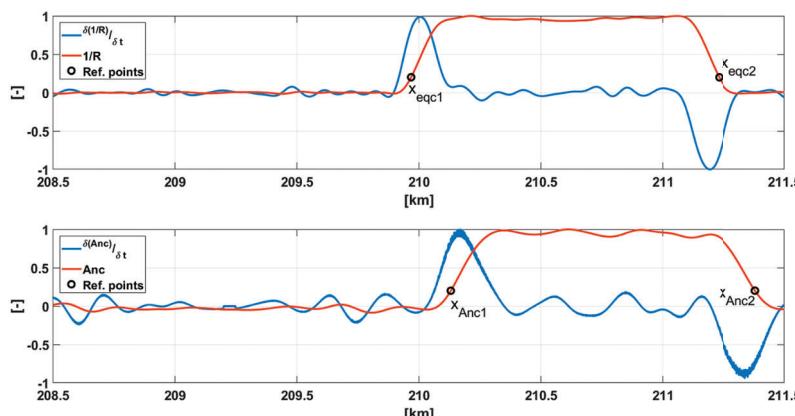


Figura 9 - Sincronizzazione segnali: ricerca punti di riferimento.
Figure 9 - Signal synchronization: search for reference points.

5. Risultati

In questo capitolo verranno riportati i risultati ottenuti dall'analisi sopra riportata.

Per motivi di sintesi verranno riportati solamente i risultati ottenuti dalle misure delle sale della terza carrozza del veicolo in composizione al convoglio di prova.

In un primo momento le variabili di interesse saranno mostrate nella loro evoluzione lungo la progressiva, ovvero nello spazio, si parlerà quindi di "grafici spaziali". In una seconda fase invece le variabili saranno mostrate nella loro evoluzione dell'una rispetto all'altra, in particolare le accelerazioni verranno rappresentate rispetto alla conicità equivalente, in questo caso si parlerà quindi di "grafici bidimensionali".

5.1. Grafici spaziali

Un primo confronto dei risultati può essere fatto osservando la loro evoluzione spaziale, cioè rappresentandoli sulla progressiva, vedi Fig. 11.

Nel primo grafico, dall'alto, sono riportate la velocità (in rosso) e l'accelerazione non compensata (in nero), che permettono di capire il tipo di tracciato percorso: quando l'accelerazione non compensata aumenta o diminuisce rispetto al valore zero, siamo in presenza di curve, destra o sinistra rispettivamente. Si trova conferma a ciò nel secondo grafico, che riporta la geometria del tracciato, indicando curve destre o sinistre con valori 1 o -1, e 0 per i rettilinei, i valori numerici riportati nel grafico esplcitano invece i raggi di curvatura.

used as reference. The application of the correction (red line) put the signal in phase.

The new coordinate is then used for the successive post-processing on the equivalent conicity.

5. Results

In this chapter the results obtained from the aforementioned analysis will be described.

For the sake of synthesis only results from the third coach will be here reported.

At first the more interesting parameters will be shown in their evolution along the track coordinate, they will be referred as "spatial graphs".

In a second phase, the variables will be shown one with respect to the other, precisely the accelerations will plotted against equivalent conicity, in this case they will be referred as "two-dimensional graphs".

5.1. Spatial graphs

A first comparison between results can be performed observing their spatial evolution, i.e. plotting signals against their track coordinate, see Fig. 11.

The first graph from top shows speed (in red) and uncompensated acceleration (in black), they allow to understand which kind of track was travelled, when acceleration rises or decrease from zero we are in presence of a curve, right or left respectively. This is confirmed by the next graph, reporting the track geometry indicating right and left curves with 1 or -1 respectively, 0 for straight, the numbers within the graph show the curvature values.

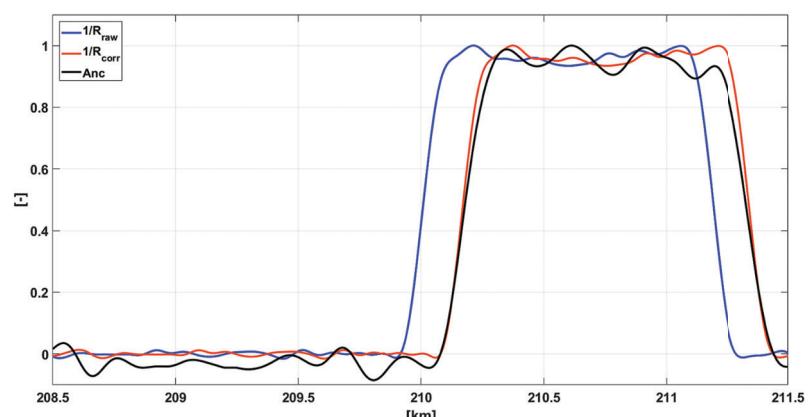


Figura 10 - Esempio di correzione delle coordinate spaziali.
Figure 10 - Example of spatial coordinates correction.

SCIENZA E TECNICA

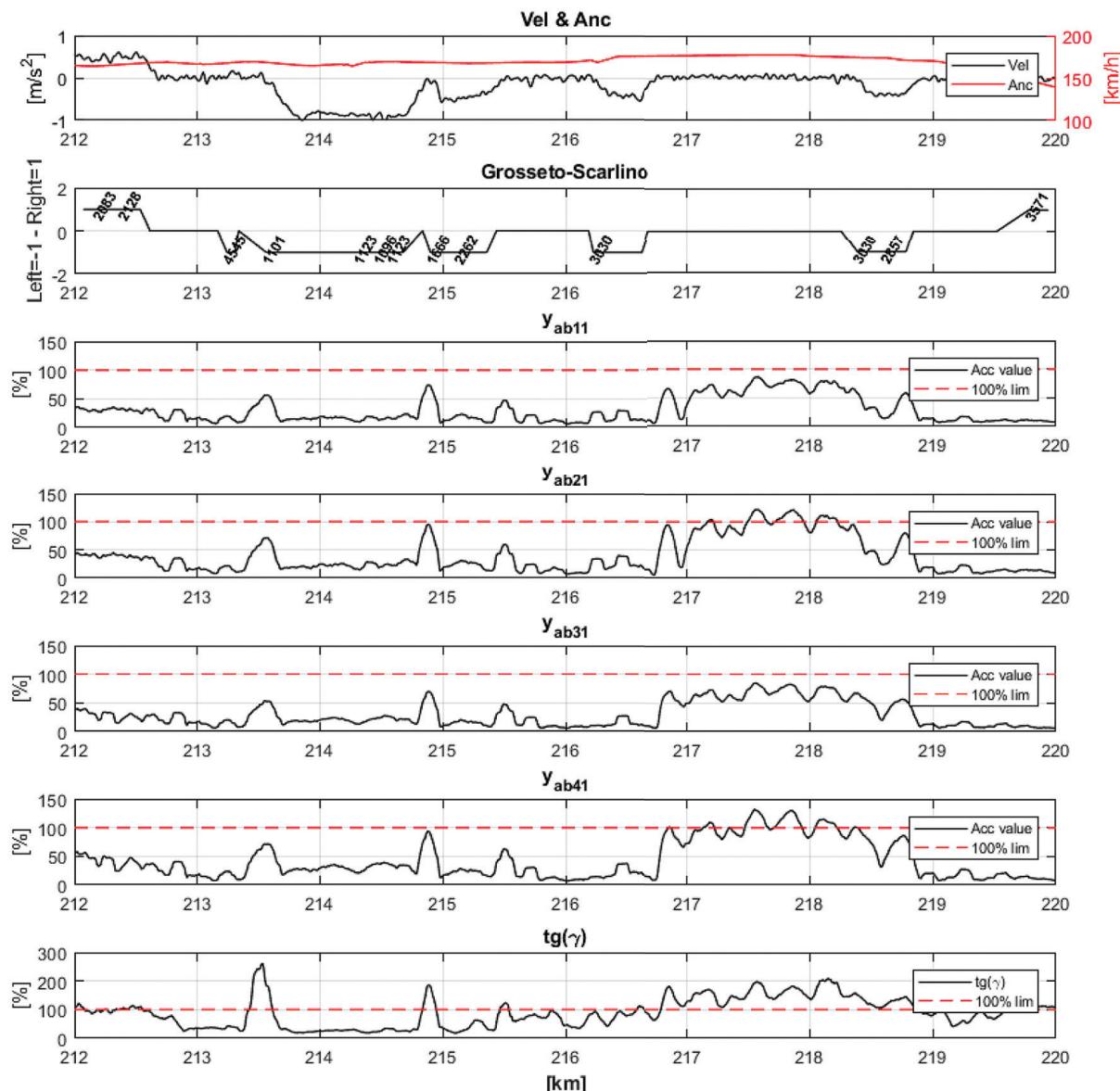


Figura 11 - Distribuzione spaziale dei risultati, dall'alto: Velocità e Anc, geometria del tracciato Grosseto-Scarlino, accelerazioni su assi 11-21-31-41, conicità equivalente.

Figure 11 - Results spatial distribution, from the top: Speed and Anc, Grosseto-Scarlino track geometry, acceleration on axis 11-21-31-41, equivalent conicity.

I quattro grafici successivi riportano invece le accelerazioni misurate sulle boccole degli assi della carrozza scelta, da 1 a 4. I segnali in questione sono già post-processedati secondo quanto riportato nel Capitolo 5.1 e riportati in percentuale rispetto al limite definito dalla norma [6]. L'ultimo grafico riporta invece la conicità equivalente, anch'essa calcolata secondo la procedura descritta nel Capitolo 5.2 e riportata in percentuale rispetto al limite.

The four successive graphs show the accelerations measured on the bushings of the coach axes, from 1 to 4. The signals shown are already post-processed, in agreement with the method explained in chapter 5.1, and expressed as the per cent value with respect to the limit defined by the standard [6]. The last graph shows the equivalent conicity, also calculated in agreement with the procedure reported in chapter 5.2 and expressed as per cent value with respect to its limit.

SCIENZA E TECNICA

Osservando la figura si evidenzia subito come esista una evidente correlazione fra l'incremento di conicità equivalente e l'instabilità.

Questa ottima correlazione fra i segnali è stata verificata calcolando il coefficiente di cross-correlazione fra le accelerazioni e la conicità equivalente secondo la formula seguente:

$$R_{xy}(m) = \sum_{n=0}^{N-m-1} x_{n+m} y_n^*$$

Dove l'asterisco indica il complesso coniugato.

Il valore $R_{xy}(m)$ può essere adimensionalizzato usando i valori ad $m=0$ delle autocorrelazioni di x e y :

$$\frac{R_{xy}(m)}{\sqrt{R_{xx}(0)R_{yy}(0)}}$$

In modo tale da ottenere un'indicazione della effettiva somiglianza dei due segnali.

Il risultato di questo calcolo è riportato in Fig. 12, dove si può osservare come sia presente un picco di massima correlazione fra i segnali nella posizione 0. Questo è indicativo del fatto che esiste un punto di massima similitudine, e che è esattamente nella condizione riportata in Fig. 11, nessuno shift è necessario per migliorare la sincronizzazione.

È importante anche osservare che il coefficiente supera per tutti i casi il valore di 0.9 (cioè il 90%), dimostrando che la correlazione fra i segnali non è casuale e che quindi i valori delle accelerazioni sono fortemente influenzate dalla conicità equivalente.

5.2. Grafici bidimensionali

Osservando i limiti riportati in Fig. 11 si nota che esiste una zona, fra i km 216 e 219 dove l'accelerazione rimane elevata per tutti gli assi e addirittura supera il limite di stabilità per gli assi 21 e 41 del terzo veicolo in composizione al convoglio di prova.

Questa zona è caratterizzata da un lungo rettilineo percorso a velocità elevata (≈ 170 km/h), è quindi stata ritenuta significativa per un'analisi aggiuntiva, di seguito riportata.

Vista l'ottima sincronizzazione dei segnali ottenuta con il metodo descritto nel Capitolo 5.3 è possibile riportare in ordinata l'evoluzione dei valori di accelerazione dei vari assi in funzione della rispettiva co-

The figure shows immediately the evident correlation between the rise of the equivalent conicity and the instability.

This correlation was verified calculating the cross-correlation coefficient between accelerations and equivalent conicity, according to this formula:

$$R_{xy}(m) = \sum_{n=0}^{N-m-1} x_{n+m} y_n^*$$

Where the asterisk indicates the complex conjugate.

The value $R_{xy}(m)$ can be expressed in dimensionless terms using the autocorrelation values of x and y at $m=0$:

$$\frac{R_{xy}(m)}{\sqrt{R_{xx}(0)R_{yy}(0)}}$$

In such a way to get an indication of the effective similitude among the two signals.

The result of this calculation is reported in Fig. 12, where it is possible to observe the presence of a peak of maximum correlation between the signals in position 0. This indicates that a maximum point of similitude exists and is placed exactly in the position shown in Fig. 11, no further shift is needed to improve the synchronization.

It is important to note that the coefficient exceeds always the value of 0.9 (i.e. 90%), demonstrating that the correlation between the signals is not aleatory and that the acceleration values are strongly affected by the equivalent conicity.

5.2. Two-dimensional graphs

Observing the limits reported in Fig. 11, it is possible to note that there is a zone, between km 219 and 219, where the

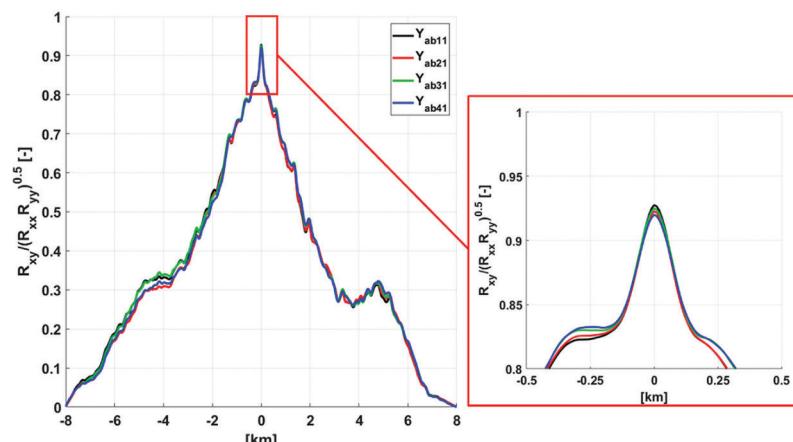


Figura 12 - Cross-correlazione fra segnali di accelerazione e conicità equivalente.
Figure 12 - Cross-correlation between signals of acceleration and equivalent conicity.

SCIENZA E TECNICA

nicità equivalente (in ascissa). In tal modo è possibile comprendere meglio il legame fra le due grandezze fisiche e capire se i casi di supero del limite riscontrati sono effettivamente avvenuti in condizione di conicità superiore al limite previsto da [1] ed espresso nel paragrafo 5.2:

$$\tan \gamma_{lim} = 0.534 - \frac{V}{900}$$

I risultati di questa analisi sono riportati in Fig. 13 dove le linee rosse tratteggiate rappresentano il limite 100% su ascisse e ordinate. Tali limiti suddividono i grafici in quattro quadranti:

- I. In basso a sinistra: sia accelerazioni che conicità equivalenti sono sotto i limiti. In questa zona si hanno condizioni di normale funzionamento.
- II. In basso a destra: le accelerazioni sono inferiori al limite anche se la conicità è elevata, in queste zone l'instaurarsi dell'instabilità potrebbe essere favorita dall'elevata conicità, tuttavia le accelerazioni generate rimangono entro limiti accettabili.
- III. In alto a destra: In queste zone sia le accelerazioni che la conicità equivalenti sono superiori ai rispettivi limiti. La condizione di instabilità è qui giustificata dagli elevati valori di conicità equivalente.
- IV. In alto a sinistra: in questa zona le accelerazioni sono superiori ai limiti ma la conicità è bassa. Questa zona dovrebbe essere vuota per garantire la sicurezza del veicolo, se sono presenti punti si rende necessaria una verifica approfondita per comprenderne il motivo.

Nel caso preso in esame possiamo osservare che i punti di instabilità osservati per gli assi 21 e 41 del terzo veicolo in composizione al convoglio di prova sono concentrati nella zona III, rassicurandoci sulla stabilità del treno in normali condizioni di circolazione.

Per gli assi 11 e 31, non essendoci superi, i quadranti III e IV sono entrambi vuoti.

In tutti i casi presi in esame si osserva comunque come i valori di accelerazione abbiano un forte incremento al crescere della conicità equivalente, indicando che il veicolo si trova sempre in condizioni di instabilità, pur raggiungendo valori diversi sui diversi assi, in alcuni casi superando il limite imposto da normativa. Questa discrepanza può dipendere da numerosi fattori, che non possono in questa sede essere approfonditi. Quello che però risulta evidente è che i due carrelli composti rispettivamente dagli assi 11-21 e 31-41 hanno un simile comportamento: gli assi posteriori infatti (21 e 41) raggiungono accelerazioni più elevate a parità di conicità equivalente. Questo fenomeno si può spiegare con il fatto che l'oscillazione del carrello abbia un centro di rotazione diverso dal centro geometrico del carrello stesso, poiché gli assi

acceleration is high for every axis and even exceeds the limit for the axes 21 and 41 of the third vehicle of the test convoy.

This zone is characterized by a long straight track, travelled at high speed (~170 km/h), and hence it was considered significative for an additional analysis, reported in the following.

Given the very good synchronization between the signals, obtained exploiting the method described in chapter 5.3, it is possible to plot the acceleration of the different axes against the equivalent conicity. In such a way it is possible to better comprehend the link between the two parameters, and understand if all the cases in which accelerations exceed the limit are actually corresponding to equivalent conicity over the limit stated in [1] and defined in chapter 5.2:

The results of this analysis are shown in Fig. 13, where the dashed red lines represent the 100% limit, both in abscissa and ordinate. These limits split the graphs in four quadrants:

$$\tan \gamma_{lim} = 0.534 - \frac{V}{900}$$

- I. Bottom left: both the acceleration and the equivalent conicity are lower than the limits. This zone is characterized by normal operation.
- II. Bottom right: the acceleration is lower than the limit, even if the equivalent conicity is high, in this zone the instability could establish due to high conicity, however the accelerations generated remain within acceptable limits.
- III. Top right: in this zone both acceleration and the equivalent conicity exceed the limits. The instability is here justified by the high values of equivalent conicity.
- IV. Top left: in this zone the accelerations are higher than the limit, but the equivalent conicity is low. This zone should be empty to guarantee safety, if points are present a deepen analysis is required to understand the reasons.

In the case examined it is possible to observe that the instability points observed for axes 21 and 41 of the third vehicle of the test convoy are concentrated in zone III, assuring the stability of the rolling stock in normal operating conditions.

For axes 11 and 31, no excess was found, the quadrant III and IV are hence empty.

In every examined case it is observable how the acceleration values have a strong increase with the growth of the equivalent conicity, meaning that the vehicle is always unstable, but reaching different values for different axis, in some cases overcoming the limit imposed by the standard. This discrepancy can be due to numerous factors, that can not be investigated here. Nevertheless it is evident that the two bogies, composed by axis 11-21 and 31-41 respectively have a similar behavior: the rear axis indeed (21 and 41) reach higher accelerations for the same level of equivalent conicity. This

SCIENZA E TECNICA

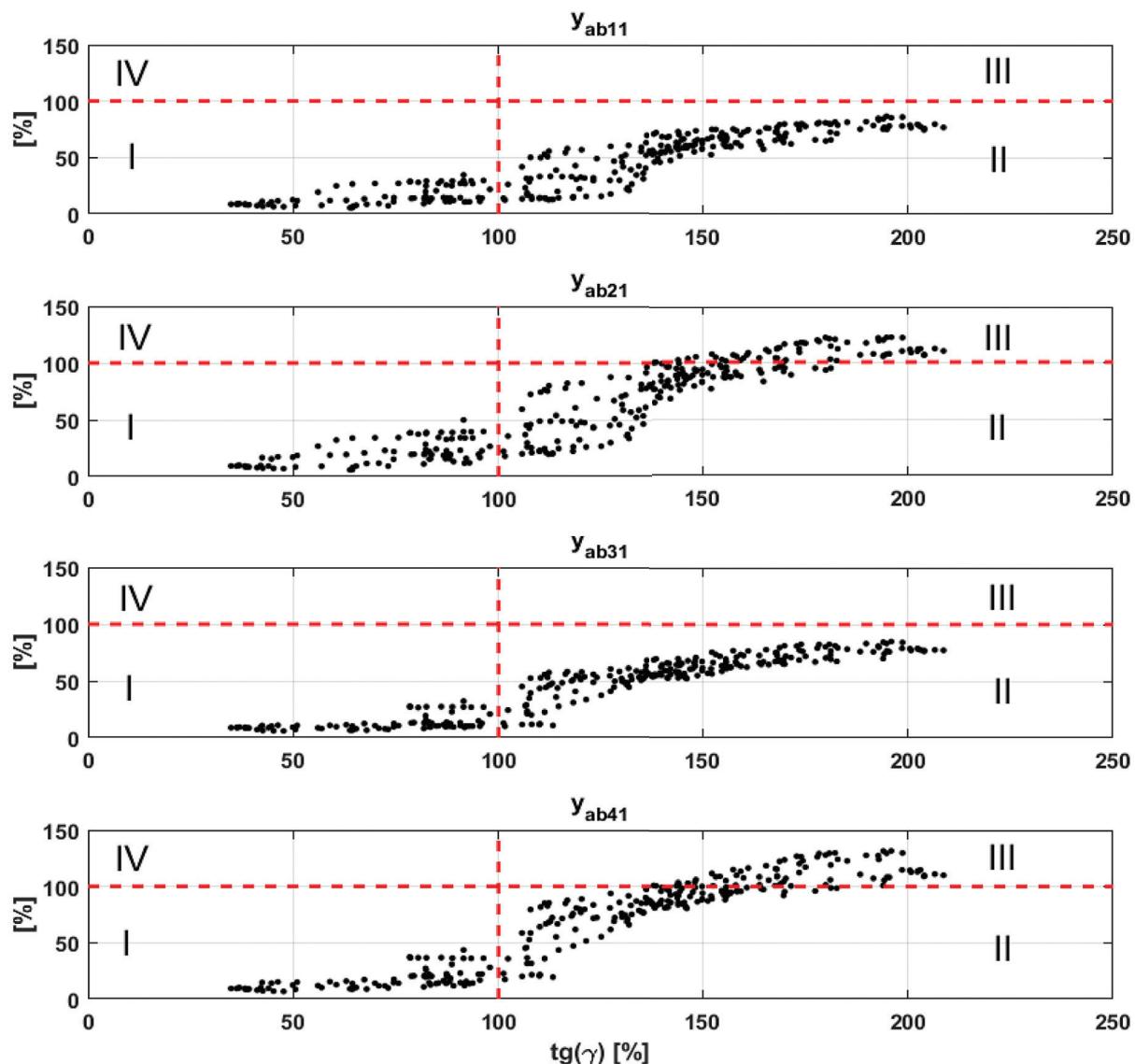


Figura 13 - Grafici bidimensionali: Accelerazioni vs Conicità equivalente per i km 216-219.

Figure 13 - Two-dimensional graphs: Accelerations vs Equivalent conicity for km 216-219.

anteriori hanno accelerazioni minori si può ipotizzare che sia prossimo ad essi.

6. Conclusioni

L'analisi di stabilità di una serie di veicoli trainati a carrelli è stata portata avanti utilizzando il metodo semplificato accelerometrico, come descritto nella norma EN14363. Alle misure accelerometriche sono stati aggiunti la misura del profilo delle ruote e delle rotaie nel tratto percorso durante le prove.

phenomenon can be explained with the fact that bogie oscillation has a center of rotation different from the geometrical bogie center, given that the front axis have lower accelerations it is possible to suppose that is close to them.

6. Conclusions

The stability analysis of a towed vehicle was carried out exploiting the simplified accelerometer method, as stated in standard EN 14363.

Together with the accelerations, the track and wheels

SCIENZA E TECNICA

A seguito di un'accurata sincronizzazione fra progressiva relativa alla geometria del binario e test è stato possibile effettuare confronti significativi fra le accelerazioni e la conicità equivalente per ogni punto della tratta percorsa.

Tale confronto ha permesso di osservare come ogni picco di accelerazione osservato fosse corrisposto da un picco di conicità equivalente. Tale osservazione è stata confermata da un'analisi di cross-correlazione fra le accelerazioni e la conicità equivalente, nonché dall'osservazione dei dati su grafici bidimensionali.

L'utilizzo di strumentazione all'avanguardia capace di misurare accuratamente la geometria del binario e delle ruote e metodi per l'elaborazione dei dati capaci di sincronizzare correttamente i segnali misurati in momenti diversi, hanno permesso di fornire un'accurata descrizione del comportamento dinamico del veicolo in questione, dando adeguata giustificazione dei superi rilevati.

profiles have been measured on the line travelled during the tests.

Thanks to an accurate synchronization between the spatial coordinate of the track geometry and of the test acquisitions, it was possible to carry out significant comparison between accelerations and the equivalent conicity for every point of the line.

This comparison allowed to observe that every acceleration peak has a corresponding peak of equivalent conicity. This observation was confirmed by a cross-correlation analysis between accelerations and the equivalent conicity, as well as by the observation of the data on two-dimensional graphs.

The use of forefront devices able to accurately measure the track geometry and the wheel profile, together with post-processing methods able to properly synchronize the signals obtained in different moments, allowed to provide an accurate description of the dynamic behavior of the test vehicle, giving adequate justification to the excesses detected.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] M. BRUNER, G. CORAZZA, (2018), "Notes on the development of an original scientific thought in the rail system - Running on a straight track and concerning", Ingegneria Ferroviaria, n. 73 (9), pp. 707-725.
- [2] G. DIANA, S. BRUNI, R. CORRADI, D. GALLEONARDO, (2012), "On the derailment of a railway vehicle. Influence of different parameters", Ingegneria Ferroviaria, n. 67 (2), pp. 109-135.
- [3] G. DIANA, F. RESTA, F. BRAGHIN, M. BOCCIONE, E. Di GALLEONARDO, C. P., (2012), "Calibration of dynamometric wheel-sets for the measurement of the wheel-rail contact forces", Ingegneria Ferroviaria, n. 67 (1), pp. 9-21.
- [4] A. BRACCIALI, F. CAVALIERE, M. MACHERELLI, (2014), "Review of instrumented wheelset technology and applications" in 2nd Int. Conf. Railway Technol., Res., Develop., Maintenance.
- [5] M. MACHERELLI, (2017), "Analisi delle forze ruota-rotaia mediante sale montate strumentate. Progettazione e validazione sperimentale di sistemi basati su strumentazione estensimetrica", Firenze.
- [6] EN 14363: 2016+A1, (2018) Railway applications - Testing and Simulation for the acceptance of running characteristics of railway vehicles - Running Behaviour and stationary tests, December.
- [7] IEN 15302, (2008), "Method for determining the equivalent conicity".
- [8] M. Nò, J. K. HEDRICK, (1984), "High speed stability for rail vehicles considering varying conicity and creep coefficients", Vehicle System Dynamics, n. 13.6, pp. 299-313, 1984.
- [9] R. M. GOODALL, S. D. IWNICKI, (2004), "Non-linear dynamic techniques v. equivalent conicity methods for rail vehicle stability assessment", Vehicle System Dynamics, n. 41, pp. 791-799.
- [10] O. POLACH, (2006), "Comparability of the non-linear and linearized stability assessment during railway vehicle design", Vehicle System Dynamics, n. 44.sup1, pp. 129-138.
- [11] F. ATTIVISSIMO, A. DANESE, N. GIAQUINTO, P. SFORZA, (2007), "A railway measurement system to evaluate the wheel-rail interaction quality", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, n. 56.5, pp. 1583-1589.
- [12] Z. LIU, J. SUN, H. WANG, G. ZHANG, (2011), "Simple and fast rail wear measurement method based on structured light", Optics and Lasers in Engineering, n. 49(11), pp. 1343-1351.
- [13] W. KLINGEL, (1883), "Über den Lauf der Eisenbahnwagen auf gerader Bahn", Organ fur die Fortschritte des Eisenbahnwesens in Technischer Beziehung, 1883.
- [14] R. PANAGIN, (1990), "La dinamica del veicolo ferroviario", Torino: Levrotto & Bella.
- [15] E. 13848-2:2006, Railway applications - Track - Track geometry quality - Part 2: Measuring systems - Track recording vehicles, May 2006.
- [16] S. BRUNI, L. MAZZOLA, P. BELFORTE, A. CERA, G. MANCINI, H. HARTWIG, D. VANNUCI, (2008), "Armonizzazione dei requisiti geometrici e funzionali degli smorzatori per treni ad alta velocità", Ingegneria Ferroviaria, n. 63 (6), pp. 505-514, 2008.