



Il pantografo innovativo JRC15 a 3kVcc

The innovative JRC15 3kV_{DC} pantograph

Ing. Marco CARNEVALE^(*)

Prof. Andrea COLLINA^(*)

Ing. Giovanni FRATTOLILLO^(**)

Ing. Guido DEL GOBBO^(***)

Ing. Dimitrios MARINIS^(***)

Ing. Mauro MENCHI^(****)

Ing. Alessio RAMIERI^(*****)

Sommario - Il presente articolo vuole essere un primo approccio alla presentazione del pantografo JRC15, sviluppato come sottosistema innovativo per l'equipaggiamento di rotabili regionali e intercity, su tratti media e lunga percorrenza (con velocità massima 200 km/h).

Il documento descrive i dispositivi elettromeccanici che compongono il pantografo, l'elettronica di comando e controllo e la sua diagnostica integrata ed armonizzata con quella di bordo rotabile e della flotta dell'operatore ferroviario.

1. Introduzione

Le attuali flotte di rotabili regionali e Intercity in Italia dispongono di diversi sistemi evoluti, sia nella loro tecnologia intrinseca sia nella diagnostica predittiva di interventi di manutenzione e di individuazione di futuri guasti. Tra i pochi sistemi che non sono completamente coinvolti in questa evoluzione tecnologica troviamo il pantografo.

Questa lacuna è stata presa in considerazione all'interno di un gruppo di ricerca permanente, il JRC (Joint Research Centre), dove con la partecipazione di università, proprietari di Infrastruttura, costruttori di rotabili, operatori e costruttori di sottosistemi ferroviari è stato sviluppato un pantografo denominato JRC15, idoneo a equipaggiare ogni tipo di rotabile caratterizzato da velocità fino a 200 km/h e a sostituire i modelli di pantografi attualmente in uso (per esempio il modello FS 52).

I principali partecipanti al gruppo di lavoro sono stati Contact (costruttore del pantografo), Bombardier Tran-

Summary - This article is intended as a first approach to the presentation of the JRC15 pantograph, developed as an innovative subsystem for regional and intercity rolling stock equipment, on medium and long distance routes (with 200 km/h maximum speed).

The document describes the electro-mechanical devices that make up the pantograph, the command and control electronics and its integrated diagnostics harmonised with that of the on board of the rolling stock and rail operator's fleet.

1. Introduction

The current regional and Intercity rolling stock fleets in Italy have different advanced systems, both in their intrinsic technology and in predictive diagnostics for maintenance operations and identification of future failures. The pantograph is among the few systems that are not fully involved in this technological evolution.

This gap has been taken into account within a permanent research group, the JRC (Joint Research Centre), where with the participation of universities, Infrastructure owners, rolling stock manufacturers, operators and builders of railway subsystems, a pantograph called JRC15 was developed, capable of equipping all kinds of rolling stock featuring speeds up to 200 km/h and of replacing the pantograph models currently in use (for example, the FS 52 model).

The main participants in the work group were Contact (manufacturer of the pantograph), Bombardier Transportation (integrator on railway rolling stock), Politecnico of Mi-

^(*) Politecnico di Milano.

^(**) Contact.

^(***) Bombardier Transportation Italy SpA.

^(****) Trenitalia.

^(*****) Italcertifer.

^(*) Politecnico of Milan.

^(**) Contact.

^(***) Bombardier Transportation Italy SpA.

^(****) Trenitalia.

^(*****) Italcertifer.

sportation (integratore su rotabile ferroviario), Politecnico di Milano (Laboratorio di Ricerca), Trenitalia (proprietario di flotta), ItalCertiFer (VIS e Laboratorio Certificato).

Il documento è stato sviluppato su tre sezioni (fra loro indipendenti), in modo da poter coprire tutti gli aspetti tecnici fondamentali del pantografo.

1.1. Requisiti di un pantografo asimmetrico per rotabili regionali

Il pantografo è stato sviluppato tenendo conto degli obiettivi sotto indicati:

- semplicità costruttiva;
- miglioramento delle prestazioni di captazione di corrente;
- riduzione del costo del ciclo di vita rispetto alla situazione dei pantografi simmetrici attuali;
- compatibilità con i diversi tipi di rotabili regionali.
- possibilità di installazione, con modifiche minime, su diversi tipi di rotabili che attualmente sono equipaggiate con i pantografi del tipo FS52;
- possibilità di essere equipaggiato con un sistema diagnostico in grado di valutare sia lo stato del pantografo che della linea aerea di contatto;
- Dimensioni e massa minori, in particolare con riferimento ai pantografi tipo FS52.

1.2. Aree di applicabilità del pantografo JRC15

Le caratteristiche del pantografo e le esaustive prove già effettuate sia in laboratorio che in linea, che saranno approfondite nelle sezioni successive, lo rendono idoneo a operare su un'ampia gamma di rotabili rivolti al servizio regionale e a intercity fino a velocità di 200 km/h. Inoltre la possibilità di essere controllato con differenti tipologie di sistemi di comando lo rende integrabile in modo semplice e poco invasivo nell'impianto pneumatico ed elettrico dei rotabili esistenti nelle flotte italiane ed estere.

1.3. Caratteristiche principali: parte elettrica, parte meccanica, parte elettronica-diagnostica

Il pantografo JRC15 del tipo a spinta impressa, è costituito (fig. 1) da un quadro articolato con struttura monobraccio (albero motore e telaio superiore) di tipo asimmetrico, recante alla sommità una testa di captazione singola che alloggia due striscianti. Il quadro articolato è azionato da una molla ad aria (attuatore pneumatico) che può essere opzionalmente controllato in pressione in funzione della velocità e del senso di marcia. La testa di captazione è connessa al telaio superiore tramite due gruppi di molle elicoidali (fig. 1) che lavorano in direzione verticale. La testa di captazione è costituita da due se-

lan (Research Laboratory), Trenitalia (fleet owner), ItalCertiFer (VIS and Certified Laboratory).

The document was developed on three (independent) sections, so as to cover all technical fundamentals of the pantograph.

1.1. Requirements for an asymmetrical pantograph for regional rolling stock

The pantograph was developed taking into account the objectives set forth below:

- *simple construction;*
- *improvement of current collection performance;*
- *life-cycle cost reduction compared to the situation of current symmetrical pantographs;*
- *compatibility with different types of regional rolling stock;*
- *installation possibilities, with minor modifications, on different types of rolling stock that are currently equipped with FS52 type pantographs;*
- *possibility to be equipped with a diagnostic system able to assess both the status of the pantograph and of the overhead contact line;*
- *smaller size and mass, particularly with reference to FS52 type pantographs.*

1.2. Applicability areas of the JRC15 pantograph

The characteristics of the pantograph and the exhaustive tests already carried out both in the lab and in the line, which will be dealt with in depth in the following sections, make it suitable for operating on a wide range of regional and intercity service rolling stock with speeds up to 200 km/h. Moreover, the possibility of being controlled with different types of control systems makes it easy to integrate in a simple and scarcely invasive way in the pneumatic and electrical system of the existing rolling stock in the Italian and foreign fleets.

1.3. Main features: electric part, mechanical part, electronic and diagnostic part

The JRC15 pantograph is made up of (fig. 1) an articulated frame with asymmetrical, single-arm structure (driving shaft and upper frame), that at the top has a single current collection head that houses two contact strips. The articulated frame is operated by an air spring (pneumatic actuator) that can be optionally pressurised depending on speed and direction of travel. The current collection head is connected to the upper frame by means of two sets of helical springs (fig. 1) working vertically. The current collection head consists of two half-frames and two self-supporting contact strips, suitable for collecting current from 3kV_{DC}-powered overhead contact lines. A rod ensures the correct

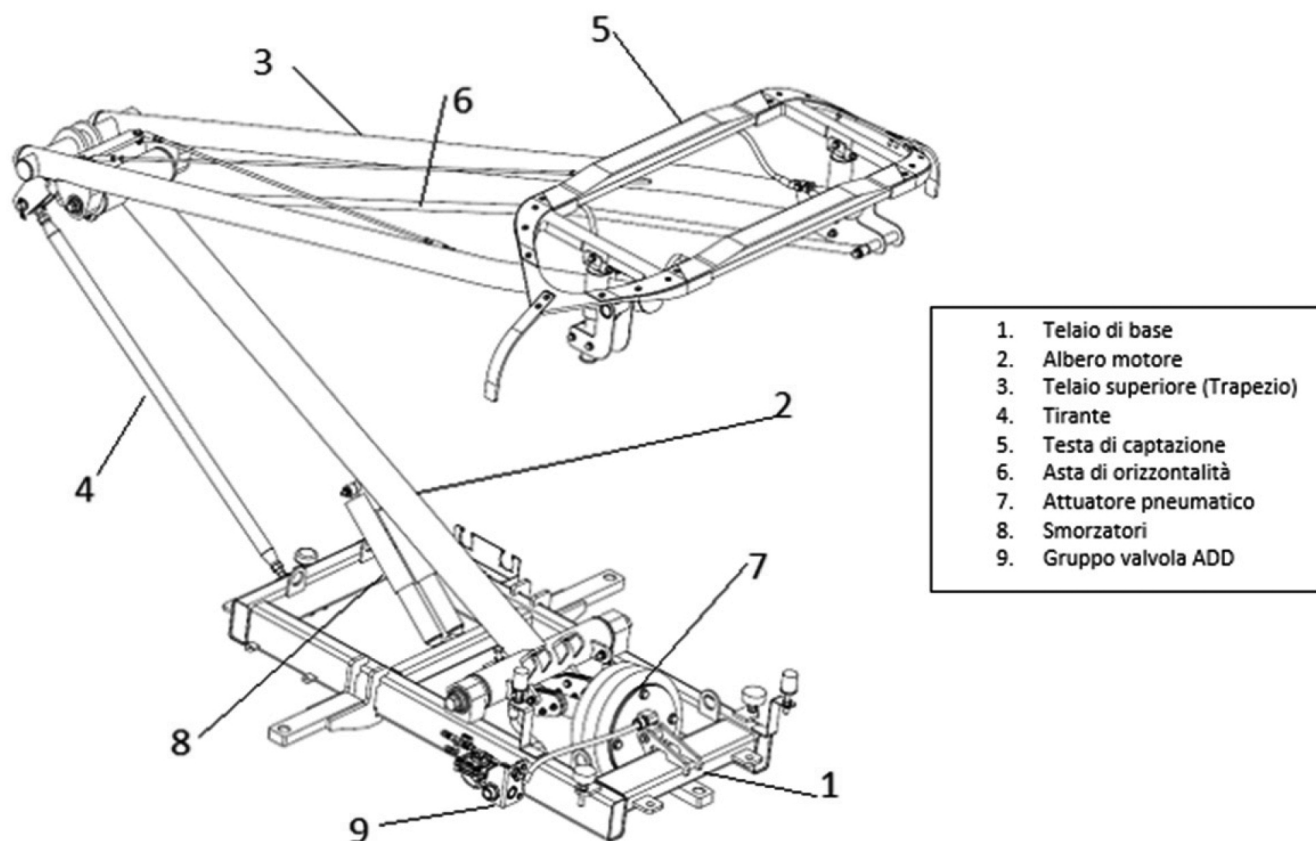


Fig. 1 - Pantografo JRC15.

Fig. 1 - JRC15 Pantograph.

mitelai e da due striscianti del tipo autoportante, idonei a captare corrente da catenarie alimentate a 3kVcc. Tramite un'asta di orizzontalità viene garantito il corretto posizionamento della testa di captazione durante l'escursione del pantografo.

Il pantografo può essere equipaggiato con un sistema diagnostico "on-board", sviluppato dalla ditta Contact e dal Politecnico di Milano, integrato con l'attuale sistema diagnostico a bordo rotabili della locomotiva E464, appartenente alla famiglia di applicazioni di "telediagnostica" di Bombardier/Trenitalia. Tale sistema svolge la suddetta valutazione elaborando le accelerazioni verticali misurate tramite dei sensori di tipo ottico.

Il pantografo è stato sviluppato e testato con particolare riferimento alle norme EN (European Norms) e alle specifiche di interoperabilità (STI) indicate nella bibliografia.

Le fasi di sollevamento/abbassamento del pantografo e il controllo della spinta media che gli striscianti esercitano sulla catenaria avvengono alimentando l'attuatore pneumatico (molla ad aria) con aria la cui pressione è determinata da una valvola proporzionale controllata in corrente in funzione della velocità e del senso di marcia. L'abbassamento del pantografo avviene per effetto gravitazionale (peso proprio), depressurizzando il sistema mo-

horizontal positioning of the captation head for the entire pantograph stroke.

The pantograph can be equipped with an "on-board" diagnostic system developed by Contact and the Politecnico of Milan, integrated with the current diagnostic system on board rolling stock of the E464 locomotive, belonging to the family of "Remote diagnosis" applications of Bombardier/Trenitalia. This system performs this evaluation by processing vertical accelerations measured using optical sensors.

The pantograph has been developed and tested with particular reference to EN standards and interoperability specifications (TSI) reported in the bibliography.

The lifting/lowering phases of the pantograph and the control of the average force that the contact strips exert on the catenary are performed by powering the pneumatic actuator (air spring) with air, whose pressure is determined by a proportional valve controlled by current depending on speed and the direction of travel. The lowering of the pantograph takes place by gravitational effect (own weight), depressurising the motion system. It is characterised by two phases: the first features a rapid detachment from the line to establish the necessary isolation distance, and subsequently break of the electric arc, if any, that may be estab-

tore. Esso è contraddistinto da due fasi: la prima caratterizzata da un rapido distacco dalla linea per stabilire la necessaria distanza di isolamento, e quindi rompere l'eventuale arco elettrico che potrebbe instaurarsi, ed una seconda, di abbassamento più lento, in modo che il quadro articolato giunga sugli appoggi in maniera graduale e senza urti.

Il sistema di sollevamento viene alimentato attraverso una centralina elettro-pneumatica che, come detto, permette il sollevamento e il controllo della spinta che il pantografo esercita sulla catenaria, in modo da garantire una adeguata qualità di captazione in tutte le condizioni operative. Tale centralina è in grado di fornire diversi livelli di pressione nella fase di abbassamento al fine di ottenere le due fasi descritte.

Essendo il sistema motore costituito da una molla elastica ad aria, per regolare la spinta statica è sufficiente variare in maniera opportuna la pressione dell'aria di alimentazione tramite la centralina.

Inoltre, il pantografo è dotato del dispositivo ADD (Automatic Dropping Device) che consente l'abbassamento del pantografo stesso quando si verifica la rottura di uno strisciante o una usura eccessiva dell'elemento di contatto con la linea aerea.

Evidentemente il pantografo JRC15 può essere comandato anche tramite un semplice regolatore di pressione come avviene normalmente per i pantografi dei rotabili regionali.

Nella fig. 2, viene riportato un disegno di assieme del pantografo in cui sono evidenziate le sezioni caratteristiche degli elementi strutturali principali del pantografo. Nella stessa figura si possono notare gli attacchi elettrici, indicati con la sigla CE, per i cavi di collegamento dell'alta tensione per l'interfacciamento elettrico del pantografo al rotabile. I collegamenti pneumatici CP1 e CP2 permettono l'interfacciamento pneumatico del pantografo con il rotabile, in particolare, tramite CP1 la centralina di controllo alimenta l'attuatore pneumatico del pantografo, mentre tramite CP2 il gruppo valvola ADD fornisce il segnale di attivazione dell'abbassamento automatico del pantografo alla centralina di controllo. In fig. 2 è mostrata anche la posizione dei fori per l'interfaccia meccanica del pantografo all'imperiale del rotabile.

1.4. Installazione meccanica e pneumatica sulla locomotiva E464.430

Di seguito sono descritti i dettagli dell'installazione del pantografo JRC15, e della relativa centralina di comando sulla locomotiva E464.430. Le locomotive del gruppo E464 sono normalmente equipaggiate con due pantografi del tipo FS52/92. La modifica implementata è relativa alla sostituzione del pantografo posizionato sul lato opposto alla cabina di guida.

L'installazione del pantografo JRC15 è stata eseguita in

lished, and the second, slower lowering, so that the articulated frame reaches the supports in a gradual manner and without impact.

The lifting system is powered through an electro-pneumatic control unit, which, as said, allows lifting and control of the force that the pantograph exerts on the catenary, in order to ensure an adequate captation quality in all operating conditions. This control unit is able to provide different levels of pressure during the lowering phase in order to obtain the two phases described.

Since the actuating system consists of an elastic air spring, to adjust the static force, it is sufficient to change the air pressure through the control unit in an appropriate manner.

In addition, the pantograph is equipped with the ADD device (Automatic Dropping Device), which allows lowering of the pantograph itself when a contact strip breaks or there is excessive wear.

Evidently, the JRC15 pantograph can also be operated via a simple pressure regulator, as is normally the case for regional rolling stock pantographs.

Fig. 2 shows a pantograph assembly drawing where the characteristic sections of the main structural elements of the pantograph are highlighted. In the same figure the electrical connections can be seen, indicated with the CE mark, for the high voltage connection cables for electrical interfacing of the pantograph to the rolling stock. The CP1 and CP2 pneumatic connections allow pneumatic interfacing of the pantograph with the rolling stock, in particular, through CP1 the control unit powers the pneumatic actuator of the pantograph, while through CP2 the ADD valve assembly provides the automatic lowering signal of the pantograph to the control unit. Fig. 2 also shows the position of the holes for the mechanical interface of the pantograph to the roof of the rolling stock.

1.4. Mechanical and pneumatic installation on locomotive E464.430

Below are the details of the installation of the JRC15 pantograph, and its control unit on locomotive E464.430. Group E464 locomotives are normally equipped with two FS52/92 type pantographs. The modification implemented relates to the replacement of the pantograph positioned on the opposite side of the driver's cabin.

The installation of the JRC15 pantograph was performed in accordance with what is shown in figs. 3 and 4. The activities were carried out in October 2015 at the Trenitalia plant in Foligno.

In Figs. 3 and 4 the interface frame can be seen, interposed between the roof of the locomotive and the insulators, defined to adapt the frame of the JRC15 pantograph (3 connections) with the connections on the locomotive (4 connections).

Fig. 5 shows the diagram of the pneumatic circuit for

accordo con quanto mostrato nelle figg. 3 e 4. Le attività sono state eseguite nell'ottobre 2015 presso l'impianto Trenitalia di Foligno.

Nelle figg. 3 e 4 si può osservare il telaio di interfaccia, interposto tra l'imperiale della locomotiva e gli isolatori, definito per adattare il telaio del pantografo JRC15 (3 attacchi) con gli attacchi presenti sulla locomotiva (4 attacchi).

In fig. 5 si riporta lo schema pneumatico del circuito di sollevamento pantografi presente sulle locomotive E464 tratto dai relativi manuali.

L'interfaccia del pantografo JRC15 con l'alimentazione pneumatica della locomotiva è stata eseguita utilizzando la linea pneumatica già presente sull'imperiale per l'alimentazione del pantografo FS52/92. La nuova centralina pneumatica è stata inserita in serie e a valle del circuito pneumatico di sollevamento pantografo già presente sulla locomotiva (nodo pneumatico).

1.5. Installazione elettrica sulla locomotiva E464.430

Le prese di corrente del pantografo JRC15 lato gomito sono state collegate alla linea di alta tensione presente sulla locomotiva E464.430 (fig. 4). La centralina viene alimentata

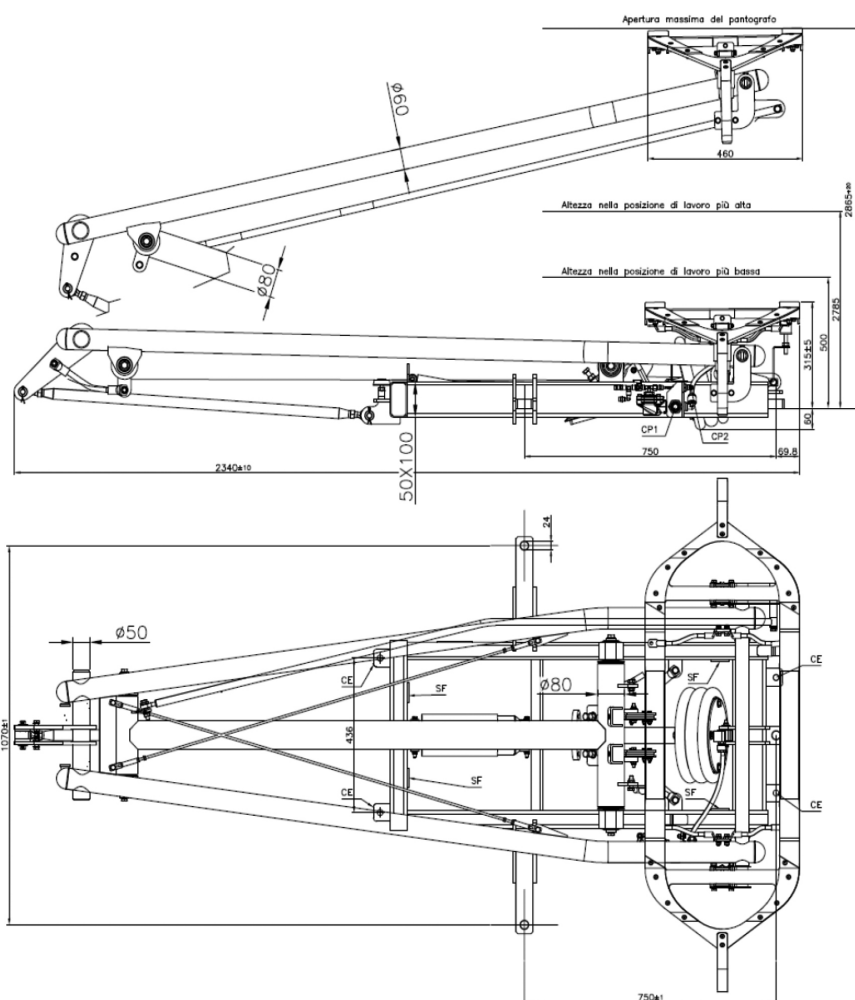


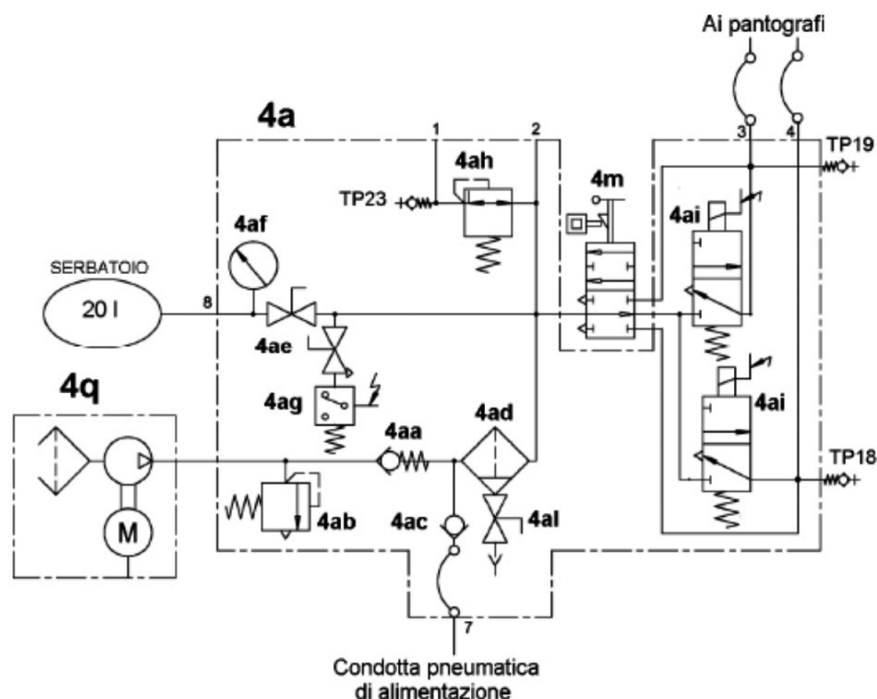
Fig. 2 - Disegno di ingombro del pantografo tipo JRC15.
Fig. 2 - JRC15 type pantograph dimension drawing.



Fig. 3 - Installazione pantografo tipo JRC15 su locomotiva E464.430.
Fig. 3 - Installation of the JRC15 type pantograph on locomotive E464.430.



Fig. 4 - Installazione pantografo tipo JRC15 su locomotiva E464.430.
Fig. 4 - Installation of the JRC15 type pantograph on locomotive E464.430.



- 4a. Gruppo completo apparecchiature sollevamento pantografi
 4aa. Valvola di ritenuta
 4ab. Valvola di sicurezza tar. 8,5 bar
 4ac. Valvola di non ritorno
 4ad. Filtro separatore centrifugo 1/2" con rubinetto di spurgo
 4ae. Rubinetto isolamento 1/4"
 4af. Manometro
 4ag. Pressostato tar. 6-7 bar 2 contatti
 4ah. alvola di alimentazione tipo AR tar. 5,5 bar
 4ai. Elettrovalvola di sollevamento pantografo
 4al. Connessione flessibile
 4m. Rubinetto di sicurezza con serratura a piastra per isolamento pantografi.
 4q. Motocompressore a 24 Vcc di 1° sollevamento pantografo.

Fig. 5 - Circuito pneumatico sollevamento pantografi locomotiva E464.430.
 Fig. 5 - E464.430 locomotive pantograph lifting pneumatic circuit.

elettricamente dal quadro di bassa tensione della locomotiva. Il comando di sollevamento pantografo presente sul banco di manovra è stato trasferito alla nuova centralina.

La centralina è predisposta alla connessione con la logica di veicolo inserendola nella catena MVB della locomotiva. Dal bus MVB la centralina riceve almeno le informazioni riguardanti velocità, direzione, data e ora. Per questa installazione prototipale non è previsto ulteriore trasferimento di informazioni dalla centralina alla logica di veicolo. In generale la centralina scambia con la logica di veicolo una serie di segnali diagnostici, informazioni e comandi, che verranno elencati nel paragrafo 3 del presente articolo.

2. Qualifica del pantografo JRC15

La qualifica del pantografo è stata eseguita in accordo

pantograph raising on E464 locomotives, drawn from the relevant manuals.

The JRC15 pantograph interface with pneumatic supply of the locomotive was performed using the pneumatic line already on the roof for pantograph FS52/92 feeding. The new pneumatic controller was introduced in series and downstream of the pantograph lifting pneumatic circuit already on the locomotive (pneumatic node).

1.5. Electrical installation on the E464.430 locomotive

The outlets of the JRC15 pantograph were connected to the high voltage on locomotive E464.430 (fig. 4). The locomotive low voltage panel electrically powers the control unit. The pantograph lift command on the driver's desk was transferred to the new control unit.

The control unit is ready for connection with the logic of the vehicle by introducing it in the MVB locomotive chain. The control unit receives at least the information regarding speed, direction, date and time from the MVB bus. Further transfer of information from the control unit to the logic of the vehicle is provided for this prototypical installation. In general the control unit exchanges a set of diagnostic signals, information and commands with the vehicle logic, that are listed in § 3 of this article.

2. Qualification of the JRC15 pantograph

The qualification of the pantograph was performed in accordance with the European and interoperability standards listed in the bibliography.

The tests were divided into two macro areas; the first relating to static tests using also certified laboratories, where provided for by current legislation, and the second concerning on-line dynamic tests.

2.1. Test area

Type tests for the qualification of the pantograph were performed on the first specimen. The tests were conducted with the pantograph fully assembled, with all electrical and mechanical components, and connected to the control unit.

con le normative europee e di interoperabilità elencate in bibliografia.

Le prove sono state suddivise in due macroaree; la prima relativa alle prove statiche utilizzando, ove previsto dalla normativa, anche laboratori certificati e la seconda, relativa alle prove dinamiche in linea.

2.1. Area di prove

Le prove di tipo per la qualifica del pantografo sono state eseguite sul primo esemplare. Le prove sono state effettuate con il pantografo completamente assemblato, provvisto di tutti i componenti elettrici e meccanici, e collegato alla centralina di comando.

Per l'esecuzione di tutte le prove di tipo sono stati utilizzati strumenti e attrezzature di taratura/calibrazione in corso di validità. Le verifiche e le prove statiche sono state eseguite con esito positivo in accordo con la normativa CEI EN 50206-1 [1] ed elencate di seguito:

- ispezione visiva;
- massa del pantografo;
- controllo dimensionale;
- identificazione;
- verifica funzionale del D.A.A.;
- misura della forza statica nominale;
- verifica del sistema di comando del pantografo;
- prove funzionali in camera climatica;
- prove di durata;
- resistenza alle vibrazioni;
- prova di rigidità trasversale;
- prove di tenuta dell'aria sul cilindro del dispositivo di comando;
- misura dei gradi di libertà dell'archetto;
- misura della forza che mantiene il pantografo in posizione di riposo.

In particolare per la prova in camera climatica, presso laboratorio accreditato, il pantografo JRC15 è stato inizialmente condizionato per un'ora alla temperatura di -25°C e successivamente condizionato per un'ora alla temperatura di +70°C. In entrambe le condizioni sono state eseguite delle prove di sollevamento e abbassamento del pantografo, misurando i corrispondenti tempi che sono risultati conformi alla norma CEI EN 50206-1 [1]. Nella fig. 6 sono riportate le condizioni di temperatura registrate durante l'intera prova.

Valid calibration tools and equipment were used to perform all type tests. Verification and static tests were carried out successfully in accordance with the CEI EN 50206-1 [1] standard as listed below:

- *visual check;*
- *mass of the pantograph;*
- *dimensional inspection;*
- *identification;*
- *functional testing of the D.A.A.;*
- *measurement of the nominal static force;*
- *verification of the pantograph control system;*
- *climatic chamber functional testing;*
- *duration tests;*
- *vibration resistance;*
- *cross test;*
- *leak testing of the air on the cylinder of the control device;*
- *measure of the degrees of freedom of the bow;*
- *measurement of the force that keeps the pantograph in the rest position.*

In particular, for testing in a climatic chamber at the accredited laboratory, the JRC15 pantograph was originally conditioned for an hour at a temperature of -25°C and subsequently conditioned for one hour at a temperature of +70°C. In both conditions lifting and lowering tests of the pantograph were performed, measuring the corresponding times that were compliant with standard CEI EN 50206-1 [1]. Fig. 6 shows the temperature conditions recorded during the entire test.

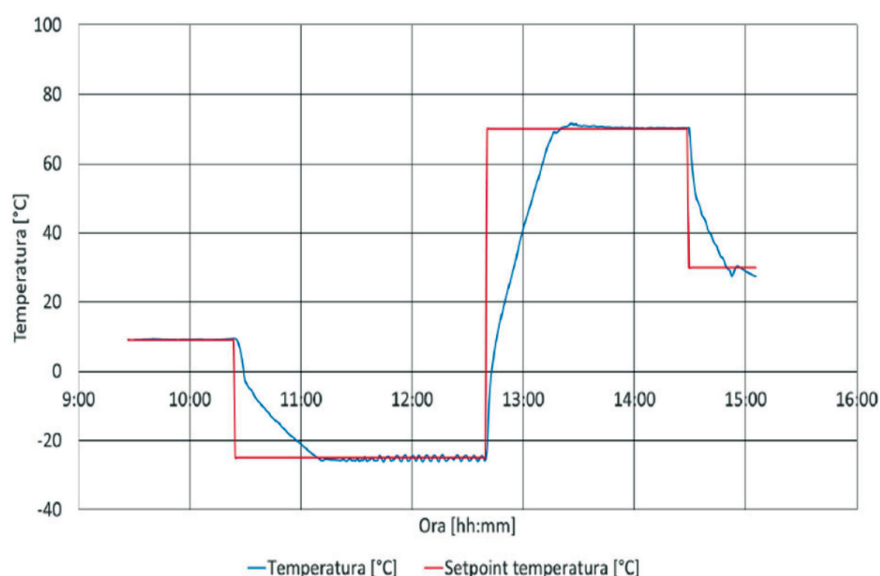


Fig. 6 - Profilo di temperature registrate durante la prova climatica.

Fig. 6 - Listing of temperatures recorded during the climatic test.

Per le prove di resistenza alle vibrazioni, presso laboratorio accreditato, il pantografo è stato sottoposto alle prove indicate all'interno della norma CEI EN 61373 [2] per verificarne l'attitudine a sopportare il tipo di condizioni di vibrazione ambientale alle quali sono normalmente esposti i rotabili ferroviari.

Al pantografo esteso al 75% (tabella 1) della sua posizione di lavoro massima sono state applicate delle accelerazioni nelle tre direzioni verticale, trasversale, e longitudinale in accordo con le seguenti tabelle.

A valle di queste prove sono state eseguite delle prove di sollevamento e abbassamento misurando i corrispondenti tempi che sono risultati conformi alla norma CEI EN 50206-1 [1].

Le prove di durata sono state eseguite presso i laboratori del Politecnico di Milano.

2.2. Prove statiche e dinamiche

Nel presente paragrafo si illustrano le attività concernenti la caratterizzazione meccanica del pantografo, effettuata mediante il banco prova sperimentale in dotazione presso il Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano (fig. 7). Il pantografo viene movimentato tramite due attuatori idraulici in contatto con i due striscianti dell'archetto, misurando la corrispondente forza di contatto per mezzo di celle di carico. Il valore medio della forza di contatto è regolato per mezzo del sistema di regolazione della pressione della molla ad aria.

I test di caratterizzazione statica hanno l'obiettivo di valutare la caratteristica bi-lineare forza-schiacciamento della sospensione della testa, definita in fase di progettazione tramite l'utilizzo di molle con elica a doppio passo.

I test sono stati eseguiti vincolando a zero lo spostamento verticale degli striscianti per mezzo degli attuatori idraulici, e applicando in sequenza diversi valori di pressione nella molla ad aria, corrispondenti a diversi valori di forza statica. La misura della forza nella sospensione è effettuata mediante le celle di carico disposte sugli attuatori idraulici, mentre lo schiacciamento della sospensione viene misurato tramite laser.

Sono stati eseguiti cicli di carico e scarico al fine di valutare eventuali comportamenti d'isteresi dovuti ad attriti, peraltro non riscontrati in maniera significativa, in un campo di forze da 50 N a 250 N, inclusivo di tutte le possibili condizioni operative.

Sulla base dei risultati sperimentali è stata effettuata una stima della rigidità totale della sospensione, ottenuta con i dati relativi alla fase di ca-

For vibration resistance testing at the accredited laboratory, the pantograph was subjected to the tests indicated within the CEI EN 61373 [2] standard to test its ability to withstand the kind of environmental vibration conditions to which rolling stock is normally exposed.

Accelerations were applied to the pantograph extended to 75% (table 1) of its maximum working position in three vertical, transverse and longitudinal directions in accordance with the following tables.

After these tests, lifting and lowering tests were performed measuring the corresponding times that were compliant with standard CEI EN 50206-1 [1].

The duration tests were carried out at the laboratories of the Politecnico di Milano.

2.2. Static and dynamic tests

This paragraph discusses the activities concerning the mechanical characterisation of the pantograph using the experimental test bench provided at the Department of Mechanics of the Politecnico di Milano (fig. 7). The pantograph is moved via two hydraulic actuators in contact with two contact strips of the bow, measuring the corresponding contact force by means of load cells. The average value of the contact force is adjusted by means of the air spring pressure regulation system.

Static characterisation tests are intended to assess the bi-linear characteristic of the head suspension, defined at design time through the use of springs with dual pitch spiral.

The tests were performed by constraining to zero the vertical displacement of contact strips support through hydraulic actuators, and applying in sequence the different values of pressure in the air spring, corresponding to different values of static force. The measurement of the force in the suspension is carried out by means of load cells placed

TABELLA 1 – TABLE 1

Profilo di prova di accelerazione nelle direzioni X – Y – Z
Acceleration test profile in directions X – Y – Z

SH.X) TEST DI URTI SU ASSE LONGITUDINALE (X)	
Profile Parameters	
Tipo di impulso - Pulse type	Mezzo seno - Half Sine
Ampiezza - Amplitude	50,00 m/s ²
Larghezza impulsi - Pulse width	30,00 ms
Principali code di impulsi - Main pulse tails	IEC 60068-2-27 Standard
Modello compensazione - Compensation template	Spostamento ottimale - Displacement Optimum
Impostazione interruzione - Abort setting	IEC 60068-2-27 Standard
SH.Y/Z) TEST DI URTI SU ASSE TRASVERSALE (Y) E VERTICALE (Z)	
Profile Parameters	
Tipo di impulso - Pulse type	Mezzo seno - Half Sine
Ampiezza - Amplitude	30,00 m/s ²
Larghezza impulsi - Pulse width	30,00 ms
Principali code di impulsi - Main pulse tails	IEC 60068-2-27 Standard
Modello compensazione - Compensation template	Spostamento ottimale - Displacement Optimum
Impostazione interruzione - Abort setting	IEC 60068-2-27 Standard

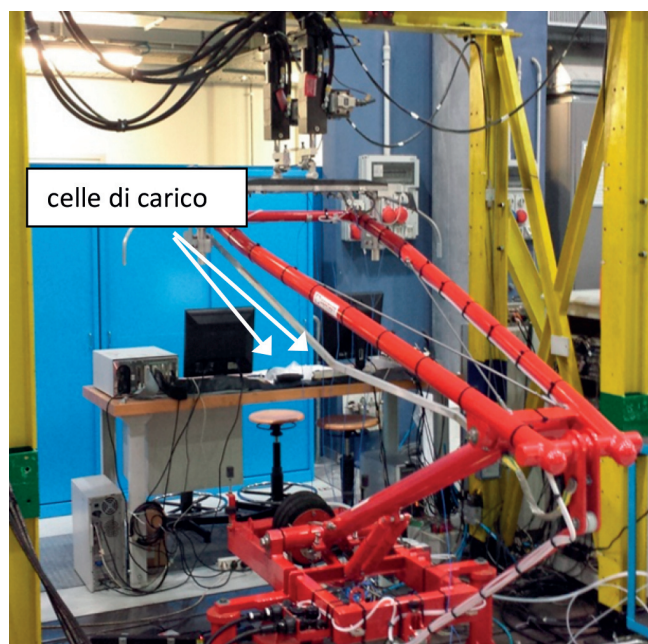


Fig. 7 - Prototipo del pantografo sviluppato.
Fig. 7 - Prototype of the pantograph developed.

rico. Si individuano due tratti lineari nella curva forza-compressione, con un cambio di pendenza intorno al valore di forza di 200 N. I valori di rigidità stimati sono pari a 3600 N/m e 4700 N/m.

I test di caratterizzazione dinamica hanno invece l'obiettivo di valutare la funzione di risposta in frequenza sperimentale del pantografo. Il pantografo è strumentato con 7 accelerometri mono-assiali, con asse di misura disposto in direzione verticale: 4 sulla testa (posizione 3 in fig. 8), 2 sull'estremità superiore del quadrilatero articolato (posizione 2 in fig. 8) e uno sull'articolazione tra braccio inferiore e superiore del quadrilatero articolato (posizione 1 in fig. 8).

La caratterizzazione dinamica è effettuata nel campo di frequenze 0-20 Hz, indicato dalla norma EN 50317 [3] ai fini della misura della forza di contatto. Al fine di individuare le non linearità nel comportamento dinamico del pantografo, sono state testate diverse ampiezze di moto, movimentando la testa del pantografo con valori compatibili a quelli riscontrati in linea:

- ampiezza 20 mm, campo di frequenze 0÷2 Hz. Tale valore è rappresentativo delle ampiezze di moto generalmente ottenibili in linea per effetto della eccitazione legata alla periodicità di campata (es: 0.89 Hz a 160 km/h con una lunghezza di campata di 50 m);
- ampiezza 1 mm nel campo di frequenze 0÷20 Hz: è rappresentativa delle ampiezze di moto ottenibili in linea per effetto della eccitazione legata alla periodicità della pendinatura (es: 11 Hz a 160 km/h e un passo di pendinatura di 4 m);

on hydraulic actuators, while deflection of the suspension is measured using a laser.

Loading and unloading cycles were performed in order to evaluate any hysteresis behaviours due to friction, which was not encountered significantly, in a field of forces from 50 N to 250 N, including all possible operating conditions.

On the basis of experimental results, an estimate of the total stiffness of the suspension was made, obtained by using the loading phase data. There are two linear sections in the force-compression curve, with a change of slope around the force value of 200 N. The estimated stiffness values are equal to 3600 N/m and 4700 N/m.

Dynamic characterisation tests instead have the objective of evaluating the experimental frequency response

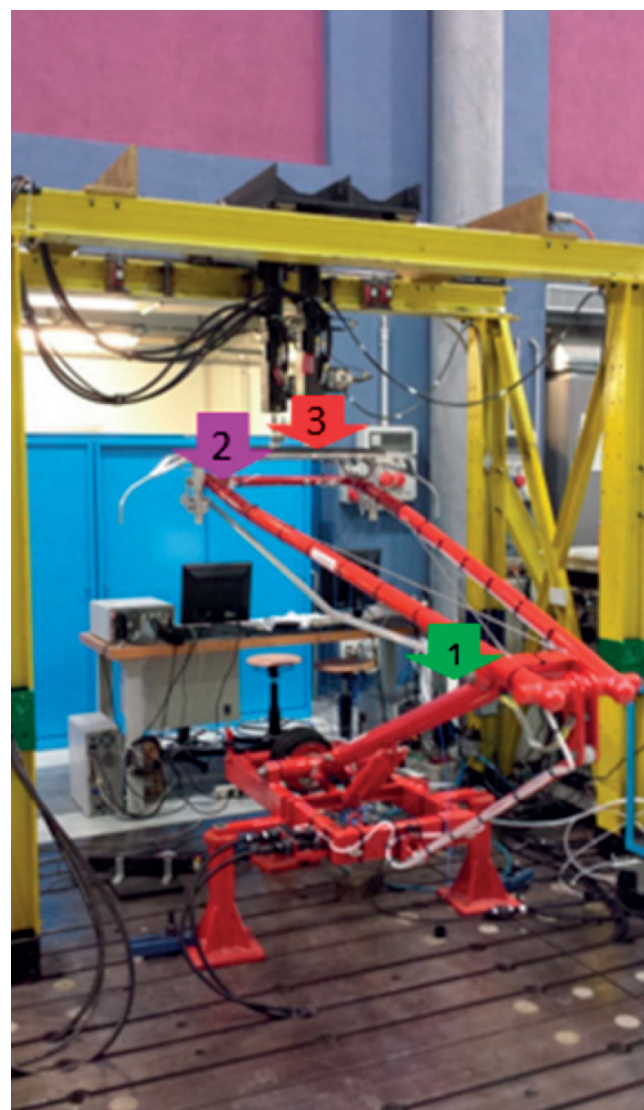


Fig. 8 - Punti di misura per il calcolo delle funzioni di trasferimento sperimentale.

Fig. 8 - Measurement points for calculating experimental transfer functions.

- ampiezza di 5 mm nel campo di frequenze 0÷5 Hz. Il valore intermedio ha lo scopo di evidenziare l'effetto delle diverse ampiezze di eccitazione sulla seconda frequenza propria del pantografo (pari a 4 Hz per una ampiezza di eccitazione di 5 mm).

Le misure di accelerazione, opportunamente mediate nel caso degli accelerometri della testa e della parte superiore del quadro, hanno permesso di misurare tre funzioni di risposta in frequenza (FRF):

1. $\frac{A3}{F}$: FRF tra la forza di contatto e l'accelerazione verticale della testa del pantografo.
2. $\frac{A2}{F}$: FRF tra la forza di contatto e l'accelerazione verticale della parte superiore del quadrilatero articolato.
3. $\frac{A1}{F}$: FRF tra la forza di contatto e l'accelerazione verticale dell'articolazione del pantografo.

La forza media utilizzata durante le prove è pari a 148 N, corrispondente al valore massimo di forza prescritto dalle Specifiche Tecniche di Interoperabilità (TSI [4]) per pantografi 3 kV alla velocità di 200 km/h, che è la massima velocità di progetto del pantografo in esame.

La prima serie di prove dinamiche è stata effettuata eccitando la testa del pantografo con gli attuatori posizionati nella linea di mezzzeria della stessa (posizione C000 in fig. 9). Al fine di individuare anche la frequenza propria corrispondente al moto di rollio della testa, nonché eventuali modi flessio torsionali del quadrilatero articolato, le prove sono state poi ripetute anche con eccitazione decentrata, spostando l'attuatore di ±200 mm rispetto al centro dell'archetto (secondo l'asse y del sistema di riferimento in fig. 9).

Si riportano, per brevità, esclusivamente le funzioni di risposta in frequenza sperimentali ottenute eccitando l'archetto in posizione centrata.

La fig. 10 rappresenta la funzione di trasferimento sperimentale tra la forza di contatto misurata e l'accele-

function of the pantograph. The pantograph is instrumented with 7 mono-axial accelerometers with measurement axis arranged vertically: 4 on the head (position 3 in fig. 8), 2 on the upper end of the articulated frame (position 2 in fig. 8) and one on the articulation between the lower and upper arm of the articulated frame (position 1 in fig. 8).

Dynamic characterisation is carried out in the frequency range of 0-20 Hz, indicated by standard EN 50317 [3] for the purpose of measuring the contact force. In order to identify the non-linearity in the dynamic behaviour of the pantograph, different motion amplitudes were tested, moving the head of the pantograph with values that are compatible with those found on the line:

- 20 mm amplitude, 0÷2 Hz frequencies range. This value is representative of amplitudes of motion generally obtainable on the line due to the excitation related to the span periodicity (e.g.: 0.89 Hz at 160 km/h with a span length of 50 m);
- 1 mm amplitude in the 0÷20 Hz frequencies range: it is representative of motion amplitudes that can be obtained on the line through the effect of excitation linked to dropper periodicity (e.g.: 11 Hz at 160 km/h and a suspension system pitch of 4 m);
- 5 mm amplitude in the 0÷5 Hz frequencies range. The middle value is intended to highlight the effect of different amplitudes of excitation on the second natural frequency of the pantograph (equal to 4 Hz for a 5 mm excitation amplitude).

The acceleration measures, conveniently mediated in the case of accelerometers of the head and of the top of the frame, allowed measuring three frequency response functions (FRF):

1. $\frac{A3}{F}$: FRF between the contact force and the pantograph head vertical acceleration.
2. $\frac{A2}{F}$: FRF between the contact force and vertical acceleration of the upper articulated quadrilateral.
3. $\frac{A1}{F}$: FRF between the contact force and vertical acceleration of the pantograph articulation.

The average force used during the tests amounted to 148 N, corresponding to the maximum force value required by Technical Specifications for Interoperability (TSI [4]) for 3 kV pantographs at speeds of 200 km/h, which is the maximum design speed of the pantograph under study.

The first series of dynamic tests was carried out by exciting of the pantograph head with the actuators positioned on centreline (C000 position in fig. 9). In order to detect the natural frequency corresponding to the rolling motion of the head, as well as any bending-torsional modes of the articulated frame, the tests were then repeated with decentralised excitation, moving the actuator ± 200 mm with respect to the centre of the bow (according

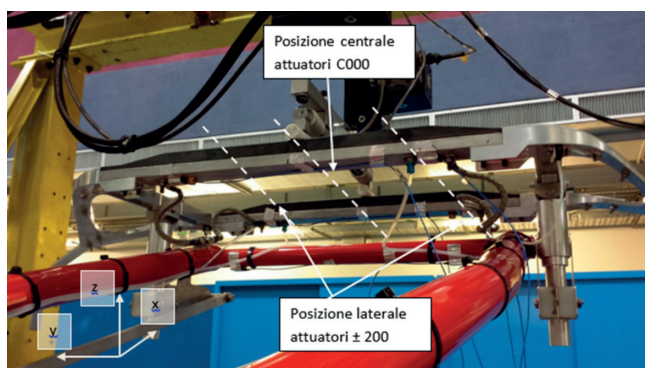


Fig. 9 - Posizioni di eccitazione della testa del pantografo.
Fig. 9 - Excitation position of the pantograph head.

razione verticale della testa del pantografo $\left(\frac{A3}{F}\right)$. Nel range di frequenze analizzato si osservano due frequenze proprie del pantografo, corrispondenti ai modi di vibrare rigidi, rispettivamente caratterizzati dal moto di testa e quadrilatero articolato in fase ed in contro-fase tra loro. I risultati ottenuti sono significativamente dipendenti dalla ampiezza di eccitazione. In particolare, per il primo modo individuato, la frequenza propria varia da 0.9 Hz per l'ampiezza di 20 mm, a 2 Hz nel caso di ampiezza di eccitazione 1mm. Per il secondo modo individuato la frequenza propria è pari a circa 4 Hz per l'ampiezza di eccitazione di 5 mm, circa 6 Hz nel caso di ampiezza di eccitazione 1mm.

La fig. 11 rappresenta la funzione di trasferimento sperimentale tra la forza di contatto misurata e l'accelerazione della parte superiore del quadrilatero articolato $\left(\frac{A2}{F}\right)$, mentre la fig. 12 la funzione di risposta in frequenza sperimentale tra la forza di contatto misurata e l'accelerazione dell'articolazione del pantografo $\left(\frac{A1}{F}\right)$. In corrispondenza della frequenza di 11.5 Hz è possibile individuare un modo di vibrare legato alla deformabilità del quadrilatero.

2.3. Modello numerico

Le funzioni di risposta in frequenza sperimentale sopra rappresentate sono state utilizzate per l'identificazione dei parametri, mediante metodi di minimizzazione dell'errore, di un modello numerico per la simulazione dell'interazione del pantografo con la catenaria. Tali simulazioni sono state necessarie al fine di valutare le caratteristiche dinamiche dell'interazione tra il pantografo e diversi modelli di catenaria (440 e 610 mm²) prima di effettuare i test in linea.

Nel modello numerico di pantografo, utilizzato per la simulazione il quadrilatero articolato e la testa sono considerati come due corpi rigidi, ed è consentito il moto di rollio della te-

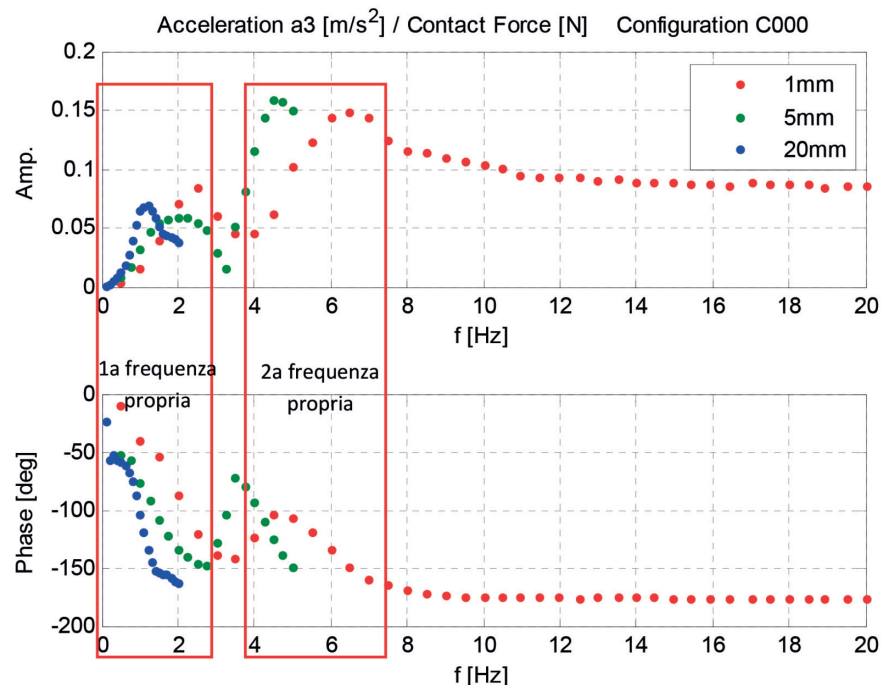


Fig. 10 - Funzione di risposta in frequenza sperimentale tra forza di contatto e accelerazione della testa del pantografo. Dipendenza dalla ampiezza di moto.
Fig. 10 - Experimental frequency response function between contact force and acceleration of the pantograph head. Motion amplitude dependence.

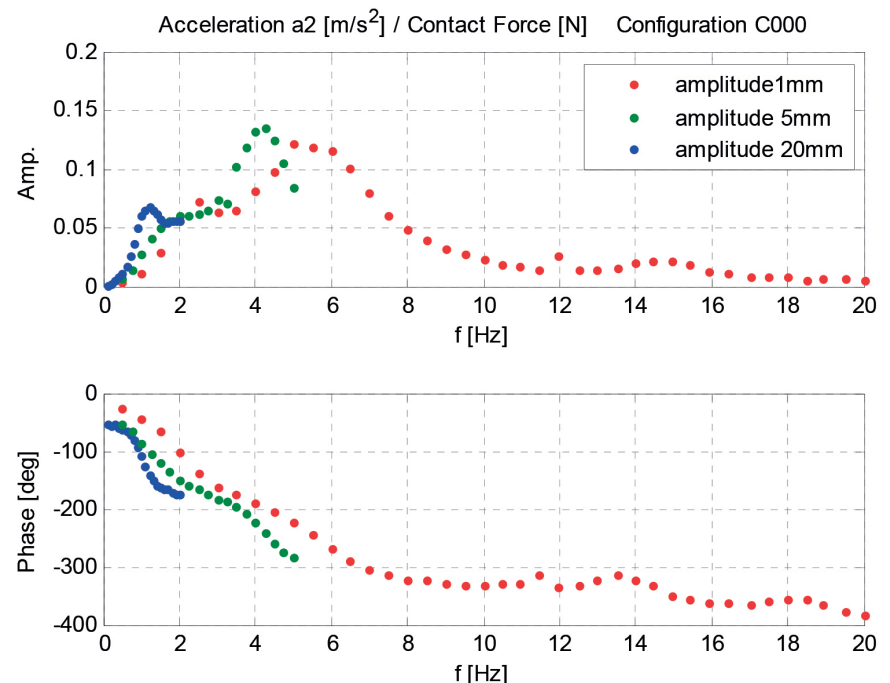


Fig. 11 - Funzione di risposta in frequenza sperimentale tra forza di contatto e accelerazione dell'estremità superiore del quadrilatero articolato. Dipendenza dalla ampiezza di moto.

Fig. 11 - Experimental frequency response function between contact force and acceleration of the upper part of the articulated frame. Motion amplitude dependence.

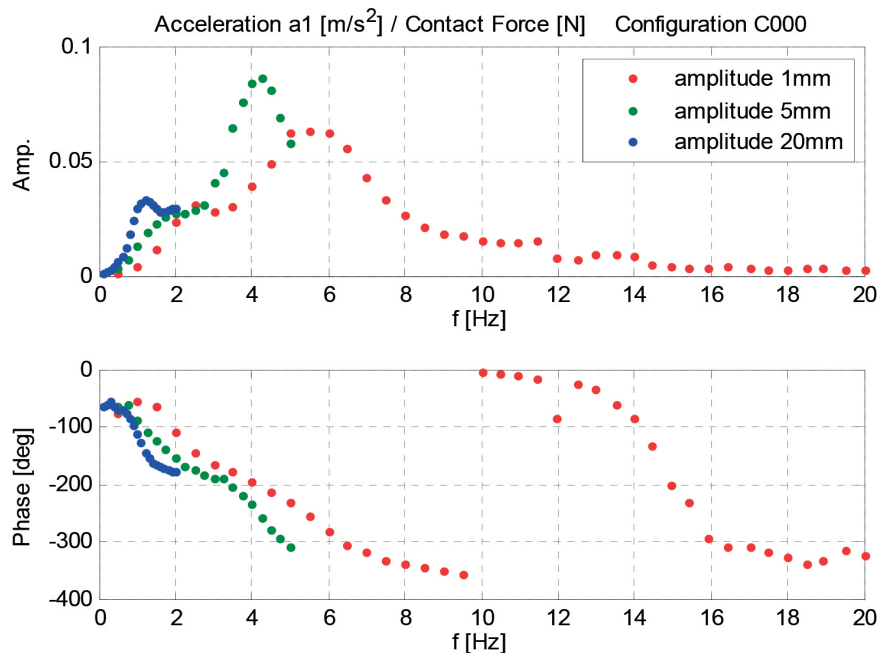


Fig. 12 - Funzione di risposta in frequenza sperimentale tra la forza di contatto e l'accelerazione dell'articolazione del pantografo. Dipendenza dalla ampiezza di moto.

Fig. 12 - Experimental frequency response function between the contact force and the acceleration of the pantograph articulation. Motion amplitude dependence.

sta. I gradi di libertà sono dunque tre: moto verticale del quadro, verticale e rollio della testa.

Ai fini dell'identificazione dei parametri del modello sono state utilizzate le funzioni di trasferimento $\frac{A_3}{F}$ e $\frac{A_2}{F}$ con eccitazione centrata. Il momento di inerzia dell'archetto è successivamente stimato a calcolo.

Al fine di ottenere un modello lineare che tenga comunque in considerazione il diverso comportamento del pantografo alle diverse ampiezze di prova, l'identificazione dei parametri è stata effettuata sulla base di funzioni di trasferimento ottenute utilizzando i seguenti risultati sperimentali:

1. ampiezza 20 mm nel range di frequenza 0.4-2 Hz;
2. ampiezza 5 mm nel range di frequenza 3-5 Hz;
3. ampiezza 1 mm nel range di frequenza 14.5-20 Hz.

Le figg. 13 e 14 riportano le funzioni di trasferimento ottenute numericamente (linea continua) a seguito della minimizzazione per l'identificazione dei parametri.

La tabella 2 riporta i dati utilizzati per le simulazioni numeriche presentate nel successivo paragrafo.

2.3.1. Simulazioni numeriche dell'interazione tra il pantografo JRC15 e la catenaria 440 mm²

Le simulazioni numeriche sono state condotte con

to the y-axis of the reference system in fig. 9).

For the sake of brevity, only the experimental frequency response functions obtained by exciting the bow in the centred position are reported.

Fig. 10 represents the experimental transfer function between the measured contact force and the vertical acceleration of the pantograph head $\left(\frac{A_3}{F}\right)$. Two natural frequencies of the pantograph are observed in the range of frequencies analysed, which correspond to the rigid vibration modes, characterised respectively by the motion of the head and an articulated quadrilateral in phase and counter-phase. The results are significantly dependent on the excitation amplitude. In particular, for the first mode, the natural frequency ranges from 0.9 Hz for the 20 mm amplitude, to 2 Hz in the case of excitation amplitude of 1 mm. For the second mode the natural frequency is approximately 4 Hz for 5 mm excitation amplitude, about 6 Hz in the case of excitation amplitude of 1 mm.

Fig. 11 represents the experimental transfer function between the measured contact force and the acceleration of the upper frame $\left(\frac{A_2}{F}\right)$, while fig. 12 the experimental frequency response function between the measured contact force and the acceleration of the articulation of the pantograph $\left(\frac{A_1}{F}\right)$. At 11.5 Hz frequency a vibration mode related to the deformability of the quadrilateral can be identified.

2.3. Numeric model

The above-mentioned experimental frequency response functions have been used to identify the parameters of a numerical model for simulating the interaction of the pantograph with the catenary by means of error minimisation methods. Such simulations were needed to evaluate the dynamic characteristics of the interaction between the pantograph and various catenary models (440 and 610 mm²) before performing on-line tests.

In the numerical pantograph model used for simulation, the articulated frame and the head are considered as two rigid bodies, and the rolling motion of the head is allowed. The degrees of freedom are thus three: vertical motion of the articulated frame, vertical and rolling motion of the head.

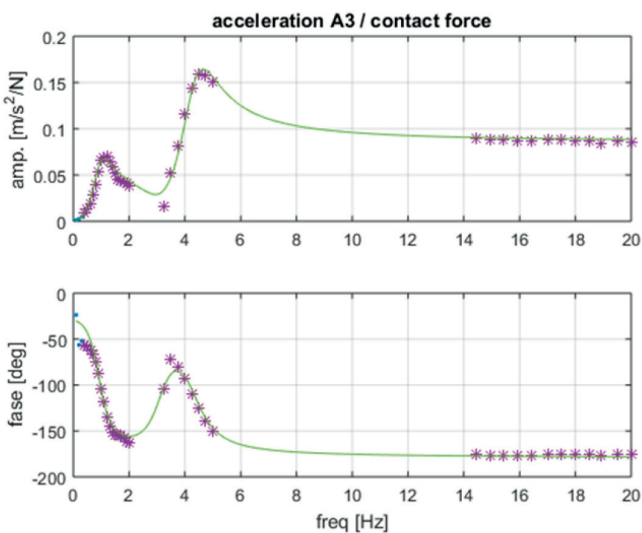


Fig. 13 - Funzione di trasferimento $\frac{A3}{F}$ ottenuta col modello numerico di pantografo risultante dall'ottimizzazione.
Fig. 13 - Transfer function $\frac{A3}{F}$ obtained with the pantograph numeric model resulting from the optimisation.

due diversi livelli di irregolarità di posa della fune di contatto, riportati in fig. 15 (a) e (b).

Al fine di ottenere una stima del massimo sollevamento sotto sospensione, i valori di forza media utilizzati nelle simulazioni sono i massimi prescritti dalle STI [4] (Specifiche Tecniche di Interoperabilità).

2.3.2. Risultati simulazioni numeriche con basso livello di irregolarità

La fig. 16 riporta i valori di forza media utilizzata nelle diverse simulazioni in funzione della velocità, i corrispondenti valori di forza massima statistica ($F_m+3\sigma$) e l'indice di captazione (Performance index, $F_m-3\sigma$). La forza media utilizzata è pari al valore massimo di forza ammesso dalla STI (TSI mean force [4]), l'indice di cap-

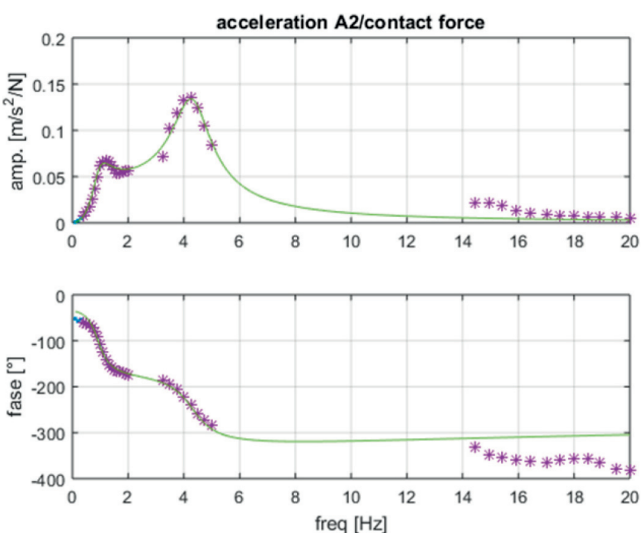


Fig. 14 - Funzione di trasferimento $\frac{A2}{F}$ ottenuta col modello numerico di pantografo risultante dall'ottimizzazione.
Fig. 14 - Transfer function $\frac{A2}{F}$ obtained with the pantograph numeric model resulting from the optimisation.

For the purpose of identifying the parameters of the model, the transfer functions $\frac{A3}{F}$ and $\frac{A2}{F}$ with centred excitation have been used. The calculation of the moment of inertia of the bow is estimated by formula.

The parameter identification was performed on the basis of transfer functions obtained using the following experimental results in order to obtain a linear model that takes into account the different pantograph behaviour at different test amplitudes:

- 1. 20 mm amplitude in the 0.4-2 Hz frequency range;
- 2. 5 mm amplitude in the 3-5 Hz frequency range;
- 3. 1 mm amplitude in the 14.5-20 Hz frequency range.

Figs. 13 and 14 show transfer functions obtained numerically (continuous line) following the minimisation for parameter identification.

Table 2 shows the data used for the numerical simulations presented in the next paragraph.

2.3.1. Numerical simulations of the interaction between the JRC15 pantograph and the 440 mm² catenary

Numerical simulations were conducted with two different levels of irregularities in the position of the contact line, as shown in fig. 15 (a) and (b).

In order to obtain an estimate of the maximum lift under suspension, the mean force values used in the simulations are the maximum prescribed by the TSIs [4] (Technical Specifications for Interoperability).

TABELLA 2 – TABLE 2

Parametri utilizzati per la simulazione del pantografo JRC15
Parameters used for the JRC15 pantograph simulation

Rigidità sospensione testa Head suspension stiffness	4505 N/m
Rigidità base quadro Frame base stiffness	50 N/m
Smorzamento sospensione testa Head suspension damping	44.6 Ns/m
Smorzamento base quadro Frame base damping	50 Ns/m
Massa quadro Head mass	13.5 kg
Massa testa Head mass	11.6 kg
Momento di inerzia archetto Moment of inertia of bow	0.62 kg m ²

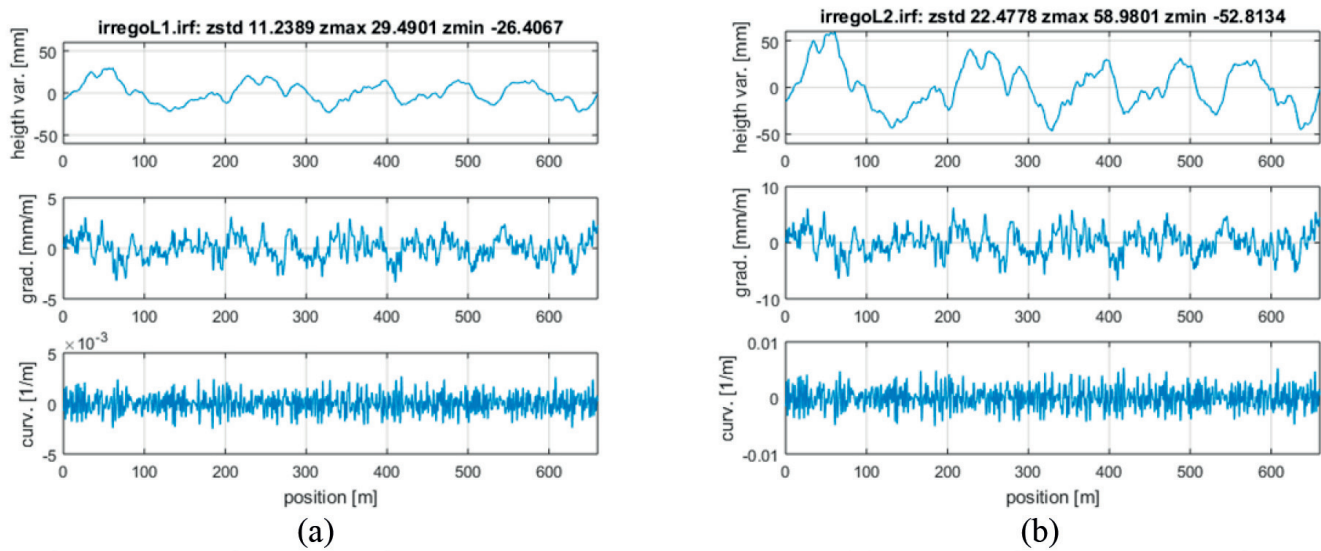


Fig. 15 - Irregularità di posa della fune utilizzata per le simulazioni numeriche. (a) Bassa irregolarità. (b) Alta irregolarità.
Fig. 15 - Irregularity in laying of the cable used for numerical simulations. (a) Low irregularity. (b) High irregularity.

tazione ottenuto è sempre superiore al valore minimo prescritto dalla STI (0.1·Mean force).

La fig. 17 riporta un esempio di forza di contatto, ottenuta per la simulazione a 160 km/h.

Le figg. 18, 19 e 20 riportano i sollevamenti della fune di contatto sotto sospensione, ottenuti rispettivamente per le simulazioni a 130 km/h, 160 km/h e 200 km/h. Il massimo sollevamento ottenuto è inferiore a 40 mm, ampiamente entro il limite consentito di 65 mm.

Le figg. 21, 22 e 23 riportano rispettivamente il moto verticale dell'archetto, il moto di rollio ed il moto verticale del quadro, corrispondenti alla velocità di 160 km/h.

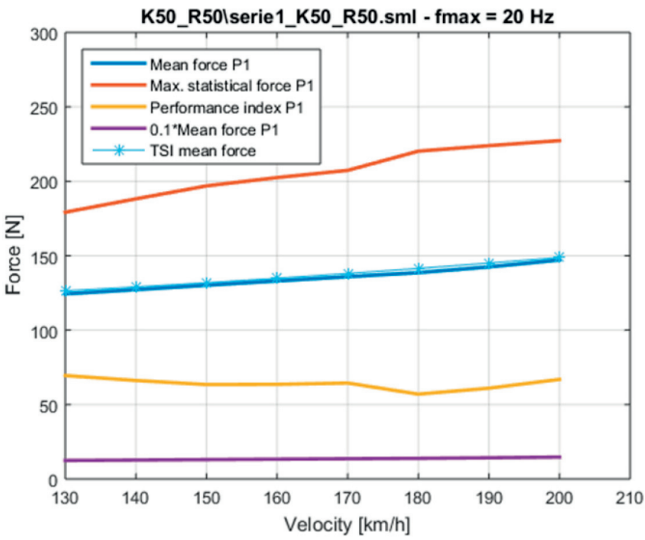


Fig. 16 - Statistiche della forza di contatto in funzione della velocità.
Fig. 16 - Speed contact force statistics.

2.3.2. Numerical simulation results with low level of irregularity

Fig. 16 shows the mean force values used in the various simulations at different speeds, the corresponding maximum static force values ($F_m+3\sigma$) and the performance index ($F_m-3\sigma$). The average force used is equal to the maximum force permitted by TSI (TSI mean force [4]), the performance index obtained is always higher than the minimum required by the TSI (0.1·Mean force).

Fig. 17 shows an example of contact force, obtained for simulation at 160 km/h.

Figs. 18, 19 and 20 show the values of the contact wire uplift under suspension, obtained for simulations at 130 km/h, 160 km/h and 200 km/h respectively. The maximum lift obtained is less than 40 mm, largely within the limit allowed of 65 mm.

Figs. 21, 22 and 23 respectively show the vertical motion of the bow, the rolling motion and the vertical motion of the articulated frame, corresponding to the speed of 160 km/h.

2.3.3. Simulation results with high level of irregularity

Fig. 24 shows the mean force values used in the various simulations based on the speed, the corresponding maximum static force values ($F_m+3\sigma$), the performance index ($F_m-3\sigma$). The average force used is equal to the maximum force permitted by TSI (TSI mean force [4]), the performance index obtained is always higher than the minimum required by the TSI (0.1·Mean force).

It can be seen that even in the case of high irregularities, the $F_m-3\sigma$ performance index meets the TSI requirements up to a speed of 200 km/h.

2.3.3. Risultati simulazioni con elevata livello di irregolarità

La fig. 24 riporta i valori di forza media utilizzata nelle diverse simulazioni in funzione della velocità, i corrispondenti valori di forza massima statistica ($F_m+3\sigma$), l'indice di captazione (Performance index, $F_m-3\sigma$). La forza media utilizzata è pari al valore massimo di forza ammesso dalla STI (TSI mean force [4]), l'indice di captazione ottenuto è sempre superiore al valore minimo prescritto dalla STI ($0.1 \cdot \text{Mean force}$).

Si può osservare come anche nel caso di elevata irregolarità l'indice di captazione $F_m-3\sigma$ rispetti i requisiti STI fino alla velocità di 200 km/h.

La fig. 25 riporta un esempio di forza di contatto, ottenuta per la simulazione a 160 km/h.

Le figg. 26 e 27 riportano i sollevamenti della fune di contatto sotto sospensione, ottenuti rispettivamente per le simulazioni a 160 km/h e 200 km/h. Il massimo sollevamento ottenuto è inferiore a 40 mm.

Le figg. 28, 29 e 30 riportano rispettivamente il moto verticale dell'archetto, il moto di rollio dell'archetto e il moto verticale del quadro, corrispondenti alla velocità di 160 km/h.

2.3.4. Prove di omologazione: secondo i punti §6.4.1.2 e §6.4.2 della EN50206 [1]

Le prove effettuate sono:

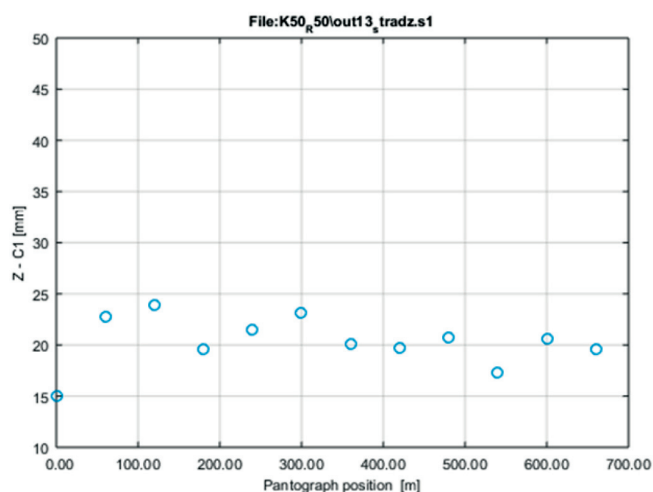


Fig. 18 - Sollevamenti della fune di contatto sotto sospensione. (a) $V=130$ km/h. $F_m=124.5$ N.
Fig. 18 - Lifting of the contact cable under suspension. (a) $V=130$ km/h. $F_m=124.5$ N.

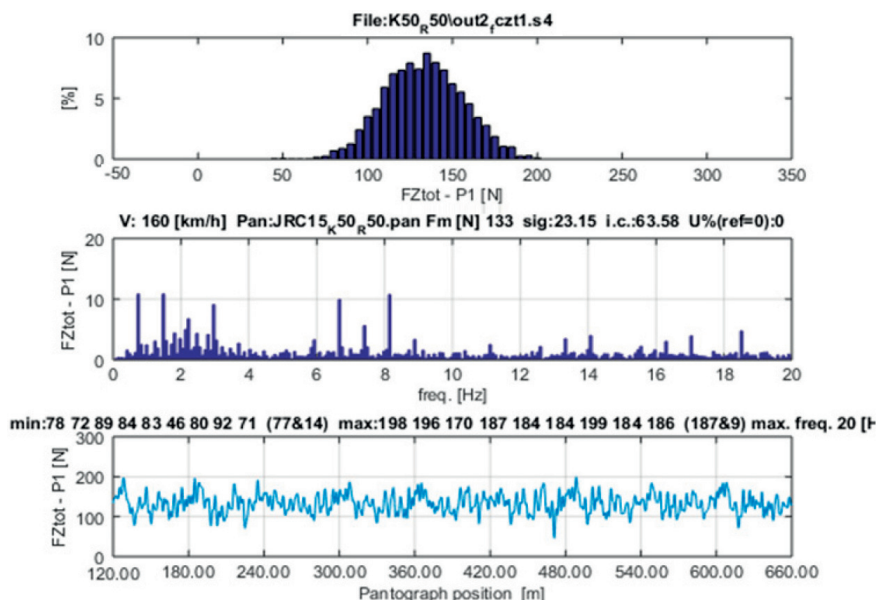


Fig. 17 - Forza di contatto ottenuta dalla simulazione a $v=160$ km/h, $F_m=133$ N.
Fig. 17 - Contact force obtained from the simulation at $v=160$ km/h, $F_m=133$ N.

Fig. 25 shows an example of contact force obtained for simulation at 160 km/h.

Figs. 26 and 27 show contact wire uplift under suspension, obtained for simulations at 160 km/h and 200 km/h respectively. The maximum lifting obtained is less than 40 mm.

Figs. 28, 29 and 30 respectively show the vertical motion of the bow, the rolling of the bow and the vertical motion of the articulated frame, corresponding to the speed of 160 km/h.

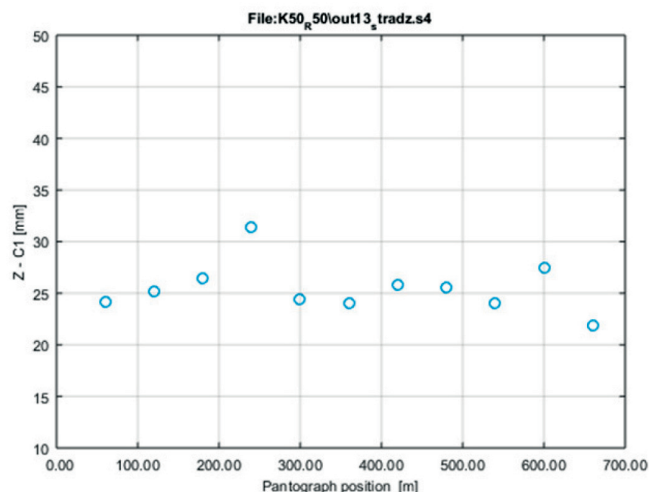


Fig. 19 - Sollevamenti sotto sospensione. $V=160$ km/h. $F_m=133$ N.
Fig. 19 - Lifting under suspension. $V=160$ km/h. $F_m=133$ N.

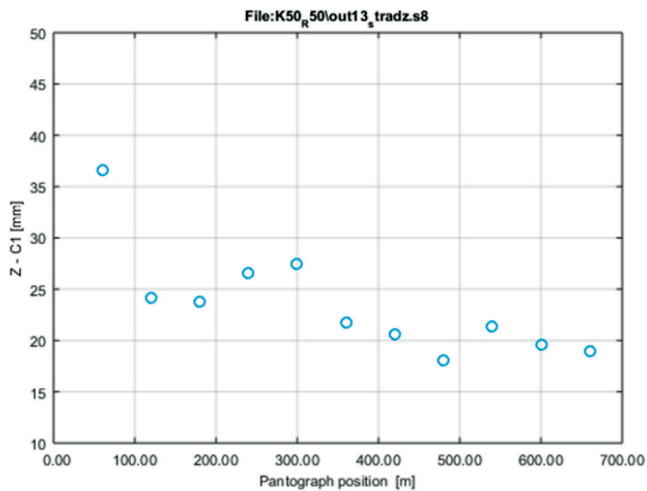


Fig. 20 - Sollevamenti sotto sospensione. V=200 km/h. Fm=147 N.
Fig. 20 - Lifting under suspension. V=200 km/h. Fm=147 N.

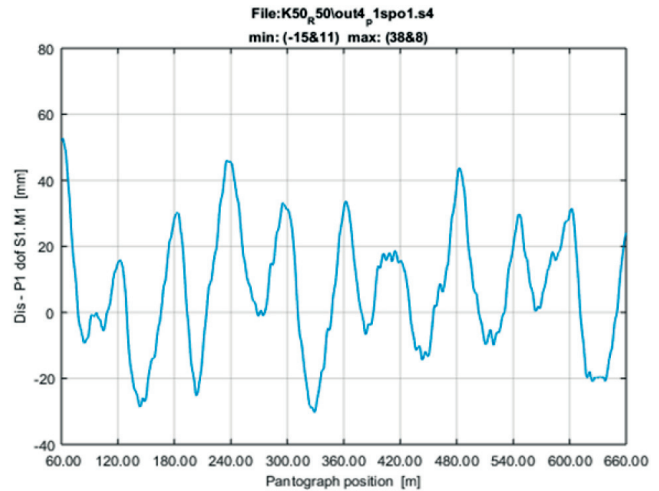


Fig. 21 - Moto verticale dell'archetto. V=160 km/h.
Fig. 21 - Vertical motion of the bow. V=160 km/h.

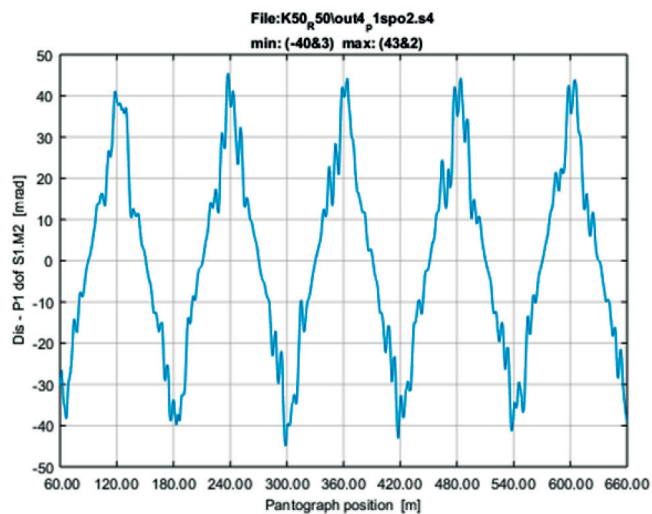


Fig. 22 - Moto di rollio dell'archetto. V=160 km/h.
Fig. 22 - Rolling of the bow. V=160 km/h.

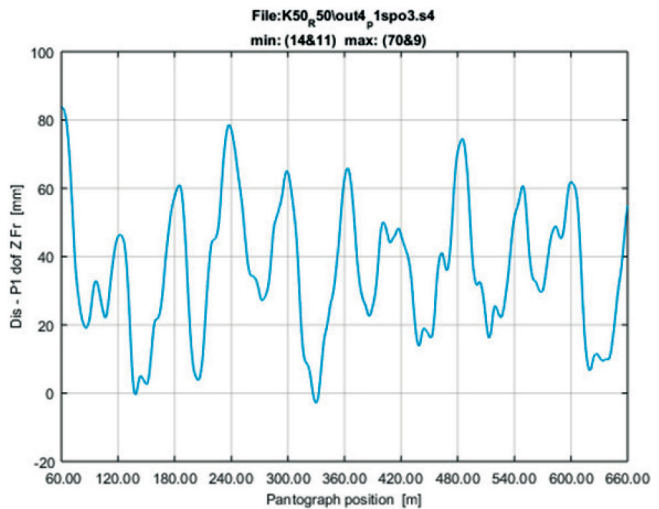


Fig. 23 - Moto verticale del quadro. V=160 km/h.
Fig. 23 - Vertical motion of the quadrilateral. V=160 km/h.

- prova di sollevamento ed abbassamento del quadro tra gli estremi della zona di lavoro, secondo le modalità definite al §6.4.1.2;
- prova di fatica sulla sospensione della testa, secondo le modalità definite al §6.4.2.

2.4. Prove di interazione pantografo - catenaria

Sono state eseguite corse prova fino alla velocità di 160 km/h con il pantografo installato sulla locomotiva E464-430 nelle seguenti configurazioni:

- configurazione mono-spinta: la spinta esercitata dalla molla ad aria è costante per ogni velocità di marcia, pari al valore del precarico statico;
- configurazione spinta variabile: la spinta è regolata in modo continuo attraverso una centralina elettronica

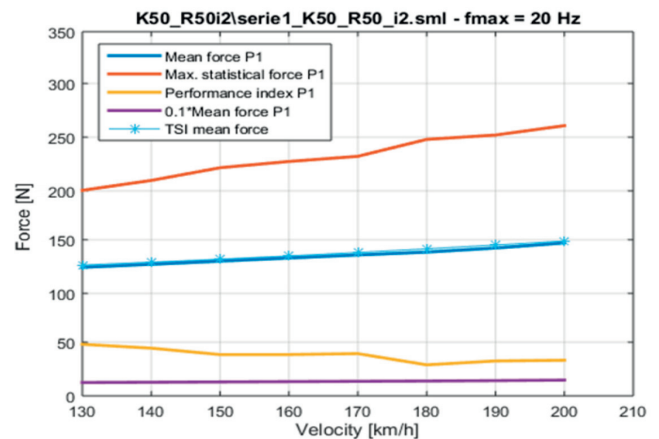


Fig. 24 - Statistiche della forza di contatto in funzione della velocità.
Fig. 24 - Speed contact force statistics.

che regola la pressione dell'aria nella molla tramite opportune funzioni della velocità $p=f(v)$, definite per ciascuna orientazione del pantografo.

La qualità di captazione è stata valutata mediante misura della percentuale di archi elettrici, per entrambe le configurazioni, al fine di valutare anche l'effettivo incremento di prestazioni reso possibile dalla regolazione della spinta mediante centralina elettronica.

Preliminarmente alle prove di captazione sono state effettuate prove di portanza aerodinamica per entrambe le orientazioni del pantografo. La valutazione delle curve di portanza permette di definire i riferimenti di pressione da impostare nella centralina che regola la spinta del pantografo, al fine di ottenere i valori di forza media ottimale in entrambe le direzioni di marcia e per tutte le velocità di esercizio.

2.4.1. Misura della portanza aerodinamica

La misura della portanza aerodinamica $P^{(1)}$ si esegue attraverso una prova con il pantografo con striscianti vincolati, per mezzo di cavetti in acciaio, in modo che la loro sommità si trovi ad un'altezza di 100 mm al di sotto dell'altezza nominale della linea in prova. I cavi d'acciaio sono ancorati a due trasduttori di forza applicati sulla base del pantografo, come indicato in fig. 31.

La testa del pantografo è dunque posizionata ad un'altezza prossima a quella del filo di contatto, senza toccarlo; il treno raggiunge la massima velocità di prova captando la corrente con una locomotiva di scorta. Il contributo delle forze aerodinamiche viene calcolato in funzione della velocità del treno, come differenza tra la spinta totale e la spinta statica dovuta al solo precarico esercitato dalla molla ad aria.

Il treno viene fatto decelerare dalla massima velocità a zero; i contributi della forza aerodinamica vengono sommati e riferiti alla velocità effettuando una media mobile del segnale a step di 1 km/h. Si determinano polinomi del secondo ordine che meglio approssimano la distribuzione dei valori di portanza secondo la legge dei minimi quadrati, calcolando il valore del coefficiente "a". Si ripete tale procedimento per almeno 10 volte.

⁽¹⁾ Con il termine "portanza aerodinamica P" si intende il contributo di forza verticale dovuto esclusivamente all'effetto dell'aria su tutte le parti che compongono il pantografo.

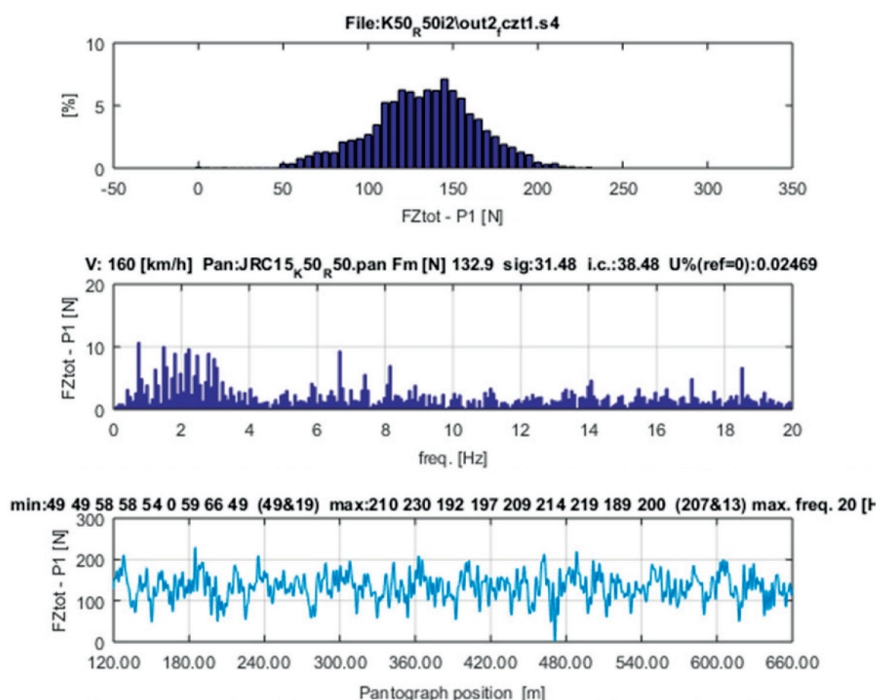


Fig. 25 - Forza di contatto ottenuta dalla simulazione a $v=160$ km/h, $F_m=133$ N.
Fig. 25 - Contact force obtained from simulation at $v=160$ km/h, $F_m=133$ N.

2.3.4. Approval tests: according to points §6.4.1.2 and §6.4.2 of EN50206 [1]

The tests carried out are:

- lifting and lowering of the quadrilateral between the working area ends, as specified in §6.4.1.2;
- fatigue test on head suspension, as per modes defined in §6.4.2.

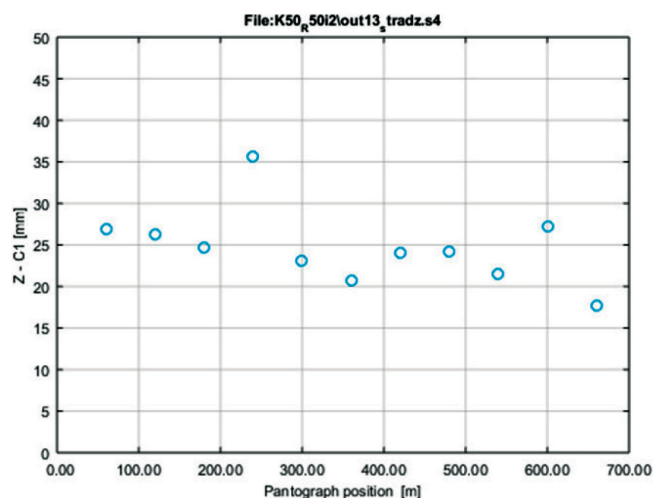


Fig. 26 - Sollevamenti sotto sospensione. $V=160$ km/h, $F_m=133$ N.
Fig. 26 - Lifting under suspension. $V=160$ km/h, $F_m=133$ N.

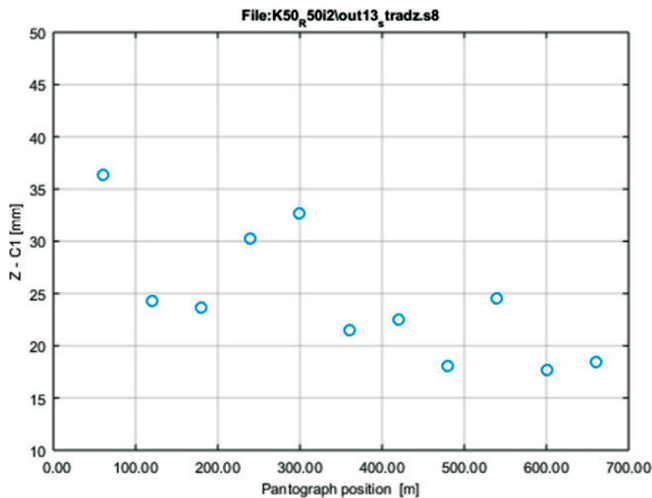


Fig. 27 - Sollevamenti sotto sospensione. V=200 km/h. Fm=147 N.

Fig. 27 - Lifting under suspension. V=200 km/h. Fm=147 N.

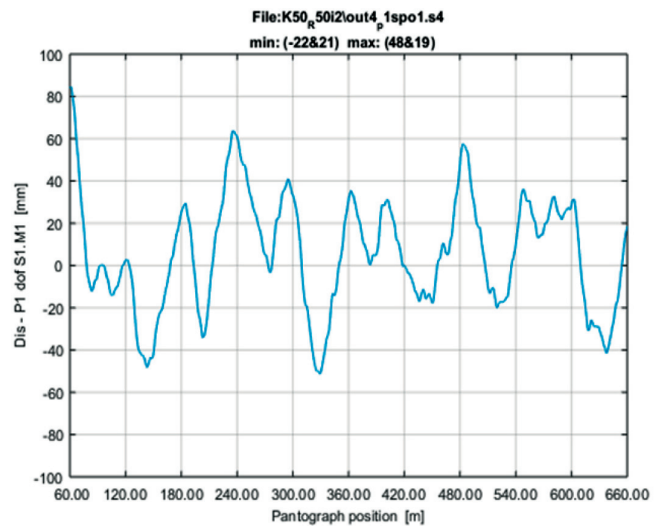


Fig. 28 - Moto verticale dell'archetto. V=160 km/h.

Fig. 28 - Vertical motion of the bow. V=160 km/h.

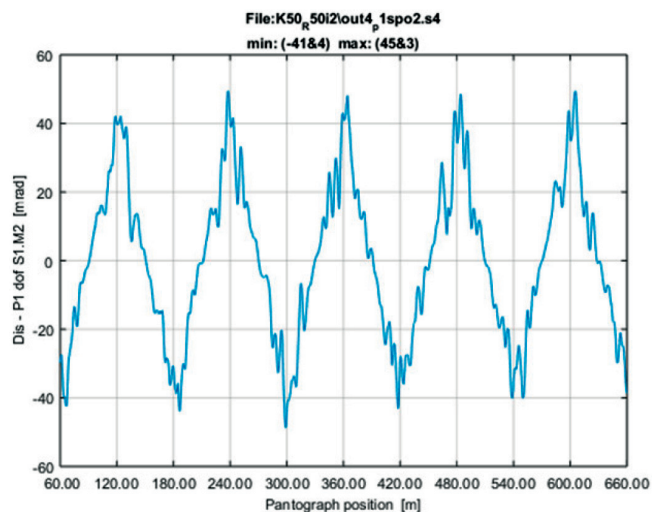


Fig. 29 - Moto di rollio dell'archetto. V=160 km/h.

Fig. 29 - Rolling of the bow. V=160 km/h.

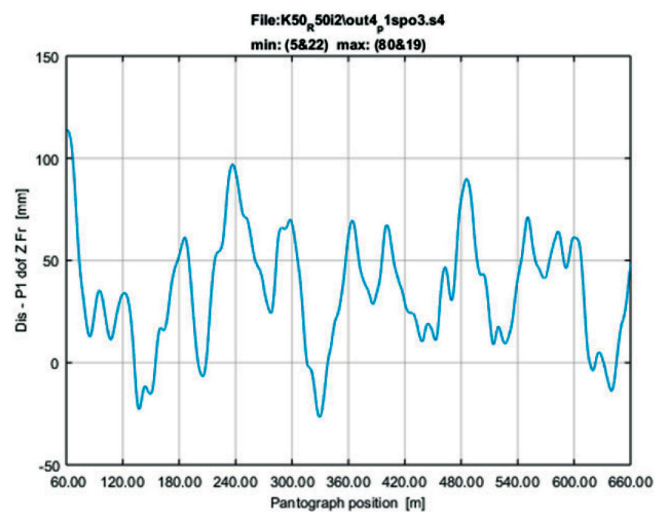


Fig. 30 - Moto verticale del quadro. V=160 km/h.

Fig. 30 - Vertical motion of the quadrilateral. V=160 km/h.

Trovati i 10 valori del coefficiente "a" (termine che moltiplica il quadrato della velocità nella formula 1 della portanza P(V)) dei rispettivi polinomi di approssimazione, se ne calcola il valore medio a_m e si esprime la portanza come:

$$P = a_m \cdot V^2 \quad (1)$$

I punti in cui il pantografo legato va a toccare la linea di contatto (eventi monitorati mediante la misura della tensione di linea) sono eliminati e non considerati per il calcolo della curva di portanza. Il calcolo della portanza P viene eseguito con una procedura software, che calcola la curva ottenuta da approssimazione polinomiale del secondo ordine della nuvola di punti.

Le prove di portanza aerodinamica del pantografo sono state eseguite con il valore di spinta statica costante

2.4. Pantograph-catenary interaction tests

Trial runs were conducted up to speeds of 160 km/h with the pantograph installed on the E464-430 locomotive in the following configurations:

- mono-force configuration: the force exerted by the air spring is constant for each operation speed, equal to the value of the static pre-load;
- variable force configuration: the force is adjusted continuously via an electronic control unit which regulates the air pressure in the spring with appropriate speed functions $p=f(v)$ defined for each orientation of the pantograph.

The quality of current collection was assessed by measuring the percentage of electric arcs, for both configura-

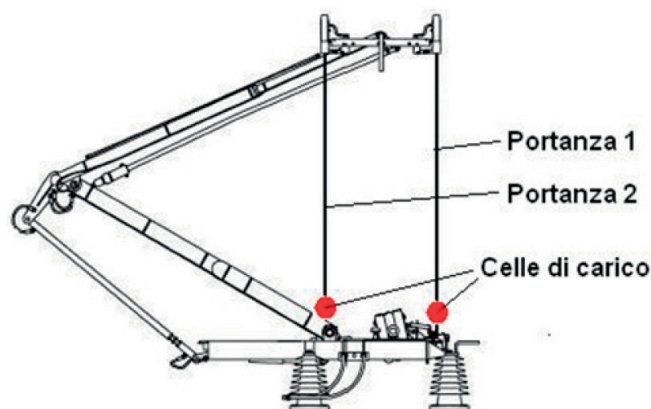


Fig. 31 - Schema della prova vincolata per la misura della portanza aerodinamica.

Fig. 31 - Constrained test diagram for the measurement of aerodynamic lift.

(pari a 90N), in modo tale da poter discernere il contributo aerodinamico alle diverse velocità. Tramite le prove aerodinamiche, eseguite per entrambe i versi di funzionamento del pantografo, sono state ricavate le seguenti funzioni di portanza totale:

- configurazione con gomito posteriore, Funzione Portanza Totale = $90 + 0,000404 \cdot V^2 \pm 1,6 \text{ N}$;
- configurazione con gomito anteriore, Funzione Portanza Totale = $90 + 0,000538 \cdot V^2 \pm 1,2 \text{ N}$.

essendo V la velocità della locomotiva.

In aggiunta alla portanza totale del pantografo, ottenuta dalla somma delle forze misurate dalle celle di carico in corrispondenza dei due fili di ritegno, è stato possibile calcolare anche lo sbilanciamento di carico fra gli archetti (anteriore – posteriore rispetto al senso di marcia).

I risultati di portanza totale e dello sbilanciamento tra i due archetti, corrispondenti alla velocità di 160 km/h, sono riportati in tabella 3.

Si può notare che alla velocità di 160 km/h la differenza di portanza aerodinamica totale tra le due configurazioni è minima, mentre si evidenzia una differenza di spinta tra l'archetto lato gomito e quello lato bocca.

tions, in order to evaluate the actual performance increase made possible by adjusting the force using an electronic control unit.

Prior to the current collection of tests, aerodynamic tests were performed to measure aerodynamic uplift, for both orientations of the pantograph. The evaluation of the uplift curves allows defining the pressure references to be set in the control unit which regulates the force of the pantograph in order to obtain the optimal average force values in both directions of travel and for all operation speeds.

2.4.1. Measurement of aerodynamic uplift

The measurement of aerodynamic lift $P^{(1)}$ is carried out through a test with the pantograph with contact strips bound by steel cables, so that their top is at a height of 100 mm below the nominal height of the line under test. Steel cables are anchored to two force transducers applied on the base of the pantograph, as shown in fig. 31.

The head of the pantograph is thus placed at a height close to that of the contact wire, without touching it; the train reaches the maximum test speed picking up the current with a pusher locomotive. The contribution of aerodynamic forces is calculated depending on the speed of the train, as the difference between the total force and static force due to the preload exerted by the air spring only.

During aerodynamic tests the train speed is decreased from full speed to zero; aerodynamic force contributions are evaluated by performing a moving average of the signal in increments of 1 km/h. Second order polynomials are determined fitting the distribution of lift values with a second order polynomial (equation by least squares method). This process is repeated at least 10 times. After finding the 10 values of coefficient "a" (a term that multiplies the square of the speed in formula 1 of lift force $P(V)$) of the respective approximation polynomials, the average a_m value thereof is calculated and the lift force is expressed as:

⁽¹⁾ The term "aerodynamic uplift P" means the contribution of the vertical force due only to the effect of air on all parts composing the pantograph.)

TABELLA 3 – TABLE 3

Sbilanciamento fra gli archetti e portanza totale per le due orientazioni del pantografo
Imbalance between the collector mead and total lifting force for the two orientations of the pantograph

Gomito Angle	Velocità Speed	Forza archetto lato gomito Collector mead force angle side	Forza archetto lato bocca Collector mead force mouth side	Sbilanciamento archetti Collector mead imbalance	Forza aerodinamica totale Total aerodynamic force
Posteriore Rear	160 km/h	53.4 N	46.9 N	6.5 N	100.3 N
Anteriore Front	160 km/h	54.3 N	49.5 N	4.8 N	103.8 N

2.4.2. Misura della percentuale degli archi elettrici

La misura mediante il parametro della formula 2 NQ[%], permette di valutare la qualità di captazione in un sistema pantografo-catenaria.

$$NQ [\%] = \frac{\sum_{i=1}^n t_{arco}}{\sum_{i=1}^m t_{totale}} \cdot 100 \quad (2)$$

Tale parametro è definito percentuale d'arco e si calcola come rapporto fra la somma delle durate degli n archi maggiori di 5 ms generati durante una corsa prova $\left(\sum_{i=1}^n t_{arco}\right)$ ed il tempo totale di osservazione $\left(\sum_{i=1}^m t_{totale}\right)$, ossia il tempo da conteggiare al contemporaneo verificarsi di 2 condizioni:

1. velocità del treno uguale alla velocità di prova ± 3 km/h;
2. corrente assorbita dal pantografo maggiore o uguale al 30% della corrente nominale.

Secondo la norma CEI EN 50317 [3], tutti gli archi di durata minore di 5 ms non vengono considerati nel calcolo di NQ, mentre tutte le coppie di archi ravvicinati che hanno un "tempo di buio" minore o uguale ad 1 ms vengono uniti come un unico arco.

Il calcolo di NQ [%] viene fatto con una procedura software, che calcola la somma delle durate di tutti gli archi verificatisi durante il rispetto delle condizioni di velocità del convoglio, di corrente assorbita e di durata minima dell'arco, descritti precedentemente.

La corrente nominale assorbita dal treno è 1500 A, quindi la soglia di corrente del 30% al di sopra della quale è valida la misura degli archi è 450 A. L'intervallo di velocità valido per la misura degli archi è 160 ± 3 km/h. Secondo la norma RFI-DTC/DNS/EE.ST TE 74D [5] il valore limite della percentuale di archi NQ per velocità fino a 160 km/h deve essere $\leq 0,1\%$.

La durata degli archi è registrata da appositi sensori, sensibili alla luce ultravioletta emessa durante l'arco elettrico. Il campo di lunghezza d'onda di tali sensori è da 220 nm a 225 nm ed essi risultano insensibili a lunghezze d'onda superiori a 330 nm.

Sono stati installati 2 sensori ai lati del pantografo come in fig. 32, per rilevare gli archi dalla parte posteriore del pantografo rispetto al senso di marcia del treno.

La distanza di riferimento dagli striscianti (con pantografo sollevato all'altezza nominale di lavoro) è 5 m; nel caso non sia possibile rispettare tale distanza, si può modificare la soglia della densità di potenza acquisita secondo la legge:

$$X_y = X_d \frac{y^2}{d^2} \quad (3)$$

$$P = a_m \cdot V^2 \quad (1)$$

The points where the restrained pantograph touches the contact line (events monitored by measuring the line voltage) are deleted and not considered for the calculation of the lifting curve. The calculation of lift force P is carried out with a software procedure that calculates the curve obtained by second order polynomial approximation of the points distribution.

Pantograph aerodynamic tests were performed with the value of constant static force (90N) so that the aerodynamic contribution at different speeds could be discerned. Through aerodynamic testing, performed for both directions of operation of the pantograph, the following functions of total lift force were obtained:

- configuration with rear angle, Total Lift Function $= 90 + 0,000404 \cdot V^2 \pm 1.6$ N;
- configuration with front angle, Total Lift Function $= 90 + 0,000538 \cdot V^2 \pm 1.2$ N.

being V the speed of the locomotive.

In addition to the total lift force of the pantograph, derived from the sum of the forces measured from the load cells at the two retaining wires, the load imbalance between the collector meads was also calculated (front - rear with respect to the driving direction).

Table 3 shows the results of total lift force and the imbalance between the two collector heads, corresponding to the speed of 160 km/h.

At a speed of 160 km/h, a minimal difference can be observed in the total aerodynamic lift force between the two configurations, while there is a difference in forces of leading and trailing collector meads.

2.4.2. Measurement of the percentage of electrical arcs

The measurement using the parameter of formula 2 NQ[%], allows evaluating the captation quality in a pantograph-catenary system.

$$NQ [\%] = \frac{\sum_{i=1}^n t_{arco}}{\sum_{i=1}^m t_{totale}} \cdot 100 \quad (2)$$

This parameter is defined as percentage of arcing and is calculated as the ratio between the sum of the lengths of the n arcs greater than 5 ms generated during a test run $\left(\sum_{i=1}^n t_{arco}\right)$ and the total observation time $\left(\sum_{i=1}^m t_{totale}\right)$, i.e. the time to be counted at the occurrence of 2 conditions simultaneously:

1. train speed equal to the test speed ± 3 km/h;
2. current absorbed by the pantograph greater than or equal to 30% of the nominal current.

According to standard CEI EN 50317 [3], all arcs

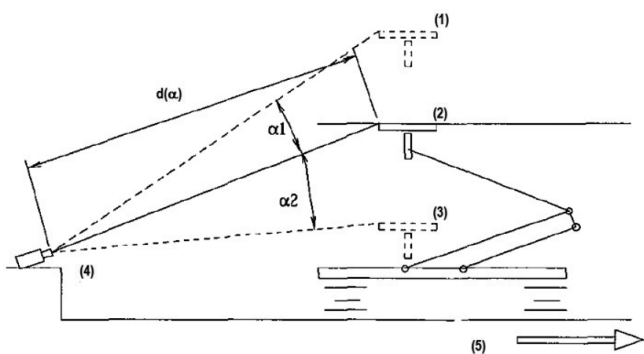


Fig. 32 - Esemplio della vista laterale del posizionamento di un rilevatore di archi. Legenda: (1): Altezza di lavoro massima; (2): Altezza di lavoro nominale; (3): Altezza di lavoro minima; (4): Rilevatore d'arco; (5): direzione di marcia.

Fig. 32 - Example of the side view of positioning of an arc detector. Legend: (1): Maximum working height; (2): Nominal working height; (3): Minimum working height; (4): Arc detector; (5): direction of travel.

In cui X_y è il valore della nuova soglia, y quello della nuova distanza, X_d il valore di soglia di riferimento alla distanza nominale di riferimento di 5 m (d).

2.4.3. Risultati dei test eseguiti

2.4.3.1. Configurazione mono-spinta

Le prove in configurazione mono-spinta sono state effettuate con il valore di spinta statica imposta costante in tutto il campo di velocità.

Tramite la rilevazione e la misura degli archi elettrici sono stati ricavati i dati relativi ai distacchi, per ogni configurazione di prova, alla velocità di 160 km/h, correlando nella loro rappresentazione, in funzione della progressiva chilometrica:

- spinta statica utilizzata;
- distacchi rappresentati con segmenti, la cui ampiezza in ms è la durata dei distacchi stessi;
- funzione distribuzione dei distacchi;
- calcolo del tempo (in %) di distacco rispetto al tempo di osservazione sull'intera tratta di prova (indice di qualità).

Un estratto dei valori della percentuale dei distacchi per le due direzioni di percorrenza sono riassunti nella tabella 4.

Nelle figg. 33 e 34 mostrato un estratto dei grafici dei test effettuati per le misure degli archi con la configurazione mono- spinta; nei grafici vengono mostrati:

with a duration of less than 5 ms are not considered in the NQ calculation, while all pairs of close arcs that have a “dark time” of less than or equal to 1 ms are merged like a single arc.

The calculation of NQ [%] is performed using a software procedure that calculates the sum of the durations of all the arcs occurred while respecting the speed conditions of the convoy, the current absorbed and the minimum arc duration described above.

The rated current absorbed by the train is 1500 A, hence the 30% current threshold above which the arc measurements are valid is 450 A. The valid speed range for the measurement of arcs is 160 ± 3 km/h. According to the RFI-DTC/DNS/EE.ST TE 74D [5] standard, the percentage of arcing limit value NQ arcs for speeds up to 160 km/h must be $\leq 0.1\%$.

Special sensors, sensitive to ultraviolet light emitted during the electric arcs, record the duration of the arcs. The wavelength range of these sensors is from 220 nm to 225 nm and they are insensitive to wavelengths greater than 330 nm.

Two sensors were installed on the sides of the pantograph as in fig. 32, to detect the arcs from the back of the pantograph with respect to the driving direction.

The reference distance from the contact strip (with pantograph lifted to the nominal working height) is 5 m; if this distance cannot be met, the power density threshold acquired according to law can be changed:

$$X_y = X_d \frac{y^2}{d^2} \tag{3}$$

Where X_y is the value of the new threshold, y is the value of the new distance, X_d is the reference threshold value at the reference nominal distance of 5 m (d).

TABELLA 4 – TABLE 4

Valori della percentuale dei distacchi per pantografo con configurazione mono-spinta
Values of the percentage of pantograph displacements with mono-force configuration

Gomito Angle	Velocità Speed	km utili Useful km	Indice di qualità Quality index NQ [%]	Limite di accettazione Acceptance limit NQ [%]
Posteriore Rear	160 km/h	7.1	0.025±0.0001	0,1
Posteriore Rear	160 km/h	9.8	0.027±0.0001	
Anteriore Front	160 km/h	3.5	0.037±0.0002	
Anteriore Front	160 km/h	5.8	0.031±0.0002	

LINEA 3kV CC - BOLGHERI ---> FOLLONICA

Pantografo JRC15
GOMITO POSTERIORE
DIREZIONE --->

Corsa prova N° 09-09 del 15-12-2015 Dal km 232 al km 262

ELABORAZIONE ARCHI

Fotorilevatore	FOT2	T_arco_Max.(s)	0.0156
km analizzati	9,8	T_osserv.(s)	221.36
N. Archi	6	T_distac.(s)	0.0599
		NQ (%)	0.027 ± 0.0001

Velocità di prova : 160 (+/- 3.0) km/h

SPINTA STATICA: 100.0 N

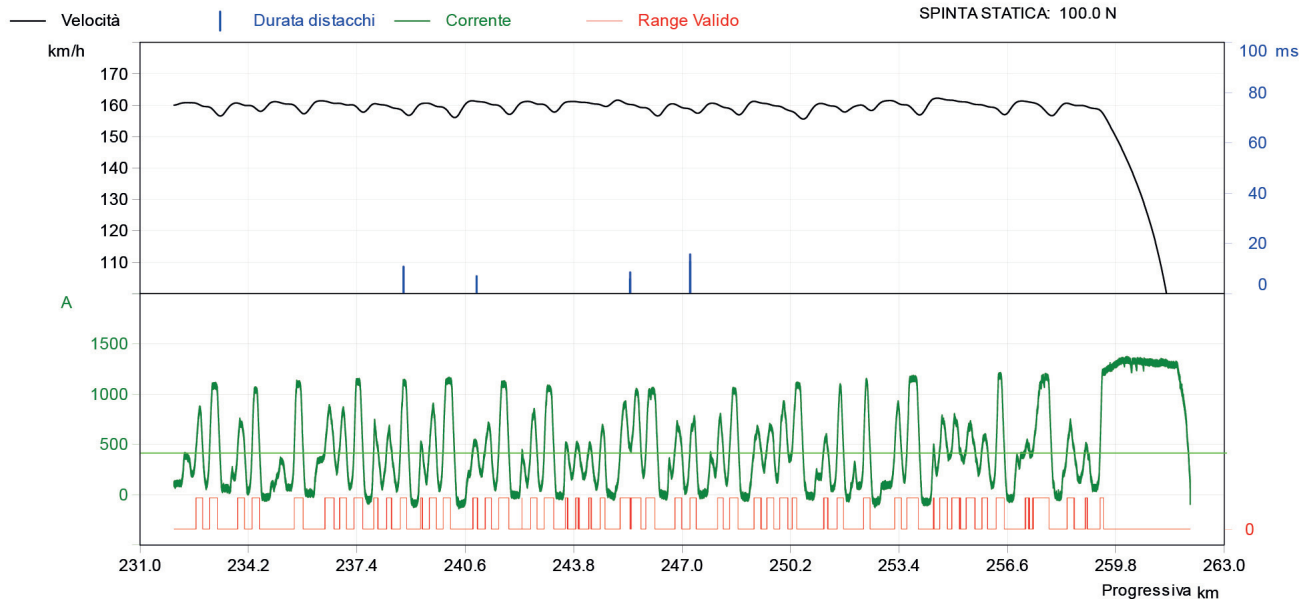


Fig. 33 - Misura della percentuale degli archi elettrici con configurazione mono-spinta e gomito posteriore rispetto al senso di marcia. Il “Range valido” per l’elaborazione degli archi elettrici risulta positivo solo quando la corrente assorbita è maggiore o uguale a 450 A (valori superiori la linea orizzontale verde) e quando la velocità è compresa tra 157 km/h e 163km/h.
Fig. 33 - Measurement of the percentage of arcing with mono-force configuration and rear angle with respect to the direction of travel. The “Valid range” for electric arc processing is only positive when the absorbed current is greater than or equal to 450 A (higher than the horizontal green line) and when the speed is between 157 km/h and 163 km/h.

- velocità del convoglio;
- corrente assorbita dalla locomotiva;
- range Valido, per l’elaborazione degli archi; il “range valido” diventa positivo quando si presentano due condizioni:
 - corrente assorbita ≥ 450 A;
 - velocità del convoglio = 160 ± 3 km/h;
- durata dei distacchi “validi” derivati dal valore positivo del “Range valido”.

2.4.3.2. Configurazione spinta variabile

I valori di riferimento di pressione per la servo-valvola comandata dalla centralina elettronica sono stati definiti, con una correzione definita sulla base dei risultati delle prove di portanza aerodinamica, al fine di ottenere dei valori di forza media di contatto ottimali per entrambe le direzioni di marcia. Per velocità nulla è stata impostata una forza di spinta a precarico di 100 N al fine di favorire la captazione di corrente a fermo e ridurre le temperature dello strisciante e del filo di contatto. Un estratto dei

2.4.3. Results of the tests performed

2.4.3.1. Single-force configuration

Single-force configuration tests were performed with the static force value set constant throughout the speed range.

Through the detection and measurement of the electric arcs, the data for the displacements, for each test configuration were obtained at a speed of 160 km/h, correlating in their representation, according to the progressive kilometre:

- the static force used;
- the displacements represented by segments whose amplitude in ms is the duration of the displacements themselves;
- the distribution function of the displacements;
- the time calculation (in %) of the displacement compared to the observation time on the entire test section (quality index).

Table 4 summarises an extract of the percentage values of detachments for the two directions of travel.

LINEA 3kV CC - FOLLONICA ---> BOLGHERI

Pantografo JRC15
GOMITO ANTERIORE
DIREZIONE <---

Corsa prova N° 12-04 del 15-12-2015 Dal km 248 al km 262

ELABORAZIONE ARCHI



Fotorilevatore	FOT1	T_arco_Max.(s)	0.0233
km analizzati	5.8	T_osserv.(s)	130.51
N. Archi	3	T_distac.(s)	0.0410
		NQ (%)	0.031 ± 0.0002

Velocità di prova : 160 (+/- 3.0) km/h
SPINTA STATICA: 100.0 N

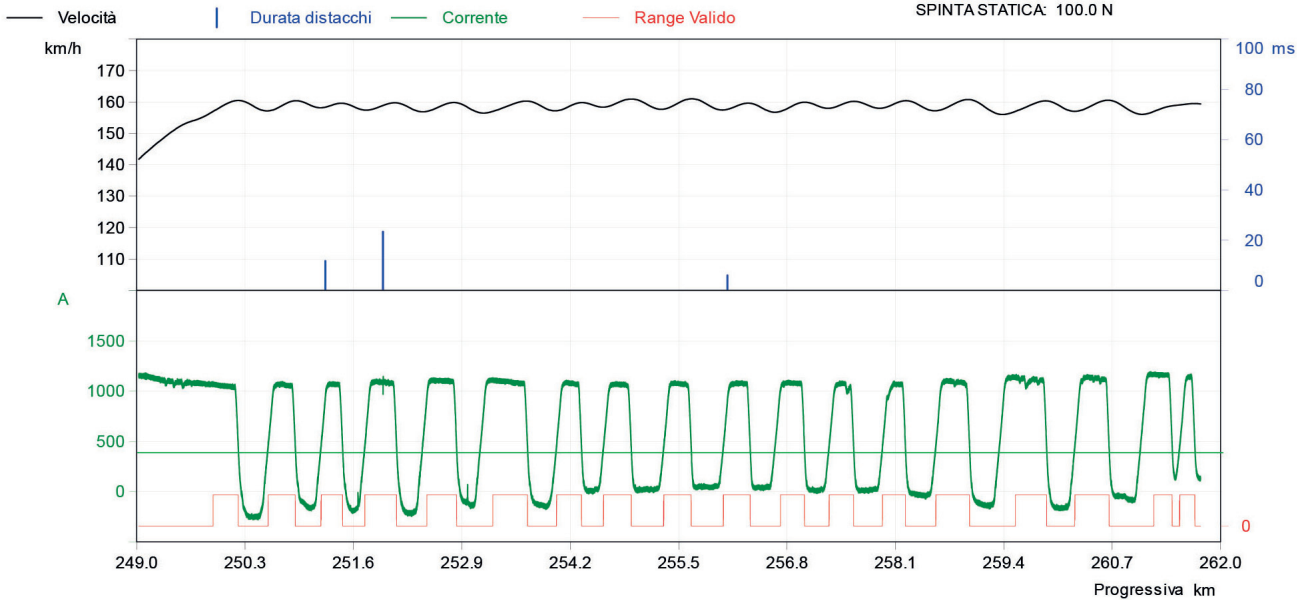


Fig. 34 - Misura della percentuale degli archi elettrici con configurazione mono-spinta e gomito anteriore rispetto al senso di marcia. Il "Range valido" per l'elaborazione degli archi elettrici risulta positivo solo quando la corrente assorbita è maggiore o uguale a 450 A (valori superiori la linea orizzontale verde) e quando la velocità è compresa tra 157 km/h e 163km/h.
Fig. 34 - Measurement of the percentage of arcing with mono-force configuration and front angle with respect to the direction of travel. The "Valid range" for electric arc processing is only positive when the absorbed current is greater than or equal to 450 A (higher than the horizontal green line) and when the speed is between 157 km/h and 163 km/h.

valori della percentuale dei distacchi per i due sensi di marcia sono riassunti nella tabella 5.

Nelle figg. 35 e 36 viene mostrato un estratto dei grafici dei test effettuati per le misure degli archi con la configurazione spinta variabile; nei grafici vengono mostrati:

Figs. 33 and 34 show an extract of the test charts for arcs measurements with the mono-force configuration; the charts show:

- the speed of the convoy;
- the current absorbed by the locomotive;
- the Valid range, for the processing of arcs; the "valid range" becomes positive when there are two conditions:
 - absorbed current ≥ 450 A;
 - convoy speed = 160 ± 3 km/hr;
- the duration of "valid" displacements derived from the positive value of the "Valid range".

TABELLA 5 – TABLE 5

Valori della percentuale dei distacchi per pantografo con configurazione mono-spinta
Values of the percentage of pantograph displacements with mono-force configuration

Gomito Angle	Velocità Speed	km utili Useful km	Indice di qualità Quality index NQ [%]	Limite di accettazione Acceptance limit NQ [%]
Posteriore Rear	160 km/h	9.5	0.010±0.0001	0,1
Posteriore Rear	160 km/h	9.6	0.007±0.0001	
Anteriore Front	160 km/h	7.6	0.011±0.0001	
Anteriore Front	160 km/h	8.0	0.013±0.0001	

2.4.3.2. Variable force configuration

The pressure reference values for the servo-valve controlled by the electronic control unit have been defined, with a correction defined on the basis of the aerodynamic tests results, in or-

LINEA 3kV CC - BOLGHERI ---> FOLLONICA

Pantografo JRC15
GOMITO POSTERIORE
DIREZIONE --->

Corsa prova N° 10-42 del 10-12-2015 Dal km 232 al km 262

ELABORAZIONE ARCHI

Fotorilevatore	FOT2	T_arco_Max.(s)	0.0105
km analizzati	9.6	T_osserv.(s)	217.83
N. Archi	2	T_distac.(s)	0.0159
		NQ (%)	0.007 ± 0.0001

Velocità di prova : 160 (+/- 3.0) km/h

SPINTA STATICA: 90.0 N

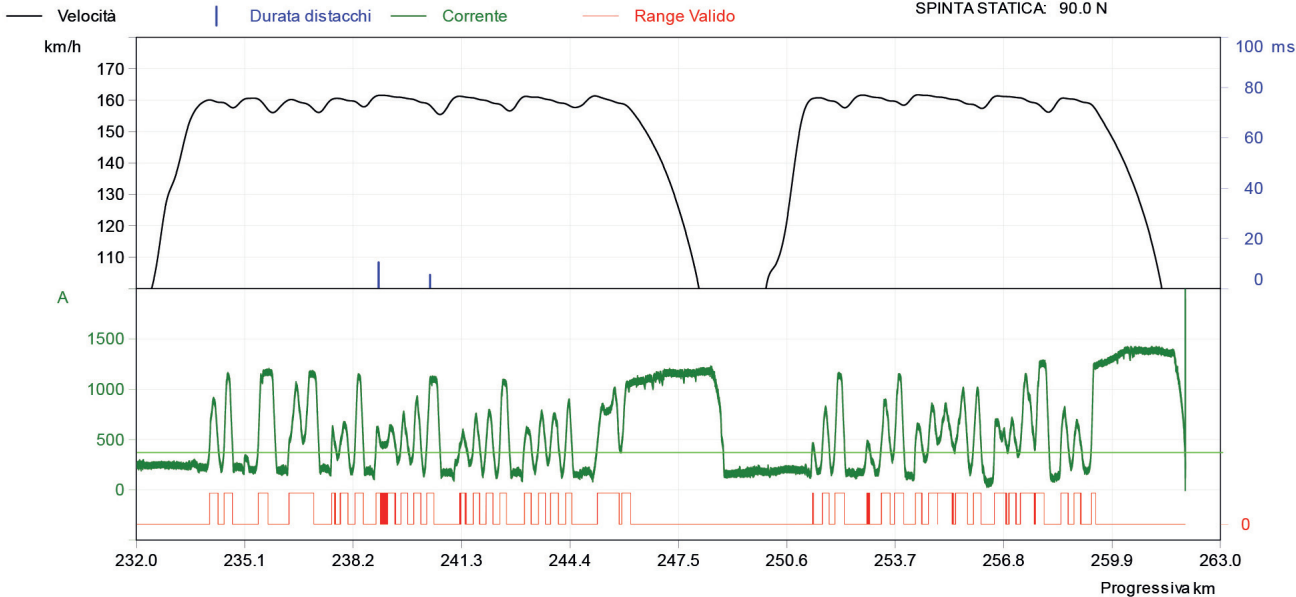


Fig. 35 - Misura della percentuale degli archi elettrici con configurazione a spinta variabile e gomito posteriore rispetto al senso di marcia. Il “Range valido” per l’elaborazione degli archi elettrici risulta positivo solo quando la corrente assorbita è maggiore o uguale a 450 A (valori superiori la linea orizzontale verde) e quando la velocità è compresa tra 157 km/h e 163km/h.

Fig. 35 - Measurement of the percentage of arcing with variable force and rear angle configuration with respect to the direction of travel. The “Valid range” for processing of electric arcs is positive only when the power absorbed is greater than or equal to 450 A (values above the horizontal green line) and when the speed is 157 km/h 163 km/h.

- velocità del convoglio;
- corrente assorbita dalla locomotiva;
- range valido per l’elaborazione degli archi; il “range valido” diventa positivo quando si presentano due condizioni:
 - corrente assorbita ≥ 450 A;
 - velocità del convoglio = 160 ± 3 km/h;
- durata dei distacchi “validi” derivati dal valore positivo del “Range valido”.

Confrontando i valori di indice di qualità NQ nella tabella 4 con quelli nella tabella 5 si può notare un miglioramento nella qualità di captazione in termini di percentuale di distacchi del pantografo dalla catenaria. Questo effetto è dovuto alla spinta variabile della centralina elettrica che migliora, aumentando, la forza media del pantografo con conseguente diminuzione del numero degli archi, o comunque della diminuzione della durata degli archi elettrici generati nei distacchi, come è possibile notare nelle tabelle sopra citate.

der to obtain optimal mean contact force values for both directions of travel. For zero speed, a preload force of 100 N has been set in order to facilitate the collection of the current at standstill and to reduce the contact strip and contact line temperatures. Table 5 summarises an extract of the percentage values of the displacements for the two directions of travel.

Figs. 35 and 36 show an extract of the charts of tests run for measurements of arcs with variable force configuration; the charts show:

- the speed of the convoy;
- the current absorbed by the locomotive;
- the valid range for processing of the arcs; the “valid range” becomes positive when there are two conditions:
 - absorbed current ≥ 450 A;
 - speed of the convoy = 160 ± 3 km/hr;
- the duration of “valid” displacements derived from the positive value of the “Valid range”.

Comparing the NQ quality index values in table 4 with

LINEA 3kV CC - FOLLONICA ---> BOLGHERI

Pantografo JRC15

GOMITO ANTERIORE

DIREZIONE <---

Corsa prova N° 12-16 del 10-12-2015 Dal km 232 al km 262

ELABORAZIONE ARCHI

Fotorilevatore	FOT1	T_arco_Max.(s)	0.0239
km analizzati	8.0	T_osserv.(s)	182.28
N. Archi	1	T_distac.(s)	0.0239
		NQ (%)	0.013 ± 0.0001

Velocità di prova : 160 (+/- 3.0) km/h

SPINTA STATICA: 90.0 N

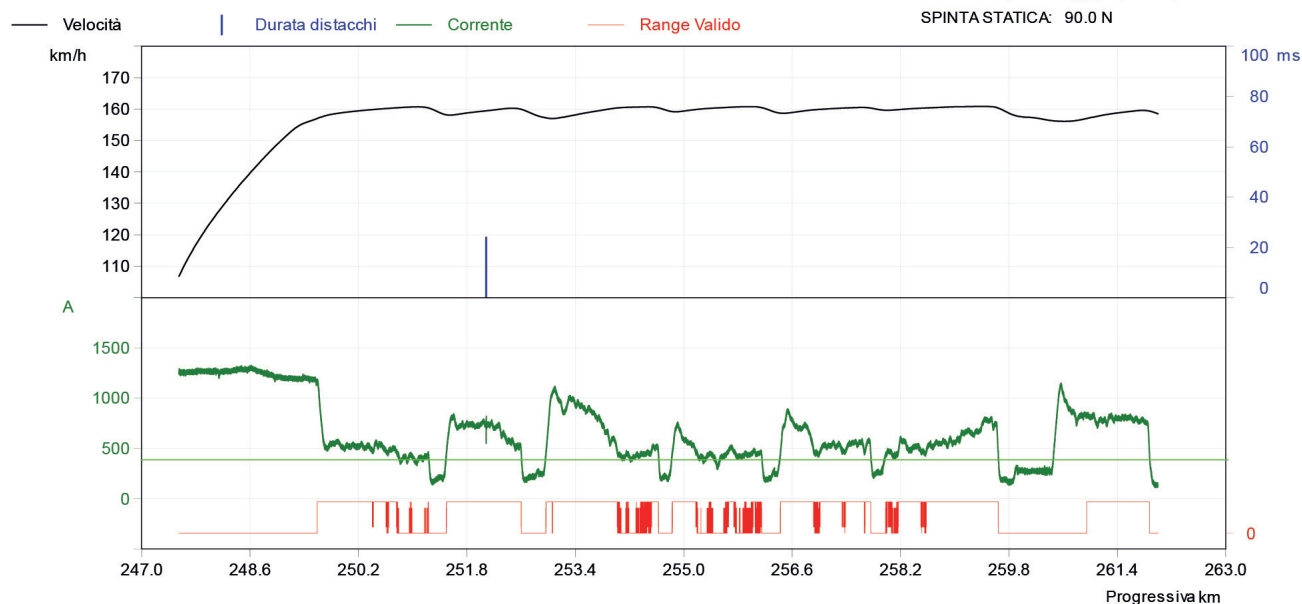


Fig. 36 - Misura della percentuale degli archi elettrici con configurazione a spinta variabile e gomito anteriore rispetto al senso di marcia. Il "Range valido" per l'elaborazione degli archi elettrici risulta positivo solo quando la corrente assorbita è maggiore o uguale a 450 A (valori superiori la linea orizzontale verde) e quando la velocità è compresa tra 157 km/h e 163km/h.

Fig. 36 - Measurement of the percentage of arcing with variable force and front angle configuration with respect to the direction of travel. The "Valid range" for processing of electric arcs is positive only when the power absorbed is greater than or equal to 450 A (values above the horizontal green line) and when the speed is 157 km/h 163 km/h.

3. Diagnostica CBM e integrazione con Sistema Telediagnostica Trenitalia [6]

La centralina diagnostica, dotata di input e output analogici e digitali, riceve dai sensori posti sul pantografo le informazioni relative alle accelerazioni verticali rilevate dagli striscianti a contatto con la catenaria. I segnali di accelerazione vengono condizionati dall'elettronica della centralina e trasdotti in segnali elettrici proporzionali alle oscillazioni percepite dal pantografo.

I segnali elettrici trasdotti vengono campionati con una frequenza tipica di 500Hz ed utilizzati dagli algoritmi diagnostici al fine di fornire indici di degrado sullo stato pantografo/linea.

La centralina dispone di bus di comunicazione come I2C, SPI, CAN etc. e può essere interfacciata con un host PC via linea seriale, USB, Ethernet. La centralina è provvista di memoria FLASH per l'immagazzinamento temporaneo dei dati utilizzati durante l'elaborazione dell'algoritmo diagnostico ed è dotata di un'interfaccia MVB in grado di comunicare segnalazioni diagnostiche, lato Pan-

those in table 5 an improvement can be observed in the captation quality in terms of percentage of displacements of the pantograph from the contact line. This effect is due to the variable force of the electric control unit which improves, increasing, the average force of the pantograph resulting in a decrease in the number of arcs, or decrease in duration of electric arcs that are generated in displacements, as can be seen in the tables above.

3. CBM Diagnostics and integration with the Trenitalia Tele-diagnosis System [6]

The diagnostic unit, equipped with analogue and digital inputs and outputs, receives information from sensors on the pantograph related to the vertical accelerations detected by the contact strips in contact with the catenary. Acceleration signals are conditioned by the electronics of the control unit and transduced into electrical signals proportional to the oscillations perceived by the pantograph.

The electrical signals transduced are sampled at a characteristic frequency of 500Hz and used by the diagnostic al-

tografo e lato Linea, alla logica di veicolo collegata al sistema di Telediagnostica [6] per la trasmissione a terra dei dati.

L'apparato diagnostico descritto viene proposto come possibile sistema opzionale da installare sui pantografi.

3.1. Integrazione del controllo/diagnostica pantografo con il TCMS del rotabile

La centralina di controllo e diagnostica del pantografo è interfacciata con il sistema di comando, controllo e diagnostica (TCMS) del veicolo; nel caso particolare dell'installazione sulla locomotiva E464, tale interfacciamento è realizzato tramite bus MVB.

Si elenca di seguito una tipica lista di segnali di scambio tra centralina-pantografo e logica di veicolo:

- Input per la centralina-pantografo:
 - comando sollevamento/abbassamento Pantografo;
 - velocità rotabile;
 - progressiva chilometrica (se disponibile);
 - numero treno;
 - numero cassa/carrozza;
 - direzione di marcia;
 - segnale di vita MVB;
 - data e ora del treno;
 - posizione GPS.
- Output alla logica di veicolo:
 - S/N pantografo;
 - Nr. Pantografo sollevato;
 - chilometri giornalieri percorsi dal pantografo;
 - chilometri totali percorsi dal pantografo dall'inizio dell'esercizio;
 - UTC Time System;
 - raising time;
 - lowering time;
 - posizione GPS;
 - warning Diagnostica pantografo e linea di contatto.

Il sistema di diagnostica della locomotiva E464 interroga la centralina pantografo al fine di acquisirne gli eventuali messaggi diagnostici. I messaggi diagnostici vengono quindi storicizzati nel database diagnostico della locomotiva e in base agli impatti sull'operatività del veicolo sono visualizzati sul monitor diagnostico.

Tutti gli eventi sono anche disponibili a seguito di scarico manuale o remoto tramite il sistema di Telediagnostica [6] installato su tutta la flotta E464.

I dati di processo (ovvero le grandezze analogiche/digitali) acquisiti dai sensori installati sul pantografo sono

algoritmi in order to provide indices of deterioration on the pantograph/line.

The control unit is equipped with communication buses such as I2C, SPI, CAN, etc. and can be interfaced with a host PC via serial, USB, Ethernet line. The control unit is equipped with FLASH memory for temporary storage of data used during the processing of the diagnostic algorithm and is equipped with an MVB interface that can communicate diagnostic signals, both from the pantograph side and catenary side to the vehicle logic connected to the telediagnostic system [6] for the transmission of data to the wayside.

The diagnostics apparatus described is proposed as possible optional system to be installed on pantographs.

3.1. Integration of the pantograph control/diagnostics with the TCMS of the rolling stock

The control unit and diagnostics of the pantograph is interfaced with the command, control and diagnostic system (TCMS) of the vehicle; in the particular case of the installation on the E464 locomotive, this interface is implemented by MVB bus.

Below is a typical list of exchange signals between the control unit-pantograph and the vehicle logic:

- Input for the control unit-pantograph:
 - Pantograph lifting/lowering control;
 - rolling stock speed;
 - progressive number of kilometres (if available);
 - train number;
 - carriage number;
 - direction of travel;
 - MVB life signal;
 - date and time of the train;
 - GPS position.
- Vehicle logic output:
 - Pantograph S/N;
 - Pantograph no. lifted;
 - distance travelled daily by the pantograph;
 - total kilometres travelled by the pantograph from the beginning of operation;
 - UTC Time System;
 - raising time;
 - lowering time;
 - GPS position;
 - warning pantograph and overhead contact line Diagnostics.

The telediagnostica system of the E464 locomotive interfaces with the pantograph control unit in order to acquire any diagnostic messages. The diagnostic messages are then downloaded in the locomotive diagnostic database

elaborati dalla centralina del pantografo e sono resi disponibili sul bus di veicolo al fine di poter, tramite il sistema di Telediagnostica [6], effettuare specifici log dati utili ad implementare indicatori di vita e o salute degli organi critici del pantografo e/o della linea di contatto (come descritto nei prossimi paragrafi).

Questo permette di visualizzare nel portale web del sistema di terra gli eventi diagnostici generati dalla centralina e tramite opportuna configurazione permette di acquisire i dati di processo resi disponibili sul bus. I dati di processo possono quindi essere utilizzati dal sistema di terra al fine di definire ed implementare Algoritmi Diagnostici e Statistici utili all'identificazione dei guasti e/o degli stati di degrado dei componenti del pantografo e/o della linea di contatto.

3.2. Diagnostica per l'individuazione di difetti/problematiche dell'infrastruttura

La centralina del pantografo JRC15 oltre alla diagnostica intrinseca del dispositivo presenta, come descritto nei paragrafi precedenti, la possibilità di diagnosticare difetti e problematiche dell'infrastruttura.

3.2.1. Esempi applicativi della diagnostica

Di seguito sono descritti alcuni esempi di analisi ed elaborazione dei dati gestiti dalla centralina del pantografo che permettono, una volta validati, di diagnosticare alcuni difetti tipici della linea di contatto. Il sistema di Telediagnostica [6] mette a disposizione gli strumenti per acquisire e raccogliere tali dati e per implementare, verificare e validare gli algoritmi che in modo automatico possano identificare i difetti e i guasti della linea.

La sensoristica del sistema di diagnostica è costituita da due accelerometri ottici installati sull'archetto del pantografo, e da un encoder posto alla base del quadro al fine di misurare la rotazione dell'albero motore. Una centralina elettronica converte i segnali ottici in analogici ± 10 V e li analizza mediante l'esecuzione di opportuni algoritmi finalizzati all'individuazione di difettosità dell'infrastruttura e del pantografo.

I due accelerometri ottici sono installati sull'archetto monoblocco del pantografo nelle posizioni indicate in fig. 37. L'utilizzo di due sensori in posizione consente di individuare i diversi livelli di eccitazione che possono insorgere sui due lati per effetto della poligonazione e del moto di rollio consentito dalla sospensione dell'archetto. La tabella 6 riporta le principali caratteristiche degli accelerometri ottici.

3.2.2. Verifica della capacità del sistema di individuare difetti della linea aerea

La funzionalità del sistema diagnostico è stata preliminarmente verificata mediante test al banco prova pan-

and according to the impacts on the operation of the vehicle are displayed on the diagnostics monitor.

All events are also available as a result of manual download or through the telediagnostica system [6] installed on the whole E464 fleet.

The process data (i.e. analogue/digital sizes) acquired by sensors installed on the pantograph are processed by the control unit of the pantograph and are made available on the bus of the vehicle in order to be able, through the telediagnostica system [6], to log specific data relevant for implementing correct functioning status of the critical organs of the pantograph and/or the contact line (as described in the following paragraphs).

This allows the display of the diagnostic events generated by the control unit on the web portal of the wayside system and using the proper setup it allows acquiring the process data made available on the bus. The process data can then be used by the wayside system in order to define and implement Diagnostic and Statistic Algorithms for identifying faults and/or degradation conditions of the pantograph components and/or of the contact line.

3.2. Diagnostics for the detection of defects/infrastructure issues

The control unit of the JRC15 pantograph in addition to the intrinsic diagnostics of the device, as described in the previous paragraphs, features the possibility to diagnose infrastructure faults and problems.

3.2.1. Application examples of diagnostics

Here are some examples of analysis and processing of

TABELLA 6 – TABLE 6

Caratteristiche degli accelerometri ottici utilizzati per il sistema diagnostico
Characteristics of optical accelerometers used for the diagnostics system

Frequency range	1÷200 Hz $\pm 5\%$
Natural frequency	800÷2.400 Hz
Measuring acceleration range	50g
Maximum g for survival	1500÷2000g
Nominal sensivity	100mV/g
Sensor Power supply	12V $\pm 5\%$ 170 mV
Outpur Impedance	<100 Ω
Phase shift	0 deg
Amplitude non linearity	<5%
Traverse sensitivity	<3%
Temperature Range	1-25÷89 °C
Protection (outdoor installation)	IP 68
Immunity	100% passive sensing design

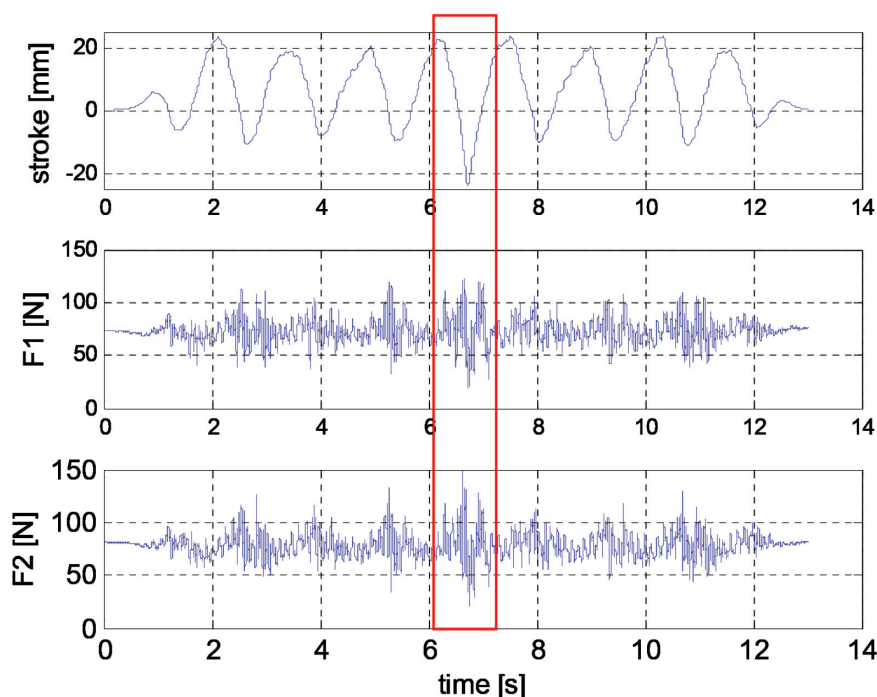


Fig. 37 - Andamento dello spostamento verticale della testa e delle forze di contatto corrispondenti ad una sospensione con rigidità incrementata (riquadro in figura).

Fig. 37 - Vertical displacement trend of the head and contact forces corresponding to a suspension with increased stiffness (picture inset).

tografo del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano. Il banco prova utilizzato permette di applicare una legge di moto agli attuatori che rappresenti lo spostamento dinamico della fune di contatto durante la marcia del treno. È quindi possibile fornire agli attuatori un riferimento di moto che corrisponda all'effettivo moto dell'archetto ottenuto sia in condizioni di catenaria standard, sia in condizioni degradate.

L'analisi di tali condizioni è stata effettuata per mezzo di simulazioni numeriche dell'interazione pantografo-catenaria. Le simulazioni sono state condotte con il software PCaDA, validato ai sensi della norma EN50318. In particolare è stato simulato il comportamento del pantografo alla velocità di 160 km, lungo 10 campate della catenaria 440 (due funi portanti tiro 11.25 kN, due funi di contatto tiro 10kN).

Di seguito analizziamo le condizioni della catenaria corrispondenti a ciascuna simulazione:

- 1) Catenaria standard in assenza di difetti (condizione non ulteriormente dettagliata).
- 2) Catenaria con sospensione di rigidità elevata (3 volte rispetto al nominale)
- 3) Catenaria con errore di posizionamento verticale su due sospensioni consecutive (+30 mm e -20 mm rispetto alla quota nominale).

data managed by the control unit of the pantograph that, once validated, allow diagnosing some typical faults of the contact line. The telediagnostica system [6] provides the tools to acquire and collect such data and to implement, verify and validate algorithms that can automatically identify the defects and faults of the line.

The sensors of the diagnostic system consist of two optical accelerometers installed on the pantograph bow, and an encoder at the base of the frame in order to measure the rotation of the driving shaft. An electronic control unit converts optical signals in analogue ± 10 V and analyses them through appropriate algorithms for the detection of defects of the infrastructure and the pantograph.

The two optic accelerometers are installed on the pantograph monoblock bow in the positions indicated in fig. 37. The use of two sensors in place allows identifying the different levels of energisation that may arise on both sides due to the staggering of the contact wire and rolling motion allowed by the suspension of the bow. Table 6 shows the main characteristics of optical accelerometers.

3.2.2. Verification of the system's ability to detect flaws of the airline

The functionality of the diagnostic system was preliminarily verified by running tests through the pantograph test bench of the Department of Mechanics at the Politecnico of Milan. The test bench used allows applying a motion law to the actuators that represents the dynamic displacement of the contact line during train operation. It is therefore possible to provide a motion reference to the actuators that corresponds to the actual motion of the bow both under standard catenary and degraded conditions.

The analysis of these conditions was performed by means of numerical simulations of the catenary-pantograph interaction. The simulations were conducted with the PcaDA software, validated in accordance with standard EN50318. In particular the behaviour of the pantograph at the speed of 160 km was simulated, along 10 spans of the 440 catenary (two 11.25 kN tension carrying cables, two 10 kN tension contact lines).

Below is the analysis of the conditions of the overhead contact line corresponding to each simulation:

- 1) Standard catenary in the absence of defects (condition not further detailed).

4) Catenaria con tiro delle funi di contatto ridotto del 20% (8 kN).

Analizziamo ora il punto 2), "Catenaria con sospensione di rigidità elevata".

Come primo caso, si considera un difetto isolato. La fig. 37 rappresenta lo spostamento della testa del pantografo ottenuto dalla simulazione numerica in cui la sospensione posizionata sul quinto palo presenta un valore di rigidità maggiore rispetto alla nominale di un fattore 3. È possibile osservare come in corrispondenza di tale sospensione difettosa (istante $t=6.7$ s) la testa subisca uno spostamento anomalo verso il basso. Il moto ottenuto dalla simulazione viene usato al banco prova come riferimento di spostamento per gli attuatori, cui corrispondono i valori di forza misurata sperimentalmente su ciascuno strisciante riportati in fig. 37. È possibile osservare come in corrispondenza della sospensione difettosa si riscontrino dei picchi di massimo e di minimo sulla forza di contatto.

La fig. 38 riporta i corrispondenti segnali di accelerazione misurati dagli accelerometri ottici. Anche in questo caso in corrispondenza del difetto è possibile osservare un incremento del livello del segnale. Tuttavia non è consigliabile discriminare la presenza del difetto mediante l'analisi del superamento di un valore di soglia del segnale di accelerazione, in quanto i massimi ed i minimi del segnale sono talvolta associati a picchi che non corrispondono univocamente alla presenza del difetto.

Al fine di identificare la presenza del difetto per mezzo del segnale di accelerazione, il valore quadratico medio (RMS) di entrambe le accelerazioni è calcolato su una finestra mobile di durata ridotta ($T=0.2$ s), con sovrapposizione del 90%. L'obiettivo di tale tecnica di analisi è di distinguere la potenza associata ai picchi di accelerazione, in modo da distinguere i picchi occasionali da quelli generati da un difetto reale, cui corrisponde un incremento del valore di potenza associata al segnale. La fig. 39 riporta il risultato di tale analisi applicata alle accelerazioni di fig. 38. È possibile osservare che per entrambi gli accelerometri il massimo dell'RMS è associato alla presenza del difetto, con un valore nettamente diverso da quello del background del segnale. La presenza del difetto analizzato è pertanto individuabile dalla analisi dei segnali di accelerazione e viene individuata al superamento di un valore di soglia, preliminarmente definito sulla base di un database di misure provenienti da più treni della flotta in condizioni di catenaria standard e priva di difetti.

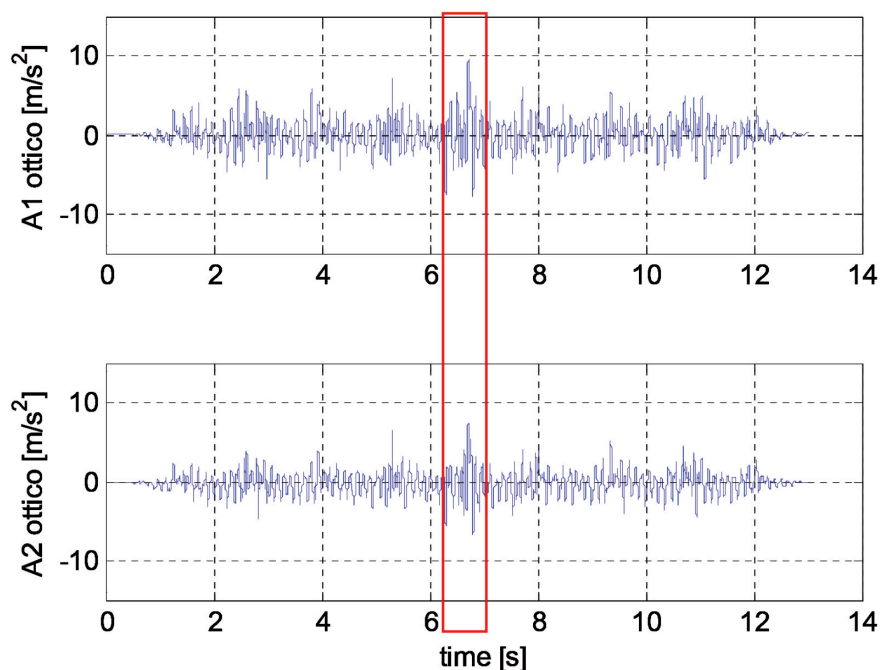


Fig. 38 - Accelerazione rilevata dagli accelerometri ottici nel caso di difetto corrispondente a sospensione con rigidità incrementata.

Fig. 38 - Acceleration detected by optical accelerometers, in the event of defect corresponding to a suspension with increased stiffness.

- 2) High rigidity suspension catenary (3 times compared to the nominal)
- 3) Catenary with vertical positioning error on two consecutive suspensions (+30 mm and -20 mm compared to the nominal dimension).
- 4) Catenary with contact wires tension reduced by 20% (8 kN).

Let us now analyse point 2), "High rigidity suspension catenary".

As the first case, it is considered an isolated defect. Fig. 37 represents the movement of the pantograph head obtained by numerical simulation in which the suspension placed on the fifth pole has a greater rigidity value than the nominal with factor of 3. We can see how at that faulty suspension (instant $t=6.7$ s) the head suffers abnormal downward displacement. The motion obtained by the simulation is used at the test bench as a displacement reference for the actuators, which correspond to force values measured experimentally on each contact strip shown in fig. 37. We can see how maximum and minimum peaks on the contact force can be found at the faulty suspension.

Fig. 38 shows the corresponding acceleration signals measured by the optical accelerometers. In this case also a signal level increase can be observed at the flaw. However it is not advisable to discriminate the presence of the defect by analysing the excess of a threshold value of the acceleration signal, as the maximum and minimum figures of the

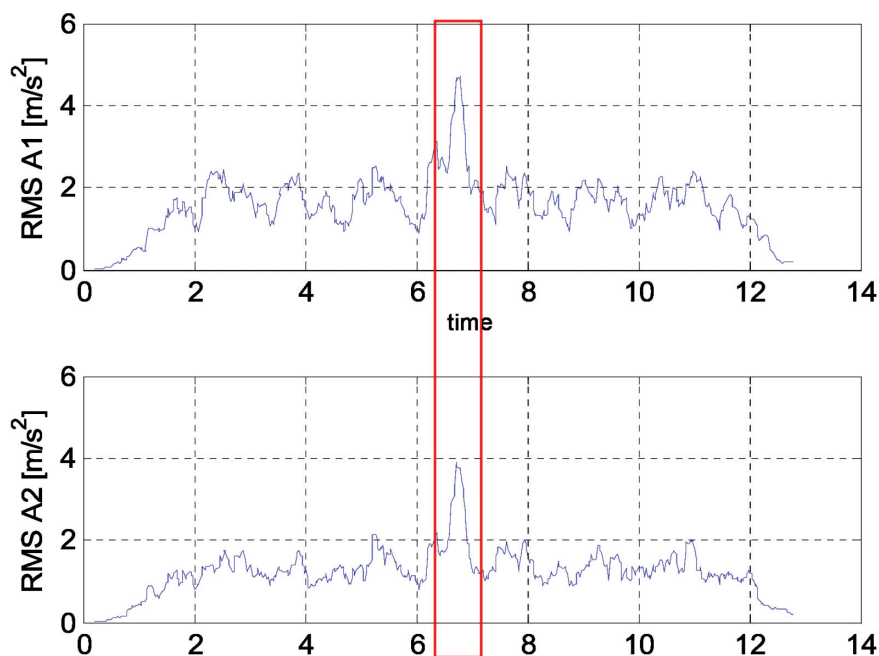


Fig. 39 - Analisi di RMS mobile per l'individuazione di un difetto localizzato.
Fig. 39 - Mobile RMS analysis to find a localised defect.

In conclusione si riporta in fig. 40 l'andamento del moto del quadro misurato per mezzo dell'encoder ottico. In corrispondenza del difetto, per effetto dell'incremento di rigidità della sospensione, il quadro subisce uno spostamento anomalo verso il basso.

Analizziamo il punto 3), "Catenaria con errore di posizionamento verticale su due sospensioni consecutive". Il primo grafico della fig. 41 rappresenta lo spostamento della testa del pantografo ottenuto dalla simulazione numerica in cui due sospensioni consecutive risultano poste ad una quota errata rispetto al valore nominale. In particolare la sospensione del quinto palo è posta ad una altezza di +30 mm rispetto alla quota nominale, mentre la successiva è posta ad una altezza di -20 mm.

Il moto della testa ottenuto dalla simulazione viene usato al banco prova come riferimento di spostamento per gli attuatori, ottenendo i valori sperimentali di forza agente su ciascuno strisciante, riportati in fig. 41. È possibile osservare come gli errori di posizionamento della sospensione non siano individuabili dalla storia temporale della forza di contatto, non essendo presenti picchi di massimo o minimo chiaramente distinguibili.

Per questa tipologia di difetto, l'a-

signal are sometimes associated with peaks that do not correspond uniquely to the presence of the defect.

In order to identify the presence of the defect by means of the acceleration signal, the root mean square value (RMS) of both accelerations is calculated on a floating window of reduced duration ($T=0.2$ s) with 90% overlapping. The objective of this technique is to distinguish the power associated with the acceleration peaks, so as to distinguish the occasional peaks from those generated by a real flaw, which corresponds to an increase of power value associated with the signal. Fig. 39 shows the result of such analysis applied to the accelerations of fig. 38. We can observe that for both accelerometers the maximum RMS is associated with a fault whose value is markedly different from that of the signal background. The presence of the fault being analysed is therefore identifiable from acceleration signal analysis and is identified when a threshold value is exceeded, preliminarily defined based on a database of measurements from multiple trains of the fleet in standard catenary condition and free of defects.

ue is exceeded, preliminarily defined based on a database of measurements from multiple trains of the fleet in standard catenary condition and free of defects.

In conclusion fig. 40 shows the frame motion trend measured by means of an optical encoder. At fault, due to the increase of stiffness of the suspension, the frame undergoes abnormal downward displacement.

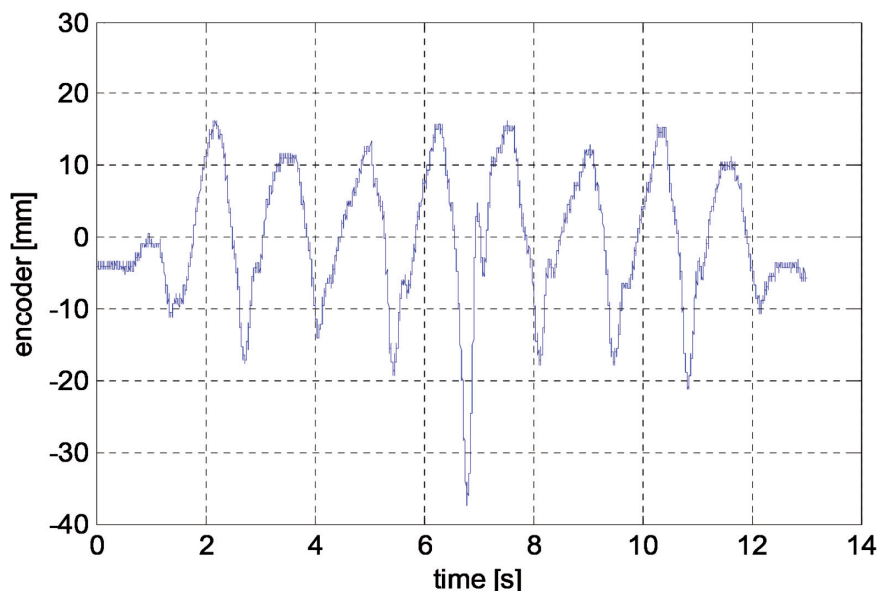


Fig. 40 - Segnale di spostamento del quadro per l'individuazione di un difetto localizzato.

Fig. 40 - Displacement signal of frame for identification of a localised defect.

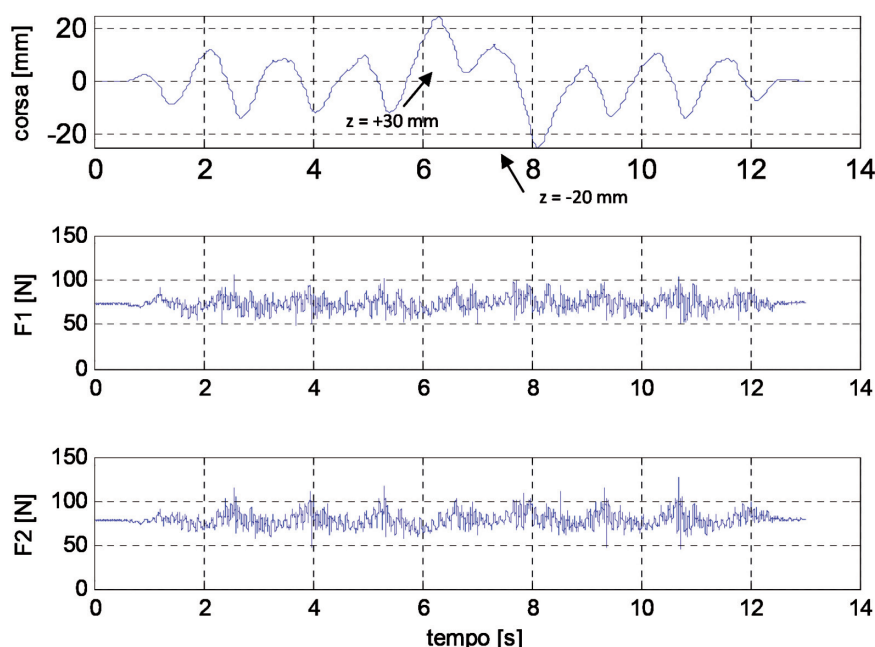


Fig. 41 - Andamento dello spostamento verticale della testa e delle forze di contatto corrispondenti ad un errore di posizionamento di due sospensioni consecutive.

Fig. 41 - Vertical displacement trend of the head and contact forces corresponding to a positioning error of two consecutive suspensions.

analisi delle accelerazioni non evidenzia particolari anomalie, né nel caso della storia temporale delle accelerazioni (fig. 42a), né a seguito della analisi RMS su finestra mobile (fig. 42b). Non sono visibili infatti in corrispondenza dei difetti particolari picchi di RMS che si distinguono nettamente dal valore di fondo. Il motivo di ciò risiede nel fatto che per questa tipologia di difetto i modi di vibrare del pantografo non sono eccitati come avviene nel caso di sospensione con rigidità incrementata, e pertanto l'analisi del contenuto di potenza associato al segnale di accelerazione non è in grado di identificare il difetto.

Il difetto analizzato, associato ad una erronea quota delle sospensioni e quindi di natura puramente geometrica, può essere tuttavia identificato dall'osservazione del moto del quadro del pantografo, che si trova costretto a seguire le variazioni di quota della linea di contatto. Pertanto un difetto di questa natura può essere individuato per mezzo dell'encoder posto alla base del quadro.

La fig. 43 riporta il segnale di spostamento del quadro. È possibile osservare distintamente l'anomalia nel moto dello stesso, tra gli istanti 6s e 9s, generata dagli errori di posizionamento della sospensione.

Analizziamo da ultimo il punto 4), "Catenaria con tiro delle funi di contatto ridotto del 20%". La fig. 44 rappresenta lo spostamento della testa del pantografo ottenuto dalla simulazione numerica in cui il tiro delle funi di contatto risulta ridotto del 20% rispetto al valore nominale (8

Analysing point 3), "Catenary with vertical positioning error on two consecutive suspensions", the first chart in fig. 41 represents the movement of the pantograph head obtained by numerical simulation in which two consecutive suspensions are placed at an incorrect altitude with respect to the nominal value. In particular the suspension of the fifth pole is placed at a height of + 30 mm compared to the nominal dimension, while the next is placed at a height of -20 mm.

The motion of the head obtained by simulation is used on the test bench as displacement reference for the actuators, obtaining the experimental values of force acting on each contact strip, shown in fig. 41. We can observe how positioning errors of the suspension cannot be distinguished from the temporal history of the contact force, there not being clearly distinguishable maximum or minimum peaks.

For this type of defect, the analysis of accelerations does not highlight specific anomalies, neither in the case of temporal history of accelerations (fig. 42a), nor as a result of RMS analysis on floating window (fig. 42b). RMS peaks that stand out sharply from the underlying value are not visible at the particular defects. The reason for this lies in the fact that for this type of defect, the vibration modes of the pantograph are not excited as occurs in the case of suspension with increased stiffness, and therefore the analysis of power content associated with the acceleration signal cannot identify the defect.

The fault analysed, combined with an erroneous height of the suspensions and therefore purely geometric, can however be identified by observing the motion of the pantograph frame, which is forced to follow the height changes of the contact line. Therefore a defect of this nature can be detected by means of the encoder at the base of the frame. Fig. 43 shows the frame displacement signal. The anomaly in the same motion can be observed between moments 6s and 9s, generated by incorrect positioning of the suspension.

Analysing point 4), "Catenary with contact lines tension reduced by 20%", fig. 44 represents the movement of the pantograph head obtained by numerical simulation in which the tension of the contact line is reduced by 20% compared to the nominal value (8 kN instead of 10 kN). This situation can arise in the contact line as a result of a thermal expansion phenomenon and locking of the tension pulleys. Unlike the previously analysed defects that are concentrated in well defined line sections, such defect affects a

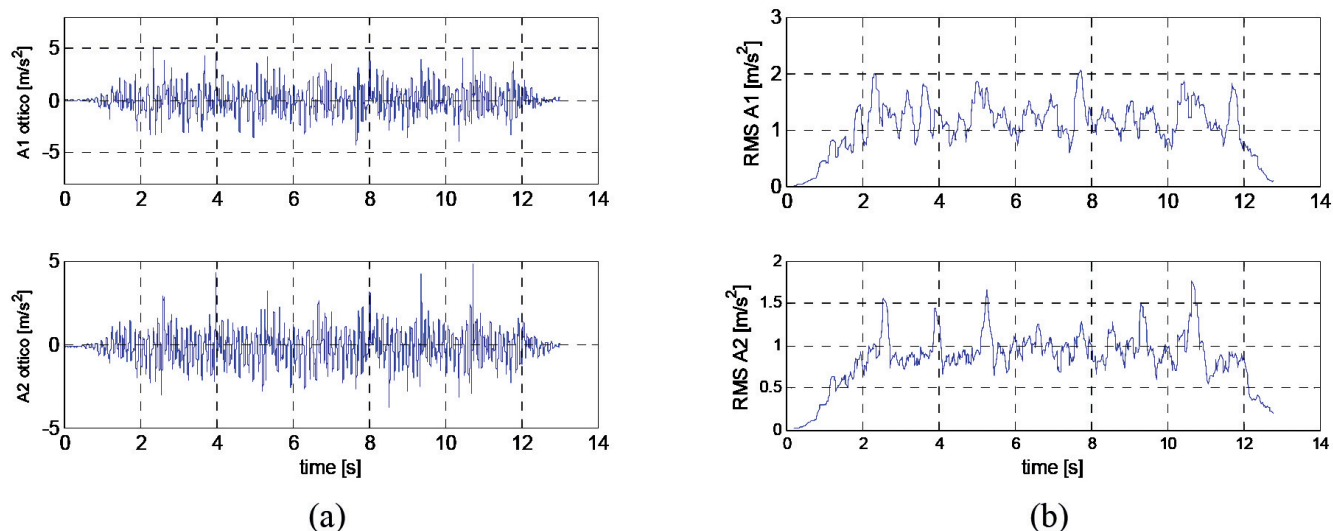


Fig. 42 - Segnali corrispondenti ad un errore di posizionamento di due sospensioni consecutive. (a) Accelerazioni; (b) Analisi RMS su finestra mobile.

Fig. 42 - Signals corresponding to a positioning error of two consecutive suspensions. (a) Accelerations; (b) RMS Analysis on floating window.

kN anziché 10 kN). Tale situazione può insorgere nella linea di contatto a seguito di un fenomeno di dilatazione termica e il bloccaggio delle carrucole di tensionamento. A differenza dei difetti precedentemente analizzati, che sono concentrati in tratti di linea ben definiti, tale difettosità interessa un'ampia porzione di linea di contatto, pari almeno all'intera tratta compresa tra le due carrucole di regolazione interessate.

Il moto della testa ottenuto dalla simulazione viene usato al banco prova come riferimento di spostamento per gli attuatori, ottenendo i valori sperimentali di forza agente su ciascuno strisciante, riportati in fig. 44. Dal confronto con fig. 45, che si riferisce alle condizioni di catenaria standard, si può osservare come la riduzione del tiro nelle funi di contatto porti ad un incremento di variabilità dell'ampiezza di moto degli archetti e della forza di contatto. Obiettivo della strumentazione adottata per la diagnostica è dunque quello di individuare l'insorgere di questo incremento di variabilità.

La fig. 46 riporta i corrispondenti segnali di accelerazione misurati dagli accelerometri ottici. In particolare le accelerazioni di fig. 46a si riferiscono alla catenaria con tiro delle funi di contatto modificato, quelle di fig. 46b alla catenaria standard. Come nel caso della forza di contatto, anche per le accelerazioni è possibile osservare

large portion of the contact line, equal to at least the whole section between the two adjustment pulleys affected.

The motion of the head obtained by simulation is used on the test bench as displacement reference for the actuators, obtaining the experimental values of force acting on each contact strip, shown in fig. 44. By comparing fig. 45, which refers to the standard catenary conditions, we can

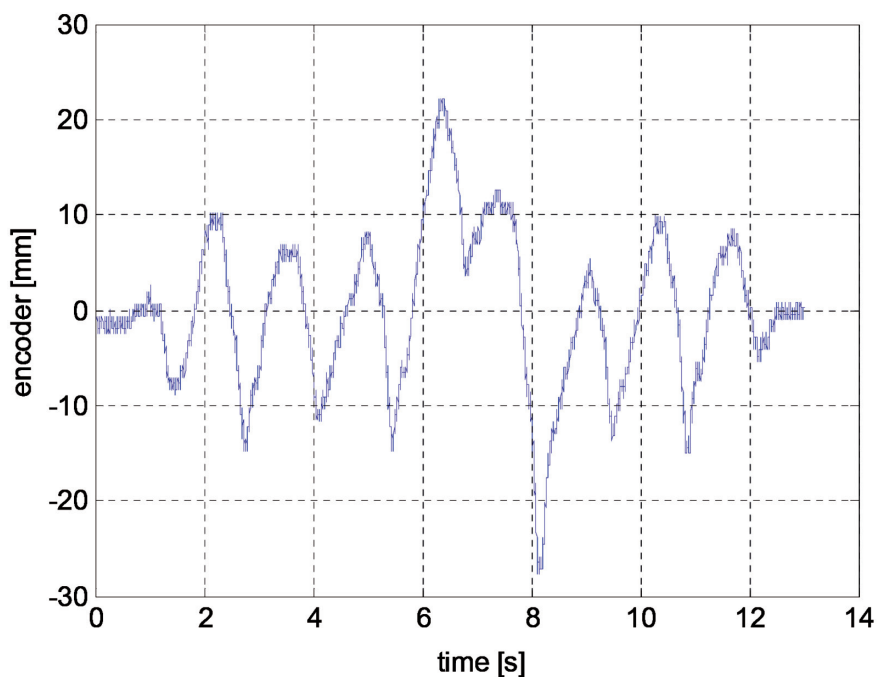


Fig. 43 - Segnale di spostamento del quadro per l'individuazione di un difetto localizzato.

Fig. 43 - Displacement signal of the quadrilateral for identifying a localised defect.

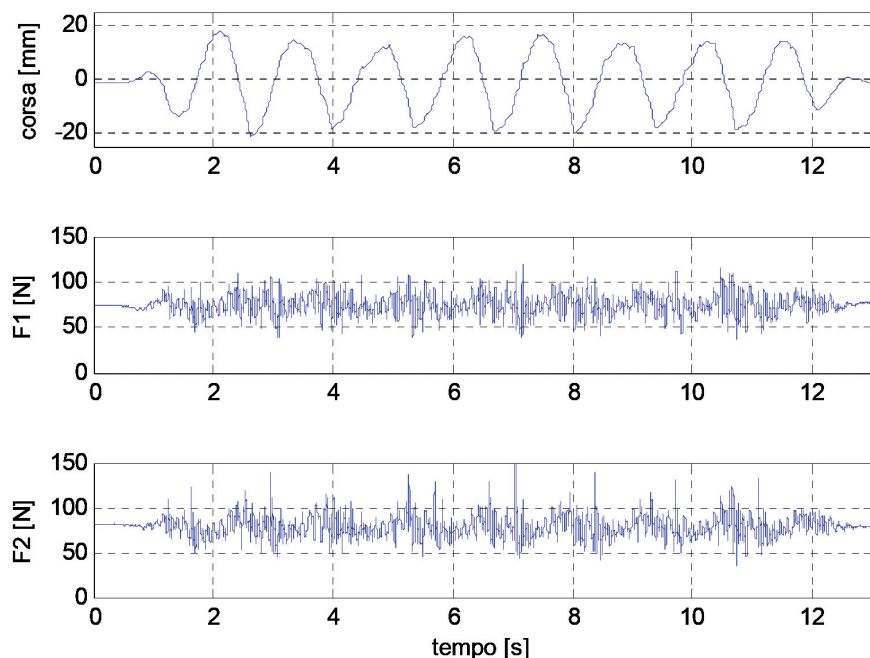


Fig. 44 - Moto dell'archetto e forze di contatto sugli striscianti in condizioni di catenaria con tiro delle funi di contatto ridotto, pari a 8 kN.

Fig. 44 - Motion of the bow and contact forces on the contact strips in catenary conditions with reduced tension contact lines, equal to 8 kN.

un incremento del livello del segnale in corrispondenza della tratta con tiro della fune di contatto modificato.

Tale incremento viene individuato dall'algoritmo in esecuzione sulla scheda della centralina elettronica per effetto della analisi RMS, effettuata questa volta su una finestra temporale di durata maggiore (es: 5 s) commisurata alla tipologia di difettosità, distribuita su un'intera regolazione di linea di contatto (tabella 7).

3.2.3. Verifica della capacità del sistema di individuare difetti del pantografo

In questo paragrafo si descrivono le prove di laboratorio effettuate al fine di valutare la capacità del sistema diagnostico di individuare alcuni difetti che possono insorgere sul pantografo stesso. La diagnostica del pantografo è basata sulla analisi delle medesime accelerazioni utilizzate per l'individuazione dei difetti della linea aerea. La possibilità di discernere tra una difettosità dell'infrastruttura o del pantografo è resa possibile dall'in-

see how reducing the contact lines tension leads to an increase in the variability of the motion amplitude of the bows and of the contact force. The objective of the instruments adopted for diagnostics is to detect emerging of this variability increase.

Fig. 46 shows the corresponding acceleration signals measured by the optical accelerometers. In particular the accelerations of fig. 46a relate to the catenary with contact lines tension modified, those of fig. 46b to the standard catenary. As in the case of the contact force, an increase in the signal level at section with the modified contact lines tension can be observed even for accelerations.

This increase is determined by the algorithm running on the electronic control unit board as a result of RMS analysis, performed this time on a longer time frame (e.g.: 5 s) commensurate with the type of defects, distributed along an entire contact line regulation (table 7).

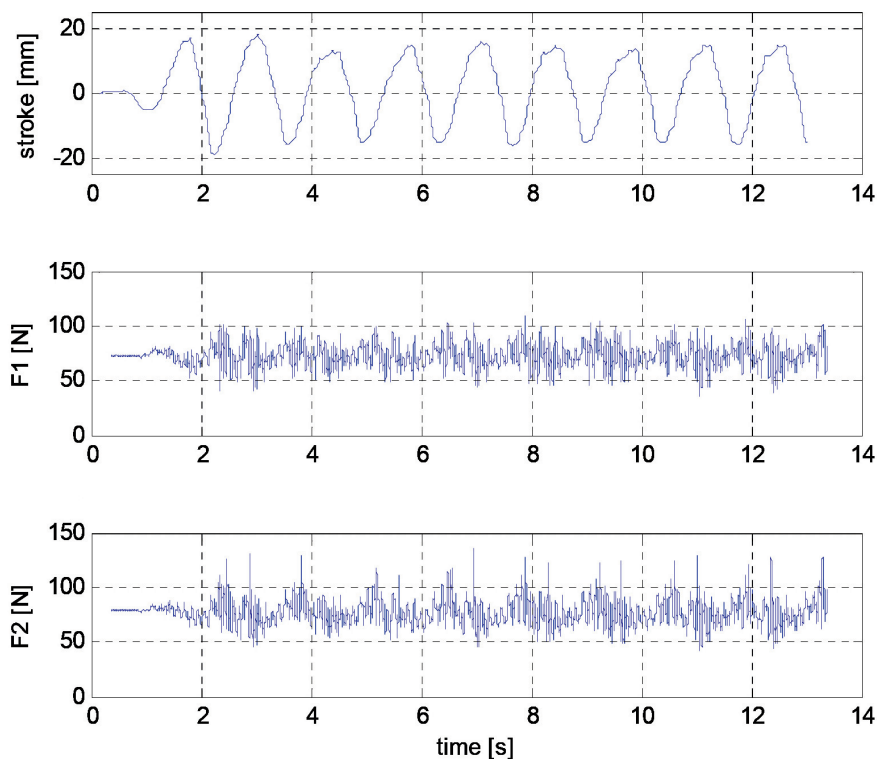


Fig. 45 - Moto dell'archetto e forze di contatto sugli striscianti in condizioni di catenaria standard, tiro delle funi di contatto 10 kN.

Fig. 45 - Motion of the bow and contact forces on the contact strips in standard catenary conditions, 10 kN tension of the contact lines.

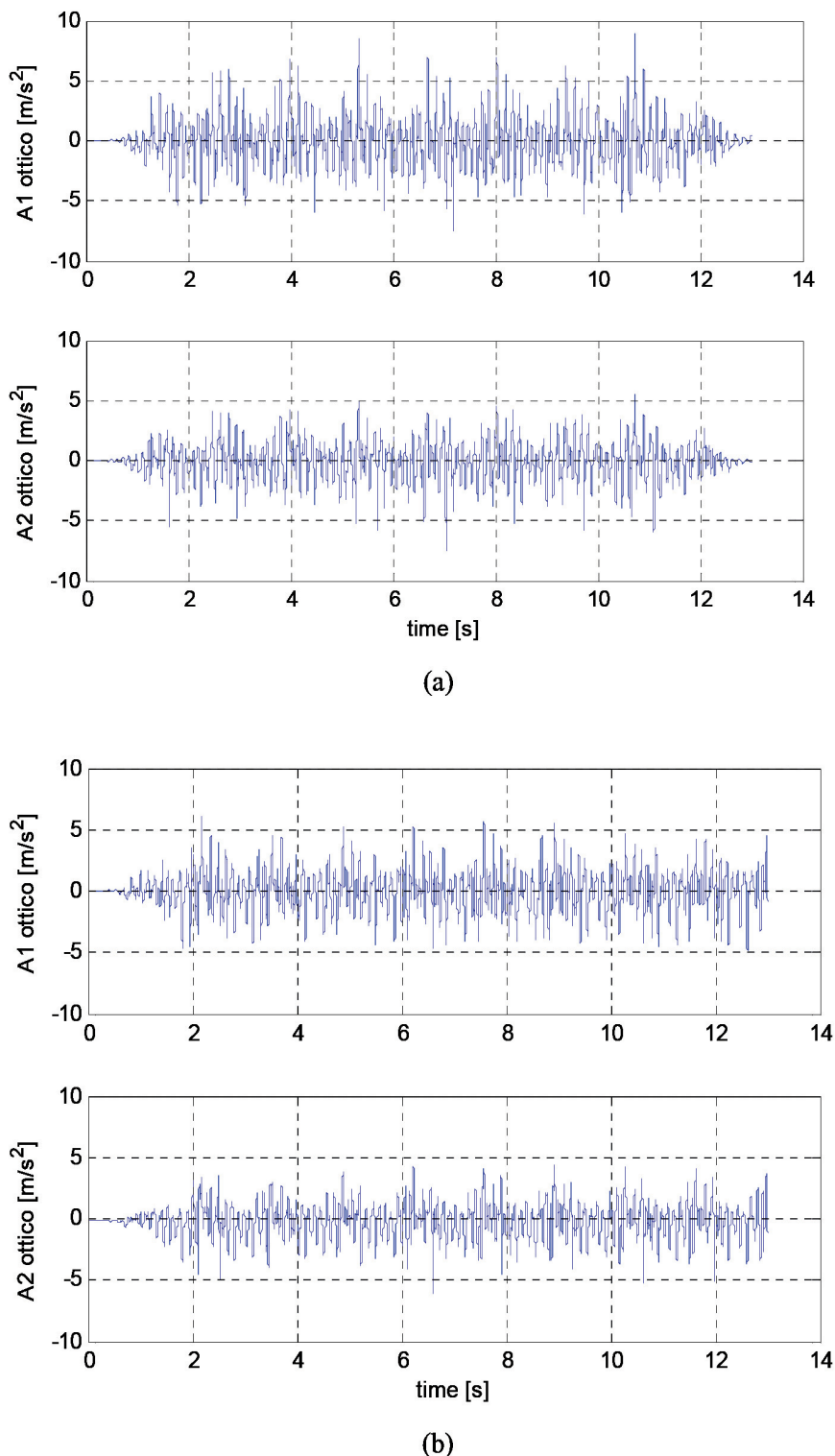


Fig. 46 - Accelerazioni misurate dagli accelerometri ottici del sistema diagnostico. (a) Funi di contatto con tiro ridotto 8 kN; (b) Funi di contatto con tiro standard 10 kN.

Fig. 46 - Accelerations measured by the optical accelerometers of the diagnostic system. (a) reduced 8 kN tension contact lines; (b) Contact wires with standard 10 kN tension.

3.2.3. Verification of the system's ability to detect pantograph defects

This section describes laboratory tests carried out in order to assess the ability of the diagnostic system to identify certain defects that may occur on the pantograph itself. The pantograph diagnostics are based on analysis of the same accelerations used for identifying faults of the overhead power line. The ability to discern between an infrastructure or pantograph defect is possible by installing the diagnostic system on multiple trains in the fleet: infrastructure defects are identified by several trains that operate in the same line block, while exceeding the threshold values on a single train is an indication of defect of the single pantograph.

The tests were conducted on the test bench using, as displacement reference for the actuators, the motion of the bow obtained by simulation with the standard catenary. Three tests were conducted, the first with standard pantograph, the remaining reproducing two types of faults on the pantograph tested at the bench. That is:

- 1) standard pantograph (not further detailed);
- 2) pantograph with partially blocked bow mechanism;
- 3) pantograph with low damping.

Let us first analyse case 2).

In order to reproduce a possible defect of the suspension of the bow, the spring near accelerometer number 1 (fig. 47) was blocked at the preload static position, therefore preventing running during operation of the pantograph.

Such a defect alters the dynamic response of the bow itself, and is therefore verifiable by analysis of the accelerations measured by optical sensors. Table 8 shows the RMS values of the acceleration signals obtained during the lab tests (0-30 Hz frequency). Values corresponding to the defective suspension test are compared with the RMS values obtained in the case of standard pantograph, free of defects. We can see how RMS analysis clearly detects the change in dynamic behavior.

stallazione del sistema diagnostico su più treni della flotta: i difetti infrastrutturali vengono identificati dai diversi treni che operano nel medesimo tratto di linea, mentre il superamento dei valori di soglia su un singolo treno è indice della difettosità del singolo pantografo.

Le prove sono state condotte al banco prova utilizzando, come riferimento di spostamento per gli attuatori, il moto dell'archetto ottenuto dalla simulazione con catenaria standard. Sono state condotte tre prove, la prima con pantografo standard, le rimanenti riproducendo due tipi di difetti sul pantografo testato al banco. Ossia:

- 1) pantografo standard (non ulteriormente dettagliato);
- 2) pantografo con sospensione dell'archetto parzialmente bloccata;
- 3) pantografo con smorzamento ridotto.

Esaminiamo dapprima il caso 2).

Al fine di riprodurre una possibile difettosità della sospensione dell'archetto, la molla in prossimità dell'accelerometro numero 1 (fig. 47) è stata bloccata nella posizione del precarico statico, impedendone pertanto la corsa durante il funzionamento del pantografo.

Tale difetto altera la risposta dinamica dell'archetto stesso, ed è perciò riscontrabile dalla analisi delle accelerazioni misurate dai sensori ottici. La tabella 8 riporta i valori dell'RMS dei segnali di accelerazione ottenuti durante il test di laboratorio (contenuto in frequenza 0-30 Hz). I valori corrispondenti alla prova con sospensione difettosa sono confrontati con i valori di RMS ottenuti nel caso di pantografo standard, privo di difettosità. Si può osservare come l'analisi RMS rilevi distintamente il cambiamento di comportamento dinamico della testa. In particolare l'RMS corrispondente all'accelerometro 1, installato in prossimità della molla bloccata, presenta valori più bassi rispetto al caso standard, a causa del movimento inibito dal bloccaggio della molla. L'RMS corrispondente all'accelerometro 2, posto in prossimità della molla libera, presenta valori di RMS nettamente superiori rispetto al caso di sospensione adiacente bloccata (+64%). Nella configurazione con difettosità si instaura infatti un significativo moto di rotolamento dell'archetto, con conseguente incremento del valore di accelerazione in corrispondenza della molla non bloccata.

L'analisi RMS del segnale di accelerazione per l'identificazione dei difetti del pantografo può essere effettuata, nell'esecuzione dell'algoritmo a bordo treno, con una finestra di durata maggiore rispetto al caso dell'identificazione dei difetti della linea aerea. In questo caso infatti non è necessaria una precisa individuazione della posizione, ed è dunque possibile selezionare la durata di una finestra che, a seconda della velocità di marcia, corrisponda ad intervalli spaziali

TABELLA 7 – TABLE 7

Valori di RMS delle accelerazioni corrispondenti alle catenarie con funi di contatto standard e con funi di contatto con tiro ridotto
RMS values of accelerations corresponding to the catenaries with standard contact lines and with reduced tension contact lines

	Tiro 10kN (nominale) <i>10kN Tension (nominal)</i>	Tiro 8kN (ridotto 20%) <i>8kN Tension (reduced 20%)</i>
Accelerometro 1 <i>Accelerometer 1</i>	1.7 m/s ²	2.1 m/s ²
Accelerometro 2 <i>Accelerometer 2</i>	1.4 m/s ²	1.7 m/s ²

of the head. In particular the RMS corresponding to accelerometer 1, installed near the locked spring, has lower values than the standard case, due to the movement inhibited by the locking of the spring. The RMS corresponding to accelerometer 2, placed near the free spring, has RMS values significantly higher than in the case of adjoining locked suspension (+ 64%). In the configuration with defects in fact a significant rolling motion of the bow is established, resulting in an increase in the value of acceleration at the free spring.

RMS acceleration signal analysis for identifying defects in the pantograph can be carried out, in the execution of the algorithm on board, with a longer time frame than in the case of identification of defects of the airline. In this case, precise location tracking is not required, making it possible to select the length of a window that, depending on the driving speed, corresponds to spatial intervals of approximately 1 km, (e.g. 22.5 s at the speed of 160 km/h). The spatial window ranges are defined by the diagnostic control units based on the odometer signal.

For a more accurate diagnosis of faults of the pantograph the frequency band in which there is the RMS anomaly of accelerations can be located in order to identify the cause of the anomaly. In particular, an increase that is associated with the span passage frequency band

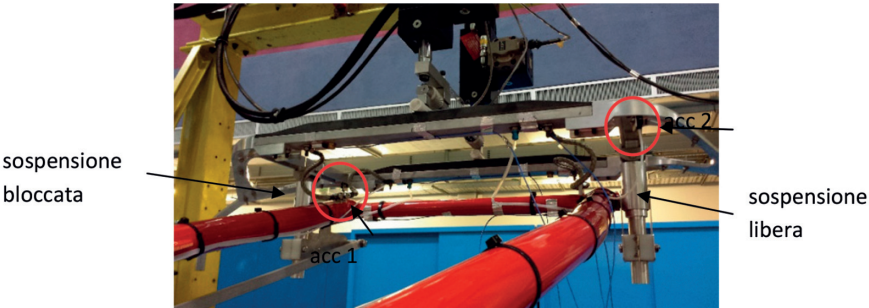


Fig. 47 - Prova con una delle due molle parzialmente bloccata.
Fig. 47- Test with one of the two partially blocked springs.

di circa 1 km, (es. 22.5 s alla velocità di 160 km/h). Gli intervalli spaziali di finestratura vengono definiti dalla centralina diagnostica sulla base del segnale odometrico.

Per una più accurata diagnostica dei difetti del pantografo è possibile individuare la banda di frequenza in cui si riscontra l'anomalia dell'RMS delle accelerazioni, al fine di poter identificare la causa della anomalia. In particolare, un incremento associato alla banda della frequenza di passaggio di campata (es: 0-2 Hz) è imputabile ad un difetto dei componenti che caratterizzano il moto del pantografo a tali frequenze, come lo smorzatore e la molla ad aria posti alla base del quadro. Un incremento del valore di RMS nel range di frequenze in cui la risposta dinamica del pantografo è dovuta prevalentemente alla sospensione dell'archetto (es: 4-13 Hz), può invece essere imputato alla sospensione stessa.

La tabella 9 indica i risultati dell'RMS ottenuto per diverse bande di frequenza sopra menzionate. I risultati relativi alla sospensione difettosa sono confrontati con quelli relativi al pantografo standard, privo di difettosità. Si può osservare come i valori di RMS relativi alla banda di frequenze 0-2 Hz risultino invariati nel caso di sospensione difettosa rispetto al caso di pantografo standard. Al contrario, per effetto della difettosità introdotta nella sospensione dell'archetto, i valori di RMS relativi al range 3.5-13 Hz mostrano elevate variazioni di entrambi gli accelerometri (RMS inferiore rispetto al caso standard per l'accelerometro in prossimità della molla bloccata, superiore per l'altro). L'analisi per banda permette dunque sia di riconoscere che la difettosità è imputabile alla sospensione della testa, sia di individuare quale delle due molle è bloccata.

4. Conclusioni

L'intento del presente articolo è stato quello di evidenziare i punti di forza del nuovo pantografo JRC15, le sue potenziali applicazioni e i possibili futuri sviluppi.

Il pantografo JRC15 rappresenta senza dubbio un elemento di assoluta innovazione rispetto agli attuali sistemi per diverse ragioni: è innanzitutto perfettamente conforme ai più recenti standard europei e internazionali del settore, nonché alle specifiche tecniche di interopera-

TABELLA 8 – TABLE 8

RMS ottenuto sperimentalmente bloccando una delle due molle della sospensione della testa. Confronto con il caso di riferimento corrispondente al pantografo privo di difettosità
RMS obtained experimentally by blocking one of the two springs of the suspension of the head. Comparison with the reference case corresponding to the pantograph devoid of defects

	Pantografo standard Standard pantograph	Sospensione bloccata Blocked suspension	Δ %
RMS 1	1.770	1.485	-16 %
RMS 2	1.442	2.349	+91%

(e.g. 0-2 Hz) is caused by a defect of the components that characterise the movement of the pantograph at these frequencies, such as the damper and the air spring at the base of the frame. An increase of the RMS value in the frequency range in which the dynamic response of the pantograph is due mainly to the suspension of the bow (e.g. 4-13 Hz), can be ascribed instead to the same suspension.

Table 9 indicates the RMS results obtained for the different above-mentioned frequency bands. Faulty suspension results are compared to those related to the standard pantograph, free of defects. We can see how RMS values relating to the 0-2 Hz frequency band are unchanged in case of faulty suspension compared to the standard pantograph case. On the contrary, as a result of defects introduced in the suspension of the bow, the RMS values relating to the 3.5-13 Hz range show high variations of both accelerometers (RMS lower than the standard case for the accelerometer in the vicinity of the blocked spring, higher than for the other). The analysis per band thus allows both to recognise that the defect is attributable to the suspension of the head, and to identify which of the two springs is blocked.

TABELLA 9 – TABLE 9

Risultati dell'analisi RMS per diverse bande di frequenza nel caso di difettosità sulla sospensione dell'archetto
RMS test findings for different frequency bands in the case of defects on the suspension of the bow

	Pantografo standard <i>Standard pantograph</i>		Sospensione bloccata <i>Blocked suspension</i>		Δ %
Banda 0-2 Hz <i>0-2 Hz band</i>	RMS 1	0.337	RMS 1	0.335	-1%
	RMS 2	0.284	RMS 2	0.287	+1%
Banda 3.5-13 Hz <i>3.5-13 Hz band</i>	RMS 1	1.266	RMS 1	0.718	-43%
	RMS 2	1.019	RMS 2	1.981	+94%

4. Conclusions

The aim of this article was to highlight the strengths of the new JRC15 pantograph, its potential applications and possible future developments.

The JRC15 pantograph is certainly an absolute innovation element with respect to the current systems for several reasons: first, it is fully compliant with the latest European and international standards in the industry, as well as the technical specifications of inter-

bilità. È inoltre integrabile con le più evolute elettroniche di bordo attraverso sistemi di comunicazione via bus.

Il vero punto di forza del nuovo pantografo JRC15 è la sua diagnostica che, oltre ad essere in linea con le più moderne tecnologie per l'individuazione e la comunicazione dello stato del sistema e dei possibili difetti a bordo rotabile, permette anche attraverso una comunicazione remota bordo/terra di ottenere la preparazione delle operazioni di manutenzione da effettuare prima che il rotabile rientri in deposito a fine servizio.

Inoltre, installando il kit opzionale della sensoristica su un congruo numero di rotabili della flotta, si potrà ottenere l'individuazione dei possibili difetti sulla linea di contatto attraverso delle regole prestabilite.

operability. It is also integrated with the most advanced on-board electronic equipment through communication systems via bus.

The real strength of the new JRC15 pantograph is its diagnostics, which is in line with the latest technology for detecting and reporting system status and faults on board rolling stock, it also allows through a remote on board/ground communication to prepare maintenance operations to be carried out before the rolling stock returns to the depot at the end of service.

Also, by installing the optional sensors kit on an appropriate number of fleet vehicles, the identification of possible defects on the contact line can be obtained through established rules.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] CEI EN 50206-1: "Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie, metropolitane - Materiale Rotabile - Pantografi: Caratteristiche e prove", Parte 1: Pantografi per ferrovie.
- [2] CEI EN 61373: "Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane – Materiale rotabile – Prove d'urto e di vibrazioni".
- [3] CEI EN 50317: "Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane. Sistemi di captazione della corrente. Requisiti e convalida delle misure \ dell'interazione dinamica tra pantografi e linea di contatto".
- [4] TSI LOC & PAS_ OJ-JOL_2014_356_R_0004: "Technical specification for interoperability relating to the 'rolling stock - locomotives and passenger rolling stock' subsystem of the rail system in the European Union".
- [5] RFI-DTC/DNS/EE.ST TE 74D: "Prove da eseguire per la caratterizzazione di un pantografo a 3 kV c.c.", Febbraio 2008.
- [6] G. DEL GOBBO, M. GIOVANNUZZI, M. ROMAIRONE, F. ROMANO, M. ROMEO, S. RIZZO, P. MASINI, "Il sistema di Telediagnostica per le flotte E464 E405 di Trenitalia", Rivista Ingegneria Ferroviaria, febbraio 2012.