



Studio del *dynamic buckling* nei pendini conduttori di una catenaria AV al passaggio del pantografo

Study of dynamic buckling in droppers of high-speed railway line catenary during pantograph passage

Giuseppe BUCCA^()
Andrea COLLINA^(**)
Giorgio DIANA^(**)
Emanuele ZAPPA^(**)
Mario DI FLAUB^(***)
Alessio IACOMELLI^(***)
Claudio SPALVIERI^(***)*

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.12.2022.ART.1.>)

Sommario - Le azioni dinamiche a cui è soggetto il pendino conduttore di una catenaria al passaggio del pantografo possono diventare molto rilevanti per alte velocità del veicolo ferroviario. In alcuni casi molto rari e isolati si è osservata la rottura prematura del pendino conduttore posizionato in prossimità della sospensione e/o delle regolazioni automatiche in catenarie per esercizio AV. Al fine di comprendere il fenomeno è stata eseguita un'indagine sviluppata in più attività, tra cui analisi numeriche e attività sperimentali in linea ed in laboratorio. Un'ultima fase dell'indagine è stata dedicata allo sviluppo di un prototipo di pendino conduttore appositamente progettato sulla base dei risultati ottenuti da tale studio con lo scopo di migliorare il comportamento a fatica del pendino. Il nuovo pendino conduttore potrebbe essere utilizzato in punti critici della linea aerea, come ad esempio in prossimità della sospensione e/o delle regolazioni automatiche.

1. Introduzione

L'incremento di tiro della fune portante e del filo di contatto, a seguito di studi come quello riportato in [1], ha consentito l'aumento della velocità di esercizio fino a 300 km/h nei maggiori sistemi AV (Alta Velocità) in Europa ed in Asia. L'aumento della velocità di esercizio ha come conseguenza l'incremento sempre più rilevante dell'effetto delle azioni dinamiche scambiate tra pantografo e

Summary - The dynamical actions to which the catenary dropper is subjected during the pantograph passage can become very relevant for high speeds of railway vehicle. In some very rare and isolated cases, premature failure of the dropper positioned near the suspension and/or near the auto tensioning devices in catenaries for High Speed (HS) operation has been observed. In order to understand the phenomenon, an analysis developed in several activities was carried out, including numerical analyses and in line and in laboratory experimental activities. A final phase of the investigation was dedicated to the development of a prototype of a dropper specifically designed on the basis of the results obtained from this study with the aim of improving the dropper fatigue behaviour. The new dropper could be used in critical points of the overhead line, such as near the suspension and/or near the auto tensioning devices.

1. Introduction

The increase of tensile load for the contact wire and for the messenger wire, following studies such as the one reported in [1], has allowed the increase in operating speed up to 300 km/h in the major HS (High Speed) systems in Europe and Asia. As a consequence, the increase in the operating speed causes a significant increase of the dynamical actions on the pantograph and the catenary due to their interaction [2][3]. Under these conditions, elements that nor-

^(*) Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Via La Masa 1, 20156 - Milano, Italia - Autore corrispondente. Indirizzo E-mail: giuseppe.bucca@polimi.it - Tel.: +39 02 2399 8496 - Fax: +39 02 2399 8492.

^(**) Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Via La Masa 1, 20156 - Milano, Italia.

^(***) Rete Ferroviaria Italiana S.p.A., Piazza della Croce Rossa, 1, 00161 - Roma, Italia.

^(*) Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Via La Masa 1, 20156 - Milan, Italy - Correspondent Author. E-mail: giuseppe.bucca@polimi.it - Tel.: +39 02 2399 8496 - Fax: +39 02 2399 8492.

^(**) Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Via La Masa 1, 20156 - Milan, Italy.

^(***) Rete Ferroviaria Italiana S.p.A., Piazza della Croce Rossa, 1, 00161 - Rome, Italy.

catenaria [2][3]. In tali condizioni, elementi che normalmente hanno una funzione prevalentemente statica si comportano essi stessi come sistemi dinamici. Tale è il caso dei pendini, la cui funzione principale è quella di sorreggere il filo di contatto riportandone il peso sulla corda portante e, nel caso dei pendini conduttori, è anche quella di assicurare un'omogenea distribuzione del flusso di corrente nel filo di contatto. Dal punto di vista meccanico, quindi, il pendino può essere considerato un elemento elastico non lineare nella fase di compressione. All'aumentare della velocità, il pendino stesso si comporta come un sistema con una propria dinamica, ossia con un comportamento transitorio dipendente anche dalla velocità di applicazione del carico, che dipende dalla velocità di transito del treno. Diverse osservazioni (vedi ad es. [4]) riportano che il transitorio di compressione di un pendino durante il transito del pantografo è caratterizzato da forme dinamiche con uno o più ventri (vedi Fig. 1): tale comportamento è interpretabile come *dynamic buckling*, ossia come la risposta del pendino ad un carico di compressione dinamico che causa una instabilità strutturale che ha come effetto finale la flessione del pendino stesso. Nel presente lavoro l'oggetto di studio è il pendino conduttore e il movimento dinamico a cui questo elemento della linea aerea è soggetto durante l'interazione dinamica con il pantografo.

Lo studio riportato in tale articolo nasce dalla rilevazione di alcuni rari fenomeni di deterioramento che in pochissimi casi ha portato alla rottura dei pendini conduttori della catenaria C270 di una linea AV/AC in prossimità della connessione con gli attacchi che ne permettono il collegamento con il filo di contatto e con la corda portante. La rottura ha interessato quasi esclusivamente pochi pendini conduttori posti in prossimità della sospensione e nelle vicinanze dei punti di regolazione della linea aerea.

usually have a predominantly static function behave themselves as dynamical systems. This is the case of the droppers, whose main function is to support the contact wire by transferring its weight to the messenger wire. Moreover, in the case of the conducting droppers, they also ensure a homogeneous distribution of the current flow in the contact wire. From a mechanical point of view, the dropper can be considered a non-linear elastic element in the compression phase. As the speed increases, the dropper itself behaves like a system with its own dynamics, i.e. with a transient behaviour which also depends on the speed of load application, which obviously depends on the train speed. Several observations (see for example [4]) report that the transient of dropper compression phase during the pantograph passage is characterized by dynamic shapes with one or more antinodes (see Fig. 1): this behaviour can be interpreted as dynamic buckling, i.e. as the response of the dropper to a dynamical compressive load which causes a structural instability which has the final effect of the dropper bending. In the present work the object of study is the dropper and the dynamical motion to which this element of the overhead line is subject during the dynamic interaction with the pantograph.

The reason why the study reported in this article was developed is the detection of some rare deterioration phenomena that in very few cases led to the failure of the dropper of the C270 catenary of a HS/HC railway line. The observed failure occurs in the dropper wire close to the clamps for the connection with the contact wire and with the messenger wire. This failure almost exclusively involved a few droppers located near the suspension and near the overhead line auto tensioning devices. Starting from this detection, the opportunity was taken to better understand the dynamic behaviour of droppers, focusing in particular to the droppers near the suspension, in order to also have information to de-

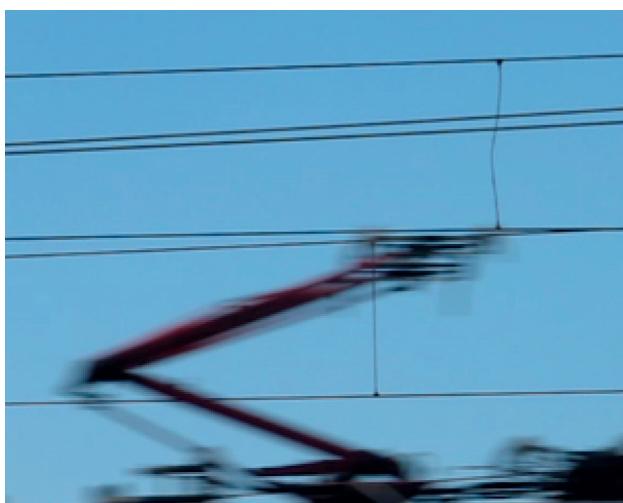
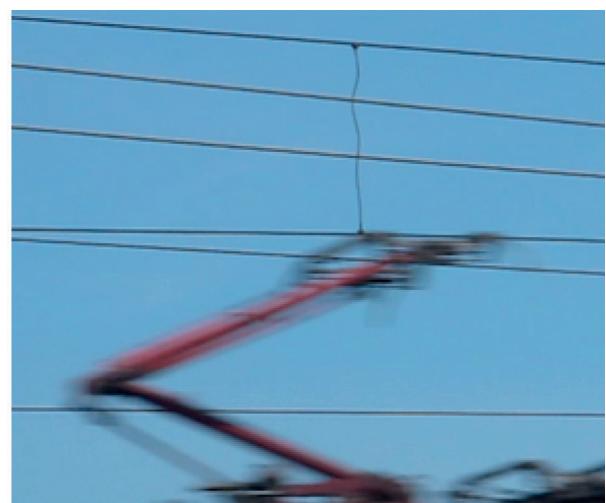


Figura 1 – Fotogrammi del passaggio di un pantografo sotto un pendino di una linea AV. Si evidenziano due diverse forme di *dynamic buckling* [4].

Figure 1 – Frames of pantograph passage under a dropper of a High Speed railway line. Two different shapes of dynamic buckling are highlighted [4].



A partire da tale rilevazione, si è colta l'opportunità di meglio comprendere il comportamento dinamico dei pendini, ed in particolare di quelli a cavallo della sospensione, al fine di avere anche gli elementi per sviluppare una modellazione più sofisticata adatta alla simulazione dell'interazione pantografo-catenaria alle velocità più elevate.

Una prima analisi bibliografica ha evidenziato come lo studio della dinamica del pendino abbia generalmente lo scopo di ottenere un modello matematico che sia in grado di considerare il contributo di questo elemento nella dinamica complessiva della linea aerea ferroviaria durante l'interazione con il pantografo. In letteratura è possibile trovare diversi modelli numerici per la linea aerea, ben riassunti in [5], che includono una modellistica dei pendini. In generale il pendino è rappresentato come un elemento elastico lineare nella sola fase di trazione e con rigidezza nulla nella fase di compressione, oppure è rappresentato da una curva non lineare, costituita da due tratti, uno per la trazione e uno per la compressione, raccordati da una zona di transizione.

Più recentemente sono stati pubblicati dei lavori che riguardano i problemi di fatica che interessano il pendino a causa dei cicli di lavoro a cui esso è soggetto ad ogni passaggio di pantografo [6][7][8][9]: tipicamente tali lavori scaturiscono dall'osservazione di rotture o deterioramento dei pendini in esercizio. La metodologia di lavoro tipicamente utilizzata nei vari lavori si basa su misure od osservazioni della dinamica del pendino in esercizio passando poi a cercare di riprodurre il fenomeno in laboratorio per studiare i fenomeni che caratterizzano la fatica del pendino e creare dei modelli numerici basati generalmente sul metodo degli elementi finiti che permettano di determinare lo stato di sollecitazione a partire dalle azioni misurate in laboratorio. Tali studi mettono in evidenza che l'operazione di "crimpatura" tra il cavo a trefolo del pendino e gli attacchi è molto delicata in quanto, se non eseguita correttamente, può produrre un danneggiamento iniziale dei trefoli del cavo del pendino che può portare in esercizio ad una rottura prematura. Inoltre, si evidenzia che i problemi di fatica sono dovuti principalmente alle azioni generate dalla flessione del pendino e al *fretting*. In alcuni casi, gioca un ruolo molto importante anche la corrosione legata alle condizioni ambientali: in tal caso il fenomeno che domina la fatica è il *fretting corrosion*.

Mentre i fenomeni che caratterizzano la fatica del pendino descritti in tali lavori possono ritenersi generali, non sempre i risultati ottenuti possono essere generalizzati e sono fortemente dipendenti dalle particolari caratteristiche costruttive del pendino e, più in generale, della linea aerea. Poiché generalmente i casi di rottura dei pendini non sono frequenti, le indagini eseguite non permettono una chiara definizione dell'influenza di un particolare parametro costruttivo o di montaggio del pendino sui fenomeni di fatica.

Nel presente lavoro si descrive la metodologia sviluppata, nel solco di quanto proposto in letteratura, per studiare in dettaglio i fenomeni dinamici associati alla fase di

velop a more sophisticated modelling suitable for the simulation of the pantograph-catenary interaction at the highest speeds.

An initial bibliographic analysis has highlighted how the study of the dropper dynamics generally has the aim of obtaining a mathematical model that is able to consider the contribution of this element in the overall dynamics of the overhead railway line during interaction with the pantograph. In literature it is possible to find several numerical models for the overhead line, well summarized in [5], which include a modelling of dropper. In general, the dropper is represented as a linear elastic element only in the traction phase and with zero stiffness in the compression phase, or it is represented by a non-linear curve, made up of two sections, one for traction and one for compression, connected with a transition zone.

More recently, some works have been published concerning the fatigue problems affecting the dropper due to the work cycles to which it is subjected at each pantograph passage [6][7][8][9]: typically, these works arise from the observation of failure or deterioration of droppers in the operation. The working methodology typically used in the various works is based on measurements or observations of dropper dynamics in the operation, then trying to reproduce the dropper dynamics in the laboratory to study the phenomena that characterize the fatigue effects on the dropper. Moreover, numerical models based on the method of finite elements are generally built to determine the state of stress starting from the actions measured in laboratory. These studies show that the crimping operation between the stranded dropper wire and the clamps is very delicate since, if not correctly performed, it can produce initial damage to the wire strands which can lead to premature failure. Furthermore, it should be noted that the fatigue problems are mainly due to the actions generated by the dropper bending and to the fretting. In some cases, corrosion together to environmental conditions also plays a very important role: in this case, the main phenomenon that influences the dropper life is fretting corrosion.

While the phenomena characterizing the fatigue effect on the dropper described in these works can be considered general, the obtained results cannot always be generalized and are strongly dependent on the particular dropper technical characteristics and, more generally, of the overhead line. Since generally the cases of dropper failure are not frequent, the related performed investigations do not allow a clear definition of the influence of a particular technical characteristic or installing parameter of the dropper on the fatigue phenomena.

This work describes the developed methodology, in the wake of what is proposed in the literature, to study in detail the dynamical phenomena associated with the dropper compression phase. It is composed of several phases:

- i. *a first phase to prepare the in line measurements, based on the numerical simulation of the pantograph-catenary dynamical interaction. The purpose of numerical simu-*

compressione di un pendino conduttore e composta da più fasi:

- i. una prima fase preparatoria della sperimentazione, basata sulla simulazione dell'interazione dinamica pantografo-catenaria, il cui scopo è valutare il campo di frequenze e di ampiezze attese per spostamenti ed accelerazioni in corrispondenza dei pendini;
- ii. una fase sperimentale in linea volta ad analizzare le condizioni di lavoro del pendino conduttore durante il normale esercizio;
- iii. una fase di sperimentazione in laboratorio su un banco prova appositamente sviluppato, che trae le condizioni di prova dai risultati della sperimentazione in linea;
- iv. una fase di analisi dei risultati sperimentali e di interpretazione del fenomeno con l'ausilio del software PCaDA, descritto nel paragrafo successivo, per lo studio dell'interazione dinamica tra pantografo e catenaria;
- v. sviluppo di un prototipo di pendino conduttore snodato.

Quest'ultima fase riguarda lo sviluppo di una forma alternativa del pendino conduttore, finalizzato all'utilizzo in posizioni lungo la linea aerea che possono risultare più critiche per il pendino conduttore, come ad esempio nelle posizioni a cavallo della sospensione. Di questo pendino è stato realizzato un prototipo che è stato provato sperimentalmente al banco in laboratorio dimostrando di possedere una migliore prestazione a fatica rispetto al pendino conduttore classico.

Nei paragrafi che seguono, si descriveranno le varie fasi dello studio eseguito.

2. Analisi teorica propedeutica alle prove in linea

La scelta del sistema di misura da utilizzare per la sperimentazione in linea è molto importante e deve tener conto delle peculiarità del sistema oggetto di analisi. Una prima condizione da tener presente nella scelta del sistema di misura è che le misure riguardano elementi della linea aerea ferroviaria che lavora ad una elevata tensione elevata (25 kV nel caso della linea AV/AC), e quindi i sensori si troveranno a lavorare sotto tensione. Una seconda condizione è limitare i disturbi al normale esercizio ferroviario e ridurre il più possibile l'influenza del sistema di misura sulle condizioni reali di funzionamento del sistema oggetto di misura: i sensori da utilizzare devono quindi essere poco invasivi sotto l'aspetto delle dimensioni e della massa. Nella scelta dei sensori, è opportuno avere un riscontro relativamente ai valori di spostamento e di accelerazione attesi per il filo di contatto e la fune portante in corrispondenza dei pendini conduttori al passaggio del pantografo. Ciò allo scopo di utilizzare sensori di capacità adeguata, senza però eccedere per non avere problemi di risoluzione. Per quest'ultimo punto si è ritenuto necessario utilizzare un software di simulazione dell'interazione

lations is to evaluate the range of frequencies and amplitudes expected for displacements and accelerations of dropper clamps connected to contact wire and messenger wire;

- ii. an in line experimental phase aimed at analysing the working conditions of dropper during normal operation;*
- iii. a laboratory experimental phase on a specially developed test bench, which derives the test conditions from the results of the in line measurements;*
- iv. a phase of analysis of the experimental results and interpretation of the phenomenon with the aid of the PCaDA software, described in the following section, for the study of the dynamic interaction between pantograph and catenary;*
- v. development of a prototype of an articulated dropper.*

This last phase concerns the development of an alternative technical solution of dropper, aimed at its use in positions along the overhead line which may be more critical for the dropper, such as in positions near the suspension. A dropper prototype was made and it was experimentally tested in laboratory on the test bench, proving that it had better fatigue performance than the classic dropper.

In the following sections, the various phases of the performed study will be described.

2. Theoretical analysis to prepare the in line measurements

The selection of the measurement system to be used for the in line test is very important and has to take into account the peculiarities of the system being analysed. A first condition to keep in mind when selecting the measurement system is that the measurements concern elements of the overhead railway line which work at a high voltage (25 kV in the case of the HS/HC railway line), and therefore the sensors will have to work under voltage. A second condition is to limit disturbances to normal railway operation and reduce as much as possible the influence of the measurement system on the actual operating conditions of the system being measured: the sensors to be used have to be minimally invasive in terms of size and of mass. When selecting the sensors, it is suitable to have feedback regarding the expected displacement and acceleration values for the contact wire and the messenger wire in correspondence with the dropper clamps as the pantograph passes. This in order to use sensors of adequate capacity, but without exceeding in order to avoid having resolution problems. For this last point, it was considered necessary to use a simulation software of the dynamical interaction between pantograph and catenary to obtain reference values that would allow to correctly select the sensor characteristics.

The software used in this work, called PCaDA (acronym for Pantograph Catenary Dynamic Analysis), was developed by researchers of the Department of Mechanical Engineering and is under continuous development to introduce new fea-

dinamica tra pantografo e catenaria per ottenere dei valori di riferimento che permettessero di scegliere in modo corretto le caratteristiche dei sensori.

Il software utilizzato in questo lavoro, denominato PCaDA (acronimo di *Pantograph Catenary Dynamic Analysis*), è stato sviluppato dai ricercatori del Dipartimento di Meccanica ed è in continuo sviluppo per introdurre nuove funzionalità. Il software di simulazione è in grado di riprodurre i fenomeni che intervengono durante l'interazione tra pantografo e catenaria [10][11] ed è stato validato con risultati sperimentali ottenuti durante prove in linea.

La linea aerea è modellizzata attraverso elementi trave tesati, mentre i pendini sono rappresentati come elementi non lineari. Per quest'ultimi, si considera nel modello la curva caratteristica non lineare forza-spostamento ricavata sperimentalmente in condizioni quasi statiche.

Il pantografo è schematizzato considerando la massa concentrata del quadro, mentre gli archetti possono essere modellizzati o come corpi rigidi oppure, nel caso interessi l'analisi a più alte frequenze, possono essere modellizzati considerando i loro modi rigidi e deformabili usando l'approccio modale. Nella presente analisi, gli archetti sono stati schematizzati come corpi rigidi, in quanto per studiare il movimento dei pendini non è necessario introdurre e considerare i contributi ad alta frequenza della forza di contatto. Il modello del contatto è basato sul *penalty method* [12], tarato in modo da rappresentare correttamente il contatto mono-latero, e quindi la condizione di distacco con forza di contatto nulla, tra strisciante e filo di contatto.

In tale lavoro, come già anticipato, il software PCaDA è stato inizialmente utilizzato per scegliere in modo corretto i sensori da utilizzare per le prove in linea: era, infatti necessario avere un'indicazione quantitativa del campo di variazione sia dello spostamento a cavallo dei pendini, sia dell'accelerazione in corrispondenza degli attacchi inferiore e superiore del pendino, rispettivamente con il filo di contatto e con la fune portante.

A tal fine, si è considerato il modello della catenaria C270 standard, ovvero la catenaria utilizzata lungo la linea AV/AC Italiana, con filo di contatto da 150mm^2 e tiro pari a 20kN e con fune portante da 120 mm^2 e tiro pari a 16.25 kN . La lunghezza di campata considerata è pari a 57 m . In Fig. 2 si riporta lo schema del modello della catenaria utilizzato, in cui, come si può notare, per un'analisi più completa si è considerato anche la mensola ed il tirante di poligonazione della sospensione.

Il pantografo considerato durante le simulazioni è l'ATR95 25kV, ovvero il pantografo utilizzato dal treno alta

tires. The software can reproduce the phenomena that occur during the interaction between the pantograph and the catenary [10][11] and has been validated with experimental results obtained during in line tests.

The overhead line is modelled through tensioned beam elements, while the droppers are represented as non-linear elements. For the latter, the non-linear force-displacement characteristic curve, obtained experimentally in quasi-static conditions, is considered in the model.

The pantograph is schematized considering the lumped mass of the frame, while the collector strips can be modelled either as rigid bodies or, in the case of higher frequency analysis, they can be modelled considering their rigid and deformable modes using the modal approach. In the present analysis, the collector strips have been schematized as rigid bodies, as to study the dropper motion it is not necessary to introduce and consider the high-frequency contributions of the contact force. The contact model is based on the penalty method [12], tuned in order to correctly represent the unilateral contact, and therefore the contact loss condition with zero contact force, between the contact strip and the contact wire.

In this work, the PCaDA software was initially used to correctly select the sensors to be used for the in line measurements: it was, in fact, necessary to have a quantitative indication of the variation range of both the displacement and the acceleration at the dropper clamps connected with the contact wire and with the messenger wire. The standard C270 catenary model was considered, i.e. the catenary used along the Italian HS/HC line, with a 150 mm^2 contact wire and a tensile load of 20 kN and with a 120 mm^2 messenger wire and a tensile load of 16.25 kN . The considered span length is equal to 57 m . Fig. 2 shows the sketch of the used catenary model, in which, for a more complete analysis, the registration arm and the steady arm of the suspension were also considered.

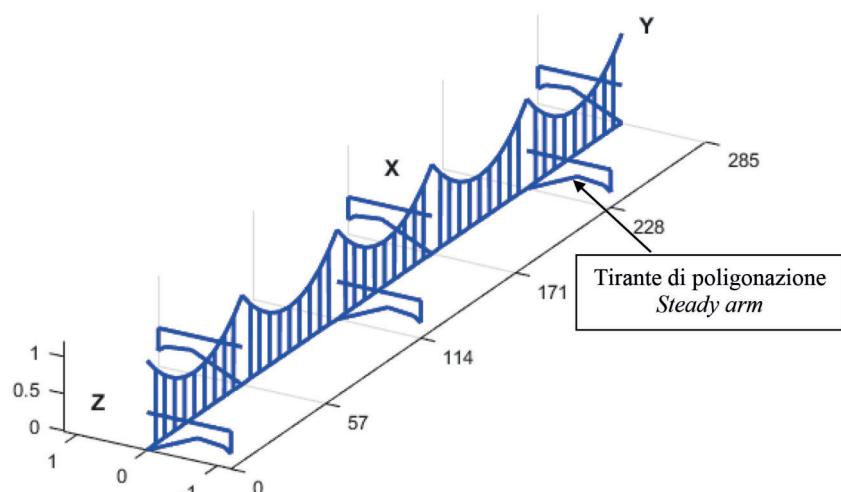


Figura 2 – Schema della catenaria C270 utilizzata durante la simulazione.
Figure 2 – Sketch of the C270 catenary used during the simulation.

velocità italiano ETR500: in Tab. 1 si riportano una schematizzazione del modello lineare a parametri concentrati del pantografo utilizzato durante le simulazioni numeriche e i corrispondenti valori dei parametri.

Il precarico statico assegnato tra pantografo e catenaria durante la simulazione è pari a 161.2 N e la velocità del treno simulata è pari a 300 km/h.

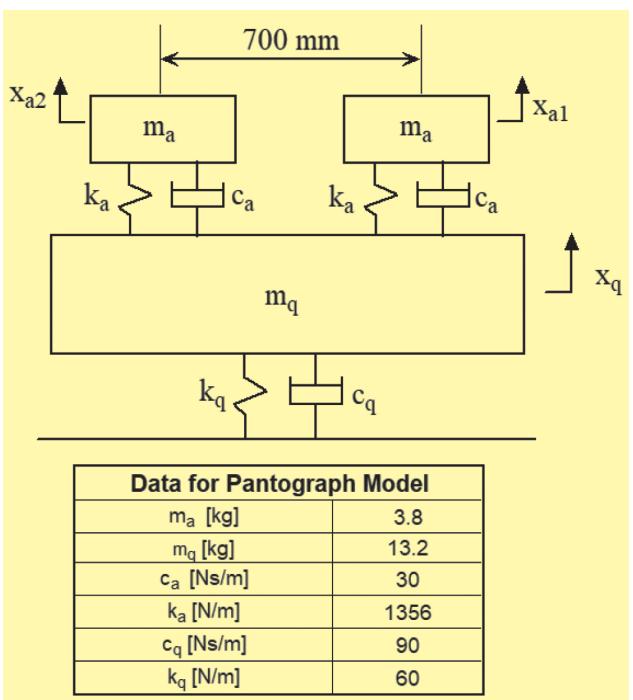
Le figure che seguono riportano la storia spaziale della forza di contatto (valore medio $F_m = 161.2$ N e deviazione standard $\sigma = 36.7$ N) con il relativo spettro e istogramma (Fig. 3), e le storie temporali degli spostamenti e delle accelerazioni degli attacchi del pendino conduttore con il filo di contatto e con la fune portante (Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6 e Fig. 7). In particolare, per quanto riguarda le storie temporali di spostamento ed accelerazione degli attacchi dei pendini, sono stati considerati i due pendini immediatamente a monte e a valle della quarta sospensione del modello della catenaria (la sospensione posizionata a 171 m in Fig. 2).

Se si analizzano gli spostamenti dei pendini in prossimità della sospensione, è possibile notare come i valori massimi degli spostamenti degli attacchi inferiori siano sempre maggiori di quelli degli attacchi superiori. La differenza di spostamento massima è compresa tra 20 mm e 35 mm circa: tale differenza comporta che il pendino al passaggio del treno sarà soggetto ad uno schiacciamento che avviene in un tempo ridotto portando, come si vedrà, al fenomeno del *dynamical buckling*. Anche i valori massimi di accelerazione sono maggiori in corrispondenza de-

Tabella 1 – Table 1

Parametri utilizzati per il modello del pantografo ATR95 25kV

Parameter used for the model of pantograph ATR95 25kV



The pantograph considered during the simulations is the ATR95 25kV, i.e. the pantograph used by the Italian high-speed train ETR500: Tab. 1 shows a schematic of the linear model with pantograph lumped parameters used during the numerical simulations and the related parameter values.

The static preload between pantograph and catenary during the simulation is equal to 161.2 N and the simulated train speed is equal to 300 km/h.

The following figures show the spatial history of the contact force (mean value $F_m = 161.2$ N and standard deviation $\sigma = 36.7$ N) with the related spectrum and histogram (Fig. 3), and the time histories of the displacements and accelerations of dropper clamps connected with the contact wire and with the messenger wire (Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6 e Fig. 7). In particular, concerning the time histories of displacement and acceleration of dropper clamps, the two droppers immediately before and after the fourth suspension of the catenary

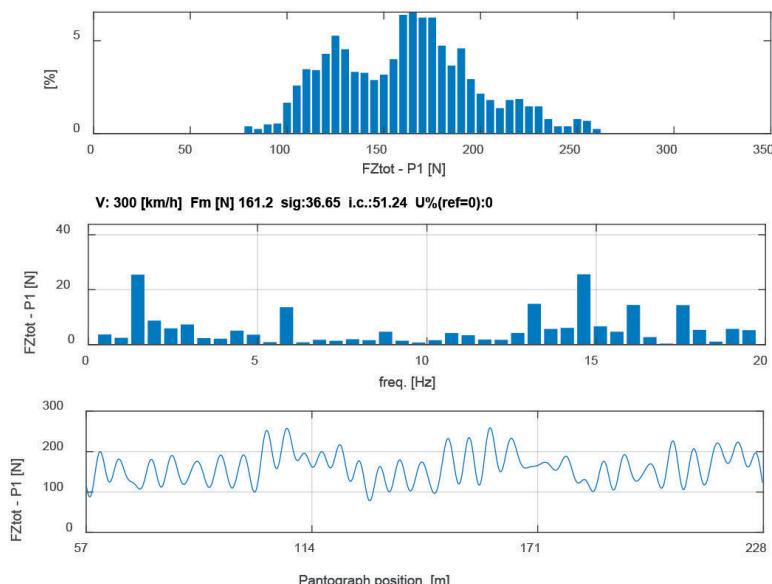


Figura 3 – Istogramma, spettro e storia spaziale della forza di contatto: interazione tra pantografo ATR95 25 kV e catenaria C270 con velocità pari a 300 km/h e precarico statico di 161.2 N.

Figure 3 – Histogram, spectrum and spatial history of the contact force: interaction between ATR95 25 kV pantograph and C270 catenary with speed equal to 300 km/h and static preload of 161.2 N.

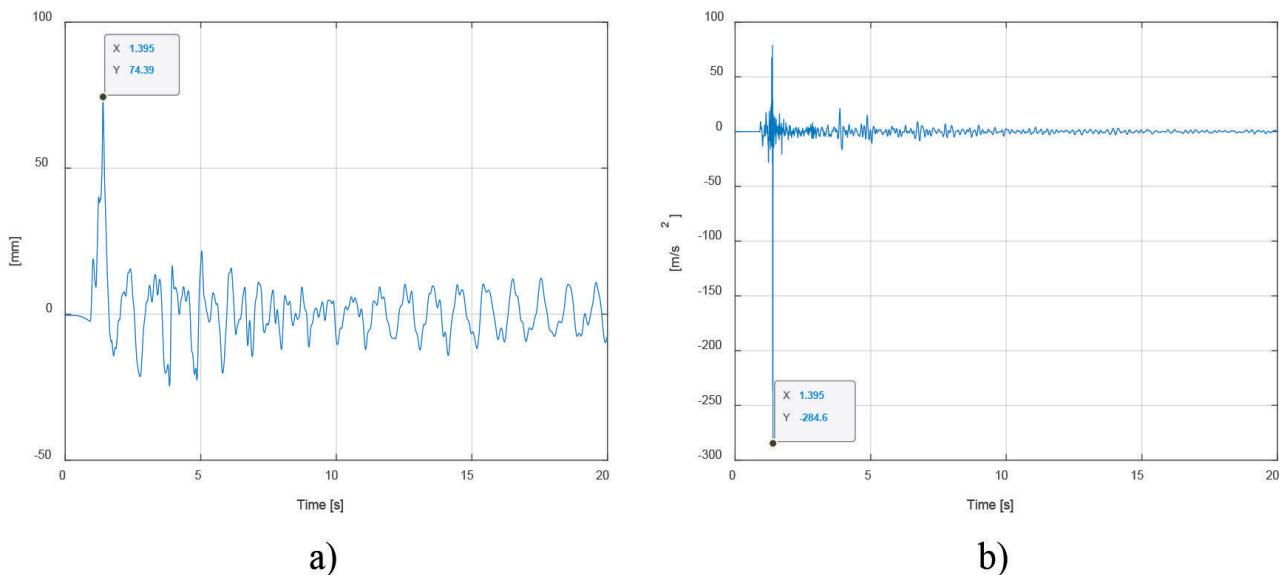


Figura 4 – Storia temporale dello spostamento (a) e dell’accelerazione (b) dell’attacco inferiore del pendino a monte della sospensione posizionata a 171 m: interazione tra pantografo ATR95 25 kV e catenaria C270 con velocità pari a 300 km/h e precarico statico di 161.2 N.

Figure 4 – Time history of displacement (a) and acceleration (b) of the lower clamp of dropper before the suspension positioned at 171 m: interaction between ATR95 25 kV pantograph and C270 catenary with speed equal to 300 km/h and static preload of 161.2 N.

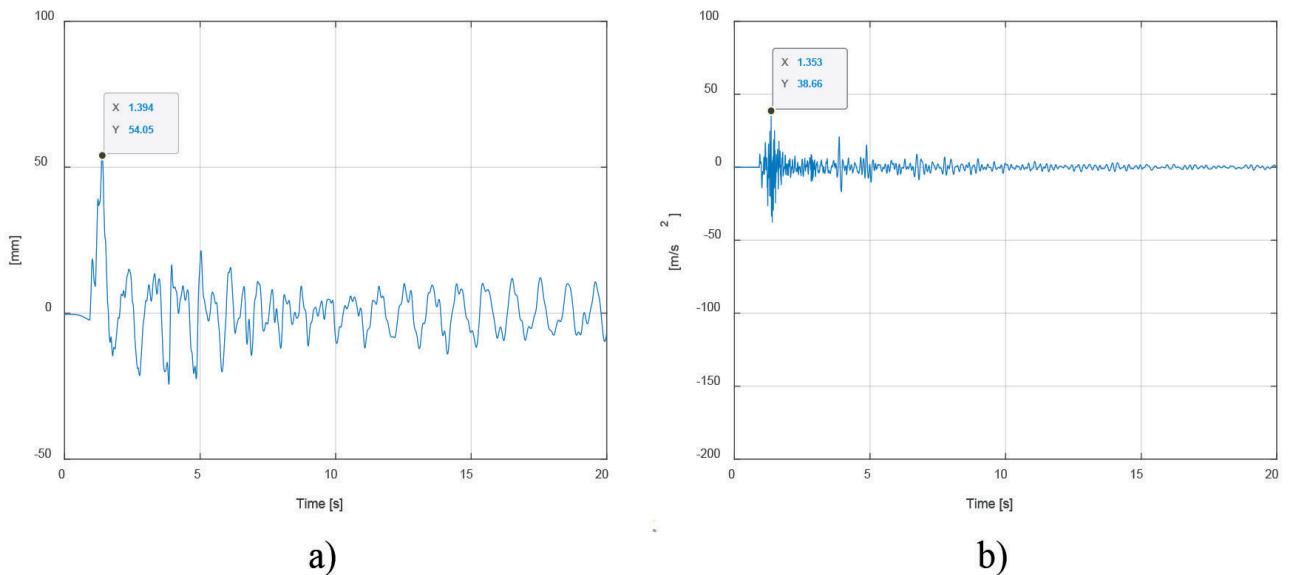


Figura 5 – Storia temporale dello spostamento (a) e dell’accelerazione (b) dell’attacco superiore del pendino a monte della sospensione posizionata a 171 m: interazione tra pantografo ATR95 25 kV e catenaria C270 con velocità pari a 300 km/h e precarico statico di 161.2 N.

Figure 5 – Time history of displacement (a) and acceleration (b) of the upper clamp of dropper before the suspension positioned at 171 m: interaction between ATR95 25 kV pantograph and C270 catenary with speed equal to 300 km/h and static preload of 161.2 N.

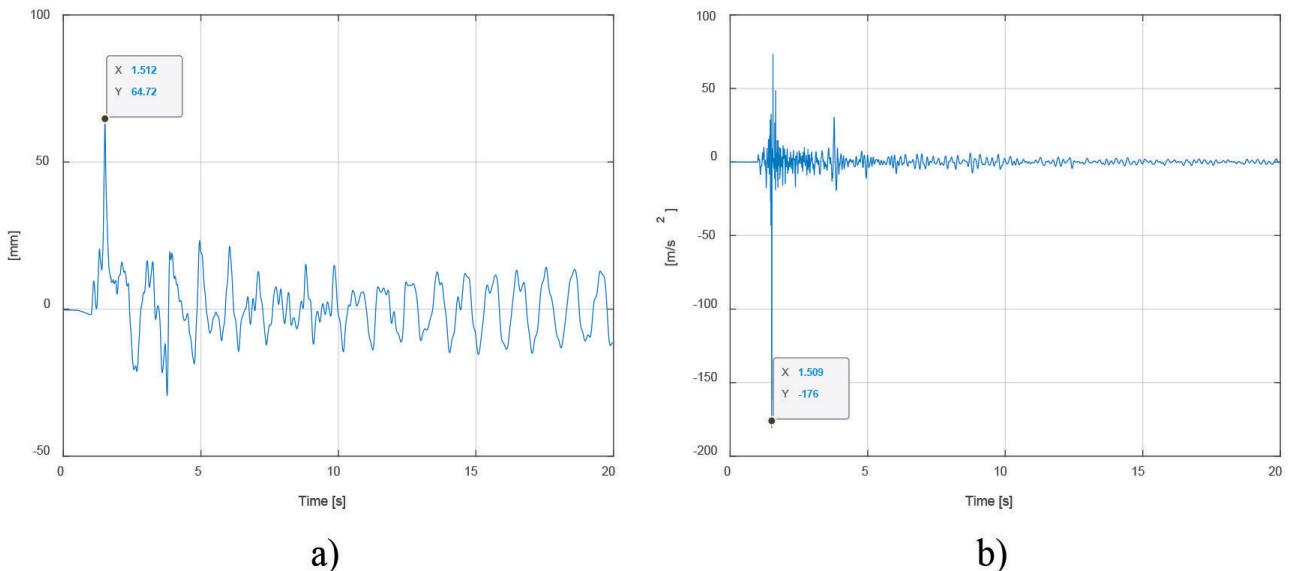


Figura 6 – Storia temporale dello spostamento (a) e dell'accelerazione (b) dell'attacco inferiore del pendino a valle della sospensione posizionata a 171 m: interazione tra pantografo ATR95 25 kV e catenaria C270 con velocità pari a 300 km/h e precarico statico di 161.2 N.

Figure 6 – Time history of displacement (a) and acceleration (b) of the lower clamp of dropper after the suspension positioned at 171 m: interaction between ATR95 25 kV pantograph and C270 catenary with speed equal to 300 km/h and static preload of 161.2 N.

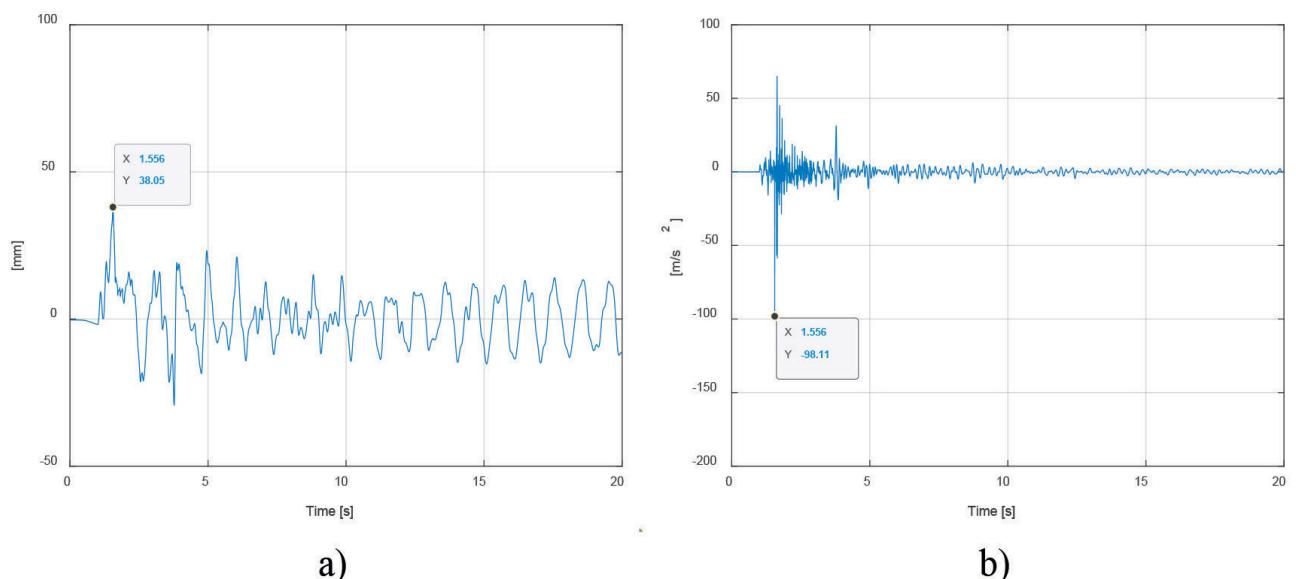


Figura 7 – Storia temporale dello spostamento (a) e dell'accelerazione (b) dell'attacco superiore del pendino a valle della sospensione posizionata a 171 m: interazione tra pantografo ATR95 25 kV e catenaria C270 con velocità pari a 300 km/h e precarico statico di 161.2 N.

Figure 7 – Time history of displacement (a) and acceleration (b) of the upper clamp of dropper after the suspension positioned at 171 m: interaction between ATR95 25 kV pantograph and C270 catenary with speed equal to 300 km/h and static preload of 161.2 N.

gli attacchi inferiori (tra 150 m/s^2 e 300 m/s^2) rispetto a quelli in corrispondenza degli attacchi superiori (tra 50 m/s^2 e 100 m/s^2), nel campo di frequenza fino a 150 Hz.

Oltre ai pendini in prossimità della sospensione, sono state eseguite delle analisi relative agli spostamenti e alle accelerazioni degli attacchi dei pendini conduttori a metà campata (Fig. 8 e Fig. 9).

L'analisi degli spostamenti degli attacchi superiori e inferiori del pendino a metà campata (Fig. 8(a) e Fig. 9(a)) mostra come i valori massimi siano molto simili (circa pari a 75 mm). Questo significa che il pendino a metà campata si deforma in misura molto inferiore rispetto ai pendini in prossimità della sospensione. La flessione a cui è soggetto il pendino a metà campata è, conseguentemente, molto più bassa rispetto a quella a cui sono soggetti i pendini che si trovano in prossimità della sospensione. Quest'ultimi sono di conseguenza quelli maggiormente soggetti al fenomeno di *dynamic buckling* risultando, quindi, sollecitati a flessione in maggior misura. La fune portante, essendo vincolata alla sospensione a pochi metri di distanza, presenta una cedevolezza minore in corrispondenza del punto di attacco superiore del pendino.

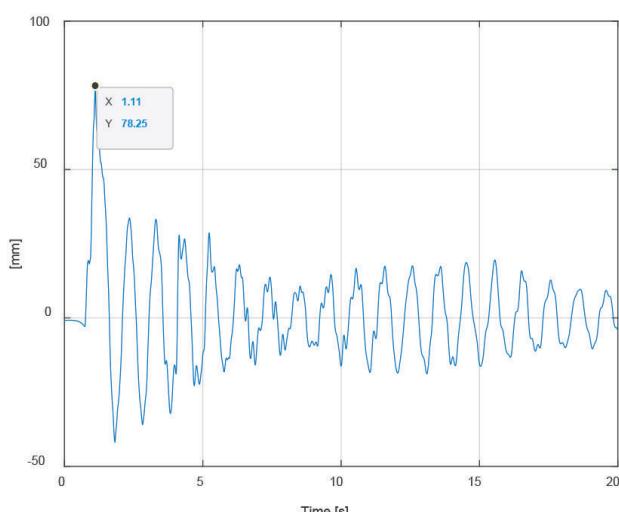
Quest'ultimo risultato è messo in evidenza anche dall'analisi della storia temporale della variazione dello spostamento del pendino, ovvero dalla differenza tra lo spostamento dell'attacco inferiore e lo spostamento dell'attacco superiore del pendino (Fig. 10). L'analisi dei risultati mostra come il pendino a metà campata è soggetto ad una variazione di spostamento di circa 2.5 mm mentre i pendini a monte e a valle della sospensione sono soggetti

model (the suspension positioned at 171 m in Fig. 2) were considered.

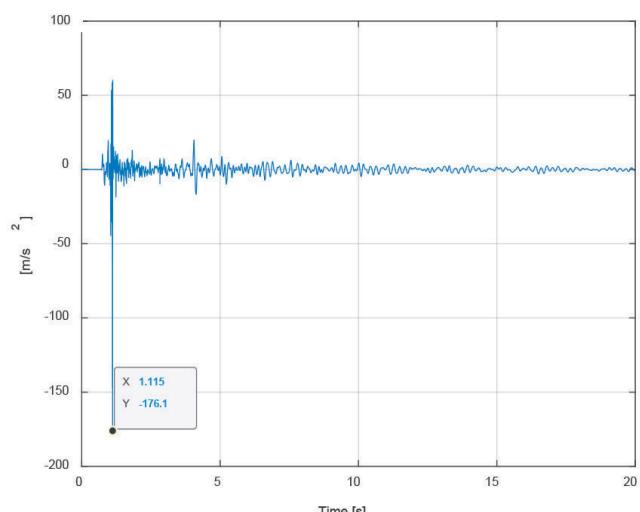
If the displacements of the droppers near the suspension are analysed, it is possible to notice that the maximum values of displacements of lower clamp (the one connected with contact wire) are always greater than those of the upper clamp (the one connected with messenger wire). The maximum displacement difference is between approximately 20 mm and 35 mm: this difference means that the dropper as the train passes will be subject to crushing which occurs in a short time leading to the phenomenon of dynamical buckling. The maximum acceleration values are also higher at the lower dropper clamp (between 150 m/s^2 and 300 m/s^2) than at the upper dropper clamp (between 50 m/s^2 and 100 m/s^2), in the frequency range up to 150 Hz.

Analyses were also performed relating to the displacements and accelerations of the clamps of the droppers in the middle of the span (Fig. 8 and Fig. 9).

The analysis of displacements of upper and lower clamps of the dropper at mid-span (Fig. 8(a) and Fig. 9(a)) shows that the maximum values are very similar (approximately equal to 75 mm). This means that the mid-span dropper deforms much less than the droppers near the suspension. The bending to which the dropper is subjected at mid-span is consequently much lower than that to which the droppers located near the suspension are subjected. The latter are consequently the most affecting ones to the dynamic buckling phenomenon resulting, therefore, affected by an important bending. The messenger wire at the position of the upper dropper clamp has an important stiffness being clamped to the suspension a few meters away.



a)



b)

Figura 8 – Storia temporale dello spostamento (a) e dell'accelerazione (b) dell'attacco inferiore del pendino a metà campata: interazione tra pantografo ATR95 25 kV e catenaria C270 con velocità pari a 300 km/h e precarico statico di 161.2 N.

Figure 8 – Time history of displacement (a) and acceleration (b) of the lower clamp of dropper at mid-span: interaction between ATR95 25 kV pantograph and C270 catenary with speed equal to 300 km/h and static preload of 161.2 N.

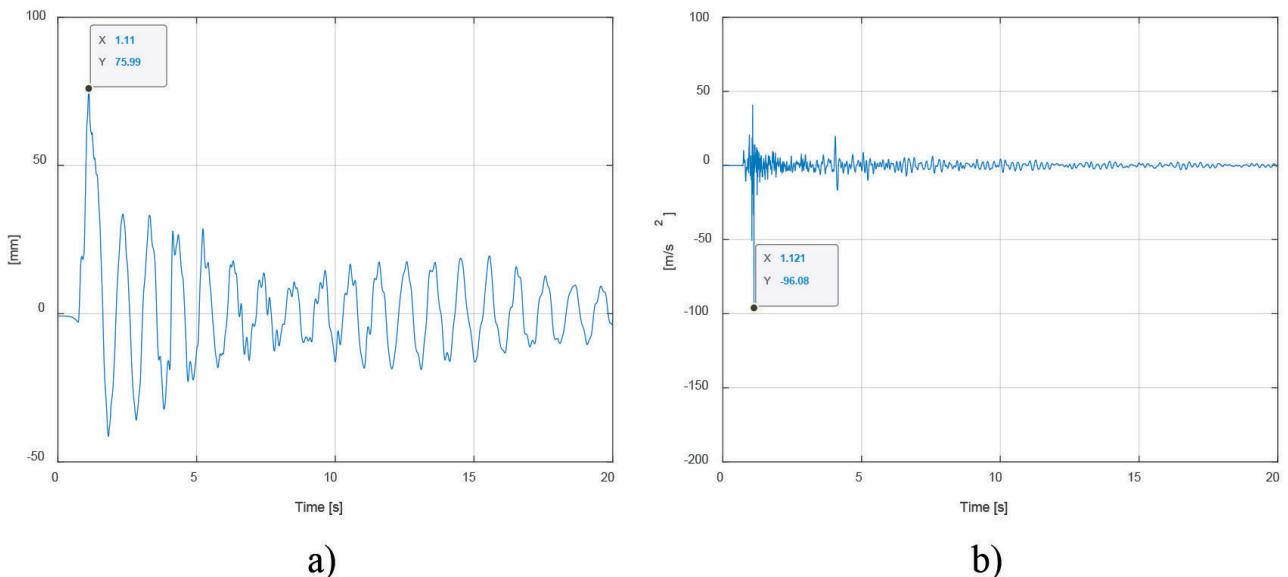


Figura 9 – Storia temporale dello spostamento (a) e dell'accelerazione (b) dell'attacco superiore del pendino a metà campata: interazione tra pantografo ATR95 25 kV e catenaria C270 con velocità pari a 300 km/h e precarico statico di 161.2 N.

Figure 9 – Time history of displacement (a) and acceleration (b) of the upper clamp of dropper at mid-span: interaction between ATR95 25 kV pantograph and C270 catenary with speed equal to 300 km/h and static preload of 161.2 N.

ad una variazione di spostamento superiore a 20 mm, ovvero maggiore di un ordine di grandezza. Si noti che i picchi di spostamento dei due estremi del pendino a valle della sospensione (Fig. 6(a) e Fig. 7(a)) non sono esattamente contemporanei fra loro, quindi nel segnale differenza fra questi spostamenti (Fig. 10(b)) il valore di picco non coincide con la differenza dei picchi visibili nelle Fig. 6(a) e Fig. 7(a).

3. La sperimentazione in linea

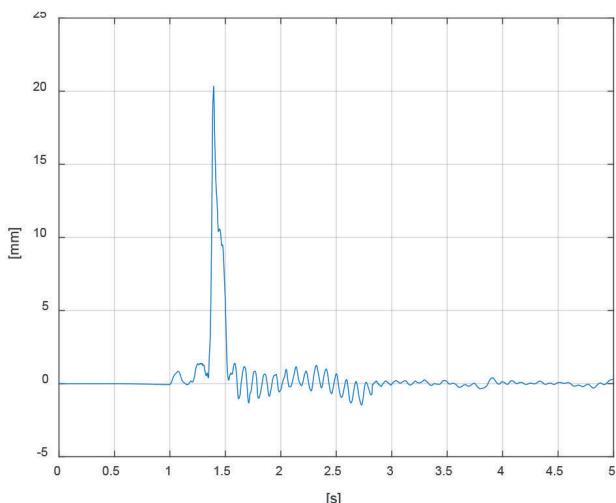
La seconda fase dell'indagine descritta in questo lavoro è rappresentata dalle misure eseguite in linea durante il regolare esercizio ferroviario. Lo scopo di questa fase è quello di misurare il reale movimento del pendino conduttore dovuto all'effetto dinamico del passaggio del pantografo. A tale scopo si è scelta la linea AV/AC Milano-Bologna. Le misure in linea necessitano della presenza di una postazione per l'alimentazione del sistema di acquisizione lungo la linea che sia anche facilmente accessibile. La scelta del luogo per eseguire le misure è ricaduta sul Posto Tecnologico (PT) Cadeo che ha anche l'importante caratteristica di trovarsi in un tratto di linea in cui i veicoli ferroviari in condizione di normale esercizio viaggiano alla velocità massima consentita, ovvero a 300 km/h. Quest'ultima condizione è importante in quanto le azioni dinamiche legate alla velocità del veicolo ferroviario che agiscono durante il movimento del pendino conduttore hanno un impatto importante sulle azioni a cui esso è soggetto.

Sulla base dei risultati numerici ottenuti e considerando che il pendino è soggetto ad una tensione pari a 25kV

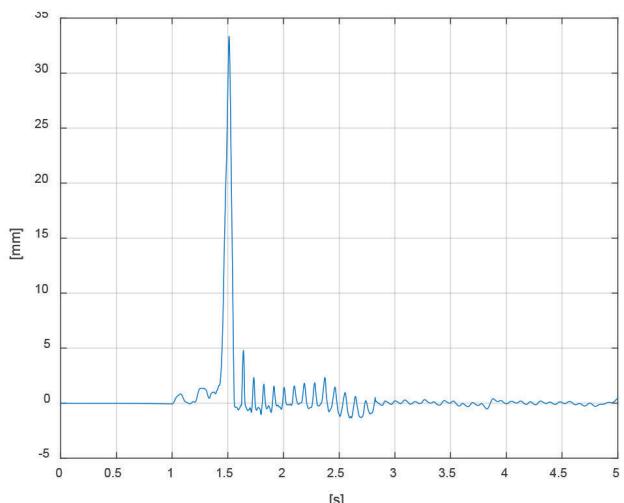
The latter result is also highlighted by the analysis of the time history of the dropper displacement variation, i.e. by the difference between the displacement of the lower clamp and the displacement of the upper clamp (Fig. 10). The analysis of the results shows that the mid-span dropper is subject to a displacement variation of about 2.5 mm while the droppers before and after the suspension are subject to a displacement variation greater than 20 mm, i.e. greater than an order of magnitude. Note that the displacement peaks of the two far ends of dropper after the suspension (Fig. 6(a) and Fig. 7(a)) are not exactly contemporary to each other, therefore in the signal representing the difference between these two displacements (Fig. 10(b)) the peak value does not coincide with the difference of the peaks visible in Fig. 6(a) and Fig. 7(a).

3. The in line measurements

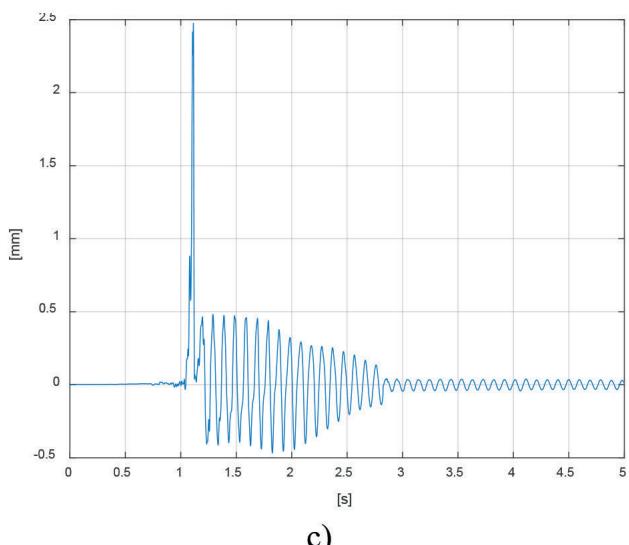
The second phase of the investigation described in this work is represented by the measurements performed in line during regular railway operation. The purpose of this phase is to measure the real motion of the dropper due to the dynamical effect of the pantograph passage. The Milano-Bologna HS/HC line was chosen for the measurements. In line measurements require the presence of a station for powering the acquisition system along the line with an easy accessibility. The choice of the place to carry out the measurements fell on the Posto Tecnologico (PT) Cadeo which also has the important characteristic of being located in a position along the line where railway vehicles in normal operating conditions travel at the maximum permitted speed, i.e. 300 km/h. This last condition is important since the dynam-



a)



b)



c)

Figura 10 – Storia temporale della variazione di spostamento del pendino a monte della sospensione (a), a valle della sospensione (b) e a metà campata (c): interazione tra pantografo ATR95 25 kV e catenaria C270 con velocità pari a 300 km/h e precarico statico di 161.2 N.

Figure 10 – Time history of the displacement variation of the dropper before the suspension (a), after the suspension (b) and at mid-span (c): interaction between the ATR95 25 kV pantograph and the C270 catenary with a speed of 300 km/h and static preload of 161.2 N.

ical actions related to the train speed that act during the dropper motion have an important impact on the actions to which it is subjected.

Based on the obtained numerical results and considering that the dropper is subjected to a voltage equal to 25 kV, the following sensors were selected for the in line experimental activity:

misurare sia lo spostamento e sia l'accelerazione è che si è interessati sia alle componenti dinamiche a bassa frequenza sia a quelle ad alta frequenza. Inoltre, conoscendo la distanza a cui sono montati gli accelerometri e ottenendo attraverso l'analisi della correlazione tra le misure di accelerazione il ritardo temporale tra i segnali di accelerazione, è possibile determinare una stima affidabile della velocità effettiva di ciascun treno in transito.

In Fig. 11 si mostra come sono stati installati gli accelerometri. In particolare, sono stati utilizzati i tipici attacchi del pendino conduttore per fissare gli accelerometri wireless in prossimità degli attacchi tra pendino conduttore e filo di contatto e fune portante. Dalle osservazioni precedenti (ad es. [4]) è stato evidenziato che i pendini tipicamente interessati dal *buckling* dinamico sono quelli posizionati immediatamente a monte e a valle di una sospensione (Fig. 12).

Gli stessi pendini conduttori sono stati anche oggetto di misura con le telecamere per l'analisi del movimento del pendino durante il passaggio del pantografo. Per quanto riguarda l'installazione delle telecamere, piuttosto che fissare le telecamere sui pali della linea aerea o su pali ausiliari, si è scelta la soluzione di posizionare le teleca-

- 4 G-LINK-200-40G Wireless Lord Microstrain accelerometers with battery power supply, having a mass of about 150 g;
- 2 FLIR BFS-U3-16S2M-CS cameras, resolution 1440x1080px.

The decision to use wireless accelerometers comes from the need to install them on the catenary work at a voltage equal to 25 kV and to manage the signal transmission up to the acquisition. Alternatives to this choice were:

- *use of traditional accelerometers, with wiring up to a galvanic separator, and battery power supply near the suspension;*
- *use of accelerometers based on optical technologies, in which the signal is transmitted via optical fibres, which are insulating in themselves.*

In both cases it was necessary to provide suitable wiring, which, based on previous experience, is a critical point for the experimental set-up, also in terms of time required for installation and uninstallation. On the other hand, these solutions can also assure a minimum mass of the sensors, thus ensuring a very low influence of the measurement system on the dynamics of the system under study.

Given the evolution in accelerometers with wireless data transmission technology, this choice was opted for, considering that the capacity of the on-board batteries was fully sufficient also given the temporary nature of the installation (two days in total).

The accelerometers were placed in correspondence with the dropper clamps on the contact wire and on the messenger wire, while the cameras were used to measure the dropper motion due to the pantograph passage. The reason for measuring both displacement and acceleration is that it is interesting to evaluate both the low-frequency and high-frequency dynamical components. Furthermore, knowing the distance at which the accelerometers are installed and obtaining the time delay between the acceleration signals through the analysis of the correlation between the acceleration measurements, it is possible to determine a reliable estimate of the actual speed of each passing train.

Fig. 11 shows how the accelerometers have been installed. In particular, the typical dropper clamps were used to fix the wireless accelerometers near the dropper clamps on the contact wire and on the messenger wire. From previous observations (e.g. [4]) it has been

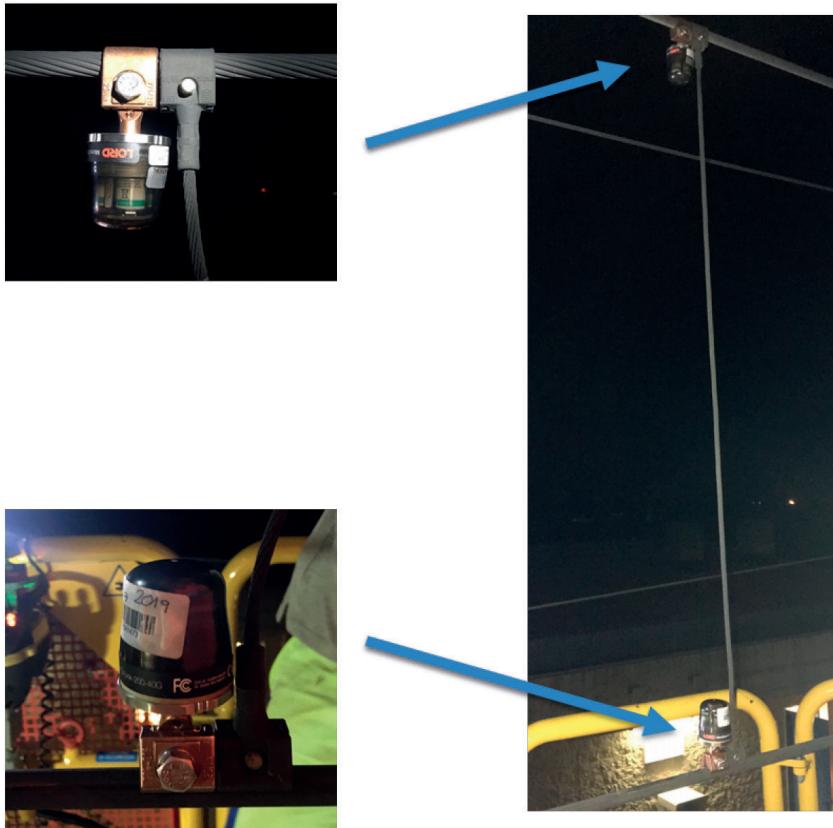


Figura 11 – Installazione degli accelerometri wireless in prossimità degli attacchi tra pendino conduttore e filo di contatto e fune portante.

Figure 11 – Installation of the wireless accelerometers near the dropper clamps on the contact wire and on the messenger wire.

mere sul tetto dell'edificio presente presso il PT Cadeo che si trova ad un'altezza simile a quella della linea di contatto e ad una distanza dal filo di contatto di circa 10 m. La soluzione scelta, oltre ad avere il vantaggio di evitare ogni possibile interferenza con la linea e con il normale esercizio ferroviario, ha anche la possibilità di regolare e movimentare le telecamere senza la necessità di richiedere alcuna interruzione del servizio. In Fig. 13 si riporta una foto che mostra la posizione delle due telecamere utilizzate per la misura del movimento dei pendini conduttori al passaggio del pantografo. Come è possibile notare dalla foto in Fig. 13, poiché le misure sono state eseguito in piena estate, le telecamere sono state protette dall'irraggiamento solare diretto per evitarne il surriscaldamento, che avrebbe potuto comportarne un malfunzionamento.

Le due telecamere sono state posizionate in modo da inquadrare il pendino conduttore oggetto della misura con due angolazioni a 90° una rispetto all'altra. I due punti di vista permettono di avere indicazioni sulla deformazione del pendino in due diversi piani, come mostrato in Fig. 14, in cui si mostra un fotogramma del medesimo pendino ripreso dalle due angolazioni. Spostando la posizione delle due telecamere in modo opportuno, è stato possibile trovare la posizione ottimale per misurare il movimento al passaggio del pantografo dei vari pendini conduttori da analizzare.

Di seguito si riportano alcuni esempi di risultati ottenuti in termini di accelerazione in corrispondenza degli attacchi del pendino conduttore con il filo di contatto e con la fune portante e di spostamento degli attacchi superiore e inferiore del pendino conduttore misurati con le telecamere. La frequenza di campionamento del segnale di accelerazione è stata fissata a 256 Hz. In Fig. 15 si riportano le misure di accelerazioni in corrispondenza degli attacchi tra pendino conduttore e fune portante (diagramma in alto nella figura) e tra pendino conduttore e filo di

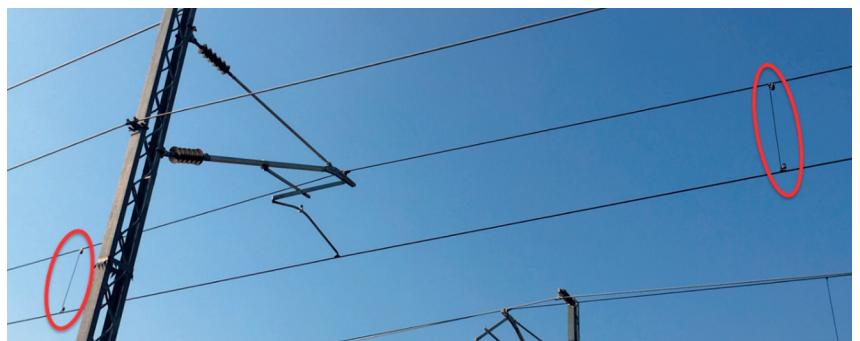


Figura 12 – Installazione degli accelerometri wireless in corrispondenza dei pendini conduttori a monte e a valle di una sospensione.

Figure 12 – Installation of wireless accelerometers at dropper before and after a suspension.

highlighted that the droppers typically affected by dynamic buckling are those positioned immediately before and after the suspension (Fig. 12).

The same droppers were also considered for the measurement of dropper motion during the passage of the pantograph with cameras. Concerning the installation of the cameras, rather than fixing the cameras on the overhead line poles or on auxiliary poles, the adopted solution was to position the cameras on the roof of the building present at the PT Cadeo which is located at a height similar to that of the contact line and at a distance from the contact wire of about 10 m. The chosen solution, in addition to having the advantage of avoiding any possible interference with the line and with normal railway operation, also has the possibility of regulating and moving the cameras without the need to request any interruption of the service. Fig. 13 reports a picture showing the position of the two cameras used to measure the dropper motion as the pantograph passes. As can be seen from the picture in Fig. 13, since the measurements were taken in the middle of summer, the cameras were protected from direct solar radiation to avoid overheating, which could have caused them to malfunction.

The two cameras were positioned so as to frame the dropper to be measured with a relative angle between them of 90° angles. The two points of view allow to have indications on the dropper deformation in two different planes, as shown in Fig. 14, which shows a frame of the same dropper taken from the two views. By appropriately shifting the position of the two cameras, it was possible to find the optimal position to measure the motion of the various droppers to be analysed as the pantograph passed.

Below are some examples of results obtained in terms of acceleration at dropper clamps and displacement of the upper and lower dropper clamps measured with the cameras. The sam-



Figura 13 – Installazione delle telecamere sul tetto dell'edificio del PT Cadeo.

Figure 13 – Installation of cameras on the roof of the PT Cadeo building.

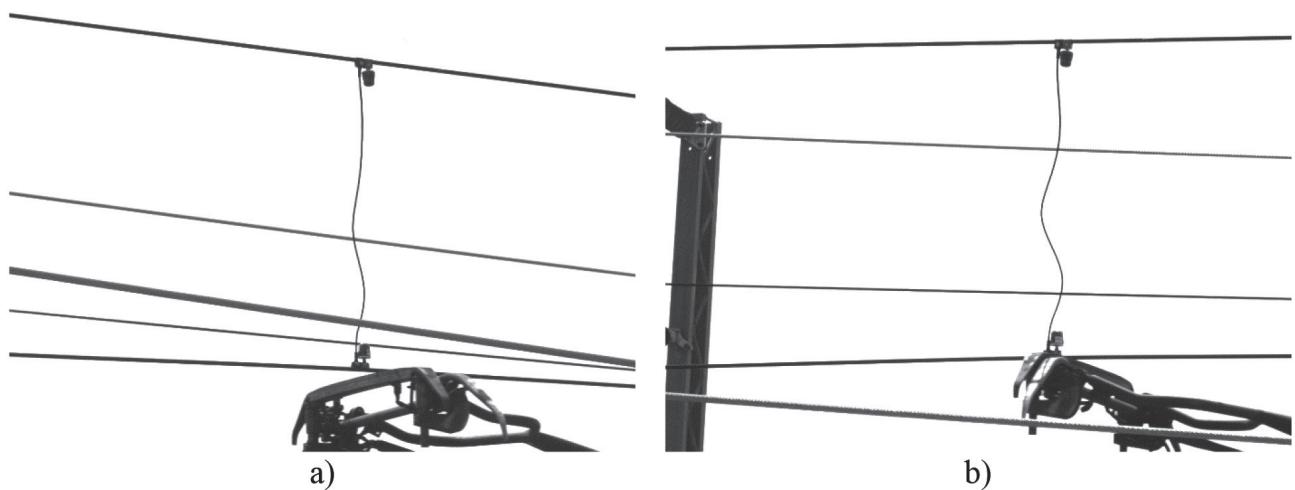


Figura 14 – Esempio di visualizzazione dello spostamento del pendino al passaggio del pantografo per le due angolazioni a 90° delle telecamere.

Figure 14 – Example of visualization of the dropper motion as the pantograph passes for the two cameras with a relative angle of 90°.

contatto (diagramma in basso nella figura) per i due pendini a monte e a valle della sospensione. La definizione "a monte" e "a valle" tiene conto della direzione del treno, ovvero il pendino a monte è quello incontrato per primo dal pantografo. L'analisi della storia temporale dell'accelerazione mostra, come atteso in base ai risultati della simulazione, valori superiori di accelerazione in corrispondenza dell'attacco tra il pendino conduttore e il filo di contatto, interessato direttamente dal contatto con il pantografo, rispetto ai valori misurati in corrispondenza dell'attacco tra il pendino conduttore e la fune portante. Il det-

pling frequency of the acceleration signal was set at 256 Hz. Fig. 15 shows the acceleration measurements in correspondence with the dropper clamp on the messenger wire (diagram at the top of the figure) and with the dropper clamp on the contact wire (diagram at the bottom of the figure) for the two droppers before and after the suspension. The definition "before" and "after" takes into account the direction of the train, i.e. the "before" dropper is the one encountered first by the pantograph. The analysis of the acceleration time history shows, as expected based on the simulation results, higher acceleration values in correspondence with dropper clamp

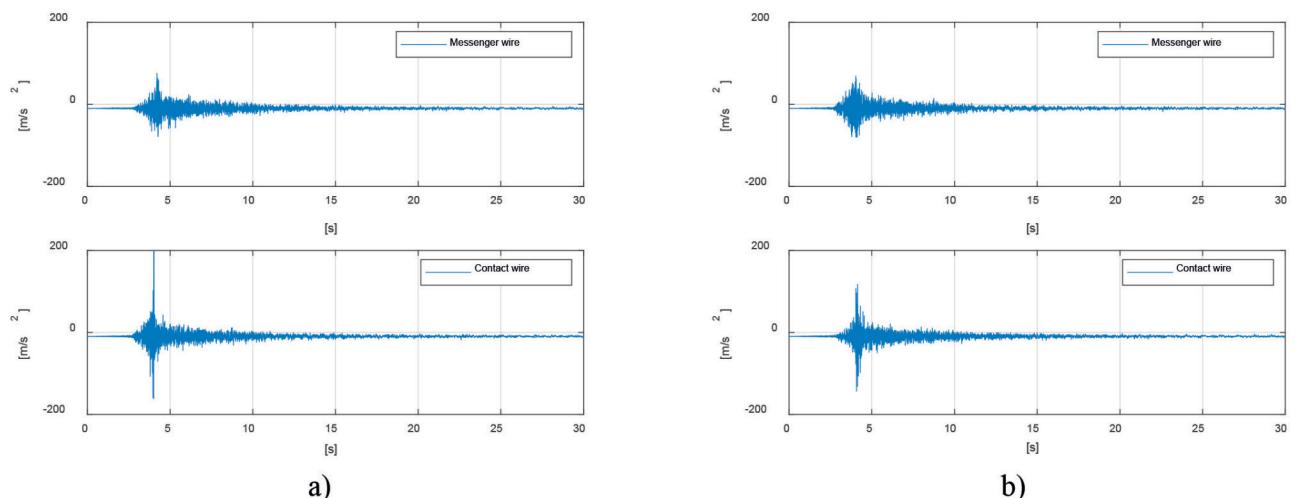


Figura 15 – Misura di accelerazione in corrispondenza degli attacchi tra il pendino conduttore e la fune portante e tra il pendino conduttore e il filo di contatto: a) pendino a monte della sospensione; b) pendino a valle della sospensione.

Velocità del treno pari a 295 km/h.

Figure 15 – Measurement of acceleration in correspondence with the dropper clamps on the messenger wire and on the contact wire; a) dropper before the suspension; b) dropper after the suspension. Train speed equal to 295 km/h.

taglio mostrato in Fig. 16 consente di apprezzare come l'accelerazione cresca gradatamente prima che il pantografo giunga sotto il punto di misura, e poi mostri il *decay* associato al moto conseguente al sollevamento dovuto al pantografo. La fase di incremento del segnale di accelerazione inizia circa 1.2 secondi prima del transito, quando il pantografo si trova a circa 98 m prima della sezione di misura, quindi oltre la campata precedente. Questa fase di salita del segnale di accelerazione è associata all'onda trasversale nel filo di contatto, la cui velocità è stimabile in circa 122 m/s, valore quasi identico anche per la fune portante, in quanto definita dal rapporto tiro/massa lineare.

L'analisi in frequenza dell'accelerazione misurata in corrispondenza dell'attacco tra pendino e filo di contatto dopo il passaggio del pantografo, ad esempio riferendosi alla Fig. 15 dopo circa 10 secondi, permette di analizzare le frequenze proprie del filo di contatto. Un esempio nel range di frequenze tra 0 Hz e 20 Hz è riportato in Fig. 17.

Analizzando tutte le misure di accelerazioni eseguite, mediamente si trovano valori più elevati di r.m.s. dell'accelerazione misurata in corrispondenza dell'attacco con il filo di contatto per il pendino a monte della sospensione e che è soggetto per primo al passaggio del treno, mentre si trovano valori mediamente più alti per l'r.m.s. dell'accelerazione misurata in corrispondenza dell'attacco con la fune portante per il pendino a valle della sospensione (Fig. 14, dove si riportano i valori massimi di r.m.s. dell'intera storia temporale dell'accelerazione calcolati su una finestra mobile di 0.1 secondi. I diagrammi riportano quindi per ciascun transito regi-

on the contact wire, directly affected by the contact with the pantograph, compared to the values measured at the dropper clamp on the messenger wire. The detail shown in Fig. 16 allows to appreciate how the acceleration gradually grows before the pantograph reaches the measurement point, and then shows the decay associated with the motion resulting from the lifting due to the pantograph. The rising phase of acceleration signal begins about 1.2 seconds before the transit, when the pantograph is about 98 m before the measurement section, therefore beyond the previous span. This rising phase of the acceleration signal is associated with the transversal wave in the contact wire, whose speed can be estimated at about 122 m/s: an almost identical value of transversal wave speed can be found for the messenger wire, as it is defined by the linear tension/mass ratio.

The frequency analysis of the acceleration measured at the dropper clamp on the contact wire after the passage of the pantograph, for example referring to Fig. 15 after about 10 seconds, allows to analyse the natural frequencies of the contact wire. An example in the frequency range between 0 Hz and 20 Hz is shown in Fig. 17.

By analysing all the performed acceleration measurements, generally higher r.m.s. values are found for the acceleration measured in correspondence with dropper clamp on the contact wire for the dropper before the suspension and which is first subject to the passage of the train, while generally higher r.m.s. values are found for the acceleration measured in correspondence with the dropper clamp on the messenger wire for dropper after the suspension (Fig. 18, which

shows the maximum r.m.s. values of the entire time history of the acceleration calculated on a sliding window of 0.1 seconds. The diagrams therefore show, for each recorded transit, the maximum value among all the r.m.s. values evaluated on the moving window).

Concerning the dropper displacement measurements performed with the two cameras, the video sequences were all acquired in full resolution (1440x1080px) and with a sampling frequency of 225 frames per second for each camera. The estimate of the displacements of the two dropper ends in correspondence with the messenger wire and with the contact wire was obtained with image analysis techniques called "pattern matching": for each test the model (frame) of the upper and lower dropper clamp from the first frame of the movie was extracted. Subsequently, for all the following frames, the displacements of this model were estimated with respect to the position in the first frame, taken as a reference.

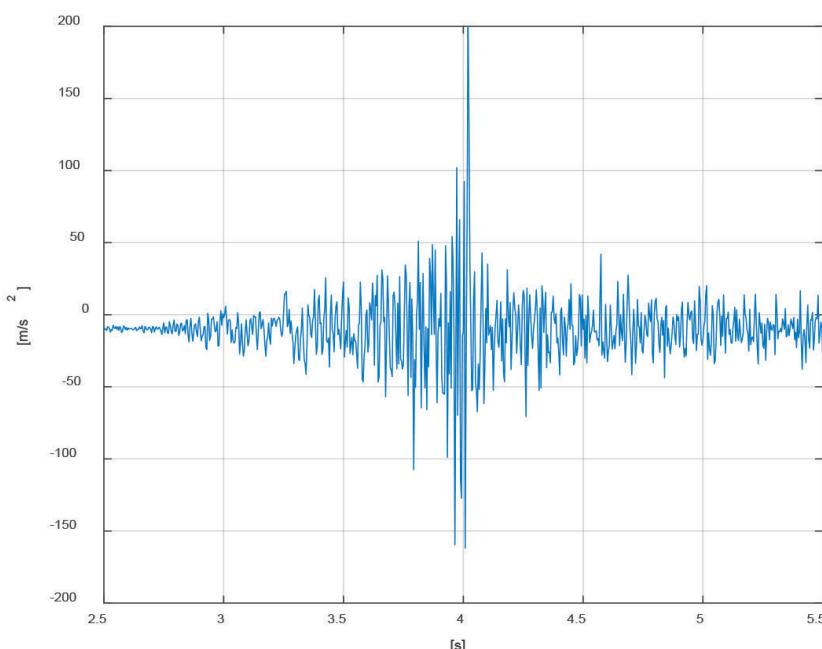


Figura 16 – Dettaglio della storia temporale dell'accelerazione al filo di contatto, per il pendino a monte della sospensione.

Figure 16 – Detail of the time history of the acceleration at the contact wire, for the dropper before the suspension

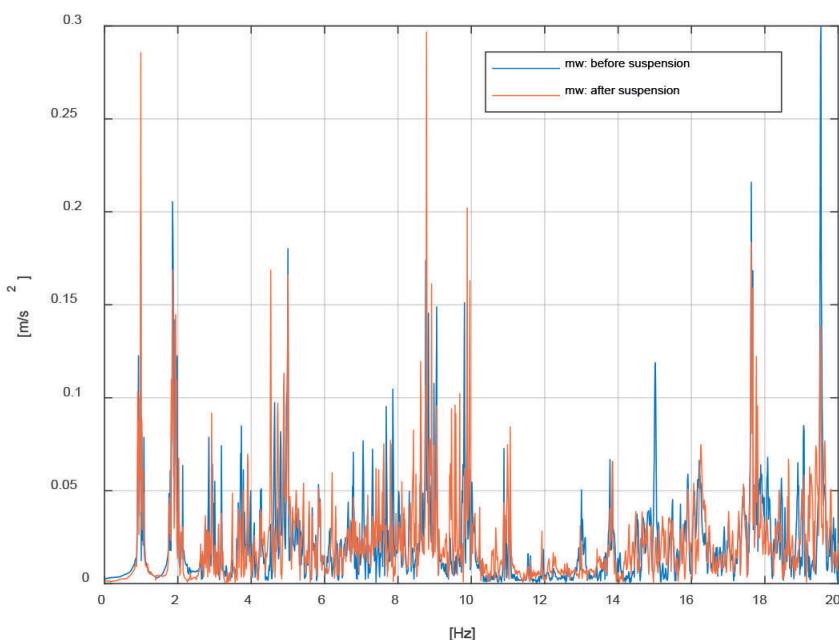


Figura 17 – Analisi in frequenza dell’accelerazione in corrispondenza degli attacchi tra il pendino conduttore e il filo di contatto a monte della sospensione e a valle della sospensione. Velocità del treno pari a 295 km/h. Tratto di storia analizzata: da circa 6 secondi dopo il transito del pantografo.

Figure 17 – Frequency analysis of the acceleration in correspondence with the dropper clamp on the contact wire for the dropper before and after the suspension. Train speed equal to 295 km/h. Section of history analysed: from about 6 seconds after the transit of the pantograph.

strato, il valore massimo tra tutti gli r.m.s. valutati sulla finestra mobile.

Per quanto riguarda le misure di spostamento del pendino eseguite con le due telecamere, le sequenze video sono state acquisite tutte in piena risoluzione (1440x1080px) e con una frequenza di campionamento di 225 immagini al secondo per ciascuna telecamera. La stima degli spostamenti dei due estremi dei pendini in corrispondenza degli attacchi con la fune portante e con il filo di contatto è stata ottenuta con tecniche di analisi delle immagini dette di *pattern matching*: per ogni prova è stato estratto il modello (immagine) dei morsetti di collegamento superiore ed inferiore dalla prima immagine del filmato. Successivamente, per tutte le immagini seguenti sono stati stimati gli spostamenti di tale modello rispetto alla posizione nel primo fotogramma, assunto come riferimento.

La conversione degli spostamenti da pixel a millimetri è stata effettuata a partire dalla conoscenza della lunghezza dei pendini in millimetri e ricavando la stessa lunghezza in pixel dalle immagini. La stima del fattore di conversione fra pixel e millimetri è stata fatta per ciascuna telecamera e per ciascun pendino considerato, in quanto a motivo della prospettiva il fattore di scala non è costante nell’intero campo di misura. Dall’analisi di stime ripetute

The conversion of the displacements from pixels to millimetres was carried out starting from the knowledge of the dropper length in millimetres and obtaining the same length in pixels from the frames. The conversion factor between pixels and millimetres was estimated for each camera and for each considered dropper, as the scale factor is not constant over the entire measurement range due to the perspective. From the analysis of repeated estimates of the conversion factor, an uncertainty on this parameter of less than 0.5% of the nominal value was identified. Combining this uncertainty with that of the pattern matching algorithm, the standard uncertainty on displacements is less than 1 mm for measurements on all droppers. As expected, the estimates of the displacements of the dropper ends obtained from the two cameras coincide.

Fig. 19 shows an example of the results obtained with the cameras. In particular, Fig. 19(a) shows the signals of the vertical displacements of the dropper clamps on the messenger wire and on the contact wire, while Fig. 19(b) shows the time history of the dropper length variation calculated as the difference between the displace-

ments of the upper and lower dropper clamps. In order to correctly interpret the results, it should be noted that positive displacements correspond to downward displacements and negative length variations correspond to a closer distance between the two dropper ends. Therefore, in the examined case, the crushing of the dropper is approximately 30 mm. Even for the displacements, it is possible to observe the dynamics that precede the wire lifting: this dynamical effect still starts about 1.2 seconds before the pantograph passes. The comparison between the lifts at the contact wire (red line) and at the messenger wire (blue line) clearly shows the common motion of the two conductors except for the crushing phase of the dropper, whose duration (see Fig. 19(b)), equal to about 0.2 seconds, corresponds to about 16 m of pantograph travel at a speed of 295 km/h.

The analysis of experimental results relating to the measured acceleration values allows to observe that the maximum peaks measured in correspondence with the upper dropper clamp are between 50 m/s² and 100 m/s², values very similar to those (between 40 m/s² and 100 m/s²) obtained with simulation. The analysis of the accelerations measured in line at the lower dropper clamp also allows to note that the maximum acceleration peaks measured in line

del fattore di conversione è stata identificata una incertezza su questo parametro inferiore allo 0.5% del valore nominale. Combinando questa incertezza con quella dell'algoritmo di pattern matching, l'incertezza standard sugli spostamenti è inferiore a 1 mm per le misure su tutti i pendini. Le stime degli spostamenti degli estremi dei pendini ottenuti dalle due telecamere sono, come atteso, fra loro coincidenti.

In Fig. 19 è riportato un esempio dei risultati ottenuti con le telecamere. In particolare in Fig. 19(a) si riportano i segnali degli spostamenti verticali degli attacchi del pendino conduttore con la fune portante e con il filo di contatto, mentre in Fig. 19(b) è riportata la storia temporale della variazione di lunghezza del pendino conduttore calcolata come la differenza tra gli spostamenti degli attacchi superiore ed inferiore del pendino conduttore. Al fine di interpretare correttamente i risultati, si precisa che spostamenti positivi corrispondono a spostamenti verso il basso e variazioni di lunghezza negative corrispondono ad un avvicinamento fra i due estremi del pendino conduttore. Pertanto, nel caso esaminato, lo schiacciamento del pendino è pari a circa 30 mm. Anche per gli spostamenti si evidenzia una dinamica che precede il

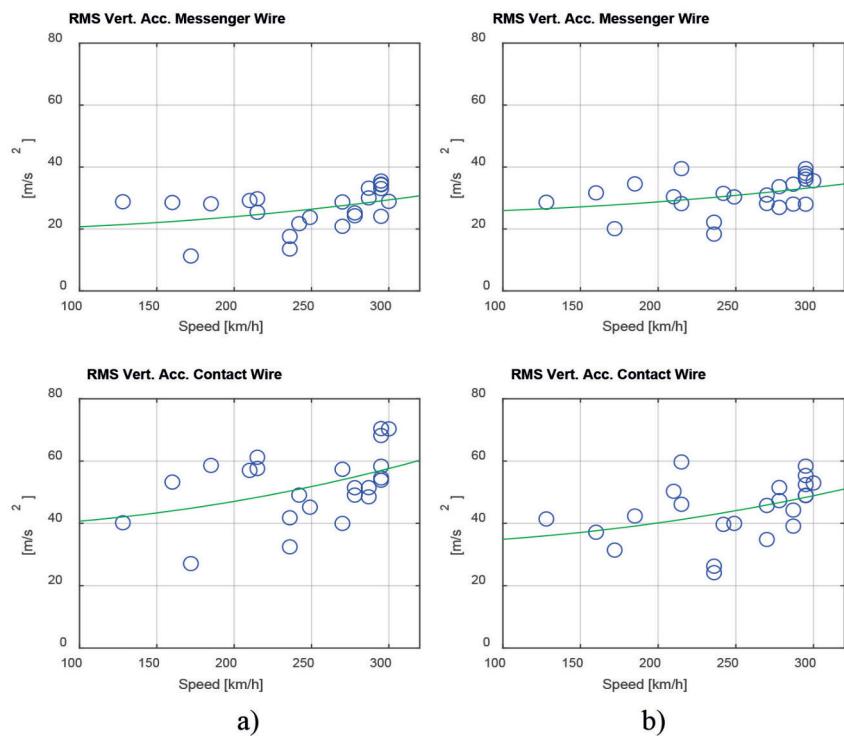


Figura 18 – Valore r.m.s. delle accelerazioni misurate al variare della velocità del treno in corrispondenza degli attacchi tra il pendino conduttore e la fune portante e tra il pendino conduttore e il filo di contatto: a) pendino a monte della sospensione; b) pendino a valle della sospensione. La curva verde rappresenta una curva interpolante del tipo $A+B\cdot V^2$ dove V rappresenta la velocità del treno.
Figure 18 – R.m.s value of the measured accelerations of dropper clamps on the contact wire and on the messenger wire as a function of train speed: a) dropper before the suspension; b) dropper after the suspension. The green curve represents an interpolating curve of the type $A+B\cdot V^2$ where V represents the speed of the train.

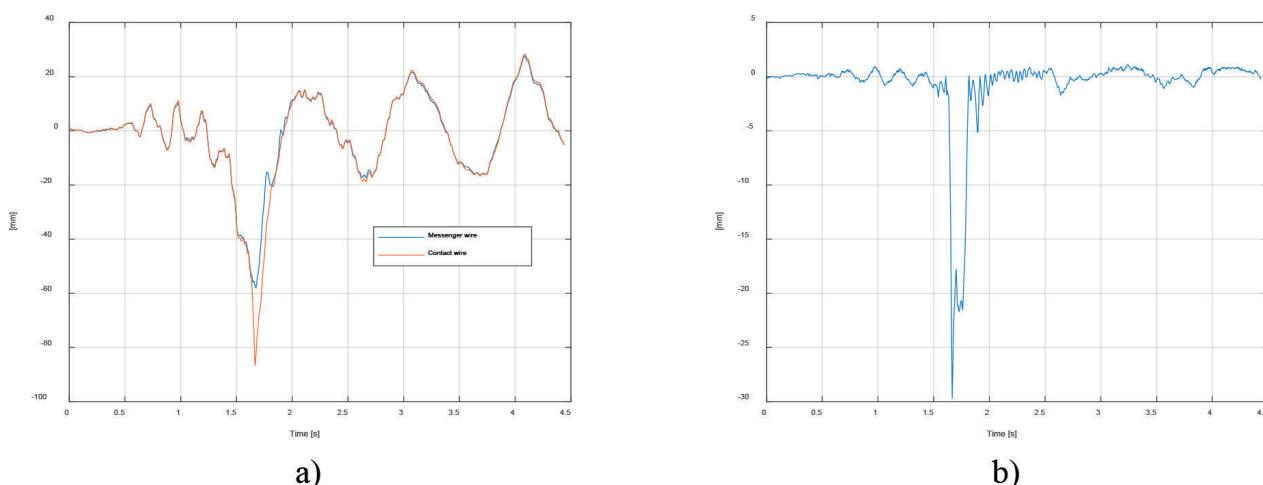


Figura 19 – Storie temporali relative al movimento del pendino conduttore: a) spostamento verticale degli attacchi del pendino conduttore con la fune portante e con il filo di contatto; b) variazione di lunghezza del pendino conduttore. Velocità del treno pari a 295 km/h.

Figure 19 – Time histories related to the dropper motion: a) vertical displacement of the dropper clamps on the messenger wire and contact wire; b) dropper length variation. Train speed equal to 295 km/h.

sollevamento dei conduttori, con un tempo di anticipo pari ancora a circa 1.2 secondi. Il confronto tra i sollevamenti al filo di contatto (linea rossa) ed alla fune portante (linea blu) mostra chiaramente il moto comune dei due conduttori eccetto che per la fase di schiacciamento del pendino, la cui durata (vedi Fig. 19(b)), pari a circa 0.2 secondi, corrisponde a circa 16m di percorrenza del pantografo alla velocità di 295 km/h.

L'analisi dei risultati sperimentali relativi ai valori misurati di accelerazione permette di osservare che i picchi massimi misurati in corrispondenza dell'attacco superiore del pendino sono compresi tra 50 m/s^2 e 100 m/s^2 , valori molto simili a quelli (tra 40 m/s^2 e 100 m/s^2) trovati durante la simulazione. Così come l'analisi delle accelerazioni misurate in linea in corrispondenza dell'attacco inferiore del pendino permette di notare che i picchi massimi di accelerazione misurati in linea (compresi tra 150 m/s^2 e 200 m/s^2) sono paragonabili a quelli ottenuti durante la simulazione (superiori a 150 m/s^2).

Se si analizzano i risultati misurati in linea in termini di spostamento è possibile notare come gli spostamenti degli attacchi inferiori hanno dei valori di picco pari a circa 80 mm per l'attacco inferiore e circa 60 mm per l'attacco superiore. Tali valori misurati sono molto simili a quelli ottenuti durante la simulazione.

Anche la variazione di spostamento del pendino, ovvero la differenza di spostamento tra l'attacco inferiore e l'attacco superiore, misurato in linea è molto simile a quello ottenuto durante la simulazione per i pendini a monte e a valle della sospensione.

Si può quindi concludere che si ha un buon accordo tra i risultati misurati in linea e i risultati ottenuti numericamente con il software PCaDA.

4. La sperimentazione in laboratorio

Il risultato sperimentale relativo al movimento del pendino conduttore al passaggio del pantografo riportato in Fig. 19 rappresenta quello in cui è stato misurato un valore più alto di spostamento dell'attacco inferiore, ovvero dell'attacco del pendino con il filo di contatto. La velocità del treno durante la misura presa in esame era pari a 295 km/h. Tale misura è stata considerata come storia temporale da replicare in laboratorio al fine di studiare il comportamento del pendino conduttore. A tale scopo è stato sviluppato un apposito banco prova.

In Fig. 20 si riportano uno schema e una foto del banco prova sviluppato presso i laboratori del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano mentre in Fig. 21 si riporta una foto dei particolari degli attacchi inferiore e superiore del pendino conduttore montato nel banco prova. Esso è composto da un attuatore idraulico utilizzato per imporre inizialmente il precarico statico e per applicare successivamente il movimento all'attacco inferiore del pendino, ovvero quello collegato in linea con il filo di contatto. L'attacco superiore del pendino è collegato con un cilindro vincolato ad un elemento elastico, a cui è permesso

(between 150 m/s^2 and 200 m/s^2) are comparable to those obtained with the simulation (above 150 m/s^2).

Analysing the displacement measurements obtained during the in line experimental campaign, it is possible to note that the displacements of the lower dropper clamp have peak values of approximately 80 mm while the displacements of the upper dropper clamp have peak values of approximately 60 mm. These measured values are very similar to those obtained during the simulation.

The dropper displacement variation, i.e. the difference in displacement between the lower dropper clamp upper dropper clamp, measured in line is also very similar to that obtained with the simulation for both the droppers before and after the suspension.

It can therefore be concluded that there is good agreement between the results measured in line and the results obtained numerically with the PCaDA software.

4. The laboratory experiments

The experimental result relating to the dropper motion due to the pantograph passage shown in Fig. 19 represents the one in which a higher displacement value of the lower dropper clamp, i.e. the dropper clamp on the contact wire, was measured. The speed of the train during the measurement under examination was equal to 295 km/h. This measurement was considered as a time history to be replicated in the laboratory in order to study the dropper behaviour. A special test bench was developed for this purpose.

Fig. 20 shows a sketch and a picture of the test bench developed in the laboratories of the Department of Mechanical Engineering of Politecnico di Milano while Fig. 21 shows a picture of the details of the lower and upper clamps of the dropper installed in the test bench. It is composed of a hydraulic actuator used to initially impose the static preload and to subsequently apply the motion to the lower dropper clamp, i.e. the one connected in line with the contact wire. The upper dropper clamp is connected to a cylinder constrained to an elastic element, which is only allowed to move vertically, which has the purpose of reproducing the stiffness of the catenary messenger wire.

The displacement imposed on the lower dropper clamp is provided by controlling the displacement of the hydraulic actuator starting from the defined offset position in such a way as to apply a tensile load, or static preload, to the dropper of approximately 100 N. This value is obtained both from practice for the droppers that are positioned near the suspension and both with the aid of the PCaDA software, considering the static configuration of the overhead line.

The reference displacement imposed on the lower dropper clamp by the hydraulic actuator is directly the one obtained during the in line tests, and in particular the one re-

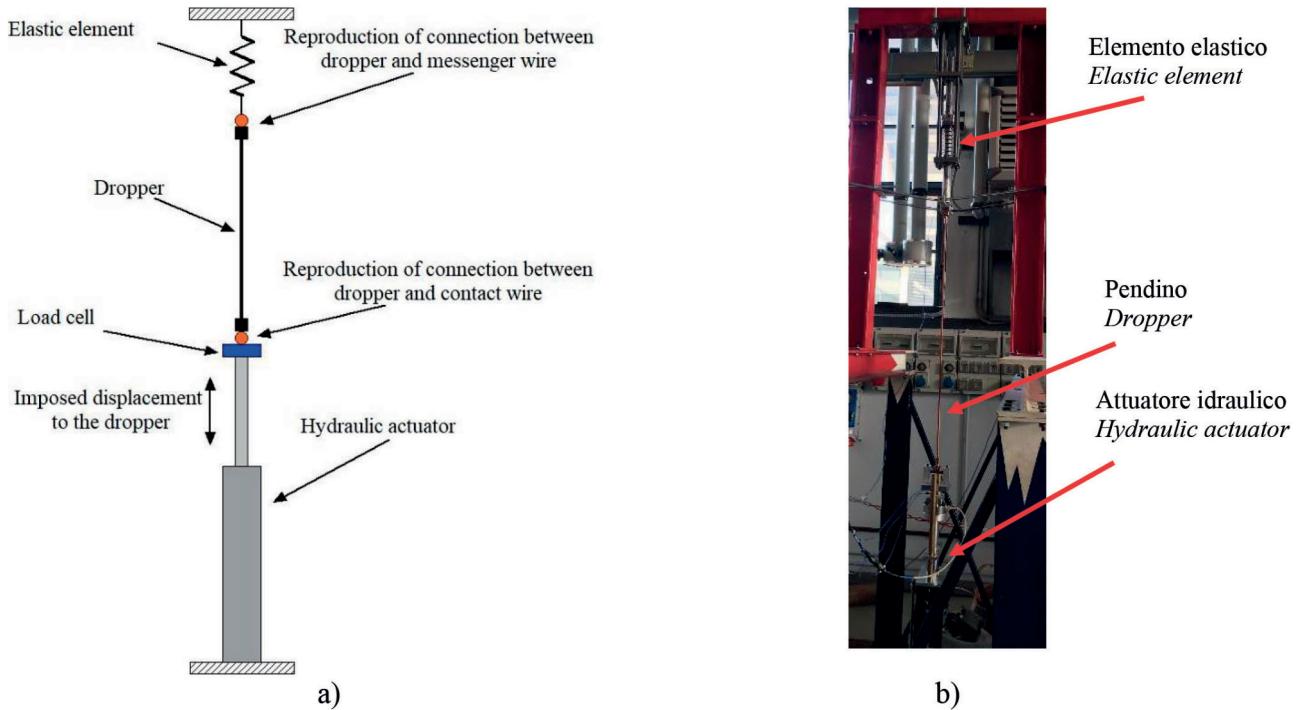


Figura 20 – Il banco prova sviluppato per lo studio del movimento del pendino conduttore in laboratorio: a) schema; b) foto.

Figure 20 – The test bench developed for the study of the dropper motion in the laboratory: a) sketch; b) picture.

so solo lo spostamento verticale, che ha lo scopo di riprodurre la rigidezza della fune portante della catenaria.

Lo spostamento imposto alla connessione inferiore del pendino è fornito controllando lo spostamento dell'attuatore idraulico a partire dalla posizione di offset definita in modo tale da applicare un tiro, o precarico statico, al pendino di circa 100 N. Tale valore è ottenuto sia dalla pratica per i pendini che si trovano posizionati in prossimità della sospensione e sia con l'ausilio del software di simulazione dell'interazione dinamica pantografo-catenaria PCaDA, utilizzando la fase di calcolo dell'assetto statico.

Lo spostamento di riferimento imposto alla connessione inferiore del pendino dall'attuatore idraulico è direttamente quello ottenuto durante le prove in linea, ed in particolare quello riportato in Fig. 19(a) e relativo all'attacco del pendino con il filo di contatto.

Dopo una prima fase di messa a punto e verifica del banco prova, si è iniziata la prova di fatica sul pendino. In tali condizioni, il pendino conduttore si è rotto dopo circa 110000 cicli in corrispondenza dell'attacco superiore. La Fig. 22 rappresenta una foto del pendino conduttore provato al banco prova e rotto.

Questo primo risultato inaspettato e comunque molto più sfavorevole rispetto a quanto osservato in linea ha indotto un'analisi più approfondita per cercare di capire quanto il moto imposto al banco si discosti da quello misurato in linea. Tale differenza è dovuta al fatto che chiaramente le condizioni di vincolo del pendino al banco so-

portato in Fig. 19(a) e relativa all'attacco del pendino sulla fune portante.

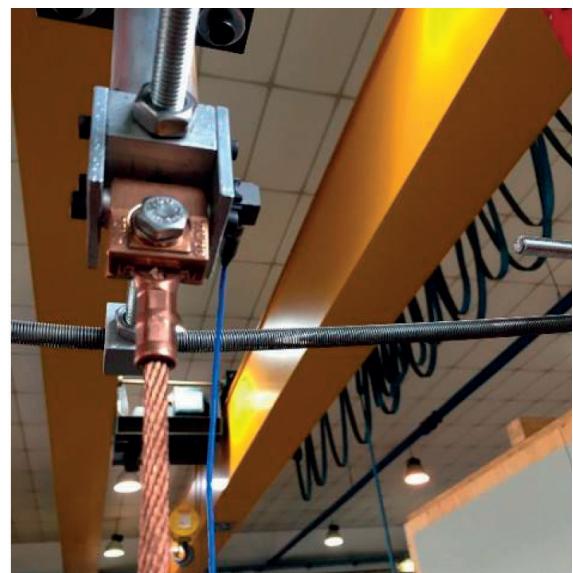
After an initial stage of test bench setting up and testing, the fatigue test on the dropper was started. Under these conditions, the dropper had a failure after about 110000 cycles at the upper dropper clamp. Fig. 22 represents a picture of the dropper tested on the test bench.

This first unexpected and, in any case, much more unfavourable result with respect to what was observed in the real operation led to a more in-depth analysis to try to quantify the difference between the motion imposed on the bench and the one measured during the real operation. The main reason for this difference is that the constraint conditions of the dropper at the test bench are clearly different from those in line. For this purpose, it was decided to use the same cameras used to measure the dropper motion in line to perform the same measurement in laboratory. In particular, the parameter to be investigated was the dropper length variation. As already described, the displacement of the lower dropper clamp is imposed by the hydraulic actuator. Therefore, it coincides with the value measured in line. The displacement of the upper dropper clamp is the result of the dynamics of the mass connected to the upper end of the dropper, with the aim of reproducing, as far as possible, the effect of the messenger wire.

The dropper displacement measurements performed on the test bench with the cameras have shown that, by impos-



a)



b)

Figura 21 – Foto dei particolari degli attacchi inferiore a) e superiore b) del pendino al banco prova.
Figure 21 – Picture of the details of the lower a) and upper b) dropper clamps on the test bench.

no diverse rispetto a quelle in linea. A tale scopo si è deciso di utilizzare le stesse telecamere usate per la misura del movimento del pendino in linea per eseguire la stessa misura in laboratorio. In particolare, il parametro che si è voluto andare ad indagare è stato la variazione di lunghezza-

ing the time history of the displacement at the lower dropper clamp measured in line, a maximum variation of dropper length on the test bench higher than approximately 60% with respect to that measured in line is obtained. In fact, the comparison between Fig. 19(b) and Fig. 23 allows to note



a)



b)

Figura 22 – Foto del primo pendino rotto.
Figure 22 – Picture of the first tested dropper that had failure.

za del pendino. Lo spostamento dell'attacco inferiore del pendino è, come già descritto, imposto dall'attuatore. Esso, quindi, coincide con il valore misurato in linea. Lo spostamento dell'attacco superiore del pendino è il risultato della dinamica della massa collegata all'estremo superiore del pendino, con lo scopo di riprodurre, per quanto possibile, l'effetto della fune portante.

Le misure di spostamento del pendino al banco con le telecamere hanno mostrato che, imponendo la storia temporale di spostamento all'attacco inferiore del pendino misurata in linea, si ottiene una variazione massima di lunghezza del pendino al banco prova superiore di circa il 60% rispetto a quella misurata in linea. Infatti, il confronto tra la Fig. 19(b) e la Fig. 23 permette di notare che la massima variazione di lunghezza del pendino misurata in linea è pari a circa 28 mm, mentre quella misurata al banco è pari a circa 45 mm.

Poiché le azioni dovute alla flessione del pendino rappresentano il contributo principale per determinarne, ad esempio, la vita a fatica, è molto più importante riprodurre al banco la deformata del pendino, legata alla variazione di lunghezza dello stesso, piuttosto che il moto assoluto di uno solo dei due attacchi. A tal fine, si è ridotto percentualmente il valore dello spostamento imposto all'attacco inferiore del pendino in modo da ottenere un valore di variazione massima di lunghezza del pendino simile a

that the maximum variation of dropper length measured in line is equal to about 28 mm, while that measured on the test bench is equal to about 45 mm.

Since the actions due to the dropper bending represent the main contribution to determine, for example, its fatigue life, it is much more important to reproduce on the test bench the deformed shape of the dropper, due to its length variation, rather than the absolute motion of one of the two dropper clamps. To this end, the value of the displacement imposed on the lower dropper clamp was reduced in order to obtain a value of maximum variation of the dropper length similar to that measured in line. Through the measurement with the cameras, it was concluded that, by imposing a displacement value at the lower dropper clamp equal to 60% of that measured in line, it is possible to obtain a maximum variation value of the dropper length similar to that measured in line.

Under these conditions, the second fatigue test was performed and this time the dropper failure occurred after about 130000 cycles at the lower dropper clamp. Fig. 24 reports a picture of the second dropper tested on the test bench.

The difference between the number of cycles until failure obtained for the first dropper and that obtained for the second dropper is due to the fact that the conditions obtained in the second case are less severe. The test conditions for the second dropper which lead to obtaining a number of cycles up to failure equal to approximately 130000 are in any case always more severe than the one occurring in line, mainly due to the different condition imposed in the test bench for the motion of the upper dropper clamp, i.e. the one which in real conditions is connected to the messenger wire. However, this condition does not compromise the results of the laboratory tests.

5. Development of a prototype of an articulated dropper

The main result obtained with the in line and laboratory experimental measurements and with the numerical analysis using the PCADA software was that the actions due to the dropper bending during its motion caused by the pantograph passage represent the main contribution to the actions which influence the dropper fatigue life. Consequently, in order to avoid as much as possible any phenomenon of premature deterioration of the droppers installed near the suspensions, it is suitable to make design modifica-

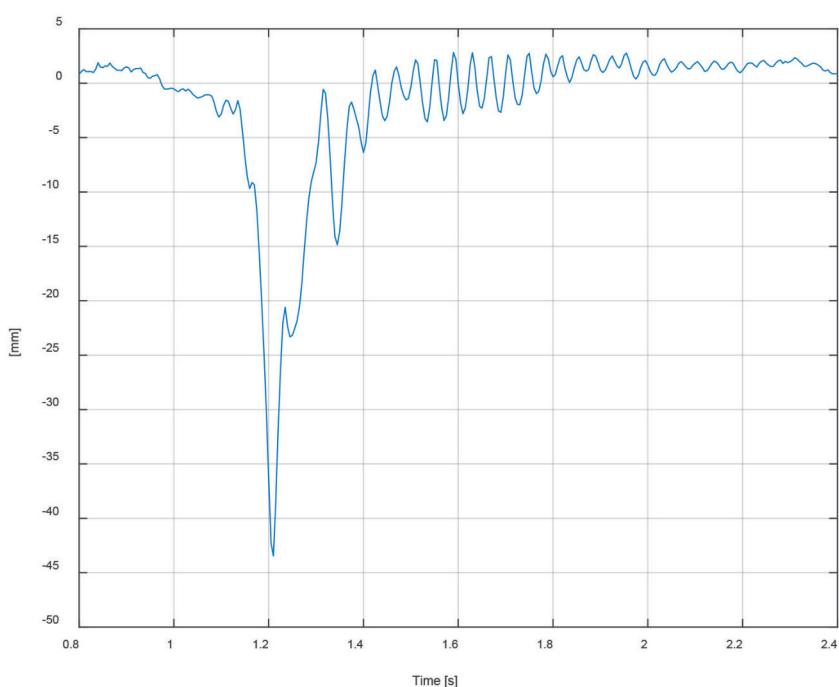
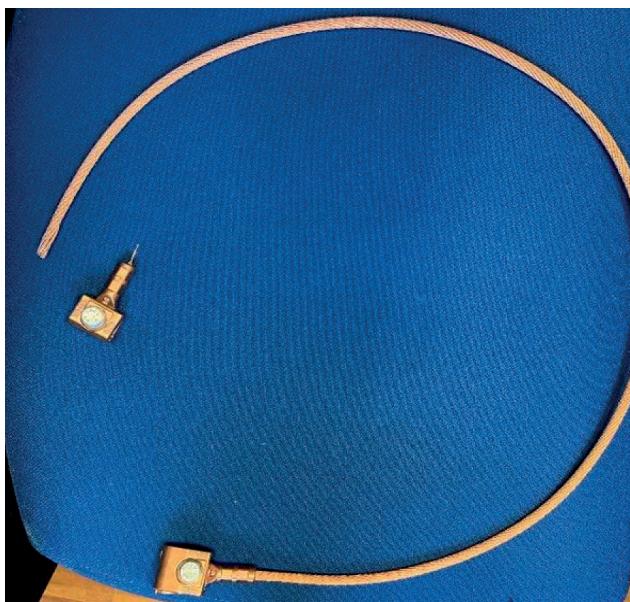


Figura 23 – Storia temporale della variazione di lunghezza del pendino misurata al banco imponendo uno spostamento all'attacco inferiore del pendino esattamente pari a quello misurato in linea.

Figure 23 – Time history of the dropper length variation measured on the bench by imposing a displacement at the lower dropper clamp exactly equal to that measured in line.



a)



b)

Figura 24 – Foto del secondo pendino rotto.
Figure 24 – Picture of the second tested dropper that had failure.

quella misurata in linea. Attraverso la misura con le telecamere, si è giunti alla conclusione che, imponendo un valore di spostamento all'attacco inferiore del pendino pari al 60% di quello misurato in linea, è possibile ottenere un valore di variazione massima di lunghezza del pendino analogo a quella misurata in linea.

In tali condizioni, si è eseguita la seconda prova di fabbrica e, questa volta, il pendino si è rotto dopo circa 130000 cicli in corrispondenza dell'attacco inferiore. La Fig. 24 rappresenta una foto del pendino conduttore provato al banco prova e rotto.

La differenza tra il numero di cicli fino a rottura ottenuto per il primo pendino e quello ottenuto per il secondo pendino è dovuta al fatto che le condizioni ottenute nel secondo caso sono meno gravose. Le condizioni di prova per il secondo pendino che portano ad ottenere un numero di cicli fino a rottura pari a circa 130000 risultano comunque sempre più gravose rispetto a quelle in linea, principalmente a causa della diversa condizione imposta nel banco prova per il movimento dell'attacco superiore del pendino, ovvero quello che nelle condizioni reali è collegato con la fune portante. Tale condizione, comunque, non compromette i risultati delle prove di laboratorio.

5. Sviluppo di un prototipo di pendino conduttore snodato

Il risultato principale ottenuto con le misure sperimentali in linea e in laboratorio e con le analisi numeriche attraverso il software PCaDA è stato che le azioni derivanti dalla flessione del pendino durante il suo moto causato dal passaggio del pantografo rappresentano il contributo

to the dropper such as to reduce the effects of bending during its motion in operation. This result can be obtained by modifying the constraint between the dropper wire (central body) and the two clamps: rather than using a fixed joint as in the current dropper, which causes bending stresses, it is more suitable to use a pin joint (Fig. 25). This approach in ideal and theoretical conditions cancels the bending actions and in real conditions allows it to be significantly reduced.

The presence of an articulation between the central body of the dropper and the clamps on the contact wire and the messenger wire requires the introduction of an additional connecting wire between the clamps and the main dropper wire in order to ensure electrical continuity. However, it is extremely important to ensure that the wire for electrical continuity does not introduce high stiffness to the pin joint. In fact, increasing the stiffness at the pin joint a greater dropper flexural stiffness during its motion is obtained, thus losing the benefit of the introduction of the pin joint constraint (theoretically, in fact, infinitely increasing the stiffness at the pin joint a fixed joint is obtained, thus coming back to the condition of the current dropper). This solution for droppers is already used in some European lines but, in some cases, the already existing solutions have some drawbacks such as incompatibility with the characteristics of the Italian overhead line, as, for example, excessive stiffness at the pin joint due to the particular mechanical characteristics of the wire for electrical continuity which reduces the advantages introduced by the pin joint, or a diameter of the dropper wire that is smaller than the standard dropper used for Italian overhead line. To this end, the cre-

principale alle azioni che influenzano la vita a fatica del pendino stesso. Di conseguenza, al fine di evitare al massimo qualsiasi fenomeno di deterioramento prematuro dei pendini a cavallo delle sospensioni, è opportuno apportare delle modifiche progettuali al pendino tali da ridurre gli effetti della flessione durante il suo moto in esercizio. Questo risultato può essere ottenuto modificando il vincolo tra la fune del pendino conduttore (corpo centrale) e gli attacchi di estremità: piuttosto che usare un incastro come nel pendino attuale, che causa sollecitazioni di flessione, è più indicato usare uno snodo (Fig. 25). Questo approccio in condizioni ideali e teoriche annulla la flessione e in condizioni reali permette di ridurla notevolmente.

La presenza di uno snodo tra il corpo centrale del pendino e gli attacchi con il filo di contatto e la fune portante necessita dell'introduzione di un'ulteriore fune (o cordino) di collegamento tra gli attacchi e la fune principale del pendino conduttore per poter garantire la continuità elettrica. È tuttavia estremamente importante garantire che il cordino di continuità elettrica non introduca un'elevata rigidezza allo snodo. Aumentando, infatti, la rigidezza allo snodo si tende ad ottenere una maggiore rigidezza flessionale del pendino durante il suo moto, perdendo così il beneficio dell'introduzione del vincolo di "snodo" (teoricamente, infatti, aumentando all'infinito la rigidezza allo snodo si ottiene un vincolo di incastro, tornando così alla condizione del pendino conduttore attuale). Tale soluzione per i pendini è già usata in alcuni linee europee ma, in alcuni casi, le soluzioni già esistenti presentano alcuni svantaggi quali delle incompatibilità con le caratteristiche della linea aerea italiana, come, ad esempio, una eccessiva rigidezza in corrispondenza dello snodo a causa delle particolari caratteristiche meccaniche del cordino per la continuità elettrica che riduce i vantaggi introdotti dallo snodo, oppure un diametro della corda del pendino inferiore rispetto al pendino conduttore standard utilizzato per le linee aeree italiane. A tale scopo, la realizzazione di un prototipo di pendino conduttore snodato deve tener conto del fatto che non è possibile discostarsi dal disegno del pendino conduttore attualmente in uso e il cordino per la continuità elettrica deve essere realizzato in modo da avere caratteristiche meccaniche tali da introdurre una bassa rigidezza allo snodo per sfruttarne al meglio i vantaggi.

Il prototipo di pendino "snodato" è stato realizzato a cura del Gruppo Bonomi con le seguenti indicazioni:

- mantenere le dimensioni della fune del corpo centrale del pendino uguali a quelle della fune del pendino attuale, al fine di garantire le medesime caratteristiche di conduzione elettrica;
- vincolare attraverso uno snodo la fune del corpo centrale e i due attacchi di estremità del pendino;
- realizzare il cordino di continuità elettrica in modo da avere una bassa rigidezza allo snodo.

Per poter verificare l'efficacia dell'introduzione dello snodo sull'incremento della vita a fatica del pendino conduttore e comparare le prestazioni del prototipo realizzato rispetto a quelle del pendino attuale, si è deciso di ese-

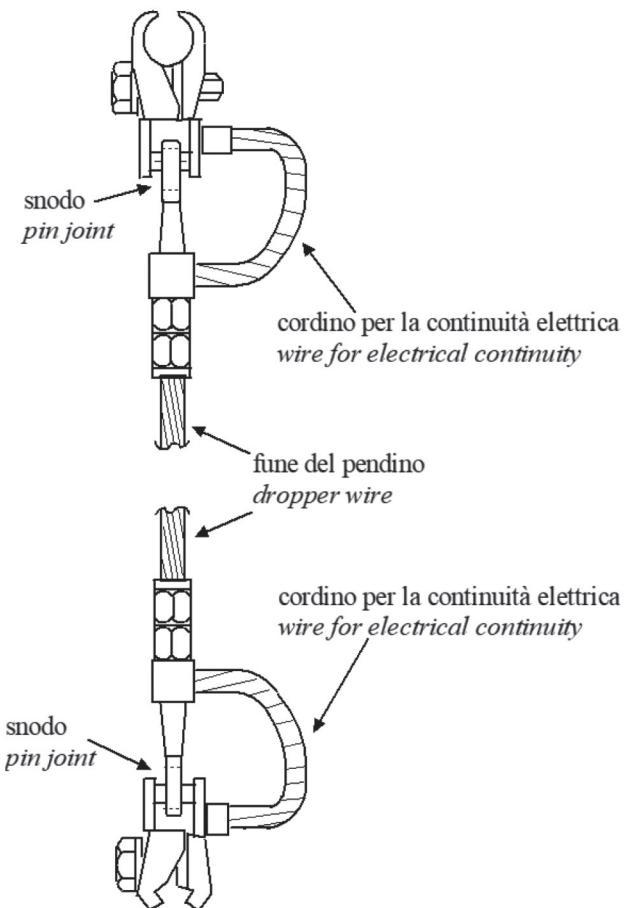


Figura 25 – Schema del prototipo di pendino "snodato".
Figure 25 – Sketch of the articulated dropper prototype.

ation of a prototype of an articulated dropper must take into account the fact that it is not possible to deviate from the design of the dropper currently in use and the wire for electrical continuity must be created in such a way as to have such mechanical characteristics as to introduce a low stiffness at the pin joint.

The articulated dropper prototype was created by the Bonomi Group with the following indications:

- *keep the dimensions of the wire of the dropper central body the same as those of the wire of the current dropper, in order to guarantee the same electrical conduction characteristics;*
- *use a pin joint to connect the wire of the central body and the two clamps of the dropper;*
- *make the wire for the electrical continuity to have low stiffness at the pin joint.*

In order to verify the effectiveness of the introduction of the pin joint on the increase of the fatigue life of the dropper

guire sul prototipo di pendino snodato delle prove di laboratorio utilizzando il medesimo ciclo sintetizzato sulla base delle misure in linea, allo scopo di riprodurre condizioni il più possibile simili a quelle di lavoro.

Il prototipo di pendino snodato ha oltrepassato senza rotture 1.5 milioni di cicli, in cui ciascun ciclo è costituito dal passaggio di un pantografo.

Alla fine della prova di laboratorio si è osservata dell'usura in corrispondenza degli elementi dello snodo causata dal moto relativo tra attacco e fune principale del pendino. Si osserva che l'usura risulta qui accelerata rispetto a quanto avviene in linea, in quanto i cicli di sollevamento sono applicati senza interruzione. Nonostante la presenza dell'usura, che si ritiene inevitabile conseguenza della modalità di funzionamento dello snodo stesso, la vita a fatica ottenuta con il prototipo di pendino si ritiene ampiamente soddisfacente.

6. Conclusioni

Nel presente lavoro si è presentato uno studio sul movimento dei pendini conduttori di una linea aerea ferroviaria ad alta velocità italiana, con riferimento al fenomeno del *buckling* dinamico, cui sono sottoposti i pendini prossimi alla sospensione, in virtù della loro maggiore lunghezza e maggiore valore di schiacciamento relativo tra le due estremità superiore ed inferiore.

Lo studio è stato svolto suddividendo l'attività in una prima fase preparatoria della sperimentazione, basata sulla simulazione dell'interazione pantografo-catenaria, una fase sperimentale in linea per analizzare le condizioni di lavoro del pendino conduttore durante il normale esercizio, una fase di sperimentazione in laboratorio su un banco prova appositamente sviluppato, atto a riprodurre condizioni il più possibile vicine, anche in campo dinamico, alle reali condizioni operative, una fase di analisi dei risultati sperimentali ed interpretazione del fenomeno che ha portato allo sviluppo di un prototipo di pendino conduttore snodato. Quest'ultimo, attraverso la sperimentazione al banco in laboratorio, ha dimostrato di essere in grado di ridurre la flessione indotta dal fenomeno di *buckling* dinamico incrementando di molto le caratteristiche a fatica anche dei pendini che si trovano a lavorare in condizioni di lavoro più gravose, come quelli a cavallo della sospensione.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare il Gruppo Bonomi per l'indispensabile supporto nella realizzazione del prototipo di pendino conduttore con snodo.

and to compare the performances of the developed prototype with respect to those of the current dropper, laboratory tests on the articulated dropper prototype using the same cycle summarized on the basis of in line measurements were carried out.

The articulated dropper prototype passed 1.5 million cycles without any failure: each cycle represents a pantograph passage.

At the end of laboratory test, wear was observed at the pin joint elements caused by the relative motion between the clamp and the main dropper wire. It is observed that the wear is accelerated in laboratory tests with respect to the real operation, as the lifting cycles are applied without interruption. Despite the presence of wear, which is considered an unavoidable consequence of the working principle of the pin joint, the fatigue life obtained with the articulated dropper prototype is considered largely satisfactory.

6. Conclusions

In the present work a study of the motion of dropper of an Italian high-speed railway overhead line is presented, with reference to the phenomenon of dynamic buckling to which the droppers near the suspension are subjected due to their greater length and greater relative crushing value between the upper and lower clamps.

The study was carried out by dividing the activity into a first preparatory phase of the experimentation, based on the simulation of the pantograph-catenary interaction, an in line experimental phase to analyse the dropper working conditions during normal operation, a laboratory testing phase on a specifically developed test bench, capable of reproducing conditions as close as possible to the real operating conditions, a phase of analysis of the experimental results and interpretation of the phenomenon which led to the development of an articulated dropper prototype. The latter, based on laboratory tests on the test bench, has shown that it is able to reduce the bending induced by the dynamic buckling phenomenon, greatly increasing the fatigue characteristics even of the droppers that have to work in more severe conditions, as those near the suspension.

Acknowledgments

The authors wish to thank the Bonomi Group for the essential support in the realization of the articulated dropper prototype.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] G. BUCCA, A. COLLINA, A. LOCONTE, A. SPADINI, E. TANZI (2013), "Studio a creep ed usura di fili di contatto per catenarie in corrente continua: confronto tra fili di contatto in Cu-ETP e CuAg0.1" - Ingegneria Ferroviaria, Vol. 68 (10), pp. 847-865.
- [2] C. BIANCHI, A. LUZI, E. TASSINI (1993), "Captazione della corrente ad alta velocità", Ingegneria Ferroviaria, n.6, pp. 305-329.
- [3] M. PAPI, E. MINGOZZI, A. VIOLI, O. BRUNO, A. LANDI, L. SANI (2000), "La captazione della corrente e l'interazione pantografo - Catenaria", Ingegneria Ferroviaria, n.4, pp. 149-172.
- [4] S. BRUNI, G. BUCCA, A. COLLINA, A. FACCHINETTI (2019), "Chapter 16 Dynamics of the Pantograph- Catenary System" - Handbook of Railway Vehicle Dynamics, Second Edition.
- [5] S. BRUNI, J. AMBROSIO, A. CARNICERO, Y.H. CHO, L. FINNER, M. IKEDA, S.Y. KWON, J.P. MASSAT, S. STICHEL, M. TUR, W. ZHANG (2015), "The results of the pantograph-catenary interaction benchmark". Vehicle System Dynamics, Vol. 53 (3), pp. 412-435, DOI: 10.1080/00423114.2014.953183.
- [6] L. XI-YANG, P. JIN-FANG, T. DE-QIANG, X. ZHI-BIAO, L. JIAN-HUA, M. JI-LIANG, Z. MIN-HAO (2018), "Failure analysis and optimization of integral droppers used in high speed railway catenary system". Engineering Failure Analysis, Vol. 91, pp. 496-506, DOI: 10.1016/j.engfailanal.2018.02.003.
- [7] C. LIMING, P. PEIHOU, H. FAN (2018), "Fatigue life analysis of dropper used in pantograph-catenary system of high-speed railway". Advances in Mechanical Engineering, Vol. 10(5), pp. 1-10, DOI: 10.1177/1687814018776135.
- [8] J.W ZHANG, J.Q. WU, W.R. CHEN, J.F. GUAN, Y. ZHONG, K.J. XU (2019), "Simulation method for dropper dynamic load considering horizontal vibration behaviour". International Journal of Simulation Modelling, Vol. 18 (4), pp. 620-631, DOI: 10.2507/IJSIMM18(4)492.
- [9] Q. YAHANG, X. SHOUNE, L. LIANTAO, Y. BING, Z. TAO, Z., Y. GUANGWU (2022), "Fatigue failure of integral droppers of high-speed railway catenary under impact load". Engineering Failure Analysis, Vol. 134, pp. 1-17, DOI: 10.1016/j.engfailanal.2022.106086.
- [10] A. COLLINA, S. BRUNI (2002), "Numerical simulation of pantograph-overhead equipment interaction". Vehicle System Dynamics. Vol 38(4), pp. 261-291.
- [11] A. COLLINA, S. BRUNI, A. FACCHINETTI, A. ZUIN (2015), "PCaDA statement of methods". Vehicle System Dynamics, Vol. 53(3), pp. 347-356.
- [12] K.J. BATHE (1996), "Finite Element Procedure", Prentice Hall, 1996.