

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

Creep and wear study for contact wire of direct current catenary: comparison between Cu-ETP and CuAg0,1 contact wires

Dott. Ingg. Giuseppe BUCCA^(*), Andrea COLLINA^(*), Antonietta LO CONTE^(*), Antonio SPADINI^(**), Ezio TANZI^(*)

Sommario - L'aumento della velocità e della capacità nel servizio ferroviario richiede un aumento delle prestazioni non solo per il materiale rotabile ma anche per l'infrastruttura. In tale lavoro, si pone l'attenzione sulle caratteristiche che deve presentare la catenaria per la rete 3 kV c.c. per garantire una buona qualità di captazione anche in condizione di doppia captazione a velocità superiori a 200 km/h e un comportamento all'usura accettabile sia per il filo di contatto e sia per gli striscianti. In particolare, di seguito si presenta uno studio del comportamento in laboratorio a creep e ad usura di due diversi materiali di filo di contatto (rame elettrolitico Cu-ETP e lega di rame-argento CuAg0,1) attraverso il quale si è ottenuto un modello interpretativo di usura del filo di contatto che ha permesso, unito ad un software per lo studio dell'interazione dinamica tra pantografo e catenaria, di stimare l'usura per le due catenarie prese in esame, fornendo una valutazione comparativa delle loro prestazioni.

1. Introduzione

L'interazione pantografo-catenaria è stato [1-3] e continua ad essere oggetto di studio in quanto fondamentale per ottenere buone prestazioni dei veicoli ferroviari a trazione elettrica. La necessità di soddisfare l'incremento di potenze richieste dal traffico ferroviario anche per la rete 3 kV in corrente continua (c.c.), pone la necessità di elevare lo standard delle catenarie attualmente in uso. Il provvedimento riconosciuto come più efficace è l'incremento del tiro dei conduttori, ed in particolare del filo di contatto [4,5]. Tale intervento, unito agli effetti sulla temperatura di esercizio del filo di contatto associati ai valori di corrente in gioco, dell'ordine dei 1500 A - 2000 A (in alcuni casi fino a 2800 A), pone delle problematiche in relazione al creep nel filo di contatto. Tenuto conto poi che la

Summary - The increase of the speed and of the capacity in the railway operation requires an increase of the performances of both rolling stock and infrastructure. This paper is focused on the needed characteristics of a 3 kV d.c. catenary to assure a good quality of current collection, even in the condition where two pantographs are in contact, for speed greater than 200 km/h. The wear behaviour of both contact wire and contact strip is taken into account for the analysis of catenary performances. In particular, in this work, an experimental study in laboratory of the creep and wear behaviour for two different materials of contact wire (electrolytic copper Cu-ETP and copper-silver alloy CuAg0,1) is presented. The laboratory analyses have been used to obtain an heuristic model for the wear of contact wire that allows, in combination with a software for the study of the dynamical interaction between pantograph and catenary, to evaluate the wear for the two considered catenaries, providing a comparative evaluation of their performances.

1. Introduction

The interaction between pantograph and catenary has been and continues to be object of study [1-3] due to its fundamental importance to obtain good performances of electrical railway vehicles. The need to satisfy the increase of power required by the railway operation, also for the 3 kV d.c. (direct current) railway line, imposes to increase the performances of the existing catenaries. The most effective measure is the increase of tensile force of contact wire [4,5]. This action, together to the effects of the operation temperature of contact wire due to high values of electrical current, which can reach 1500 A - 2000 A (in some cases also 2800 A), requires the analysis of the creep behaviour of the contact wire. Considering that the stress in the contact wire sections with high

^(*) Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica.
^(**) RFI - Roma.

^(*) Politecnico di Milano, Department of Mechanics.
^(**) RFI - Roma.

sollecitazione nelle sezioni del filo di contatto soggette a maggiore usura, per effetto della conseguente riduzione di sezione, è ulteriormente incrementata, ne risulta che per consentire l'esercizio a correnti e tiri più elevati si impone un passaggio dal classico rame elettrolitico (Cu-ETP) a leghe di rame (tipicamente la lega rame-argento), già in uso presso altre reti europee [4], nel campo della trazione in corrente alternata.

L'avvio di un processo di aggiornamento e rinnovamento degli standard delle catenarie 3 kV c.c. necessita di considerare anche altri aspetti, quali quelli legati alla dinamica dell'interazione pantografo-catenaria e all'usura della coppia strisciante-filo di contatto. A questo scopo è stata avviata una ricerca su queste tematiche tra loro correlate, avente come risultato finale la proposizione di nuovi standard per catenarie 3 kV c.c., considerando tutti gli aspetti che tipicamente influenzano le prestazioni di una catenaria, ovvero creep, usura e qualità della captazione.

Sulla base delle linee guida espresse in [6], in termini di sperimentazioni e proposte di modellazione, la ricerca è stata impostata sia su prove sperimentali di laboratorio, sia su modelli di usura sviluppati nella presente ricerca, unitamente ad altri già disponibili per la simulazione della dinamica dell'interazione pantografo-catenaria. Per quanto concerne i materiali del filo di contatto sui quali concentrare l'attenzione, nello studio effettuato dall'Istituto Sperimentale delle Ferrovie dello Stato (ISFS), riportato in [6], erano già stati considerati diversi materiali sulla base dei fondamentali requisiti di resistività elettrica, resistenza meccanica e ad usura, nel campo di temperatura previsto in esercizio. Le indagini di laboratorio e sul campo riportate in [6], avevano consentito di selezionare come materiale più adatto alla sostituzione del rame elettrolitico la lega di rame argento allo 0.1% (CuAg0,1).

Partendo da queste premesse di base, è stata svolta una ricerca che contempla tutti gli aspetti coinvolti nel problema ossia, come già detto, creep, usura qualità della captazione e sue conseguenze sull'usura. Lo schema in fig. 1 punta a sintetizzare le principali interazioni tra questi aspetti. Il comportamento a creep del materiale della catenaria concorre a determinare, infatti, il valore ammissibile di tiro massimo del conduttore. Valori più elevati di tiro permettono, come si vedrà nei paragrafi che seguono, una migliore qualità di captazione dovuta alla migliore interazione dinamica tra pantografo e catenaria. Infine, il materiale del filo di contatto deve possedere ovviamente un buon comportamento all'usura al fine di ridurre i costi di manutenzione.

Le attività della presente ricerca sono:

- prove di creep nell'intervallo di temperatura 80-100°C e tensioni di 133 MPa e 166 MPa, con lo scopo di confermare le migliori prestazioni, dal punto di vista del creep, della lega CuAg0,1 rispetto al Cu-ETP;
- prove di usura, eseguite con il Banco Prova Striscianti (BPS) del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano [7-9], utilizzando striscianti del tipo Kaspe-

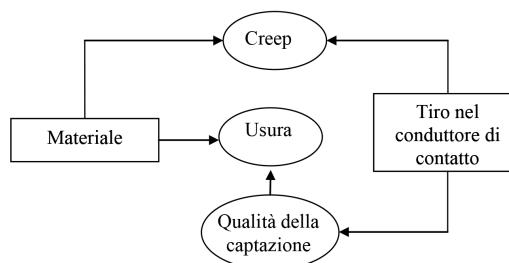


Fig. 1 - Schema delle principali interrelazioni tra gli ambiti inerenti i comportamenti dei materiali e delle condizioni operative. Fig. 1 - Scheme of main correlations among every aspect related to the material behaviour and the operation conditions.

wear increases due to their lower section, the railway operation with higher electrical current and tensile force requires a change in the material of contact wire and in particular from the typical one, electrolytic copper (Cu-ETP) to copper alloys (typically copper-silver alloy), already used in some European railway line [4] in the field of alternate current traction.

The updating and renovation of standards of 3 kV d.c. catenaries also need the analysis of every aspect correlated to the dynamical interaction between pantograph and catenary and to the wear of the couple strip-contact wire. To this aim, a research to these topics considering every aspect that typically influences the catenary performances, as creep, wear and quality of current collection, has been carried out in order to provide proposal for the new standards of 3 kV d.c. catenaries.

According to the guidelines reported in [6] about experimental analysis and models, the research has been organised based on laboratory experimental tests and wear models developed in the present research in combination with other models already available for the simulation of the dynamics of pantograph-catenary interaction. As far as the materials of contact wire to be considered are concerned, in the study performed by Istituto Sperimentale delle Ferrovie dello Stato (ISFS), reported in [6], different materials were taken into account considering the fundamental requirements for the application, i.e. electrical resistivity, mechanical resistance and wear in the temperature field of operation. The investigation in laboratory and in line reported in [6], had allowed to select the copper-silver alloy CuAg0,1 as the most suitable material of contact wire for the replacement of the electrolytic copper.

Considering these preliminary remarks, a research that contemplates every aspect related to this problem, i.e. creep, wear and quality of current collection and its effects on the wear has been carried out. The scheme reported in fig. 1 aims at summarizing the main interactions among these aspects. The creep behaviour of the catenary's material influences the maximum value of tensile force. Higher values of the tensile force improve the quality of current collection due to the enhancement of the dynamical interaction be-

rovski, caratterizzati da una parte portante in rame, con sezione a forma di "U", di spessore pari a circa 3 mm dentro cui si trova la matrice di carbone di larghezza pari a circa 54 mm, forniti direttamente da Trenitalia, adatti alla captazione in c.c., in diverse condizioni di corrente, precarico medio e velocità;

- c) sviluppo di modelli di usura a partire dalle prove richiamate al punto precedente;
- d) ottimizzazione dell'interazione dinamica tra pantografo e linea aerea, di catenarie di nuovo disegno, con tiri incrementati grazie all'adozione di fili di contatto in CuAg0,1 con l'ausilio di un software per lo studio dell'interazione dinamica tra pantografo e catenaria [10];
- e) combinazione dei risultati delle simulazioni del punto d) e dei modelli sviluppati al punto c), per fornire un'indicazione quantitativa dei diversi tassi di usura attesi nelle catenarie di nuovo disegno rispetto a quelle attuali.

Nei paragrafi che seguono verranno descritte le prove di creep e le prove di usura e i corrispondenti risultati ottenuti; si introdurrà il modello euristico di usura, che verrà utilizzato in combinazione con un modello numerico per lo studio della interazione dinamica tra pantografo e catenaria, ed infine si riporteranno e si commenteranno i risultati ottenuti relativi alla stima dell'usura associata alla qualità della captazione per i due diversi materiali di filo di contatto.

2. Prove di creep

Come noto dall'esercizio, i conduttori subiscono un incremento di temperatura rispetto alla temperatura ambiente per gli effetti associati al passaggio di corrente [11]. Questo causa un allungamento nel lungo periodo che porta ad una variazione dell'assetto geometrico della linea, oltre che ad una variazione permanente della posizione delle contrappesature dei conduttori.

Per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche, l'indagine ha preso in esame due valori di temperatura, 80°C e 100°C, valori di fondamentale importanza per valutare il comportamento del filo di contatto in esercizio, secondo la normativa EN50119 [12], tenuto conto dell'influenza della temperatura di "lavoro" sulle prestazioni meccaniche di conduttori tesati.

Questo intervallo corrisponde ad una temperatura ambiente di 35°C ed una sovratemperatura per irraggiamento solare di 10°C. Il carico elettrico di normale esercizio anche nelle condizioni più gravose, per effetto Joule produce una sovratemperatura comunque non superiore a 45°C cui corrisponde una temperatura di lavoro di 90°C.

Le prove sono state eseguite a sforzo costante, utilizzando un provino la cui geometria è riportata nella fig. 2. Il tratto utile è delimitato da due collarini per l'appoggio dell'estensimetro su cui è montato l'LVDT per la misura dell'allungamento nel corso della prova. La temperatura

tween pantograph and catenary, as described in the following sections. Finally, the material of contact wire must have a good wear behaviour in order to reduce the maintenance costs.

The activities of the present research are:

- a) *creep tests in the temperature range 80°C – 100°C with stresses equal to 133 MPa and 166 MPa, with the aim to confirm the best performances, from the creep behaviour point of view, of the CuAg0,1 alloy with respect to the electrolytic copper Cu-ETP;*
- b) *wear tests, carried out using the BPS (Banco Prova Striscianti) test bench developed at the Department of Mechanics of Politecnico di Milano [7-9]. These tests have been carried out using Kasperovski contact strips, characterised by a copper carrying part, with a U-shape cross section 3 mm thick, in which a 54 mm in width impregnated carbon part is fixed. These strips have been provided by Trenitalia and they are able to collect direct current in different conditions (electrical current, static preload and speed values);*
- c) *development of wear models starting from the tests described in the previous item;*
- d) *optimization of the interaction between pantograph and new designed catenary, with higher tensile forces thanks to the adoption of CuAg0,1 contact wire, using a software for the study of dynamical interaction between pantograph and catenary [10];*
- e) *combination of results obtained by simulations described in item d) and by models presented in item c) in order to provide a quantitative information about different wear rates expected by using the new designed catenaries with respect to the existing ones.*

In the following sections, the creep and wear tests and the obtained results will be described; the heuristic wear model will be introduced and it will be used in combination with a numerical model for the study of dynamical interaction between pantograph and catenary; finally, the results in terms of estimation of wear related to the quality of current collection for the two considered different material of contact wire will be presented and discussed.

2. Creep tests

As known by the operation, the wires of overhead line are subjected to an increase of temperature with respect to the ambient temperature due to the effects related to the electrical current flow [11]. This phenomenon causes a stretch that produces a variation of the overhead line geometry and a permanent variation of the tensioning device's position.

As far as the mechanical characteristics are concerned, the research considered two values of temperature, 80°C and 100°C, which are very important values for the evaluation of the contact wire behaviour during the operation, according to EN50119 [12].

sulla lunghezza del tratto utile del provino è misurata mediante tre termocoppie e controllata a $\pm 2^\circ\text{C}$ rispetto alla temperatura di prova. I dati di prova sono riportati nella tabella 1.

I provini sono stati ricavati attraverso una lavorazione con una macchina a controllo numerico da uno spezzone di filo di contatto di 100 mm^2 per entrambi i materiali provati. I livelli di sforzo sono stati applicati considerando le condizioni riassunte nella tabella 1. Ai valori di sforzo minimo (80 MPa), intermedio di 133 MPa e massimo (167 MPa) corrispondono le velocità di propagazione dell'onda trasversale lungo il filo di contatto rispettivamente di 94 m/s, 122 m/s e 136 m/s. In base ai valori di tiro del filo di contatto e sezione (a nuovo e con 20% di sezione usurata), si sono utilizzati come livelli di sforzo 133 MPa e 166 MPa.

Le figure che seguono riportano i risultati delle prove di creep in termini di storia temporale della deformazione naturale, definita come rapporto tra la variazione di lunghezza e la lunghezza iniziale del provino espressa in termini di percentuale. In fig. 3 si riportano le curve di deformazione naturale in funzione del tempo relative al provino in Cu-ETP per le due condizioni di temperatura e stato di sforzo. Si noti che, dopo circa 300 ore, la prova a 100°C e 166 MPa è giunta alla fase di rottura. La fig. 4 mostra il confronto a pari condizioni tra la deformazione naturale del provino in Cu-ETP e il provino in CuAg0,1. Come è possibile notare, la deformazione naturale accumulata dal provino in CuAg0,1 è decisamente inferiore rispetto a quella del provino in Cu-ETP. Questo risultato è espresso anche dal valore inferiore della velocità di deformazione dei provini in CuAg0,1 rispetto a quella dei provini in Cu-ETP (fig. 5).

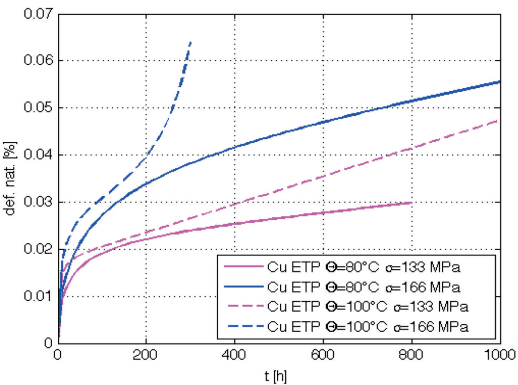


Fig. 3 - Deformazione naturale per il provino Cu-ETP in funzione del tempo nelle diverse condizioni di prova.
Fig. 3 - Natural strain for the Cu-ETP specimen as a function of time for the different test conditions.

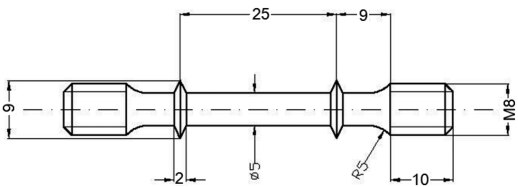


Fig. 2 - Geometria del provino per le prove di creep secondo la [13] (le dimensioni del provino sono in mm).
Fig. 2 - Geometry of the specimen for the creep tests, according to [13].

TABELLA 1 - TABLE 1

SFORZI ASSIALI NOMINALI SUL FILO DI CONTATTO IN DIVERSE CONDIZIONI DI TIRO ED USURA
NOMINAL AXIAL STRESSES ON THE CONTACT WIRE FOR DIFFERENT TENSILE FORCES AND WEAR CONDITIONS

Sezioni - Cross-sections [mm ²]	Tiri - Tensile force [kN]				
	12	15	18,75	20	25
150	80 MPa	100 MPa	125 MPa	133 MPa	167 MPa
120 (80% di 150)	100 MPa	125 MPa	156 MPa	167 MPa	
100	120 MPa	150 MPa			
80 (80% di 100)	150 MPa				

This temperature range corresponds to the ambient temperature equal to 35°C and to an over-temperature due to the sun irradiation of 10°C . The electrical load in the operation, also in the heaviest conditions, produces an over-temperature not greater than 45°C due to Joule effect, obtaining a work temperature of 90°C .

The tests have been carried out with a constant stress. The geometry of the used specimen during the creep tests is reported in fig. 2. The strain during tests has been measured by means of an LVDT sensor and the temperature of the specimen has been monitored by means of three thermocouples fixed on the specimen and controlled in order to have a maximum variation of $\pm 2^\circ\text{C}$ with respect to the test temperature. The test parameters are reported in table 1.

The specimens have been obtained by machining a piece of contact wire with a cross-section of 100 mm^2 for both tested material. The levels of stresses imposed during the tests are summarised in table 1. The values of stresses 80 MPa, 133 MPa and 167 MPa are related to the propagation velocity values of the transversal wave along the wire of 94 m/s, 122 m/s and 136 m/s respectively. Considering the tensile force and cross-section of contact wire (in new condition and with a 20% worn cross-section), two levels of stresses have been used for creep tests, i.e. 133 MPa and 166 MPa.

The following figures report the results of creep tests in terms of time histories of natural strain, defined as the ratio between the length variation and the initial length of

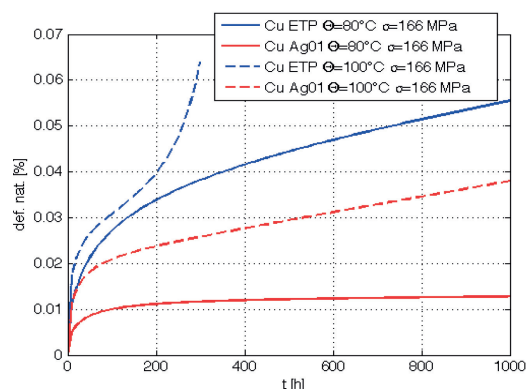


Fig. 4 - Deformazione naturale per il provino Cu-ETP e per il provino CuAg0,1 nelle condizioni di prova comparabili a 166 MPa.
Fig. 4 - Natural strain of the Cu-ETP specimen and of the CuAg0,1 specimen for the test conditions with 166 MPa.

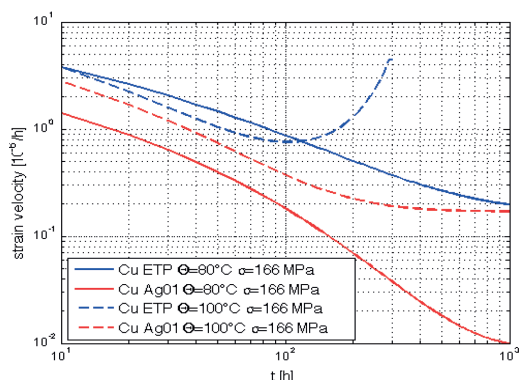


Fig. 5 - Velocità di deformazione naturale in $[10^{-6} \text{ mm}/(\text{mm h})]$ per il provino Cu-ETP e per il provino CuAg0,1 nelle condizioni di prova comparabili a 166 MPa.
Fig. 5 - Strain rate expressed in $[10^{-6} \text{ mm}/(\text{mm h})]$ of the Cu-ETP specimen and of the CuAg0,1 specimen for the test conditions with 166 MPa.

In [6] sono riportati alcuni risultati di prove di creep eseguite dall'Istituto Sperimentale delle FS (ISFS) su spezzoni di filo di Cu-ETP e di CuAg0,1. Tali dati sono stati confrontati con quelli ottenuti con le prove sopra descritte, anche se il confronto è indicativo in quanto le prove presso ISFS erano state condotte su di uno spezzone di filo di contatto mentre quelle eseguite al Politecnico di Milano sono state eseguite su di un provino ricavato dal filo di contatto. In quest'ultimo caso, infatti, si modificano gli effetti associati all'incrudimento del materiale dato dall'operazione di trafilatura nell'ottenimento del filo di contatto. Nonostante tale differenza, si è trovato un buon accordo tra i risultati ottenuti presso ISFS e quelli ottenuti presso il Politecnico di Milano per entrambi i

the specimen expressed in percentage. The curves of the natural strain for the Cu-ETP specimen as a function of time for the two temperature conditions and for the two levels of stress are reported in fig. 3. It is possible to notice that, after about 300 hours, the specimen tested imposing a temperature of 100°C and a stress value of 166 MPa broke. The fig. 4 shows the comparison in the same test conditions between the natural strain of Cu-ETP specimen and of the CuAg0,1 specimen. The analysis of fig. 4 allows to notice that the accumulated natural strain of the CuAg0,1 specimen is definitely lower than that of Cu-ETP specimen. This result is also evident by analysing the fig. 5 that reports the strain rate for the two materials: the strain rate of CuAg0,1 specimen is lower than the strain rate of Cu-ETP specimen.

Some results of creep tests carried out by Istituto Sperimentale delle FS (ISFS), the experimental institute of Italian railway, on pieces of Cu-ETP and CuAg0,1 contact wires are reported in [6]. These results have been compared with that obtained during the creep tests described in this paper, even if this comparison is just as an indication because the tests carried out by ISFS were performed on pieces of contact wire while tests carried out by Politecnico di Milano have been performed on specimens obtained by the contact wire. In this last case, the effect due to the work hardening of material produced by the wire-drawing process is modified. In spite of this difference, a good agreement between the results obtained during tests at ISFS and at Politecnico di Milano for both the considered materials and for both the considered temperatures ($\Theta = 80^\circ\text{C}$ e 100°C) has been found. In fig. 6 the results represented by means of squares are related to the ISFS creep tests [6], while the results represented by means of diamonds are related to the creep tests described in this paper.

By means of the test results, a creep model to describe the strain rate in the secondary stage, i.e. the stage in the strain curve where the strain rate is about constant [14]. The model considered as the most satisfactory to describe the strain rate in the secondary stage is the Bailey - Norton model [14], which has the following expression:

$$\dot{\epsilon} - \dot{\rho} = A \sigma^n \quad (1)$$

where $\dot{\epsilon} - \dot{\rho}$ represents the strain rate in the secondary stage in $[10^{-6} \text{ mm}/(\text{mm h})]$, σ represents the stress $[MPa]$ and A and n represent two coefficients identified by using the method of least squares applied to the experimental results. The values of these parameters are reported in table 2 as a function of temperature Θ considered during the creep tests for both the analysed materials. Fig. 6 shows a logarithmic diagram where experimental results and numerical results provided by the model in equation (1) are reported. The relationship reported in equation (1) enables to calculate the strain rate for different loads.

The analysis of creep behaviour of CuAg0,1 specimen allows to notice that, for the considered temperature values,

materiali oggetto di studio e per entrambe le temperature di prova considerate ($\Theta = 80^{\circ}\text{C}$ e 100°C). In fig. 6, i risultati rappresentati con dei quadrati rappresentano i valori riportati in [6], mentre i risultati rappresentati con dei rombi rappresentano i valori ottenuti con le prove descritte nel presente paragrafo.

I risultati delle prove hanno permesso di derivare i parametri di un modello di creep per quanto riguarda la velocità di deformazione al termine del tratto secondario, ovvero il tratto della curva a velocità di deformazione circa costante [14]. Il modello ritenuto più soddisfacente per descrivere la velocità di deformazione nel tratto secondario è quello di BAILEY – NORTON [14], che ha la seguente espressione:

$$\dot{\epsilon}-\rho = A\sigma^n \quad (1)$$

dove $\dot{\epsilon}-\rho$ rappresenta la velocità di deformazione del tratto secondario, espresso in [10^{-6} mm/(mm h)], σ rappresenta lo sforzo ([MPa]) e A ed n rappresentano dei coefficienti, identificati con il metodo dei minimi quadrati applicato ai risultati sperimentali. I valori di tali parametri sono riportati nella tabella 2 in funzione della temperatura Θ considerata durante le prove per entrambi i materiali analizzati, mentre in fig. 6 si mostra in un diagramma doppio logaritmo il confronto tra i risultati sperimentali e risultati predetti dal modello riportato nell'equazione (1). La legge riportata nell'equazione (1) consente di prevedere la velocità di deformazione per carichi diversi da quelli di prova.

Confrontando il comportamento del provino in Cu-ETP con il provino in CuAg0,1 si osserva che per i valori di temperatura considerati il secondo mostra una dipendenza della velocità di deformazione dallo sforzo nettamente inferiore. Ciò costituisce uno dei principali vantaggi di questa lega di rame.

3. Prove di usura

Scopo principale dei test di usura è di valutare se sussistano differenze significative tra l'utilizzo del filo di contatto in Cu-ETP e del filo di contatto in CuAg0,1 per quanto riguarda i tassi di usura, sia del filo di contatto

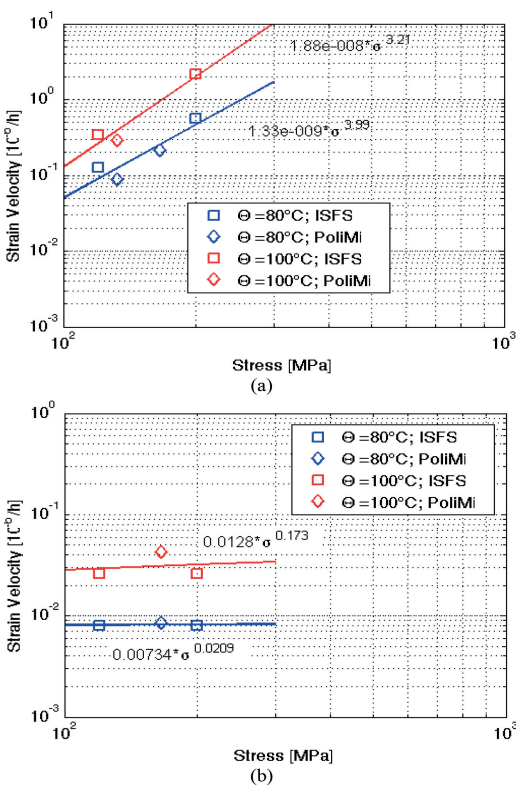


Fig. 6 - Velocità di deformazione naturale in [10^{-6} mm/(mm h)] fornita dal modello utilizzato e confronto con i dati sperimentali: (a) Filo in Cu-ETP; (b) Filo in CuAg0,1.
Fig. 6 - Strain rate in [10^{-6} mm/(mm h)] provided by the considered creep model and comparison with the experimental results: (a) Cu-ETP wire; (b) CuAg0,1 wire.

this material shows a very low dependence of strain rate on the stress. This is one of the main advantages of this copper alloy.

3. Wear tests

The main aim of wear tests is to compare the wear behaviour of the Cu-ETP contact wire and of the CuAg0,1 contact wire in terms of wear rate of both strip and wire for different speed and electrical current conditions.

The wear tests have been carried out by using the BPS (Banco Prova Striscianti) test bench developed at Department of Mechanics of Politecnico di Milano [7-9]. It enables to test full scale pantograph strips up to a sliding speed of 220 km/h and with a level of electrical current up to 1400 A d.c., 500 A 16₂₃ Hz a.c. and 350 A 50 Hz a.c. The main element of the test bench is a fibre-glass disk with a

TABELLA 2 – TABLE 2

PARAMETRI DEL MODELLO DI CREEP PER I DUE MATERIALI DI FILO
PARAMETERS OF CREEP MODEL FOR THE TWO MATERIAL OF CONTACT WIRE

Temperatura Θ [°C] Temperature Θ [°C]	Filo in Cu-ETP Cu-ETP wire		Filo in CuAg0,1 CuAg0,1 wire	
	A	n	A	n
80	1.33 10 ⁻⁹	3.99	7.34 10 ⁻³	0.021
100	1.88 10 ⁻⁸	3.21	1.28 10 ⁻²	0.173

sia degli striscianti, considerando diverse condizioni di velocità e di corrente.

Per le prove di usura in presenza di corrente è stato utilizzato il Banco Prova Striscianti del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano [7-9] che permette di provare striscianti di pantografo in scala 1:1 fino alla velocità di 220 km/h e con un livello di corrente elettrica al contatto fino a 1400 A in corrente continua (c.c.), 500 A 16_{2/3} Hz in corrente alternata (c.a.) e 350 A 50 Hz in c.a. L'elemento principale del banco prova è un disco in vetroresina di diametro pari a 4.4 m, rotante intorno al proprio asse verticale. Sulla circonferenza del disco è collegato elasticamente un filo di contatto dello stesso tipo di quello usato nella linea ferroviaria italiana. Un motore asincrono mette in rotazione il disco attraverso una trasmissione a cinghie trapezoidali.

Lo strisciante del pantografo è montato attraverso due sospensioni ad una piattaforma che si può muovere in direzione radiale rispetto al disco in vetroresina con lo scopo di riprodurre l'effetto della poligonazione.

Un attuatore idraulico, controllato in spostamento, permette di imporre il precarico statico tra lo strisciante ed il filo di contatto. È inoltre presente un apparato di ventilazione per convogliare un flusso d'aria nella zona di contatto alla stessa velocità del disco al fine di riprodurre i fenomeni termici agenti tra lo strisciante e l'aria a causa del movimento del treno (fig. 7).

Al fine di analizzare l'influenza dei principali parametri di prova (velocità, forza media di contatto e corrente) sull'usura di filo e strisciante, si sono eseguite prove a tre livelli di velocità (120 km/h, 160 km/h e 200 km/h), due livelli di forza media di contatto (precarico statico) pari a 60 N e 90 N, considerando anche il caso in cui al valore medio viene aggiunta una componente variabile di tipo si-

diameter of 4.4 m, rotating around its vertical axis. A contact wire, the same used in the real operation in the Italian railway line, is elastically connected on the circumference of the disk. An asynchronous motor moves the disk by means of a belt transmission.

The pantograph strip is mounted by means of two suspensions on a platform that can be moved in radial direction with respect to the fibre-glass disk, aiming at reproducing the staggering effect (zigzag motion).

A hydraulic actuator, moved by controlling the displacement, allows to impose the static preload between the strip and the wire. Moreover, a ventilation apparatus is present to convey an air flow at the same speed of the sliding speed in the contact zone in order to reproduce the thermal phenomena acting between the strip and the air due to the train running.

The wear tests have been carried out considering three levels of sliding speed (120 km/h, 160 km/h and 200 km/h), two levels of static preload equal to 60 N and 90 N in order to analyse the influence of the main parameters (sliding speed, static preload and electrical current). Some tests have been carried out considering not only the static preload but also a sinusoidal variable component with a frequency equal to the frequency of the passage of pantograph under suspension at the test speed for a span length of 60 m (when the speed is equal to 200 km/h the frequency of the passage of pantograph under suspension is 0.93 Hz). As far as the electrical current levels are concerned, three main levels have been chosen (300 A, 750 A and 1000 A) and, only for wear tests on the Cu-ETP contact wire, three more values (0 A, 100 A and 200 A) have been considered in order to deeply investigate the wear mechanism.

The total number of tests is 30: 18 carried out on Cu-

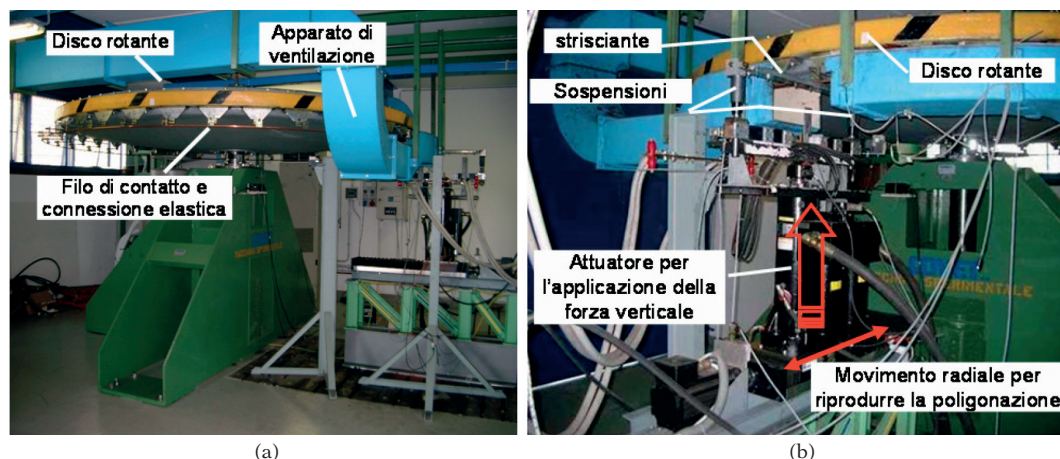


Fig. 7 - (a): Immagine di insieme del banco prova captazione; (b) dettaglio della zona di contatto.

Fig. 7 - (a): Picture of BPS test bench; (b) detail of contact zone.

nusoidale la cui frequenza è scelta pari alla frequenza di passaggio sotto sospensione alla velocità di prova considerando una lunghezza di campata pari a 60 m (per il caso con velocità pari a 200 km/h la frequenza risulta essere 0.93 Hz). Per quanto riguarda i livelli di corrente elettrica, sono stati scelti tre livelli principali (300 A, 750 A e 1000 A) e, al fine di indagare in modo più approfondito, per il solo caso di prove di usura su filo di rame elettrolitico Cu-ETP, sono stati considerati altri tre livelli di corrente (0 A, 100 A e 200 A).

Il numero di prove complessivamente eseguite è pari a 30, di cui 18 con filo di rame elettrolitico Cu-ETP e 12 con filo in lega di rame argento CuAg0,1. Le prove, come già detto, sono state condotte con striscianti tipo Kasperovski. Le figure che seguono riportano i principali risultati delle prove in termini di usura del filo e di strisciante. In particolare, nel seguito si farà riferimento all'indice NWR (Normal Wear Rate), definito come rapporto tra il volume di materiale usurato (in mm³) e la distanza di strisciamento (in km):

$$NWR = \frac{Vol_{usu}}{d}$$

Il volume usurato per lo strisciante viene ricavato considerando il valore di densità del materiale e la misura della differenza di massa dello strisciante stesso tra prima e dopo la prova. Tale misura è ottenuta con una bilancia capace di misurare variazioni di massa di 0.1 g. Il volume usurato del filo di contatto viene invece ottenuto attraverso considerazioni geometriche a partire dalla misura della variazione di spessore del filo tra prima e dopo la prova. Quest'ultima misura è ottenuta con un sensore laser capace di misurare variazioni di spessore con un'incertezza composta di 3 µm.

Le prove sono composte da una serie principale, ovvero una sequenza di prove eseguite nello stesso ordine per entrambi i conduttori, riportata in tabella 3 cui si affiancano ripetizioni di alcune delle condizioni sopra definite. In particolare l'ultima condizione (precarico pari a 90 N, corrente pari a 1000 A e velocità pari a 200 km/h) è stata ripetuta altre due volte.

La fig. 8 riporta il confronto tra l'evoluzione della sezione usurata (mm²) in funzione dei milioni di passaggi di strisciante (10⁶ contact strip passages) per il filo di contatto in Cu-ETP e il filo di contatto in CuAg0,1 sulla base dei risultati trovati con la sperimentazione in laboratorio per le sette prove della serie principale (tabella 3), mentre la fig. 9 riporta il confronto tra l'evoluzione dello spessore dello strisciante, ottenuta a partire dal volume usurato e considerando una superficie di contatto pari al prodotto tra la larghezza dello strisciante (60 mm) e la poligonazione media in linea (400 mm), in funzione della distanza percorsa per i due diversi fili di contatto. Come è possibile notare il comportamento ad usura dei due diversi fili di contatto è molto simile sia per quanto riguarda l'effetto sullo strisciante e sia per l'effetto sul filo stesso. Bisogna ricordare, però, che il filo

ETP contact wire and 12 carried out on CuAg0,1 contact wire. The tests, as already said, have been performed using Kasperovski strips. The following figures report the main test results in terms of wear for both contact wire and strip. In particular, in this paper the NWR (Normal Wear Rate) index is introduced: this index is defined as the ratio between the worn volume of material ([mm³]) and the sliding distance ([km]):

$$NWR = \frac{Vol_{usu}}{d}$$

The worn volume for the strip is obtained considering the value of material's density and the measurement of the variation of strip mass before and after the test. This measurement is obtained by means of a balance able to measure mass variation of 0.1 g. The worn volume of contact wire is obtained by means of geometrical relationship starting from the thickness variation of wire before and after the test. This last measurement is obtained by using a laser sensor able to measure thickness variation with an uncertainty of 3 µm.

The wear tests are composed of a main series (table 3), i.e. a sequence of tests carried out following the same order for both tested contact wires. Moreover, some test conditions have been repeated, as the test with the static preload equal to 90 N, electrical current equal to 1000 A and sliding speed equal to 200 km/h.

The fig. 8 reports the comparison between the evolution of the worn cross section (mm²) for the Cu-ETP contact wire and for the CuAg0,1 contact wire as a function of million contact strip passages ([10⁶ c.s.p.]) considering the experimental results of the main series tests. The fig. 9 reports the comparison between the evolution of the worn thickness of contact strip for the two contact wire materials, obtained by considering the worn volume during the main series tests and a nominal contact surface equal to the strip width (60 mm) times the mean value of the line stagger (400 mm), as a function of the sliding distance. As it is possible to notice, the wear behaviour of the two different contact wires is quite similar either as far as the effect on the strip is concerned or as far as the effect on contact wire

TABELLA 3 – TABLE 3

SERIE PRINCIPALE PER LE PROVE DI USURA
MAIN SERIES OF WEAR TESTS

Prova Test	Precarico Static preload [N]	Corrente Electrical current [A]	Velocità Sliding speed [km/h]
#1	60	300	160
#2	60	750	160
#3	90	300	160
#4	90	750	160
#5-#6-#7	90	1000	200

di contatto in CuAg0,1 può essere testato con un tiro maggiore rispetto al filo di contatto in Cu-ETP a causa del suo miglior comportamento a creep. Per tale motivo ci si aspetta una migliore qualità di captazione che influenzerà positivamente il comportamento ad usura in esercizio.

Nella fig. 10 sono riassunti i risultati trovati in laboratorio dell'usura del filo di contatto per i due diversi materiali in termini di NWR, in funzione del precarico statico e della corrente. Come già accennato, per il solo caso di filo in Cu-ETP sono state eseguite delle prove con valori di corrente pari a 0 A, 100 A e 200 A al fine di indagare i fenomeni di usura in questo intervallo di corrente. Come è possibile notare dalla fig. 10a, i valori di usura del filo di contatto per questi valori di corrente risultano essere molto bassi. Questo fenomeno può essere spiegato considerando che i bassi valori di corrente non generano le condizioni tali da innescare i meccanismi di usura tipici del contatto tra strisciante e filo presenti per correnti più alte ("oxidative wear" e "melt wear", secondo la nota relazione desunta dall'esperienza dell'esercizio) anche a causa del fatto che la temperatura media al contatto varia di circa una decina di gradi.

Le prove eseguite con valore di corrente pari a 300 A hanno mostrato i livelli di usura del filo più alti e crescenti con l'aumentare della forza di contatto, indicando che il fenomeno di usura in tal caso è principalmente di tipo

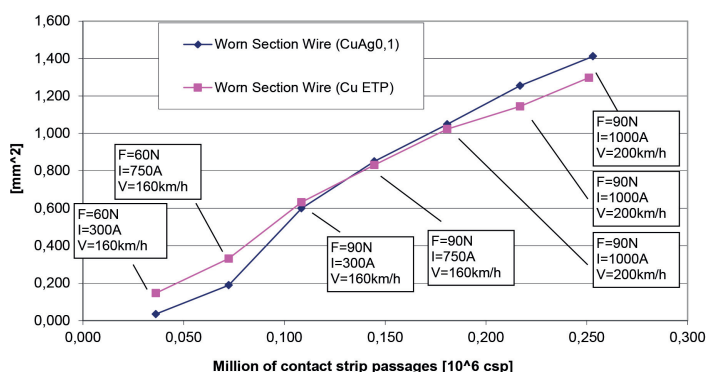


Fig. 8 - Evoluzione della sezione di filo di contatto usurata (in mm²) in funzione dei milioni di passaggi di strisciante ([10⁶ csp]) per i fili in rame elettrolitico (Cu-ETP) e in lega di rame-argento (CuAg0,1) per le sette prove con pari parametri di prova.

Fig. 8 - Evolution of worn cross section of contact wire (mm²) as a function of million contact strip passages ([10⁶ csp]) for the Cu-ETP contact wire and for the CuAg0,1 contact wire. Results are related to the main series tests.

is concerned. But the tensile force applied to the CuAg0,1 contact wire can be greater than the one applied to the Cu-ETP contact wire due to its better creep behaviour. For this reason, a good quality of current collection, which positively influences the wear behaviour of contacting bodies in the real operation, is expected.

In fig. 10 the laboratory results of the NWR for the two tested contact wires as a function of static preload and electrical current are summarized. As already discussed, for the Cu-ETP contact wire tests with electrical current levels of 0 A, 100 A and 200 A have been carried out in order to deeply investigate the wear phenomena in this range of the electrical current. The Figure 10a shows that the wear of the contact wire for these values of electrical current are very low. This phenomenon can be explained considering that the low values of electrical current don't produce the conditions able to cause the typical wear mechanisms present during the contact between the contact strip and the contact wire with higher electrical current ("oxidative wear" and "melt wear", according to the experience coming from the real operation). This is also due to the very low mean value of contact temperature, which had a variation of about ten degrees during the tests with low electrical current.

The tests carried out with a value of electrical current of 300 A showed wear levels of contact wire higher and increasing with the increase of the static preload, meaning that the wear phenomenon is mainly the abrasion

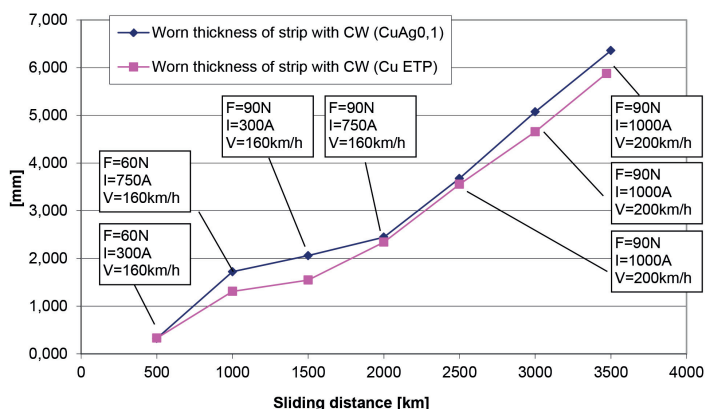


Fig. 9 - Evoluzione dello spessore usurato di strisciante in funzione dello spazio percorso per i fili in rame elettrolitico (Cu-ETP) e in lega di rame-argento (CuAg0,1) per le sette prove con pari parametri di prova.

Fig. 9 - Evolution of worn thickness of contact strip (mm) as a function of sliding distance ([km]) for the Cu-ETP contact wire and for the CuAg0,1 contact wire. Results are related to the main series tests.

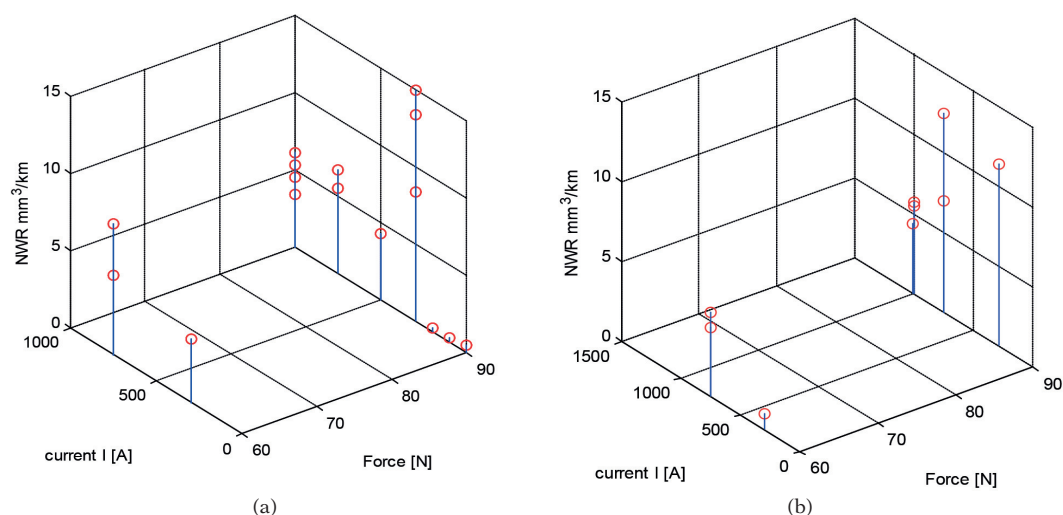


Fig. 10 - Grafico riassuntivo dell'indice di usura specifico del filo di contatto (NWR) in funzione della corrente e della forza media: (a) prove con il filo Cu-ETP; (b) prove con il filo CuAg0,1.

Fig. 10 - Summarizing diagram of normal wear rate (NWR) as a function of the electrical current and of the static preload: (a) tests on the Cu-ETP contact wire; (b) tests on the CuAg0,1 contact wire.

abrasivo in quanto la temperatura al contatto non è tale da generare la fusione del materiale dello strisciante nella zona di contatto. Le prove eseguite con valori di corrente più elevate hanno invece mostrato valori di usura del filo più bassi del caso a 300 A e valori crescenti del precarico statico hanno portato in alcuni casi ad una diminuzione del tasso di usura. Tali andamenti si possono giustificare in prima istanza, come già detto, in base alla combinazione di due principali contributi all'usura, uno di natura meccanica e uno di natura elettrica. Tali contributi sono interagenti tra loro tramite le grandezze forza di contatto e intensità di corrente. La diminuzione del contributo meccanico con la corrente è giustificabile con il fenomeno chiamato "current lubrication" (già espresso in [15]), per cui le condizioni della meccanica al contatto diminuiscono l'effetto abrasivo tipico di un contatto a secco.

4. Modello di usura del filo di contatto

Dai risultati delle prove effettuate, commentati nel paragrafo precedente, si ricava come il livello di usura dipenda sia dalla forza di contatto sia dal livello di corrente, in maniera mutuamente influenzata da entrambi questi parametri. In particolare, con valori di forza più elevata (90 N), si ha una dipendenza decrescente dell'usura con la corrente, mentre per forze più basse si ha un comportamento opposto. Se si considera il livello di corrente pari a 300 A, allora l'usura è crescente con il valore di forza di contatto, mentre con correnti più elevate può anche diminuire. Come già detto, tali andamenti si possono giustificare considerando che l'usura del filo di contatto è

because the contact temperature is not able to produce the material melting in the contact zone. The tests carried out with electrical current greater than 300 A showed wear rate lower than the last one and increasing value of static preload produced in some cases a decrease of wear rate. This behaviour can be explained considering the combination of two main contributions to the wear, the mechanical contribution and the electrical one. These contributions interact by means of the contact force and the electrical current. The decrease of the mechanical contribution for increasing electrical current can be justified considering the phenomenon called "current lubrication" (already described in [15]), which has the effect of a reduction of abrasive phenomenon typical of the dry contact.

4. Wear model of the contact wire

The results obtained by the wear tests described in section 3 show as the wear rate depends mutually on both contact force and electrical current. In particular, with higher contact force values (90 N), the wear rate of contact wire decreases when the electrical current increases, while with lower contact forces the wear behaviour is opposite. If the electrical current value is equal to 300 A, the wear of contact strip increases when the value of contact force increases, while for higher value of electrical current it can decrease. As already discussed, this behaviour can be justified considering that the wear of contact wire is dependent on the combination of two main wear mechanisms, the abrasive wear due to the

combinazione di due principali meccanismi di usura, uno di natura meccanica ("abrasive wear") e uno di natura elettrica ("melting wear"), interagenti tra loro tramite le grandezze forza di contatto e intensità di corrente. I risultati sperimentali mostrano anche come con l'aumentare della corrente diminuisca il contributo meccanico all'usura, fenomeno giustificabile, come detto, con il cosiddetto "current lubrication". D'altra parte, una diminuzione della forza di contatto porta ad un aumento della resistenza elettrica al contatto, incrementando la parte di "melting wear" associata alla potenza dissipata elettricamente, semplificata con un effetto joule.

Nel presente paragrafo si introduce un modello parametrico dell'usura del filo di contatto, basato sui modelli proposti in [15-17]. Il modello utilizzato è espresso in funzione dei principali parametri operativi, con coefficienti che vengono tarati in funzione dei risultati ottenuti dalle prove applicando il metodo dei minimi quadrati. Esso si compone di tre contributi, assimilabili rispettivamente ad una quota parte di origine meccanica, una di origine elettrica per effetto Joule, cui si aggiunge un ulteriore contributo derivante dagli effetti degli archi associati ai distacchi, giungendo così alla seguente formulazione:

$$NWR = k_1 \left(\frac{1}{2} \left(1 + \frac{I_c}{I_o} \right) \right)^{(-\alpha)} \left(\frac{F_m}{F_o} \right)^{\beta} \frac{F_m}{H} + k_2 \frac{R_c(F_m) F_c^2}{HV} (1-u) + k_3 u \frac{V_a I_c}{VH_m \rho} \quad (2)$$

La formula è costruita in modo che il contributo meccanico sia dipendente dal livello di corrente, (decrescente all'aumentare della corrente, in modo da tener conto del fenomeno di "current lubrication"), mentre la quota parte associata all'effetto Joule della corrente aumenta con il quadrato della stessa e dipende proporzionalmente dalla resistenza al contatto, a sua volta dipendente dalla forza di contatto. In tal modo si formalizza l'interdipendenza dei due contributi (elettrico e meccanico). Le grandezze utilizzate nel modello descritto dalla (2) hanno il significato elencato nella tabella 4. Nella stessa tabella si riportano i valori numerici individuati attraverso l'applicazione del metodo dei minimi quadrati al modello descritto in (2) ed ai risultati delle prove. I parametri k_1 , k_2 e k_3 rappresentano rispettivamente i coefficienti che forniscono il "peso" dei singoli contributi meccanico, elettrico e degli archi elettrici all'usura complessiva del filo di contatto.

Nella tabella 4, la formula utilizzata per ottenere la resistenza elettrica al contatto R_c in funzione della forza di contatto F_m è stata ottenuta attraverso una precedente campagna di prove, descritta in modo dettagliato in ([9]).

La fig. 11 mostra il risultato dell'applicazione del metodo dei minimi quadrati nel caso delle sette prove considerate a pari parametri di prova per il caso del filo Cu-ETP e per il caso del filo CuAg0,1, che permette la taratura del modello euristico di usura del filo di contatto riportata in (2). In fig. 11 è evidente come la prova eseguita con valore di corrente pari a 300 A sia la peggiore dal punto di vista dell'usura del filo di contatto. Come già discusso, tale fenomeno di usura si può spiegare considerando che il ti-

friction effects and the melting wear due to the Joule effects. These two wear mechanisms interact by means of the contact force and the electrical current. The experimental results show a decrease of the mechanical contribution to the wear with the increase of the electrical current: this phenomenon is already known [15] and it is called "current lubrication". On the other hand, a decrease of contact force produces an increase of the electrical resistance at the contact, providing an increase of the electrical contribution to the wear due to the electrical dissipated power (Joule effect).

In this section, a parametric wear model for the contact wire is introduced. This model is based on the proposed models in [15-17]. The considered model is expressed as a function of the main operating parameters and it presents coefficients that are tuned considering the experimental results using the method of least square. The presented model is composed of three contributions that represent respectively the mechanical contribution to the wear due to friction, the electrical contribution to the wear due to the Joule effect and the last contribution is the one considering the effect of the electrical arcs to the wear. The equation of the considered model is:

$$NWR = k_1 \left(\frac{1}{2} \left(1 + \frac{I_c}{I_o} \right) \right)^{(-\alpha)} \left(\frac{F_m}{F_o} \right)^{\beta} \frac{F_m}{H} + k_2 \frac{R_c(F_m) F_c^2}{HV} (1-u) + k_3 u \frac{V_a I_c}{VH_m \rho} \quad (2)$$

The equation has been developed taking into account that the mechanical contribution is dependent on the level of the electrical current (it decreases when the electrical current increases in order to consider the effect of the current lubrication). The contribution related to the Joule effect increases with the electrical current raised to the second power and it is proportional to the electrical contact resistance, which depends on the contact force. In this way the mutual correlation between the mechanical and electrical contributions can be taken into account. The variables present in the equation (2) are described in table 4. In the same table, the numerical values of these variables, obtained by using the method of least square, are reported. The parameters k_1 , k_2 and k_3 represent respectively the coefficients that provide the "weight" to the whole wear of contact wire of the mechanical contribution, electrical contribution and electrical arcs' contribution.

In table 4, the relationship used to calculate the electrical contact resistance R_c as a function of contact force F_m has been obtained by means of a previous experimental campaign described in detail in [9].

The fig. 11 shows the comparison between the results obtained by means of the wear model, tuned using the method of least square, and the results obtained by experimental tests of the main series for Cu-ETP contact strip and CuAg0,1 contact strip. Analysing fig. 11 it is possible to notice as the test carried out imposing an electrical current equal to 300 A produces the highest value of the contact wire's wear. As already discussed, this phenomenon can be

TABELLA 4 – TABLE 4

VARIABILI E PARAMETRI DEL MODELLO DI USURA DEL FILO DI CONTATTO E CORRISPONDENTI VALORI
 VARIABLES AND PARAMETERS PRESENT IN THE WEAR MODEL OF CONTACT WIRE

Simbolo Symbol	Significato Meaning	Cu-ETP	CuAg0,1
F_m	Valore medio della forza di contatto [N] Mean value of contact force [N]	-	-
k_1	Grado di partecipazione del contributo meccanico all'usura Weight of mechanical contribution to the whole wear	22.4	30.9
k_2	Grado di partecipazione del contributo elettrico per effetto Joule all'usura Weight of electrical contribution to the whole wear	10.3	12.5
k_3	Grado di partecipazione del contributo degli archi all'usura Weight of contribution due to electrical arcs to the whole wear	0.4	0.4
α	Coefficiente di dipendenza della parte meccanica dall'intensità di corrente Coefficient of dependence for the mechanical contribution on the electrical current	4.5	4.2
β	Grado di non linearità della dipendenza del contributo meccanico dalla forza media Coefficient of non-linear dependence of mechanical contribution on the mean value of contact force	1.8	4.0
I_0	Corrente di riferimento [A] Reference value of electrical current [A]	500	500
I_c	Corrente nominale di prova [A] Reference value of contact force [N]	-	-
F_0	Forza media di riferimento [N] Reference value of contact force [N]	90	90
H	Durezza superficiale del materiale [N/mm ²] Hardness of material [N/mm ²]	700	700
R_c	Resistenza elettrica al contatto filo-strisciante [Ω] $R_c = 0.013 + 0.09 \cdot \exp(-(F_m - 14)/11)$ Electrical contact resistance between strip and wire [Ω] $R_c = 0.013 + 0.09 \cdot \exp(-(F_m - 14)/11)$	-	-
V	Velocità di prova [m/s] Sliding speed in the tests [m/s]	-	-
V_0	Velocità di riferimento [m/s] Reference value of sliding speed [m/s]	44.4	44.4
u	Frazione di distacco (percentuale di distacco in forma decimale) Decimal fraction value of percentage of contact loss	-	-
V_a	Tensione d'arco [V] Electrical arc voltage [V]	50	50
H_m	Calore latente di fusione del rame [kJ/kg] Latent heat of fusion for copper [kJ/kg]	205	205
ρ	Densità del rame [kg/m ³] Density of copper [kg/m ³]	8490	8490

po di usura per questo valore di corrente nominale è principalmente di tipo abrasivo in quanto la temperatura al contatto non è tale da generare la fusione del materiale dello strisciante nella zona di contatto. La fig. 12 mostra un esempio dell'effetto dei tre contributi all'usura del filo di contatto al variare della corrente ed in particolare si riferisce al caso del filo in Cu-ETP nel caso in cui il precarico statico è pari a 60 N, la velocità di strisciamento è pari a 200 km/h e la percentuale di distacco è pari allo 0.05%.

In fig. 13 si riporta l'andamento dell'indice di usura NWR previsto dal modello riportato nell'equazione (2) e tarato con i risultati sperimentali per il filo Cu-ETP (fig. 13(a)) e per il filo CuAg0,1 (fig. 13(b)) nel caso in cui la velocità di strisciamento è pari a 200 km/h, la percentuale di distacco è pari allo 0.05% e per tre valori di precarico

explained considering that the wear mechanism for this nominal value of electrical current is mainly the abrasion because the contact temperature is not so high to produce melting of material in the contact zone. The fig. 12 shows an example of the effect of the three contributions to the wear of contact wire when the electrical current varies. In particular, fig. 12 refers to the Cu-ETP contact wire case with a static preload of 60 N, a sliding speed of 200 km/h and a percentage of contact loss equal to 0.05%.

In fig. 13, the NWR provided by the wear model presented in equation (2) and tuned by means of the experimental results for the two kinds of contact wire in the case of static preload equal to 50 N, 70 N and 90 N, sliding speed equal to 200 km/h and percentage of contact loss equal to 0.05% is reported. It is possible to notice that,

statico, ovvero 50 N, 70 N e 90 N. Come è possibile notare, dal punto di vista dell'usura i due materiali del filo di contatto analizzati in questo lavoro appaiono equivalenti. Il comportamento del filo CuAg0,1 sembrerebbe mostrare un comportamento peggiore per più alti valori di forza e basse correnti, mentre sembrerebbe possedere un comportamento all'usura leggermente migliore rispetto al filo Cu-ETP per i valori più alti di corrente.

5. Simulazioni numeriche dell'interazione dinamica pantografo-catenaria

Una volta ottenuto il modello euristico dell'usura del filo di contatto in funzione dei parametri che influenzano il fenomeno, ovvero la forza di contatto, la corrente al contatto, la percentuale di distacco e la velocità di strisciamento, si è utilizzato il modello numerico per lo studio dell'interazione dinamica pantografo-catenaria, sviluppato dai ricercatori del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano (si rimanda a [10] per una descrizione dettagliata) per ottenere una valutazione quantitativa dell'influenza dei principali parametri sull'usura del filo di contatto. In particolare, fissato e considerato costante il

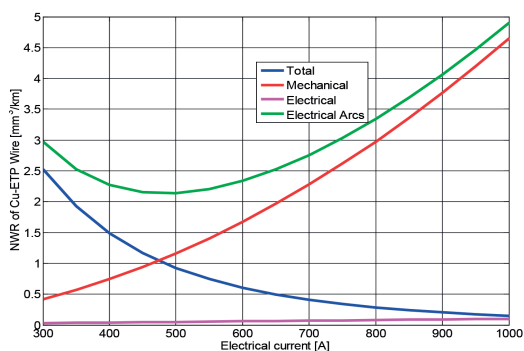


Fig. 12 - Andamento previsto dal modello dell'indice di usura specifico del filo di contatto (NWR) con il filo Cu-ETP con $F_m=60$ N, $u\%=0.05$, $V=200$ km/h: la figura mostra l'andamento dei tre singoli contributi presenti nel modello di usura del filo di contatto (contributo meccanico, elettrico e relativo agli archi elettrici, quindi ai distacchi) in funzione della corrente e l'andamento complessivo previsto dal modello di usura in funzione della corrente elettrica.

Fig. 12 - NWR of contact wire provided by the wear model for the Cu-ETP contact wire with $F_m=60$ N, $u\%=0.05$, $V=200$ km/h: the figure shows the trend of the three contribution to the wear (mechanical contribution, electrical contribution and electrical arcs contribution) and of the whole wear of contact wire as a function of the electrical current.

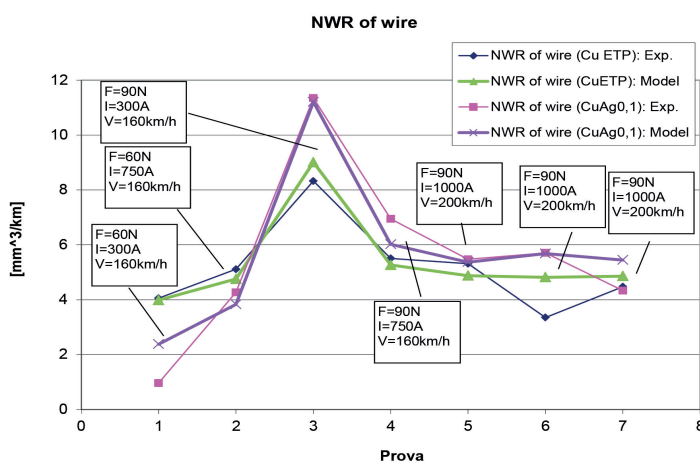


Fig. 11 - Confronto tra l'indice di usura specifico del filo di contatto (NWR) ottenuto con il modello tarato e quello ottenuto con le prove sperimentali per il filo Cu-ETP e per il filo CuAg0,1 per le sette prove con pari parametri di prova.

Fig. 11 - Comparison between the NWR of contact wire obtained using the tuned wear model and the NWR of contact wire obtained by experimental tests for Cu-ETP contact wire and for CuAg0,1 contact wire. The tests of the main series are considered.

from the wear point of view, the two kinds of contact wire have a very similar behaviour. The wear behaviour of CuAg0,1 contact wire seems to be worse for high values of contact force and low values of electrical current, while it seems to be better than the Cu-ETP contact wire for high values of electrical current.

5. Numerical simulations of the dynamical interaction between pantograph and catenary

Once defined the wear model for the contact wire as a function of the operating parameters, i.e. the contact force, the electrical current, the percentage of contact loss and the sliding speed, the numerical model for the study of dynamical interaction between pantograph and catenary, developed by researchers of Department of Mechanics of Politecnico di Milano [10], has been used to provide a quantitative estimation of the influence of the main parameters on the wear of contact wire. In particular, considering a constant value for the electrical current and the sliding speed, the conditions of the pantograph-catenary dynamic interaction for the two considered contact wires have been simulated. The results of the simulations have been the contact force variation and the related percentage of contact loss, which represent the input for the heuristic wear model. In this way, a quantitative estimation of the wear rate for the Cu-ETP contact wire and for the CuAg0,1 contact wire has been obtained. It is important to notice that the different interaction between the two kinds of contact wire and the pantograph has been reproduced simulating a different tensile force. In particular, as discussed in section 2, the CuAg0,1 contact wire has a

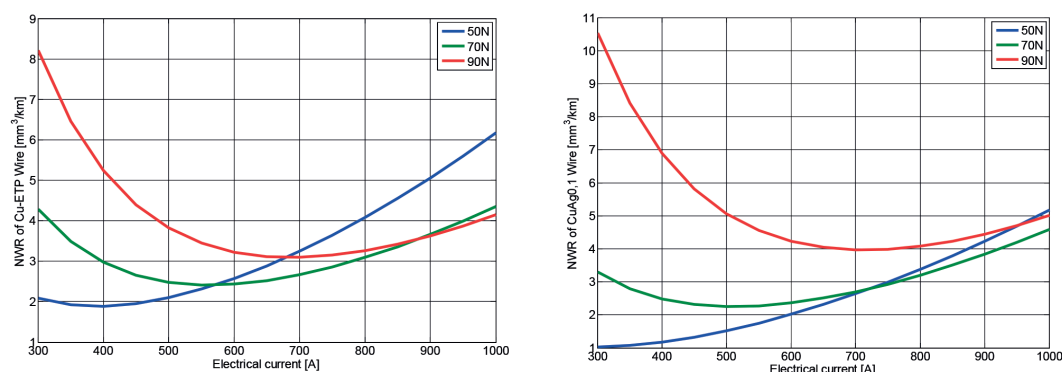


Fig. 13 - Andamento previsto dell'indice di usura specifico del filo di contatto (NWR) con $F_m=50-70-90\text{N}$, $u\%=0.05$, $V=200\text{ km/h}$: (a) filo Cu-ETP; (b) filo CuAg0,1.

Fig. 13 - NWR of contact wire provided by the wear model with $F_m=50-70-90\text{N}$, $u\%=0.05$, $V=200\text{ km/h}$: (a) Cu-ETP contact wire; (b) CuAg0,1 contact wire.

valore di corrente al contatto e di velocità, si sono simulate le condizioni di interazione dinamica tra pantografo e catenaria per i due fili di contatto, ovvero per il filo Cu-ETP e per il filo CuAg0,1, e si è ottenuto l'andamento della forza di contatto e della corrispondente percentuale di distacco che, utilizzati nel modello euristico di usura, hanno fornito una valutazione quantitativa dell'indice di usura per i due tipi di fili di contatto considerati. È bene notare che la differenziazione dell'interazione tra pantografo e i due tipi di filo di contatto considerati è stata eseguita a livello di simulazione dinamica considerando un diverso tiro per i due fili. In particolare, come già precisato nel paragrafo 2, il filo di contatto CuAg0,1 presenta un miglior comportamento a creep rispetto al filo in rame elettrolitico, permettendo l'aumento del tiro in esercizio. A tal fine, si è simulato il comportamento dinamico dell'interazione tra due pantografi del tipo ATR 95 3 kV c.c. in doppia captazione, che rappresenta una condizione più critica dal punto di vista dinamico rispetto alla singola captazione, distanti tra loro 200 m e una catenaria 440 mm² (2 fili di contatto da 100 mm² e due funi portanti da 120 mm²) con tiro dei fili di contatto pari a 10 kN per il caso di filo Cu-ETP e tra due pantografi ATR 95 3 kV c.c. in doppia captazione e una catenaria 480 mm² (2 fili di contatto da 120 mm² e due funi portanti da 120 mm²) con tiro dei fili di contatto pari a 15 kN per il caso di filo CuAg0,1.

Per avere una valutazione dell'influenza della qualità del contatto sull'usura del filo di contatto sono state eseguite delle simulazioni per le due tipologie di catenarie a velocità diverse, con passi di 10 km/h. In tutte le simulazioni non è mai stata considerata alcuna irregolarità della catenaria e il precarico statico considerato durante le simulazioni è stato imposto secondo la seguente relazione:

$$P = 90 + 0.00085 V^2 \quad \text{con } V \text{ in [km/h] e } P \text{ in [N].}$$

Le figure che seguono riportano i principali risultati ottenuti. In particolare, la fig. 14 riporta i principali pa-

better creep behaviour than the Cu-ETP contact wire allowing an increase of the tensile force. In the simulations, the interaction between two ATR 95 3kV d.c. pantographs positioned at a distance of 200 m one to the other and a 440 mm² catenary (two 100 mm² contact wires and two 120 mm² messenger wires) with a tensile force equal to 10 kN for the Cu-ETP contact wire has been considered. The CuAg0,1 contact wire has been simulated considering the same pantograph configuration and a 480 mm² catenary (two 120 mm² contact wires and two 120 mm² messenger wires) with a tensile force equal to 15 kN. The double current collection (two pantographs in contact) has been considered because it is a worse condition with respect to the single current collection (one pantograph in contact).

In order to evaluate the influence of the quality of current collection on the wear of the contact wire numerical simulations for the two kinds of considered catenaries at different speed, with steps of 10 km/h, have been carried out. In every simulation the irregularity of the catenary has never been considered and the static preload in the simulations has been imposed following the relationship:

$$P = 90 + 0.00085 V^2 \quad \text{with } V \text{ in [km/h] and } P \text{ in [N].}$$

The following figures report the main simulation results. In particular, the fig. 14 reports the main parameters that define the quality of current collection for the 440 mm² catenary (Cu-ETP contact wire) for the two pantographs in contact, i.e. the mean value of contact force, the maximum statistical value of contact force ($F_m + 3s$, with F_m mean value and s standard deviation of contact force), the current collection index or minimum statistical value of contact force ($F_m - 3s$) and the limit value of minimum contact force equal to $0.1 F_m$. Moreover, in the fig. 15, the total contact force FZ_{tot} (the sum of the two contact forces between each collector strip of the same pantograph and the

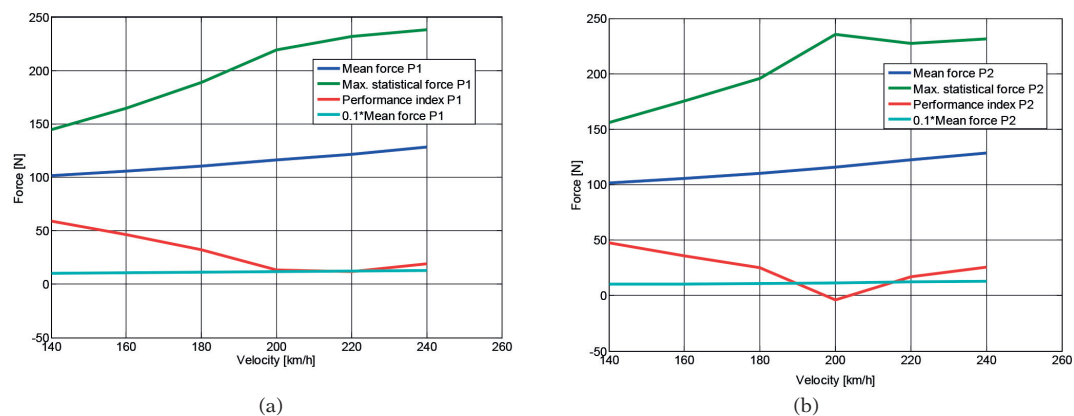


Fig. 14 - Qualità della captazione con la catenaria 440 mm²: (a) primo pantografo ; (b) secondo pantografo.
Fig. 14 - Current collection quality for the 440 mm² catenary: (a) first pantograph; (b) second pantograph.

rametri per la definizione della qualità della captazione nel caso di catenaria 440 mm² (caso di filo di contatto in Cu-ETP) per i due pantografi in contatto, ovvero la forza di contatto media, il valore massimo statistico della forza di contatto ($F_m + 3s$, con F_m valore medio e s deviazione standard della forza di contatto), l'indice di captazione o valore minimo statistico della forza di contatto ($F_m - 3s$) e il limite inferiore della forza di contatto, ovvero il valore $0.1 F_m$. Inoltre, nella fig. 15, si riporta a titolo di esempio la forza di contatto totale FZ_{tot} (somma della forza di contatto dei due archetti dello stesso pantografo) per i due pantografi alla velocità di 200 km/h in termini di distribuzione statistica, di spettro in frequenza e andamento in funzione dello spazio percorso.

catenary) for the two pantographs and for the speed of 200 km/h in terms of statistical distribution, frequency spectrum and variation in the space is reported. Fig. 16 and 17 report the same information for the simulations in the case of 480 mm² catenary (CuAg0,1 contact wire).

As it is possible to notice, the current collection quality becomes worse with the increase of the vehicle speed for both considered catenaries and, at the same speed, the second pantograph shows a worse current collection quality than the first. In effect, at the velocity of 200 km/h the current collection index $F_m - 3s$ for the first pantograph is very close to the limit value $0.1 F_m$ while for the second pantograph the current collection index is negative due to the higher standard deviation value of the contact force (see fig.

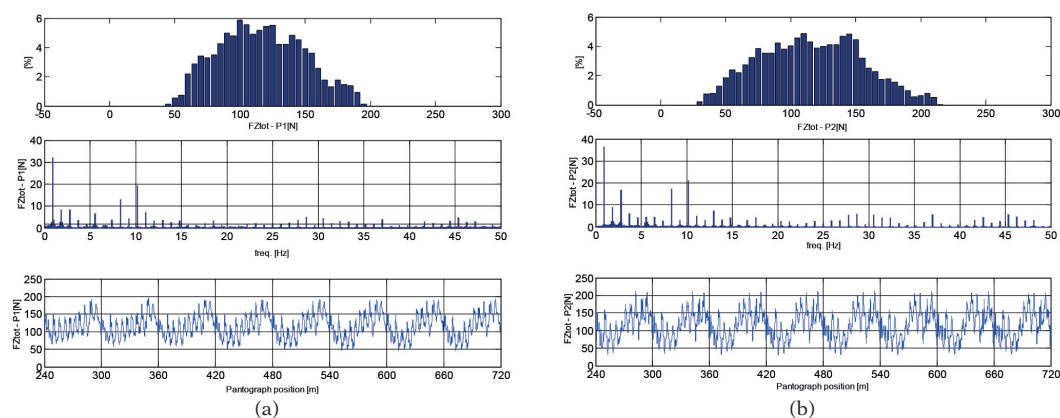


Fig. 15 - Forza di contatto totale (indicata in figura con il simbolo FZ_{tot}) a 200 km/h, con la catenaria 440 mm²: (a) primo pantografo (indice di captazione $F_m - 3s = 18.4$); (b) secondo pantografo (indice di captazione $F_m - 3s = -1.86$).
Fig. 15 - Total contact force FZ_{tot} at 200 km/h, with the 440 mm² catenary: (a) first pantograph (current collection index $F_m - 3s = 18.4$); (b) second pantograph (current collection index $F_m - 3s = -1.86$).

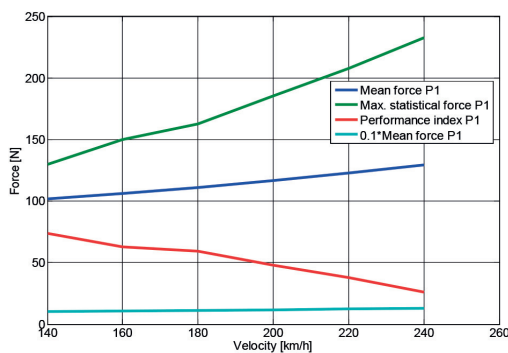
Analogamente, le figg. 16 e 17 riportano i risultati trovati nel caso di simulazione della catenaria 480 mm^2 (caso di filo di contatto in CuAg0,1).

Come è possibile notare, la qualità della captazione diventa via via peggiore con l'aumentare della velocità per entrambe le tipologie di catenaria considerate e, a parità di velocità, il secondo pantografo presenta una qualità della captazione peggiore rispetto al primo pantografo. Infatti, alla velocità di 200 km/h l'indice di captazione $F_m - 3s$ del primo pantografo si trova sul limite di $0.1 F_m$ mentre per il secondo esso è addirittura negativo a causa della più elevata deviazione standard della forza di contatto (si veda la fig. 15). Inoltre, per la catenaria 440 mm^2 , ovvero nel caso in cui il filo di contatto è in Cu-ETP, la qualità della captazione degrada per velocità più basse rispetto alla catenaria 480 mm^2 , ovvero nel caso in cui il filo di contatto è in CuAg0,1. Il motivo di tale com-

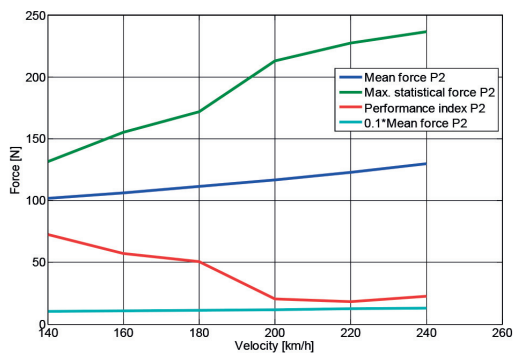
15). Moreover, for the 440 mm^2 catenary, i.e. in the case of Cu-ETP contact wire, the current collection quality worsens for lower speed with respect to the 480 mm^2 catenary, i.e. CuAg0,1 contact wire. This behaviour is due to the different value of tensile force for the two contact wires: a greater value of tensile force improves, as known, the dynamical interaction between pantograph and catenary, decreasing the local effects related to the droppers.

6. Evaluation of wear of contact wire

The contact force obtained by the numerical simulations in combination with the heuristic wear model described by the equation (2) allow to evaluate the wear rate for the two considered contact wires, i.e. the Cu-ETP contact wire and the CuAg0,1 contact wire. If the mean values of the operating conditions are considered in the equation

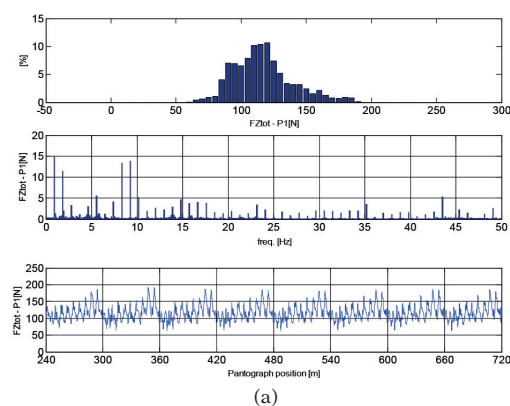


(a)

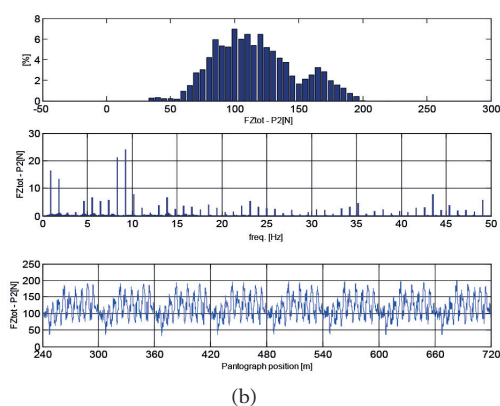


(b)

Fig. 16 - Qualità della captazione con la catenaria 480 mm^2 : (a) primo pantografo; (b) secondo pantografo.
Fig. 16 - Current collection quality for the 480 mm^2 catenary: (a) first pantograph; (b) second pantograph.



(a)



(b)

Fig. 17 - Forza di contatto (indicata in figura con il simbolo FZ_{tot}) a 200 km/h , con la catenaria 480 mm^2 : (a) primo pantografo (indice di captazione $F_m - 3s = 47.6$); (b) secondo pantografo (indice di captazione $F_m - 3s = 20.2$).
Fig. 17 - Total contact force FZ_{tot} at 200 km/h , with the 480 mm^2 catenary: (a) first pantograph (current collection index $F_m - 3s = 47.6$); (b) second pantograph (current collection index $F_m - 3s = 20.2$).

portamento risiede nel diverso tiro del filo di contatto: un tiro maggiore migliora, come noto, la dinamica dell'interazione pantografo-catenaria, diminuendo gli effetti locali associati ai pendini.

6. Stima dell'usura del filo di contatto

A partire dall'andamento della forza di contatto ottenuta dalle simulazioni, in combinazione con il modello di usura sviluppato dalle prove sperimentali, si vuole ora giungere ad una stima comparativa del livello di usura dei due fili di contatto presi in esame, ovvero del filo CuETP e del filo CuAg0,1.

Si osserva che, se si inserissero nel modello di usura del filo di contatto i soli valori medi delle condizioni operative, si otterrebbero risultati che sarebbero indipendenti dalla condizioni dinamica di captazione. Per tenere conto del fatto che materiali diversi consentono tiri diversi nei conduttori, e conseguentemente originano diversi livelli di qualità della captazione, è necessario considerare l'effettiva forza scambiata dinamicamente.

La procedura qui proposta, il cui schema è riportato in fig. 18, prevede di considerare la distribuzione statistica della forza di contatto, con un istogramma che corrisponde alla densità di probabilità, associando alla popolazione della forza di contatto una popolazione di valori di usura, sempre in termini di densità di probabilità. L'area sottesa dalla densità di probabilità dei valori di usura fornisce il livello di usura complessivo, che tiene conto quindi non solo del valore medio della forza di contatto, ma della sua variabilità. In tal modo i diversi effetti dei valori estremi della forza di contatto, in termini di usura meccanica ed elettrica vengono tenuti in conto, ottenendo così una stima del livello medio di usura lungo la linea. Come esempio, in fig. 18 si riporta, a partire dalla distribuzione statistica della forza di contatto (figura in alto a destra), la distribuzione statistica

(2), the wear results would be independent of the current collection quality. In order to take into account that the two contact wire materials allow to impose different tensile force on the contact wire causing different levels of current collection quality, it is necessary to consider the real dynamical contact force.

The proposed procedure, schematized in Figure 18, considers the statistical distribution of contact force (the histogram corresponds to the probability density function), and it correlates this statistical distribution to the contact force the statistical distribution of the contact wire wear, in terms of probability density function. The area of the probability density function of the wear represents the whole wear that is produced not only by the mean value of contact force but also by its dynamical variation. In this way it is possible to take into account the effect of the extreme values of contact force in terms of mechanical and electrical wear, obtaining an estimation of the wear of contact wire along the line. As an example, in fig. 18 the statistical distributions of the mechanical contribution to the wear and of the electrical contribution to the wear (the considered nominal value of the electrical current is equal to 300 A) starting from the statistical distribution of the contact force is reported. For the statistical distributions of mechanical contribution and of electrical contribution, the corresponding value of the integral of the two distributions, which represents the wear rate for the considered example, is reported in the figure (the NWR due to the mechanical contribution is 2.43 mm³/km and the NWR due to the electrical contribution is 0.72 mm³/km).

Applying the presented procedure to the numerical simulations for the two considered catenaries (440 mm² in CuETP and 480 mm² in CuAg0,1) described in the section 5, the results reported in Fig. 19 are obtained. It is possible to notice that, considering a constant value of electrical current equal to 1000 A per strip and considering two pan-

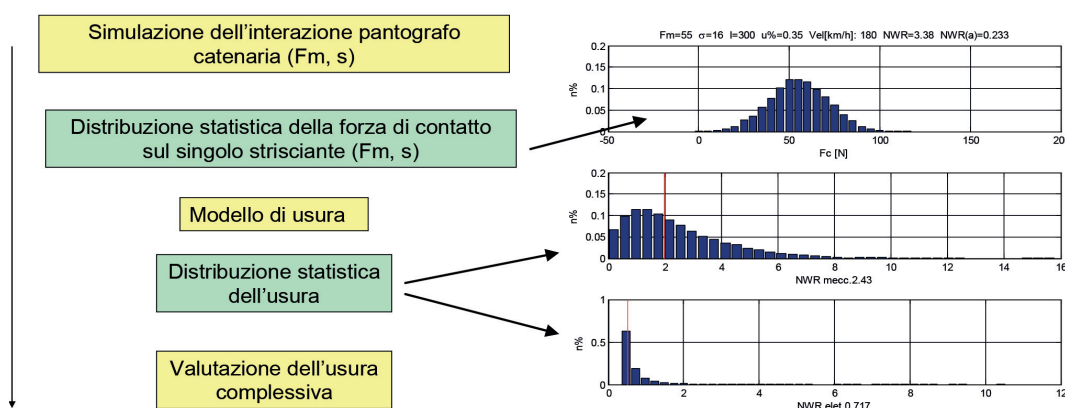


Fig. 18 - Schema dei passi per la valutazione dell'usura in base al modello elettromeccanico di usura e alla distribuzione statistica della forza di contatto ed esempio di applicazione del metodo.

Fig. 18 - Scheme of steps for the evaluation of the wear using the heuristic wear model and the statistical distribution of the contact force and example of the method application.

del contributo meccanico all'usura (figura in centro a destra) e la distribuzione statistica del contributo elettrico all'usura (figura in basso a destra nel caso di un livello di corrente pari a 300 A per strisciante). Per le ultime due figure, si riporta anche il valore dell'integrale delle distribuzioni, che rappresenta il livello di usura per l'esempio considerato (NWR dovuto al contributo meccanico pari a $2.43 \text{ mm}^3/\text{km}$ e NWR dovuto al contributo elettrico pari a $0.72 \text{ mm}^3/\text{km}$).

Applicando la procedura appena descritta ai risultati delle simulazioni numeriche delle due tipologie di catenarie (440 mm^2 in Cu-ETP e 480 mm^2 in CuAg0,1) presentati nel paragrafo 5, si ottengono i risultati riportati in fig. 19, dove è possibile osservare come, considerando una corrente al contatto costante e pari a 1000 A per strisciante e considerando due pantografi in contatto, l'utilizzo di un filo di contatto CuAg0,1, permettendo un tiro maggiore rispetto ad un filo di contatto Cu-ETP, permette di ridurre l'usura dal 10% al 20% in termini di NWR. Inoltre, grazie alla migliore qualità di contatto, è possibile garantire una qualità di captazione accettabile a velocità superiore a 200 km/h anche in doppia captazione, avendo nel contempo una diminuzione del livello di usura complessivo.

7. Conclusioni

Nel presente lavoro si è presentata una procedura per la stima dell'usura del filo di contatto a partire da un modello di usura euristico, tarato sulla base di prove sperimentali di laboratorio, e da un modello numerico per lo studio dinamico dell'interazione tra pantografo e catenaria. Tale procedura ha permesso lo studio comparativo di due tipologie di filo di contatto, ovvero il filo in rame elettrolitico ed il filo in lega di rame ed argento. L'approccio numerico-sperimentale, che ha permesso di caratterizzare ad usura ed a creep i due fili di contatto, ha permesso di mettere in evidenza le migliori prestazioni di una catenaria in CuAg0,1 rispetto ad una catenaria classica in Cu-ETP, in quanto, presentando un miglior comportamento a creep, permette un tiro maggiore del filo di contatto. Inoltre, l'analisi ha permesso di mettere in evidenza che, incrementando il tiro nel caso di catenaria in CuAg0,1 è possibile utilizzare la doppia captazione a 200 km/h e, nel contempo, avere una diminuzione dell'usura del filo di contatto di circa il 20% rispetto al caso di catenaria in Cu-ETP.

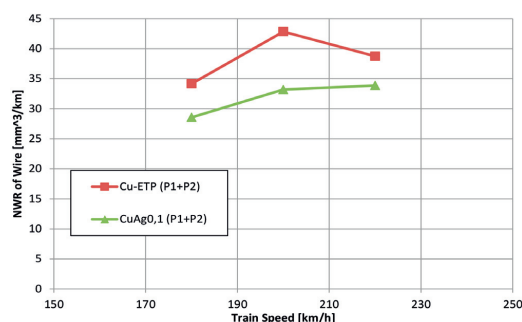


Fig. 19 - Usura stimata complessiva del filo di contatto associata al primo e secondo pantografo.

Fig. 19 - Estimated wear of contact wire related to the first and to the second pantograph.

tographs in contact, the use of CuAg0,1 contact wire reduces the wear of contact wire from 10% to 20% in terms of NWR with respect to the Cu-ETP contact wire. Moreover, due to the better quality of contact, it is possible to assure a better quality of current collection at speed greater than 200 km/h also with two pantographs in contact, with a reduction of the whole wear rate.

7. Conclusions

In the present work a procedure for the evaluation of contact wire's wear starting from a heuristic wear model, tuned by means of laboratory experiments, and from a numerical model for the analysis of dynamical interaction between pantograph and catenary has been presented. This procedure allowed the comparative analysis of two kinds of contact wire, i.e. the Cu-ETP contact wire and the CuAg0,1 contact wire. The numerical-experimental approach, based on the wear and creep characterization of the two contact wires, showed the best performances of CuAg0,1 contact wire, especially in terms of creep behaviour, with respect to the Cu-ETP contact wire. The analysis enabled to point out that, increasing the tensile force on the CuAg0,1 contact wire, the current collection with two pantographs in contact is possible at 200 km/h decreasing the wear of contact wire of about the 20% with respect to the Cu-ETP contact wire.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] BIANCHI, TACCI, VANDI, "Studi sull'interazione dinamica pantografi-catenaria con programma di simulazione agli elementi finiti", Ingegneria Ferroviaria, novembre 1991, pp. 647-667.
- [2] BIANCHI, LUZI, TASSINI, "Captazione della corrente ad alta velocità", Ingegneria Ferroviaria, giugno 1993, pp. 305-329.
- [3] PAPI, MINGOZZI, VIOLI, BRUNO, LANDI, SANI, "La captazione della corrente e l'interazione pantografo- Catenaria", Ingegneria Ferroviaria, aprile 2000, pp. 149-172.
- [4] KIESSLING F., PUSCHMANN R., SCHMIEDER A., "Contact lines for electric railways: planning, design, implementation", Siemens AG, Publics Corporate Publishing, Munich, 2001.

- [5] BUCCA G., CARNEVALE M., COLLINA A., FACCHINETTI A., RESTA F., "Extending pantograph dynamics assessment in laboratory to the evaluation of dynamic performances in real operating environment", in IAVSD'09 21st Symposium, Stockholm, 17th-21st august 2009.
- [6] Nuovi conduttori per linee di contatto a 3 kVc.c. e 25 kVc.a. Informativa per il responsabile della direzione manutenzione, Ingegneria di Manutenzione, S.O. Trazione Elettrica
- [7] DIANA G., MANIGRASSO R., BOCCIOLONE M., MAPELLI F., COLLINA A., "Banco prova materiali per striscianti", Ingegneria Ferroviaria, marzo 2003, pp. 295-301.
- [8] Bucca G., Collina A., "A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph-catenary system", Wear, vol. 266, 2009, pp. 46-59.
- [9] BUCCA G., COLLINA A., MANIGRASSO R., MAPELLI F., TARSIANO D., "Analysis of electrical interferences related to the current collection quality in pantograph-catenary interaction", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2011, Vol. 225, 5, pp. 483-500.
- [10] COLLINA A., BRUNI S., "Numerical simulation of pantograph-overhead equipment interaction", Vehicle System Dynamics, 2002, vol. 38 (n. 4), pp. 261-291.
- [11] BORGWARDT H., "Verschleißverhalten des Fahrdrat der Oberleitung", Elektrische Bahnen, 1989.
- [12] European Standard EN 50119 Railway applications – Fixed installations – Electric traction overhead contact lines, 2001.
- [13] ASTM E139-06 "Standard Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials".
- [14] GAROFALO F., "Fundamentals of Creep and Creep Rupture in Metals", Mec Millan Company, New York, 1965.
- [15] KLASAS D., BENSON F.A., HACKAM R., EVISON P.R., "Wear in simulated railway overhead current collection systems", Wear, 126, 1988, pp. 167-190.
- [16] BRUNI S., BUCCA G., COLLINA A., FACCHINETTI A., MELZI S., "Pantograph-catenary dynamic interaction in the medium-high frequency range", Vehicle System Dynamics, 41, pp. 697-706.
- [17] USUDA T., IKEDA M., YAMASHITA Y., "Prediction of Contact Wire Wear in High-speed Railways", in WCRR 2011 9th World Congress on Railway Research, Lille, 22nd-26th May 2011.

Sommaire

ETUDE PAR « CREEP » ET USURE DES FILS DE CONTACTE POUR CATÉNAIRE EN COURANT CONTINU : COMPARAISON ENTRE LES FILS DE CONTACT EN Cu-ETP ET CuAg0,1

L'augmentation de la vitesse et de la capacité dans le service ferroviaire requiert une augmentation des performances par seulement pour le matériel roulant, mais aussi pour l'infrastructure. Dans un tel travail, on pose l'attention sur les caractéristiques qui doivent être présentées par la caténaire pour le réseau 3kV c.c. pour garantir une bonne qualité de captation aussi en conditions de double captation aux vitesses au delà de 200 km/h et un comportement à l'usure acceptable pour le fil de contacte ainsi que pour les matériaux frottant. En particulier, on présente ici par la suite une étude du comportement en laboratoire par « creep » et usure de deux différents matériaux pour fil de contacte (cuivre électrolytique Cu-ETP et aloi de cuivre-argent CuAg0,1) à travers lequel on a obtenu un modèle interprétatif de l'usure du fil de contacte qui a permis, grâce aussi à l'utilisation d'un logiciel pour l'étude de l'interaction dynamique entre pantographe et caténaire, d'estimer l'usure pour les deux caténaires en examen, tout en fournissant un' évaluation comparative de leurs performances.

Zusammenfassung

STUDIEN DES FAHRDRAHTSVERHALTENS UNTER SCHLUPF- UND VERSCHLEIß-BEDINGUNGEN FÜR GLEICHSTROMFAHRLEITUNGEN. VERGLEICH VON FAHRDRÄHTEN AUS KUPFER ODER AUS SILBER-KUPFER-LEGIERUNG Cu-Ag 01.

Höhere Geschwindigkeiten benötigen bessere Dienstleistungen von Fahrzeugen und Infrastruktur. Hier werden die Merkmale erwähnt, die eine moderne 3 kV Gleichstromfahrleitung haben soll, um eine gute Stromabnahme bis über 200 km/h zu gewährleisten. Im Labor wurden zwei Fahrdrähtwerkstoffen ausprobiert, d.h. einfaches elektrolytische Kupfer und die Kupfer-Silber-Legierung CuAg01 unter die obengenannten physikalischen Bedingungen. Davon wurde ein Verschleißmodell entwickelt, das zusammen mit einem rechnerischen Verfahren die dynamische Wechselwirkungen zwischen Stromabnehmer und Fahrleitung simuliert. Vorstellung der Resultaten und deren Analyse.