

FENOMENI DI FRETTING-FATIGUE SU UN CONDUTTORE ELETTRICO

Marco Boniardi, Giorgio Diana, Chiara Tagliabue

I conduttori elettrici aerei per linee di alta tensione sono funi metalliche costituite da più fili avvolti ad elica in strati successivi attorno a un filo/anima centrale. La vita in servizio di questi componenti spesso è drasticamente ridotta dalle vibrazioni eoliche che generano, nella vicinanza dei morsetti di sospensione e dei dispositivi di ancoraggio, movimenti di scorrimento relativo di piccola ampiezza tra le superfici dei singoli fili a contatto tra loro.

Questo fenomeno provoca sul componente il danneggiamento denominato fretting-fatigue, che rappresenta una delle cause principali di rottura dei fili dei conduttori e, in condizioni eccezionali, dell'intera fune.

Scopo dell'attività di failure analysis qui descritta è identificare la morfologia nonché comprendere la natura e le cause dei fenomeni coinvolti nel cedimento di un conduttore di tipo AAAC (in lega di alluminio 6101), composto da 61 fili (su quattro strati concentrici) appartenente ad una linea ad alta tensione a fascio binato senza ammortizzatori di vibrazione né distanziatori.

Per lo svolgimento dell'attività è stata seguita una tipica procedura di failure analysis, prendendo in considerazione sia il conduttore danneggiatosi in esercizio che un conduttore nuovo delle medesime caratteristiche. L'analisi visiva e l'esame frattografico hanno evidenziato le tipiche caratteristiche morfologiche del fenomeno di fretting-fatigue; le prove di trazione e le analisi chimiche eseguite sia sul conduttore nuovo che su quello esercito hanno escluso la presenza di difetti o anomalie nel materiale. L'insieme degli esami effettuati ha permesso di identificare nei fenomeni di vibrazione eolica la causa scatenante del danneggiamento.

Per evitare il ripetersi del fenomeno, si è consigliato l'attrezzamento della linea con distanziatori e ammortizzatori: tali accorgimenti hanno risolto in modo definitivo il problema lamentato.

PAROLE CHIAVE: fatica, alluminio e leghe, tribologia, caratterizzazione materiali

CONDUTTORI ELETTRICI E PRINCIPALI MECCANISMI DI DANNEGGIAMENTO

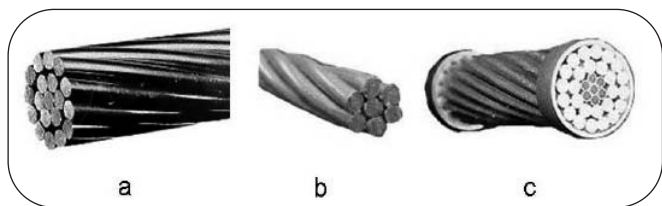
Il trasporto di energia elettrica ad alta tensione viene effettuato in moltissimi casi mediante linee aeree. Queste linee sono esposte continuamente all'ambiente esterno, specificamente all'aggressione degli agenti atmosferici presenti. La conoscenza dei fenomeni che intervengono nel danneggiamento dei componenti (conduttori, isolanti elettrici, morsetti, giunzioni) è molto importante per poter effettuare un monitoraggio efficace della linea con conseguenti interventi tempestivi, in modo da evitare che il danneggiamento degeneri con il

tempo in veri e propri cedimenti strutturali [1].

I principali problemi di deterioramento riscontrati su queste linee si riferiscono alla formazione di cricche per fragilità negli isolanti in materiale ceramico e a fenomeni di corrosione o danneggiamento meccanico dei conduttori in lega metallica per effetto dell'azione dell'ambiente o del vento. I conduttori elettrici sono il componente più importante e costoso delle linee ad alta tensione e il loro deterioramento è causato molto spesso dalle vibrazioni indotte dall'azione del vento. Soprattutto nel caso di nuove tipologie di conduttori, per cui non esiste esperienza di progettazione a fatica, o per linee di nuova realizzazione, può capitare che si verificano fenomeni di cedimento per fatica o fretting-fatigue [1].

I conduttori elettrici utilizzati per le linee ad alta tensione sono funi composte da un numero variabile di fili avvolti ad elica. Il materiale usato per la realizzazione di questi fili è di differente natura [2]. Nei conduttori tipo AAC (All Aluminium Conductor) i fili che compongono

Marco Boniardi, Giorgio Diana, Chiara Tagliabue
Dipartimento di Meccanica,
Politecnico di Milano, Milano



▲
Fig. 1

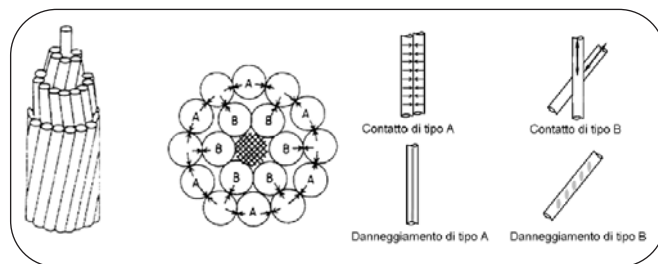
Diversi tipi di conduttore: a) AAC, b) AAAC, c) ACSR [2].

Different kinds of electrical conductor: a) AAC, b) AAAC, c) ACSR [2].

la fune sono tutti in alluminio commercialmente puro (ottenuto per raffinazione elettrolitica – grado E.C.), con un contenuto minimo di alluminio pari a 99,5%. Questi conduttori solitamente sono usati nelle zone urbane, in cui le campate sono brevi, o nelle zone costiere a motivo della loro elevata resistenza a corrosione (Fig. 1.a). Vi sono poi i conduttori tipo AAAC (All Aluminium Alloy Conductors) che sono realizzati con leghe di alluminio contenenti magnesio e silicio ed aventi elevata conducibilità elettrica (una delle leghe più usate è la 6201). I conduttori tipo AAAC sono caratterizzati dall'aver una superiore resistenza a corrosione, un miglior rapporto resistenza meccanica/peso e maggiore conduttività elettrica a parità di diametro, rispetto ad un conduttore tipo AAC. Normalmente sono utilizzati nelle zone costiere e nelle aree in cui sono predominanti i problemi corrosivi (Fig. 1.b). L'ultima tipologia disponibile è quella dei conduttori tipo ACSR (Aluminium Conductors Steel Reinforced) che sono costituiti da un'anima centrale (filo singolo o trefolo) in acciaio ricoperta da fili di alluminio (grado E.C.); la parte in acciaio può variare dal 6% al 40% della sezione del conduttore. Data l'elevata resistenza meccanica, vengono utilizzati per linee di attraversamento fiumi, linee molto alte rispetto al suolo o installazioni con campate particolarmente lunghe. (Fig. 1.c).

La principale causa di deterioramento in esercizio dei conduttori elettrici è di tipo meccanico ed è da ricondurre a fenomeni di vibrazione eolica [1, 3]. Il vento, generando vortici di fluido, sottopone il conduttore elettrico a forze alternate di sollevamento e abbassamento o ad oscillazioni nel piano orizzontale che inducono vibrazioni meccaniche. Questi movimenti vibratorii crescono fino alla frequenza di risonanza del conduttore (le tipiche frequenze vanno dai 10 ai 30 Hz), con ampiezza di vibrazione dell'ordine del diametro del conduttore stesso. Le vibrazioni eoliche inducono sforzi di flessione alternata sul conduttore che possono variare molto per intensità e durata a seconda del tipo e dell'intensità dei venti agenti. In determinate condizioni, l'oscillazione del conduttore può generare fenomeni di fretting o usura per sfregamento tra i fili di alluminio: il fenomeno è più marcato in corrispondenza dei morsetti e degli elementi di fissaggio e nel caso in cui le sollecitazioni meccaniche agenti sul conduttore siano particolarmente severe (sia in termini di vibrazioni eoliche che di tensione di saturazione dei conduttori) si possono manifestare rotture dei singoli fili o, peggio, il cedimento dell'intero conduttore [1, 5].

Per cercare di ridurre il più possibile i danneggiamenti indotti dalle vibrazioni eoliche vengono montati sulle linee elettriche, a distanze regolari, degli smorzatori di



▲
Fig. 2

Contatti tra fili in funi a spirale. Contatto di tipo A: contatto di linea tra fili appartenenti allo stesso strato; contatto di tipo B: contatto tipo trellis tra fili appartenenti a strati diversi [9].

Intervire contacts in spiral strands. Type A contact: line contact within layers; type-B contact: trellis contact between layers [9].

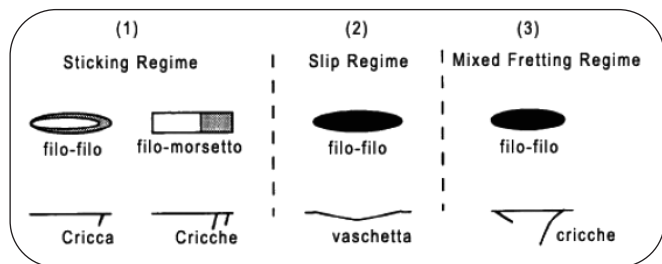
vibrazione (spacer dumpers) mediante morsetti [4].

FENOMENI DI FRETING NEI CONDUTTORI

I cedimenti per fretting sono forme di danneggiamento che si verificano quando due superfici a contatto sono sottoposte a moti relativi periodici con spostamenti di piccola entità. Il fretting porta alla formazione di micro-particelle che sono il prodotto della reazione chimica tra le sostanze abrasive dalla superficie e l'ambiente circostante. Nel caso di conduttori per linee aeree, le superfici a contatto sono rappresentate dai fili di alluminio, l'ambiente è l'aria e il prodotto di ossidazione è costituito da ossido di alluminio (tipo Al_2O_3) di colore nerastro [1].

In aggiunta al semplice fenomeno di usura per fretting, è possibile talvolta osservare anche il cosiddetto fenomeno di fretting-fatigue, in cui si ha l'azione combinata del fretting e delle sollecitazioni meccaniche che inducono un danneggiamento per fatica. In tale eventualità il danneggiamento per usura (fretting) in termini di materiale asportato è lieve mentre predomina invece la riduzione della resistenza a fatica [6].

In condizione di fretting-fatigue la resistenza a fatica del componente può subire riduzioni particolarmente significative. Prove di laboratorio eseguite su provini lisci in acciaio di differente composizione chimica hanno rilevato che il limite di fatica in presenza di fretting-fatigue è dell'ordine del 30% in meno rispetto al caso in assenza di fretting [7, 8]; prove eseguite su funi tipo ACSR (ai sensi delle norme IEEE) mostrano che, in presenza di fretting-fatigue, il limite di fatica dei fili è pari al 4%-5% del loro carico di rottura [5]. Spesso il fenomeno di fretting fatigue si manifesta in prossimità di un elemento di fissaggio dove le oscillazioni/vibrazioni dei fili di alluminio provocano, dopo decine di milioni di cicli, la rottura per fatica dei fili più esterni della fune [1]. I parametri che influiscono sul fenomeno di fretting-fatigue sono numerosi: ampiezza degli spostamenti, valore e distribuzione della pressione di contatto, tipologia dei materiali usati e condizioni delle superfici a contatto, forze di attrito e sforzi vicino alla superficie, frequenza dei cicli di vibrazione, temperatura, aggressività dell'ambiente [4].

▲
Fig. 3

Regimi di fretting e modi di nucleazione delle cricche per fretting [5].

Fretting regime and its fretting cracking mode [5].

Da un punto di vista metallurgico il danneggiamento si manifesta sia sottoforma di meccanismo di usura (con progressiva riduzione della sezione resistente del filo), sia come un fenomeno di

fatica in quanto le discontinuità superficiali prodotte sulla superficie del filo costituiscono un innesco preferenziale delle cricche di fatica.

Il fenomeno di fretting-fatigue è molto complesso e, nel caso delle funi, può innescarsi nei numerosi punti di contatto presenti tra filo e filo o tra filo ed elemento di fissaggio (morsetto).

Con riferimento alla Fig. 2 è possibile identificare due tipologie di contatto tra i fili di un conduttore. Un primo tipo di contatto è quello tra fili adiacenti appartenenti allo stesso strato (tipo A). Il contatto di tipo A può essere considerato come il contatto lineare tra due cilindri paralleli e tale contatto ha come effetto quello di influenzare la rigidità assiale, torsionale e flessionale senza vincoli della fune nel suo complesso. Questo tipo di contatto si trova anche nei fasci paralleli o con angolo d'elica basso, in cui influenza non solo le proprietà elastiche, ma anche la vita a fatica in quanto i fenomeni di fretting sulle linee di contatto possono ridurre in modo significativo la vita a fatica dei fili. Il secondo tipo di contatto è quello che si riscontra normalmente tra fili di strati differenti nelle funi in cui, per minimizzare la coppia generata nel fascio avvolto a elica, i vari strati vengono avvolti in direzioni opposte. Da questo tipo di avvolgimento risulta che i fili di due strati successivi si incrociano con un certo angolo formando un contatto in un punto, che viene denominato contatto rettilineo o a reticolo (tipo B). Dal momento che questi contatti sono localizzati in punti definiti (idealmente il contatto è puntuale), gli sforzi di contatto sono molto più elevati di quelli che si generano nei contatti di linea; questi contatti puntuali influenzano molto meno la rigidità della fune, ma giocano un ruolo fondamentale per il comportamento a fatica e a fretting-fatigue.

La conoscenza dei tipi di contatto, della natura dei movimenti in loro corrispondenza e delle distribuzioni di sforzi ad essi associate è fondamentale per comprendere le proprietà elastiche, di isteresi e a fatica delle funi [9]. Indipendentemente dal fatto che il regime di carico sia assiale o flessionale e che, conseguentemente, si abbiano modi di spostamento differenti in corrispondenza dei contatti tra strati diversi, è stato dimostrato che la vita a fatica della fune è controllata principalmente dallo stato di sforzi in corrispondenza di contatti di tipo B [9]. La

teoria e i dati sperimentali mostrano inoltre che le fratture dei fili interni avvengono prima di quelle dei fili esterni.

Altro elemento di valutazione è la morfologia dei "segni" di danneggiamento rimasti sui fili in corrispondenza dei punti di contatto. Si possono distinguere sia tracce "statiche" derivanti dalla deformazione plastica imposta dal morsetto durante il montaggio degli smorzatori che tracce "dinamiche" prodotte dai fenomeni di fretting. Alcune tracce si presentano perciò solo come deformazioni plastiche, altre sono segni di usura, altre ancora sono un misto tra le due precedenti. Solitamente nei punti di contatto di tipo A si trovano tracce di danneggiamento strette e lineari, in corrispondenza dei contatti di tipo B, invece, i segni di danneggiamento hanno forma ellittica.

Studi effettuati sul comportamento a fretting dei conduttori elettrici hanno identificato tre diversi possibili regimi di fretting che provocano differenti tipi di danneggiamento sulla fune [5] (Fig. 3).

Il regime Stick, o regime di scorrimento parziale (regime 1), interessa tutti i punti di contatto tra i fili esterni e il morsetto e tra fili nella porzione di fune interna al morsetto. In questi punti si hanno elevati carichi radiali nel conduttore ed elevati carichi normali nel contatto; si generano piccoli microslettamenti solo lungo il bordo della zona di contatto, con usura molto contenuta, ed è necessario un elevato numero di cicli perché si nuclei una cricca di fatica. La cricca ha una direzione di innesco quasi perpendicolare alla superficie (80°) e propaga per fatica con un angolo di circa 65° [4]. La superficie di frattura dei fili rotti in questo regime solitamente ha un andamento quasi planare, molto vicino alla sezione trasversale del filo.

Il regime Slip, o regime di scorrimento (regime 2), interessa i contatti esterni alla zona di afferraggio. I carichi radiali sono più contenuti e si hanno scorrimenti relativi elevati tra i fili; molte particelle vengono distaccate dalla superficie e le tracce di fretting crescono rapidamente all'aumentare del numero di cicli. Dal punto di vista della nucleazione delle cricche, invece, questo regime è poco dannoso.

Il regime Mixed, o regime misto (regime 3), si osserva nell'ultima parte della zona di contatto tra conduttore e morsetto; il numero di tracce correlate a questo regime è minore rispetto ai precedenti. Il danneggiamento dei punti di contatto è intermedio rispetto a quello dei due regimi già descritti, ma più vicino al caso di regime di parziale scorrimento (regime 1). Il regime di fretting misto è il più critico dal punto di vista della nucleazione delle cricche, infatti si possono osservare cricche corte (minori di $100\ \mu\text{m}$) dopo un contenuto numero di cicli a flessione; le cricche hanno un basso angolo d'innesco (25°) rispetto alla superficie e propagano per fatica inclinate di circa 65° . L'andamento delle superfici di frattura che si formano in questo regime segue un piano inclinato di 45° rispetto all'asse del filo con un breve tratto piano perpendicolare all'asse. Inoltre la deformazione plastica ciclica della superficie è più evidente e si creano delle zone scure (dark zones), che non si trovano in corrispondenza dei regimi 1 e 2. Il degrado superficiale dei fili di alluminio avviene per distacco di particelle e meccanismi di delaminazione (formazione di cricche parallele all'orientazione della microstruttura) che portano

alla formazione di detriti di ossido di alluminio (Al₂O₃) come risultato dell'azione associata all'elevato carico ciclico tangenziale e all'ossidazione delle particelle distaccatesi dal metallo [4].

Il regime locale di fretting influenza fortemente la nucleazione e la prima fase di crescita delle cricche, mentre lo sforzo ciclico influenza la successiva propagazione della cricca stessa [10].

Il tipo e il grado di danneggiamento che si può riscontrare sul conduttore, nonché la sua durata in esercizio dipende, come già detto, da vari parametri, tra cui i più importanti sono l'ampiezza del ciclo di flessione, le condizioni di afferraggio e il coefficiente di attrito (si ricordi che anche il tipo di materiale coinvolto influisce sui diversi regimi di fretting che si possono riscontrare [10]). All'aumentare dell'ampiezza di flessione diminuisce la vita del conduttore: aumentano infatti gli scorrimenti e i microscorrimenti tra i fili e il degrado della superficie nei punti di contatto. Inoltre la variazione dell'ampiezza di flessione può modificare il regime di fretting, innescando un regime misto in cui può avvenire la nucleazione di cricche.

Le condizioni di afferraggio (tipo di morsetto e carico di serraggio) influenzano molto le condizioni di contatto tra fili e tra filo e morsetto, inducendo sulla fune differenti condizioni di carico a cui conseguono diversi regimi di fretting [4]. Inoltre a morsetti diversi corrispondono diversi tipi di contatto tra i fili dello strato esterno e il morsetto stesso, che possono modificare anche la posizione delle zone più critiche per la rottura dei fili. Da studi compiuti sulla relazione tra il fenomeno di fretting-fatigue e le condizioni di carico esterno [11], sembra che l'influenza della tensione applicata alla fune (tiro) sia marginale quando è compresa tra il 15% e il 40% del carico di rottura della fune; essa influisce, però, sul livello delle vibrazioni eoliche che si possono instaurare nella fune.

Il coefficiente di attrito può variare a seconda che le funi siano lubrificate o meno.

Esistono conduttori lubrificati in cui tra i fili è posto uno strato di grasso; la presenza del lubrificante comporta una diminuzione dell'ossidazione delle particelle staccatesi dal materiale e l'usura per contatto diminuisce grazie alle proprietà di accomodamento del miscuglio lubrificante-particelle. Nei punti con regime di parziale scorrimento, il lubrificante può anche prevenire completamente il contatto aria-metallo, annullando l'ossidazione. Di conseguenza, in un conduttore lubrificato le tracce di fretting sono minori in numero e dimensione e le tracce scure di particelle ossidate sono molto ridotte. In questo caso in corrispondenza delle tracce di contatto tra i fili si nota la formazione di cricche più corte rispetto al caso senza lubrificante; tali cricche sono presenti in grande quantità e tendono a coalescere tra loro e a propagare obliquamente o anche parallelamente alla superficie del filo, provocando il distacco di particelle di dimensioni maggiori e creando un profilo irregolare [12]. Nelle funi lubrificate il coefficiente di attrito è inferiore e le forze tangenziali nei punti di contatto diminuiscono: di conseguenza è meno facile raggiungere le condizioni di regime misto di fretting e la nucleazione di cricche viene ritardata. Nel caso di fili rotti, la superficie di frattura in presenza di lubrificante è solitamente normale all'asse del filo, a ulteriore conferma della riduzione del fretting

associato al regime misto. Alla luce di queste considerazioni l'influenza del fretting può essere ridotta in modo significativo mediante l'uso di lubrificanti, nonostante si possano avere fenomeni di fretting fatigue anche in queste condizioni. Si segnala infine che l'effetto benefico del lubrificante si evidenzia soprattutto nei regimi di scorrimento (regime 2) e misto (regime 3), mentre nel regime di scorrimento parziale (regime 1) è marginale. [12]

IL CASO STUDIATO

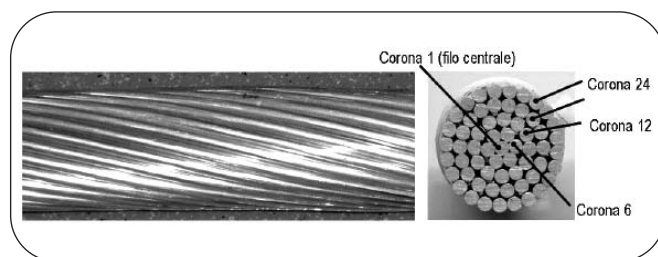
L'analisi svolta riguarda alcuni conduttori elettrici per l'alta tensione di una linea da 400 kV equipaggiata con fascio binato installata in Nord Africa. Le funi analizzate presentavano alcuni fili rotti ed evidenti segni di danneggiamento. Non si è esaminato solo il materiale proveniente dalle funi danneggiate, ma anche spezzoni di funi esercite che non avevano evidenziato alcun cedimento nonché spezzoni di fune ancora nuovi, presi dai magazzini.

Per semplicità di organizzazione il materiale è stato denominato come segue:

- fune danneggiata: spezzoni di fune che presentavano alcuni fili rotti;
- fune esercita: spezzoni di fune in cui non si osservavano rotture dei fili;
- fune nuova: spezzoni di fune prelevata da magazzino e non ancora messa in opera.

Tutte le tipologie di funi provenivano dallo stesso lotto di produzione per cui la comparazione dei risultati ottenuti sui diversi tipi è significativa.

L'analisi è stata effettuata allo scopo di identificare la causa e il meccanismo di danneggiamento delle funi, con particolare attenzione a stabilire se le rotture rilevate fossero imputabili a particolari condizioni di esercizio oppure dipendessero da una scarsa qualità del materiale.



▲
Fig. 4

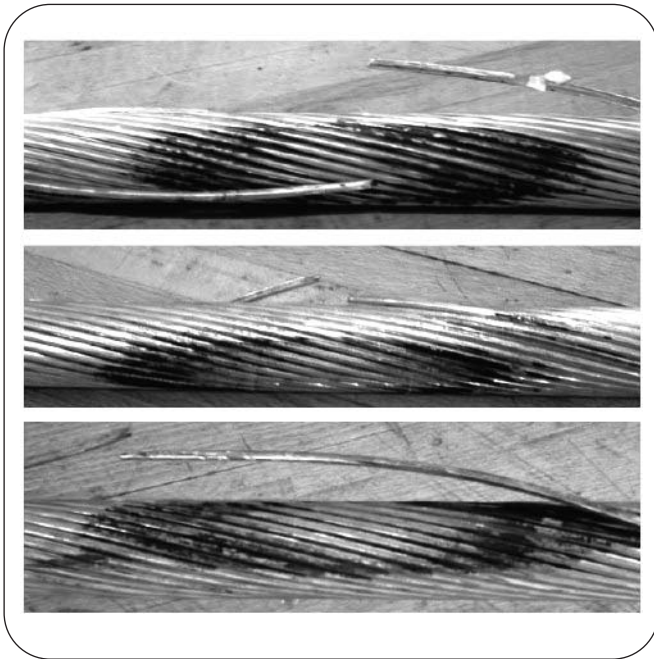
La fune oggetto dello studio con l'indicazione delle varie corone di fili.

The analyzed rope and the different layers of wires.

| Caratteristica | Valore |
|---------------------------------------|------------|
| Diametro nominale della fune | 31,05 mm |
| Diametro del singolo filo | 3,45 mm |
| Massa della fune | 1629 kg/km |
| Carico di rottura nominale della fune | 183700 N |

▲
Tab. 1

Caratteristiche della fune analizzata.
Analyzed rope properties.



▲
Fig. 5

Aspetto tipico della fune danneggiata che mostra il cedimento di alcuni fili (corona 24) in corrispondenza delle zone di ancoraggio dei morsetti; si notino le zone di colore grigio-nerastro sintomo della presenza di ossido d'alluminio.
Typical appearance of the damaged rope, it is possible to see the failure of some wires (layer 24) in correspondence of the clamping region; grey- black areas show the presence of aluminum oxide.

Le funi studiate sono realizzate interamente in alluminio (tipo AAAC) e sono costituite da 61 fili cordati in quattro differenti strati (corone) attorno al filo centrale con la seguente sequenza (vedi anche Fig. 4):

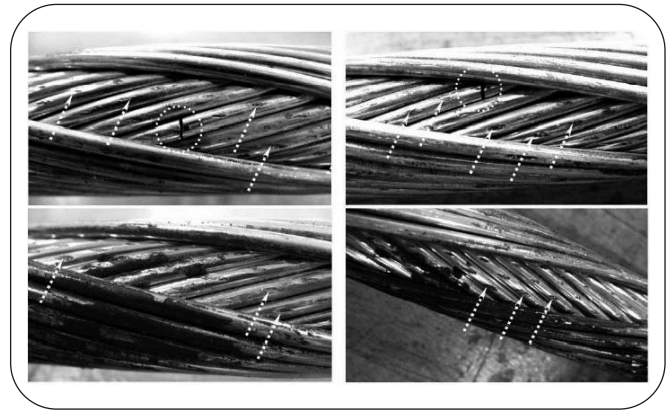
- 1 filo centrale;
- 6 fili → prima corona (Corona 6);
- 12 fili → seconda corona (Corona 12);
- 18 fili → terza corona (Corona 18);
- 24 fili → quarta corona, o corona esterna (Corona 24).

Alcune caratteristiche di interesse della fune sono riportate in Tab. 1.

La linea dell'alta tensione da cui provenivano le funi era equipaggiata con un fascio binato; le funi erano collegate ai tralicci con morsetti di sospensione di produzione industriale. Al verificarsi delle rotture sulla linea non erano montati né ammortizzatori di vibrazione, né distanziatori.

ANALISI VISIVA

L'analisi visiva della fune danneggiata evidenzia la presenza di caratteristiche significative che si ripetono in tutti gli spezzoni osservati. I fili rotti si trovano sia in prossimità che in corrispondenza del morsetto di sospensione, appartengono prevalentemente alla corona 18 e solo in parte alla 24. Inoltre, sempre in corrispondenza del morsetto di sospensione, si nota un deposito pulverulento di colore grigio-nerastro riconducibile alla presenza di ossidi di alluminio (Al_2O_3), come si osserva nella Fig. 5.



▲
Fig. 6

Esempi delle difettologie riscontrate sulle funi; le frecce bianche indicano le incisioni superficiali, i cerchi bianchi evidenziano i fili rotti nella corona 18. Le zone di colore grigio-nerastro sono sintomo della presenza di ossido di alluminio.

Examples of defects on the ropes; white arrows point to surface marks, white circles highlight broken wires in layer 18. Grey- black areas show the presence of aluminum oxide.

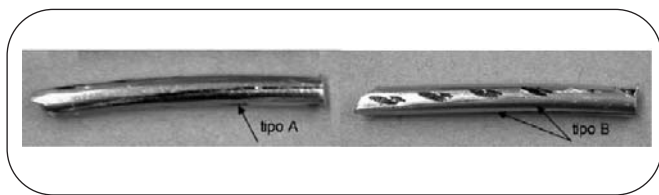
Per analizzare in modo più completo anche i fili della corona 18, sono stati asportati alcuni fili della corona 24 (Fig. 6) riscontrando un evidente danneggiamento per usura da sfregamento. Il danneggiamento si manifesta sia con la presenza di depositi grigio-nerastri di ossido d'alluminio che sotto forma di marcature (incisioni superficiali) equidistanti fra loro della stessa distanza esistente tra i fili della corona 24. Tali osservazioni sperimentali permettono di ricondurre il danneggiamento alla sollecitazione esercitata dal premicorda del morsetto di sospensione e all'usura dovuta allo sfregamento dei fili tra loro. Le incisioni superficiali sono presenti sui fili fino a 1,5 - 2 m dal morsetto di sospensione. Alcuni dei segni di deterioramento riscontrati sulla fune danneggiata si ritrovano anche nell'analisi visiva delle funi esercite. In particolare si osserva la presenza di depositi di colore grigio nerastro in corrispondenza dei morsetti di sospensione e di marcature superficiali della corona 18, questa volta però meno pronunciate rispetto alla fune danneggiata. Non si osservano, al contrario, fili rotti.

Per quanto riguarda le funi nuove, l'analisi visiva indica assenza di qualsiasi tipo di anomalia.

I CAMPIONI ANALIZZATI

I campioni da sottoporre all'esame frattografico sono stati prelevati mediante taglio manuale con seghetto alternativo per evitare alterazioni termiche del materiale in prossimità della zona di taglio.

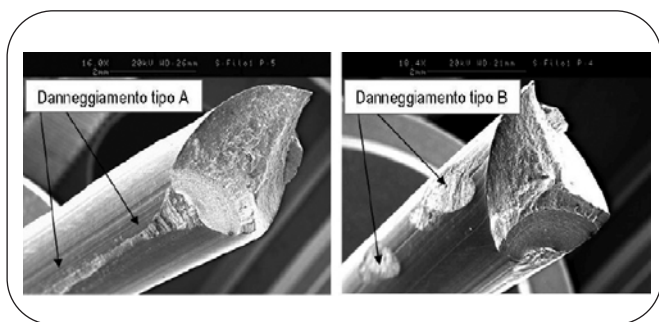
Prima di iniziare le analisi, le zone di frattura sono state sottoposte a pulitura per rimuovere eventuali depositi superficiali di sporcizia. Tale pulitura è stata eseguita mediante ultrasuoni, immergendo il campione in acetone a temperatura ambiente [13]. Con questo metodo non si altera la superficie di frattura che così è nelle migliori condizioni per essere osservata.



▲
Fig. 7

Le due tipologie di danneggiamento osservate sui fili estratti dalle funi analizzate.

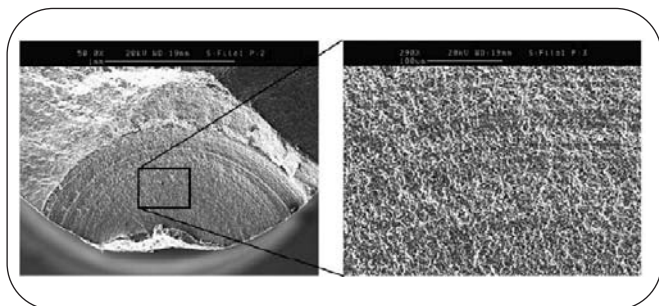
Kinds of damage observed on wires extracted from the analyzed ropes.



▲
Fig. 8

Esempio di cedimento per fatica di un filo prelevato dalla fune danneggiata; la rottura per fatica è partita dal danneggiamento di tipo A anche se sono presenti entrambe le tipologie di danneggiamento.

Example of fatigue failure of a wire taken from the damaged rope; the fatigue rupture started from a type A damage even if there are both kinds of damage on the wire.



▲
Fig. 9

Osservazioni a maggiore ingrandimento del filo di Figura 8 nella zona di propagazione della cricca a fatica.

Propagation region of the fatigue crack of the wire in figure 8, observations at high magnification.

FRATTOGRAFIA

I campioni estratti sono stati sottoposti a macrofrattografia e microfrattografia, mediante osservazione visiva e microscopia elettronica a scansione. Dall'osservazione dei fili danneggiati, si identificano entrambe le tipologie di danneggiamento precedentemente descritte; si evidenziano, infatti, danneggiamenti longitudinali all'asse del filo (Fig. 7.a) e marcature da fretting inclinate di 30° rispetto a tale asse (Fig. 7.b).

Passando ad un esame a più elevati ingrandimenti, sono state osservate le superfici di frattura dei fili rotti, che presentano segni evidenti di fenomeni di fatica. Si noti che il cedimento vero e proprio per fatica si è innescato prevalentemente da danneggiamenti di tipo A, nonostante i fili presentino entrambi i tipi di danneggiamento (Fig. 8-10). Solo in qualche caso la cricca per fatica si è innescata da un danneggiamento di tipo B (Fig. 11).

PROVE MECCANICHE DI TRAZIONE

Dai tre tipi di funi analizzati (danneggiata, esercita e nuova) sono stati prelevati degli spezzoni di fili da sottoporre alle prove meccaniche di trazione. I fili sono stati scelti dalle varie corone in maniera casuale, ottenendo il materiale per eseguire il piano di prove descritto in Tab. 2. Le prove di trazione sono state eseguite secondo la norma CEI 7-2 (1997), su fili prelevati dalla fune svolgendoli manualmente. La modalità di prelievo implica che i risultati possano essere differenti da quelli di prove eseguite su fili prelevati prima della cordatura; inoltre non è possibile ottenere dalle prove di trazione eseguite un valore corretto del modulo elastico E, in quanto il calcolo di tale parametro avviene nel primo tratto della curva di trazione (campo elastico) e proprio in questa zona si risentono maggiormente gli effetti legati alla rad-drizzatura del filo che si manifesta durante la prova stessa. Durante alcune prove (in circa il 10% del numero totale) si è verificata una problematica tipica della prova di trazione di fili (menzionata anche nella norma suddetta), ovvero il fenomeno di rottura del filo in corrispondenza degli afferraggi; in tal caso la prova non è stata considerata valida ed è stata rifatta.

Tenuto conto delle precedenti considerazioni, i risultati validi delle prove di trazione svolte sono raccolte nelle Tab. 3, 4 e 5 mentre le Fig. 12, 13 e 14 mostrano le curve sforzi-deformazioni per i vari fili delle corone dei tre tipi di funi. Per tutte e tre le tipologie di funi la dispersione dei risultati è minima.

Le caratteristiche meccaniche dei fili sottoposti alla prova rientrano tutte nelle prescrizioni della norma CEI/IEC 1089/91 e nella CEI/IEC 104, fili in lega di alluminio con diametro minore di 3,5 mm, type B. Inoltre si

| Fune | Corona 24 | Corona 18 | Corona 12 | Corona 6 | Corona 1 |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| Danneggiata | 6 prove | 6 prove | 6 prove | 6 prove | 1 prova |
| Esercita | 4 prove | 4 prove | 4 prove | 4 prove | 1 prova |
| Nuova | 4 prove | 4 prove | 4 prove | 4 prove | 1 prova |

▲
Tab. 2

Numero di prove di trazione eseguite per ogni fune e posizione di prelievo del filo all'interno della fune.
Number of tensile tests performed on each rope and position of taken wires in the rope.

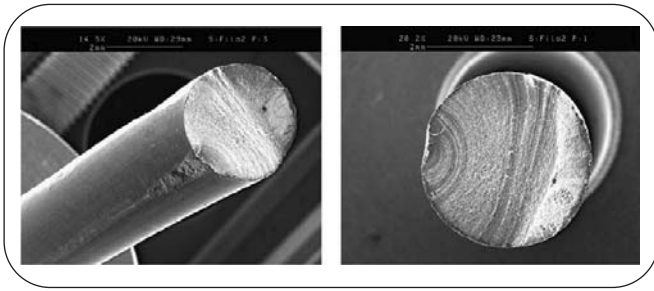


Fig. 10 Altro esempio di filo rotto per fatica a partire da un danneggiamento di tipo A.
Another example of a fatigue rupture of a wire started from a type A damage.

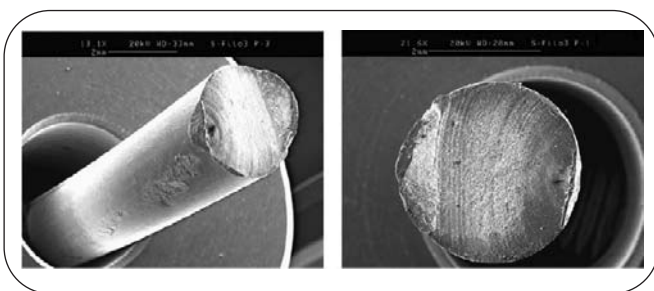


Fig. 11 Filo rotto per fatica a partire da un danneggiamento di tipo B.
Fatigue rupture of a wire started from a type B damage.

può notare che, per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche, non ci sono differenze statisticamente significative tra i fili dei tre tipi di funi: i fili delle tre funi possono essere considerati sostanzialmente identici.

ANALISI CHIMICA

L'analisi chimica è stata effettuata per verificare che il materiale costituente la fune sia effettivamente quello dichiarato. Dalla fune danneggiata è stato prelevato un filo lungo circa un metro; il campione prelevato è stato fuso sottovuoto per ottenere una superficie sufficientemente ampia da poter essere utilizzata per prove di tipo quantometrico. Sono state eseguite tre misure al quantometro i cui risultati sono riportati in Tab. 6. Dai risultati ottenuti si nota che l'analisi chimica della lega di alluminio rientra nelle prescrizioni stabilite dalla norma EN AW 6101-A, che sono indicate in Tab. 7. È possibile anche fare alcune considerazioni sul tipo di materiale. La lega di alluminio 6101 è una lega ampiamente utilizzata per realizzare fili per conduttori di trasporto della corrente nelle linee di alta tensione. Essa ha elevata conduttività elettrica (anche se minore rispetto alla lega 1350), ottima deformabilità plastica e buone proprietà meccaniche (superiori a quelle della lega 1350); queste buone caratteristiche meccaniche derivano dal trattamento termico di indurimento (ricottura e invecchiamento) che permette di ottenere carichi di rottura nell'ordine dei 300 MPa. La presenza di silicio e magnesio nella lega permette la formazione, durante il

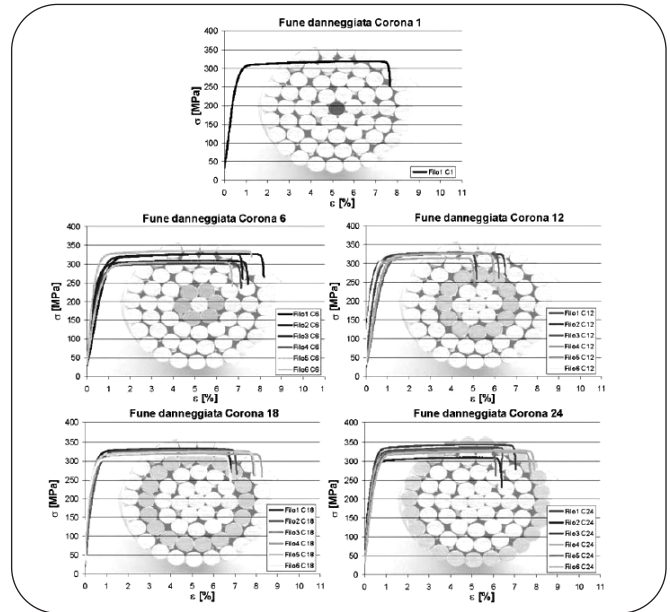


Fig. 12 Curve sforzi-deformazioni su diversi fili della fune danneggiata.
Stress-strain diagrams of different wires taken from the damaged rope.

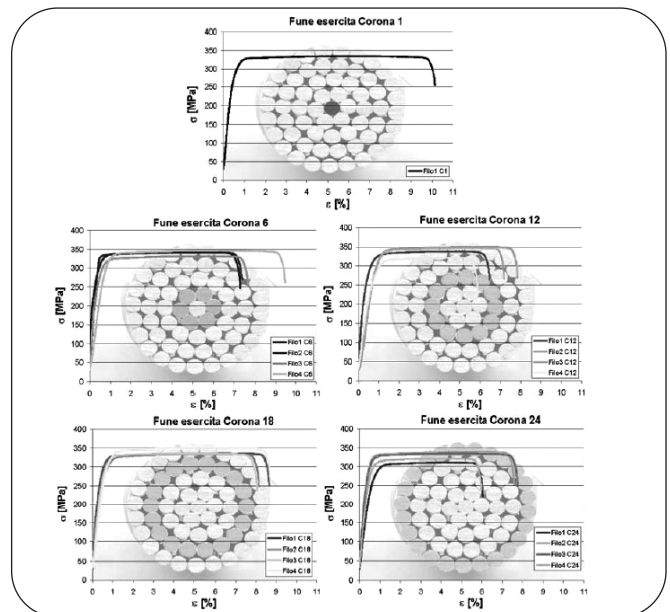


Fig. 13 Curve sforzi-deformazioni su diversi fili della fune esercitata.
Stress-strain diagrams of different wires taken from the exercised rope.

treatment, of intermetallic compounds type Mg₂Si, finely dispersed in the matrix, for which the hardening of the alloy occurs through the formation of Guinier-Preston [14,15].

CONSIDERAZIONI FINALI E CONCLUSIONI

Le incisioni superficiali osservate sulla fune danneggiata sono chiaramente riconducibili al fenomeno di fret-

| Fune danneggiata | | | | | | | | | | |
|------------------|----------------------|-----|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|
| | Corona 1 | | Corona 6 | | Corona 12 | | Corona 18 | | Corona 24 | |
| Prova | R _m [MPa] | A% | R _m [MPa] | A% | R _m [MPa] | A% | R _m [MPa] | A% | R _m [MPa] | A% |
| 1 | 327 | 8,1 | 327 | 8,17 | 328 | 5,16 | 333 | 6,8 | 336 | 6,4 |
| 2 | | | 327 | 7,2 | 322 | 6,5 | 331 | 7 | 309 | 6,3 |
| 3 | | | 308 | 7,4 | 326 | 6,2 | 327 | 7,8 | 344 | 7 |
| 4 | | | 302 | 7,13 | 314 | 5 | 319 | 8,2 | 324 | 7,7 |
| 5 | | | 335 | 7,6 | 327 | 5,9 | 325 | 7,9 | 333 | 6,1 |
| 6 | | | 306 | 6,7 | 335 | 6,5 | 315 | 6,7 | 328 | 7,9 |
| Media | | | 318 | 7,4 | 325 | 5,9 | 325 | 7,4 | 329 | 6,9 |
| Dev.St. | | | 13,78 | 0,50 | 6,98 | 0,66 | 6,93 | 0,64 | 11,97 | 0,76 |

▲
Tab. 3

Caratteristiche meccaniche e indici statistici (media e deviazione standard σ_{n-1}) dei fili prelevati dalla fune danneggiata.
Mechanical properties and statistical indexes (average and standard deviation σ_{n-1}) of wires taken from the damaged rope.

| Fune esercita | | | | | | | | | | |
|---------------|----------------------|-------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|
| | Corona 1 | | Corona 6 | | Corona 12 | | Corona 18 | | Corona 24 | |
| Prova | R _m [MPa] | A% | R _m [MPa] | A% | R _m [MPa] | A% | R _m [MPa] | A% | R _m [MPa] | A% |
| 1 | 336 | 10,13 | 342 | 7,37 | 338 | 6,47 | 337 | 8,65 | 312 | 6,03 |
| 2 | | | 343 | 7,29 | 348 | 7,19 | 335 | 8,15 | 340 | 7,58 |
| 3 | | | 332 | 7,66 | 350 | 7,85 | 336 | 8,05 | 335 | 7,76 |
| 4 | | | 347 | 9,47 | 321 | 5,86 | 350 | 8,70 | 322 | 5,98 |
| Media | | | 341 | 7,95 | 339,25 | 6,84 | 339,5 | 7,05 | 327,3 | 6,84 |
| Dev.St. | | | 6,38 | 1,03 | 13,25 | 0,86 | 8,39 | 0,34 | 12,69 | 0,96 |

▲
Tab. 4

Caratteristiche meccaniche e indici statistici (media e deviazione standard σ_{n-1}) dei fili prelevati dalla fune esercita.
Mechanical properties and statistical indexes (average and standard deviation σ_{n-1}) of wires taken from the exercised rope.

| Fune nuova | | | | | | | | | | |
|------------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|-------|
| | Corona 1 | | Corona 6 | | Corona 12 | | Corona 18 | | Corona 24 | |
| Prova | R _m [MPa] | A% | R _m [MPa] | A% | R _m [MPa] | A% | R _m [MPa] | A% | R _m [MPa] | A% |
| 1 | 338 | 9,32 | 321 | 7,25 | 334 | 8,93 | 315 | 6,39 | 331 | 10,03 |
| 2 | | | 324 | 8,24 | 322 | 6,84 | 327 | 7,05 | 327 | 8,65 |
| 3 | | | 326 | 8,39 | 333 | 6,08 | 311 | 7,88 | 323 | 8,58 |
| 4 | | | 304 | 6,87 | 334 | 5,43 | 326 | 7,37 | 340 | 8,25 |
| Media | | | 318,7 | 7,69 | 330,7 | 6,82 | 319,7 | 7,17 | 330,2 | 8,88 |
| Dev.St. | | | 10,05 | 0,74 | 5,85 | 1,52 | 7,97 | 0,62 | 7,27 | 0,79 |

▲
Tab. 5

Caratteristiche meccaniche e indici statistici (media e deviazione standard σ_{n-1}) dei fili prelevati dalla fune nuova.
Mechanical properties and statistical indexes (average and standard deviation σ_{n-1}) of wires taken from the new rope.

ting-fatigue che, come già descritto, induce la formazione di lacerazioni superficiali in corrispondenza delle quali si innescano cricche di fatica che provocano la rottura dei singoli fili. È utile ricordare nuovamente che questo fenomeno è poco influenzato dalle caratteristiche statiche della fune e dei singoli fili che la compongono e

dipende quasi esclusivamente dalle condizioni di esercizio della fune stessa (deformazioni elastiche conseguenti ai moti vibratorii del conduttore). L'analisi frattografica, eseguita sia a livello macroscopico che a livello microscopico, conferma che il fenomeno osservato è un tipico danneggiamento per fretting-fatigue. Dalle

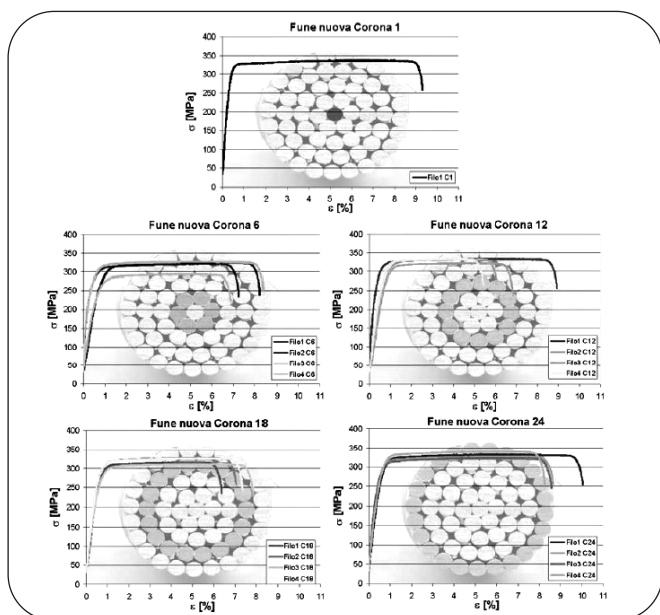


Fig. 14
Curve sforzi-deformazioni su diversi fili della fune nuova
Stress-strain diagrams of different wires taken from the new rope.

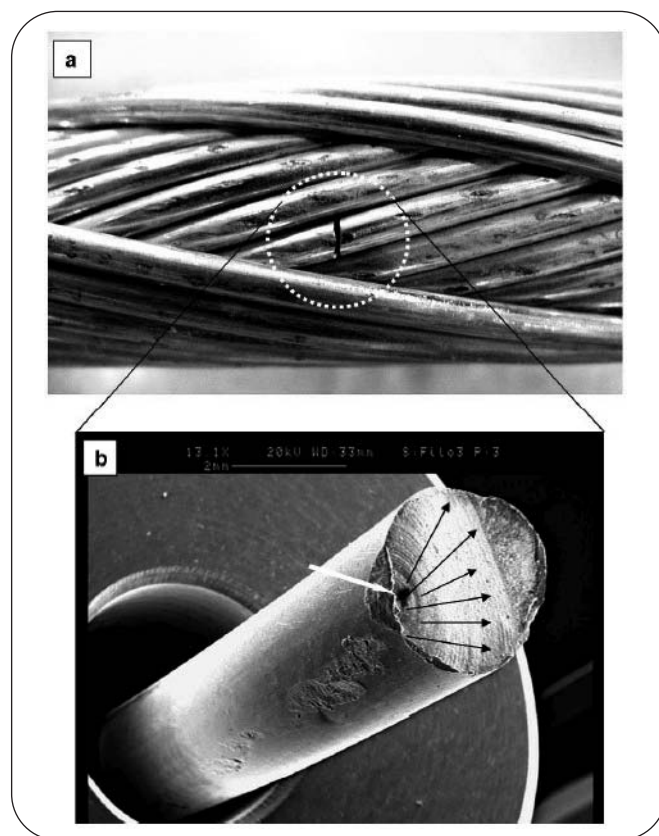


Fig. 15
Illustrazione del meccanismo di danneggiamento dei fili.
Damage mechanism of wires.

lacerazioni superficiali si innescano le cricche di fatica che portano alla rottura dei fili della fune. Le superfici di frattura dei fili risultano perpendicolari all'asse degli stessi, per cui si può affermare che il regime di fretting-fatigue che ha causato le rotture è di tipo 1.

Più precisamente il danneggiamento per fretting-fatigue si manifesta, prevalentemente, in corrispondenza della corona di 18 fili (la seconda a partire dall'esterno). Sono ben evidenti le marcature (incisioni) legate ai microscorimenti dei fili della corona superiore (quella da 24 fili) rispetto alla corona sottostante (quella da 18 fili), si osservi al proposito la Fig. 15.a. Nell'immagine al microscopio elettronico a scansione (Fig. 15.b) si notano chiaramente la zona di innesco (freccia bianca) e la successiva

propagazione per fatica (freccie nere). Le prove meccaniche di trazione eseguite mostrano che i fili delle tre tipologie di funi hanno caratteristiche tensili sostanzialmente identiche e che rientrano nelle prescrizioni stabilite dalla normativa, così come rientra nelle prescrizioni anche l'analisi chimica della lega. Il complesso delle indagini svolte, quindi, permette di determinare il meccanismo di danneggiamento del conduttore in fenomeni di fretting-fatigue. La causa del

| Scarica | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | B | Ti | Zn | V | Al |
|---------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|---|----|------|-------|------|
| 1 | 0,629 | 0,238 | 0,005 | <0,001 | 0,558 | 0,005 | — | — | 0,05 | 0,005 | bal. |
| 2 | 0,685 | 0,222 | 0,006 | <0,001 | 0,567 | 0,005 | — | — | 0,05 | 0,006 | bal. |
| 3 | 0,687 | 0,219 | 0,007 | <0,001 | 0,544 | 0,005 | — | — | 0,05 | 0,005 | bal. |

Tab. 6
Analisi chimica quantometrica della fune danneggiata.
Spectrometric chemical analysis of the damaged rope.

| EN AW 6101-A | | | | | | | |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------|
| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Al |
| 338 | max. 0,50 | max. 0,10 | max. 0,03 | 0,35-0,80 | max. 0,03 | max. 0,10 | bal. |

Tab. 7
Analisi chimica della lega AlMgSi (A) tipo EN AW 6101-A per impieghi elettrici.
Chemical analysis of the AlMgSi (A) kind EN AW 6101-A alloy for electrical use.

danneggiamento è da ricondursi alle vibrazioni eoliche del conduttore montato sulla linea. La caratterizzazione della fune (prove di trazione e analisi chimica) consente di affermare che la modalità di danneggiamento per fretting-fatigue non può essere correlata a difetti o ad anomalie del materiale con cui sono stati realizzati i fili. Questo è in accordo con un fenomeno di danneggiamento di tipo dinamico, limitato alle zone di ancoraggio della fune ai morsetti.

Tenuto conto, in particolare, del regime di fretting coinvolto (regime 1), si deve ritenere che per ridurre il fenomeno di danneggiamento l'eventuale presenza di lubrificante porti un effetto scarsamente efficace. Più opportuno risulta un intervento per limitare l'effetto delle vibrazioni eoliche, per cui al costruttore si è consigliato di inserire sulla linea distanziatori e ammortizzatori di vibrazioni. Come conseguenza di detti accorgimenti, il fenomeno non si è più manifestato.

BIBLIOGRAFIA

- 1] R.K.AGGARWAL, A.T.JOHNS, J.A.S.B.JAYASINGHE, W.SU, *Electric Power System Research* 53 (2000) pp.15-22.
- 2] Sito internet www.deoragroup.com/dwnm.htm visionato in data 25/09/2006.
- 3] F.E.KRUEGER, in *Failure Analysis and Prevention, Metals Handbook, Vol.10, 8th Ed.*, ASM International, pp.154-160
- 4] C.R.F.AZEVEDO, T.CESCON, *Engineering Failure Analysis* 9 (2002) pp.645-664.
- 5] Z.R.ZHOU, A.CARDOUT, S.GOUDREAU, M.FISET, *Tribology International* Vol.29 No.3 (1996) pp.221-232.
- 6] T.C.LINDLEY, *Int. J. Fatigue* Vol.19, Supp. No.1 (1997) pp.S39-S49.
- 7] K.SATO, H.FUJII, S.KODAMA, *Bull.JSME*, 29, (1986) pp.3253-3258.
- 8] T.HATTORI, M.NAKAMURA, H.SAKATA, T.WATANABE, *JSME International Journal* vol.31 serie 1 (1988) pp.100-107.
- 9] R.E.HOBBS, M.RAOOF, *J.Construct. Steel Res.* Vol.39 No.1 (1996) pp.31-50.
- 10] Z.R.ZHOU, L.VINCENT, *Wear* 181-183 (1995) pp.531-536.
- 11] J.-I.SUH, S.P.CHANG, *International Journal of Fatigue* 22 (2000) pp.339-347.
- 12] Z.R.ZHOU, M.FISET, A.CARDOU, L.CLOUTIER, S.GOUDREAU, *Wear* 189 (1995) pp.71-57.
- 13] S.NISHIDA, *Failure analysis in engineering applications*, Butterworth-Heinemann, Oxford (1992) p.8.
- 14] ALCAN CABLE, 6101 and 6201 Redraw Rod User's Processing Guide, (1992).
- 15] R.BRICK, R.GORDON, A.PHILLIPS, *Structure and Properties of Alloys*, McGraw-Hill, (1965).

ABSTRACT

FRETTING-FATIGUE PHENOMENA ON AN ELECTRICAL CONDUCTOR

Keywords: fatigue, aluminium alloys, tribology, materials characterization

Overhead electrical conductors are spiral ropes consisting of a group of wires laid helically in successive layers over a straight central king wire (Fig. 1). The service life of these ropes is often drastically reduced because of aeolian vibrations. The presence of these vibrations causes, in the vicinity of clamps, the occurrence of oscillatory sliding motions of small amplitude between the contacting surfaces of wires. This phenomenon causes on the conductor the damage known as fretting-fatigue that can be considered the main factor leading to conductor individual wire breaks (Fig. 2 and 3).

The aim of the failure analysis described in this paper is to identify the morphology and to understand the nature and the causes of the phenomena

involved in the failure of an AAAC conductor (6101 aluminium alloy) that was composed of 61 wires laid in four layers over the central wire. This conductor came from a 400 kV overhead line on which there weren't either dumpers or spacers (Fig. 4, Tab. 1).

Typical steps of failure analysis were performed on different kinds of ropes. Some ropes had failed during service and showed some broken wires and other evident signs of damage; other ones were put in exercise but they didn't fail. Besides some new ropes were examined as term of comparison. Visual examination (Fig. 5 and 6) and fractography (Fig. 7, 8, 9, 10 and 11) showed the characteristic features of fretting-fatigue, whereas tensile tests (Tab. 2, 3, 4 and 5; Fig. 12, 13 and 14) and chemical analysis (Tab. 6 and 7) excluded the presence of defects or anomalies in the material.

The results of the analysis led to identify the cause of the damaging in aeolian vibrations phenomena (Fig. 15). In order to avoid the event in the future it was suggested the use of spacer and/or damper devices. These actions solved the observed problems.