METRICA
METRology Institutional CAtalog

ISTITUTO NAZIONALE DI RICERCA METROLOGICA
Repository Istituzionale

Dipendenza delle connessioni crimpate dagli stress meccanici e termici

Original
Dipendenza delle connessioni crimpate dagli stress meccanici e termici / Bellavia, L.; Caria, S. E.; Galliana, F.; Perta, A. P.; Roccato, P. E.. - (2022), pp. 1-38.

Availability:
This version is available at: 11696/73910 since: 2022-09-17T11:09:40Z

Publisher:

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

29 October 2024

L. Bellavia, S.E. Caria, F. Galliana, A.P. Perta, P.E. Roccato

Dipendenza delle connessioni crimpate dagli stress meccanici e termici

R.T. 9/2022 Marzo 2022

RAPPORTO TECNICO I.N.RI.M.

Sommario

I cavi intestati con capicorda crimpati sono spesso utilizzati nei laboratori di prova nelle prove di sovratemperatura per validare dispositivi elettrici. L'aumento della resistenza elettrica delle connessioni crimpate può portare ad un'elevata dissipazione di potenza e calore durante queste prove, compromettendone l'esito. Questo lavoro è consistito nella valutazione della dipendenza della resistenza elettrica e della potenza dissipata delle connessioni crimpate quando sono sottoposte a stress meccanici e termici. La resistenza è risultata più sensibile agli stress termici che a quelli meccanici. Un limite della potenza dissipata dalle connessioni crimpate nelle prove di sovratemperatura è stato stimato in circa 4 W corrispondenti ad una resistenza elettrica di 25 μΩ per prove effettuate a 400 A. Il rispetto di questi limiti potrebbe evitare scarti errati di apparecchiature in prova.

Abstract

Cables headed with crimped lugs are frequently used in test laboratories in temperature rise tests carried out to validate electrical devices. The increase of the electrical resistance of the crimped connections can lead to high dissipation of power and heat during these tests, impairing their outcome. This work consisted in the evaluation of the dependence of the electrical resistance and of the dissipated power of crimped connections when they are submitted to mechanical and thermal stresses. This resistance resulted more sensitive to thermal stresses than to mechanical ones. A limit of the dissipated power from crimped connections in the temperature rise tests was estimated to be about 4 W corresponding to an electrical resistance of 25 μΩ for tests made at 400 A. Respecting these limits could avoid wrong rejections of equipment under test.

Indice

Sommario 1

Abstract 1

1. Introduzione 3

2. La tecnica di crimpatura 4

3. La resistenza di crimpatura 5

4. Metodi e strumenti di misura 7

5. Comportamento della resistenza elettrica di una connessione crimpata sottoposta a stress meccanici 9

5.1 Comportamento della resistenza elettrica in una connessione crimpata ad un cavo soggetto a torsioni 12

5.2 Comportamento della resistenza elettrica in una connessione crimpata ad un cavo soggetto a rotazioni 17

5.3 Incertezza di misura 18

5.4 Discussione 19

6. Comportamento della resistenza elettrica di una connessione crimpata sottoposta a stress termici 20

6.1 Cicli termici 22

6.2 Valutazione dell'incertezza delle misure di R_{crimp} con il micro ohmmetro 26

6.3 Prove di sovratemperatura 27

6.4 Incertezze di misura 30

Conclusioni 33

Bibliografia 34

Allegato. Simulazione delle correnti in un condotto barra sottoposto a test di sovratemperatura . 37

1. Introduzione

I dispositivi elettrici operanti ad alte correnti, come quelli nei sistemi di distribuzione e potenza elettrica, devono rispettare i limiti di sovratemperatura in condizioni di lavoro per essere validati secondo le norme [1, 2]. Non devono surriscaldarsi durante il loro funzionamento in quanto ciò comporterebbe un invecchiamento precoce dei loro materiali e un aumento della resistività e dell'ossidazione dei conduttori interni provocando danni o guasti. Per verificare se tali dispositivi sono conformi alle norme, vengono sottoposti a prove di sovratemperatura al fine di rilevare se possono sopportare la corrente nominale (cioè quella normalmente applicata) senza superare i limiti di temperatura stabiliti dalle stesse norme per la loro sicurezza e durata. In queste prove i cavi utilizzati devono essere collegati ad un generatore di corrente e al dispositivo in prova per simularne le normali condizioni di lavoro. Questi cavi spesso terminano con capicorda, che sono terminali metallici da una patella d'attacco e da un colletto [3]. I capicorda sono utilizzati per i collegamenti in impianti industriali, automobilistici e nei laboratori di prova. Un capocorda può variare per dimensioni, forma e materiale. Si ricava da un tubo di rame elettrolitico, ricotto e protetto superficialmente da una stagnatura elettrolitica. Il rame e la ricottura lo rendono resistente alla trazione e all'ossidazione e malleabile per la crimpatura. Il colletto è smussato e con un foro di ispezione per l'introduzione di un cavo (Fig. 1).

Fig. 1. Capocorda crimpato ad un cavo.

Nei laboratori di prova i cavi intestati con capicorda crimpati sono frequentemente sottoposti a stress meccanici e termici mentre quelli utilizzati nelle installazioni di impianti vengono lasciati nella stessa posizione per diversi anni. Per esempio I cavi utilizzati nelle prove di sovratemperatura possono essere avvolti attorno al loro asse di simmetria quando vengono imbullonati alle barre all'uscita del generatore di corrente. Inoltre possono essere sottoposti a stress termici, poiché la loro corrente può essere superiore a quella nominale. Capicorda crimpati possono indurre errori

indesiderati in quanto la resistenza elettrica di una connessione danneggiata o crimpata in modo errato può aumentare aumentando la dissipazione di potenza e calore per effetto Joule provocando un aumento della temperatura pregiudicando o addirittura invalidando il risultato di una prova di sovratemperatura. Lo scopo di questo lavoro era l'indagine della dipendenza di questa resistenza quando le connessioni crimpate sono sottoposte a stress meccanici e termici. I risultati ottenuti potrebbero essere importanti per migliorare l'affidabilità delle prove di sovratemperatura. Vengono forniti anche i budget di incertezza secondo la Guida ISO dell'espressione delle incertezze nelle misurazioni [4]. La novità del lavoro consiste nella proposta di valori limite della resistenza di crimpatura e della potenza dissipata delle connessioni crimpate per individuare precocemente capicorda presumibilmente danneggiati. Questo metodo, basato su misurazioni sperimentali, può essere utile e conveniente per i laboratori di prova e alternativo ad altre tecniche come quelle basate sull'analisi termografica e ultrasonica [5, 6], non sempre disponibili, affidabili e convenienti.

2. La tecnica di crimpatura

La crimpatura (connessione per compressione mediante crimpatrice manuale (Fig. 2) o per mezzo dispositivi costituiti da una testa oleodinamica abbinata ad una pompa oleodinamica (Fig.3)

Fig.2 Pinza crimpatrice manuale Intercable mod. PMT16.

Fig. 3a). Testa oleodinamica Intercable mod. PP130

Fig. 3b). Pompa oleodinamica a batteria Intercable mod. CP700.

è una tecnica economica e comune per realizzare connessioni meccaniche ed elettriche. Stabilisce un contatto tra due conduttori applicando una forza per deformare i metalli. Questa forza induce un'area di contatto metallo su metallo che blocca insieme i conduttori a causa della deformazione plastica. La crimpatura consente anche la pulizia da contaminanti e ossidi dalle superfici dei conduttori a causa dell'elevata pressione applicata. Nel laboratorio e di Alte Tensioni e Forti Correnti dell'INRIM (LATFC) e nei laboratori di prova viene applicata la tecnica della crimpatura per collegare capicorda ai cavi elettrici. Questa è un'operazione irreversibile, in quanto deforma permanentemente entrambi. Dopo la crimpatura, è impossibile rimuovere un cavo da un capocorda senza danneggiarli entrambi. A seconda della matrice di crimpatura si possono ottenere profili differenti che variano in lunghezza, profondità, numero e forma delle rientranze (Fig. 4).

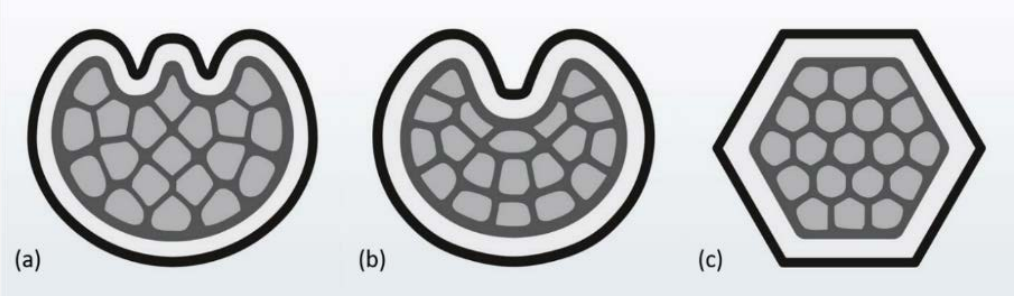


Fig.4 Crimpatura a doppia rientranza (a) a rientranza a punta(b) esagonale(c).

Le caratteristiche e l'affidabilità della tecnica di crimpatura sono state discusse sin dagli anni sessanta [7-9]. Negli ultimi anni, lavori hanno indagato le caratteristiche della tecnica di crimpatura in particolare dal punto di vista meccanico [6, 10-16] sviluppando anche modelli per l'identificazione precoce dei difetti di connessione [17]. In [18] è riportato un recente volume divulgativo sulla qualità della tecnica mentre in [16] è stato ottenuto un soddisfacente accordo tra un'analisi meccanica basata su di un modello FEM e una sperimentale di una connessione crimpata. Interessanti studi sulla distribuzione elettrica nelle connessioni crimpate sono riportati in [10, 12, 13, 19] mentre in [20] è stata condotta un'indagine sul comportamento della resistenza di crimpatura su connessioni con capicorda crimpati a cavi di due diverse sezioni, disponibile presso il LATFC. Malgrado questi lavori permane un'esiguità di studi elettrici sulla tecnica di crimpatura che fa sì che il comportamento elettrico delle connessioni realizzate con questa tecnica non sia ancora del tutto consolidato.

3. La resistenza di crimpatura

La resistenza R_{crimp} di una connessione crimpata tra un cavo e un capocorda, è costituita dalle resistenze equivalenti del cavo all'interno del capocorda, del capocorda stesso nella zona crimpata e della resistenza di contatto tra il cavo e la patella di attacco del capocorda (Fig. 5). Questa resistenza

di contatto è la resistenza elettrica associata all'interfaccia tra due corpi separabili ed è data dalla somma di una resistenza di costrizione e di una resistenza del film [21].

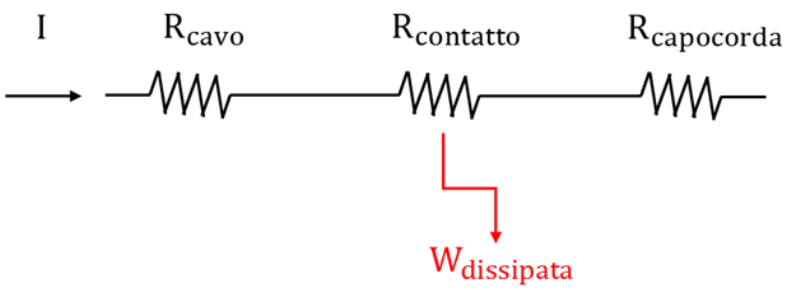


Fig.5. Circuito equivalente resistivo di un tratto della connessione crimpata

La resistenza di costrizione è legata al fatto che quando due superfici sono accoppiate il contatto tra queste avviene solo attraverso le loro asperità che si toccano. Quindi, il contatto si realizza solo attraverso un gran numero di micro aree e la superficie di contatto reale sarà minore rispetto all'area apparente di contatto. La resistenza dei film è legata alla generazione di film superficiali sui materiali. Questi film possono essere ossidi o solfuri. Poiché sono stati considerati capicorda ricotti in stagno, il film superficiale che si forma è l'ossido di stagno che protegge il rame da un'eventuale corrosione. Considerando un modello assial-simmetrico di un capocorda (Fig. 6). La misura della resistenza elettrica di crimpatura è valutata attraverso la caduta di tensione ΔV.

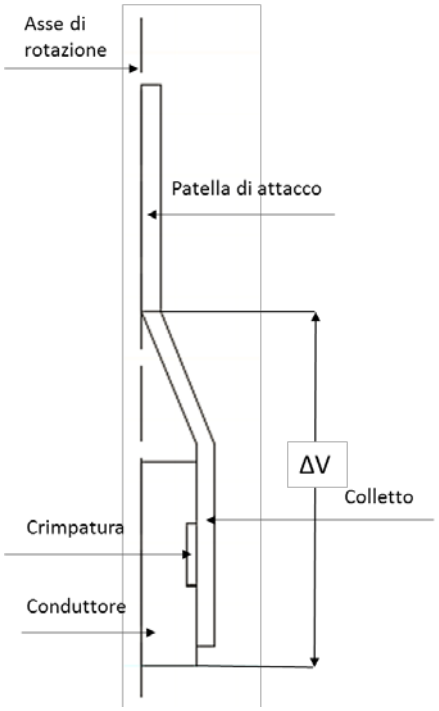


Fig.6. Sezione trasversale di una connessione crimpata con crimpatura a singola rientranza

4. Metodi e strumenti di misura

Le misure della resistenza di crimpatura R_{crimp} sono state effettuate con due metodi alternativi: il primo è un metodo voltamperometrico mentre il secondo consiste nella misura diretta della resistenza con un micro-ohmmetro. In Fig. 7 è mostrato uno schema a blocchi dei due metodi, del generatore di corrente di alimentazione con gli strumenti impiegati per effettuare le misure.

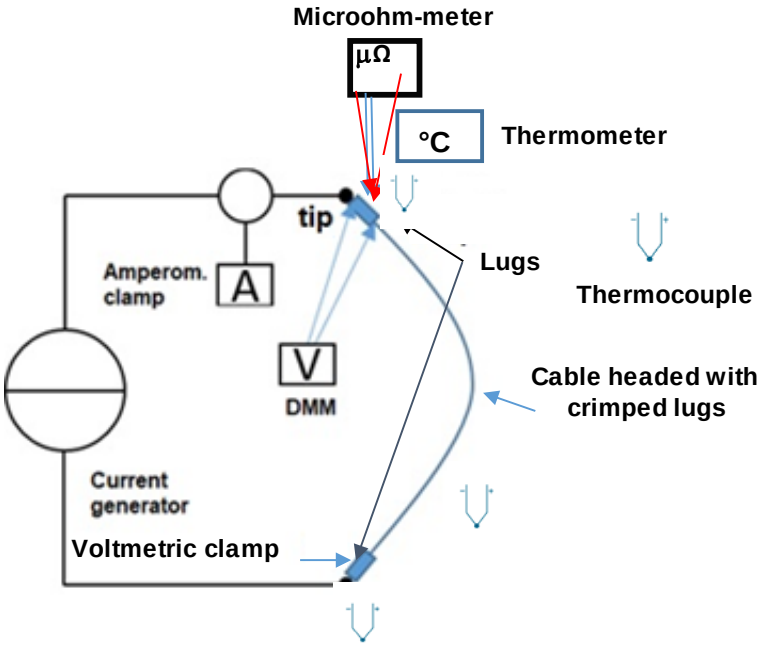


Fig. 7. Schema a blocchi deli circuiti per le misure di R_{crimp}.

Le misure R_{crimp} sono state effettuate impiegando nello specifico: un generatore di corrente OSAT Elettronica, tensione max 8 V corrente max 1200 A, barre di rame di sezione 600 mm^2, un cavo di prova per bassa tensione (1 kV), intestato con capicorda crimpati, di lunghezza e sezione rispettivamente 2 m e 240 mm^2, una pinza amperometrica Fluke 355, un multimetro (DMM) HP 34401A, una pinza voltmetrica INRIM, un micro-ohmmetro ICE mod. 20022, termocoppie mod. K e un termometro Fluke 54 per le misure di temperatura. La riferibilità delle misure di resistenza ai campioni nazionali mantenuti presso l'INRIM è assicurata mediante la taratura del micro ohmmetro (riferito campione nazionale di resistenza in corrente continua), del DMM (riferito al campione nazionale di tensione continua) e della pinza amperometrica (riferita ad entrambi i campioni). Anche le termocoppie e il termometro Fluke 54 sono riferiti al campione nazionale di temperatura dell'INRIM. In Fig. 8 è mostrato uno zoom del circuito di misura attorno al collegamento capocorda-cavo per valutare R_{crimp} con il metodo volt-amperometrico.

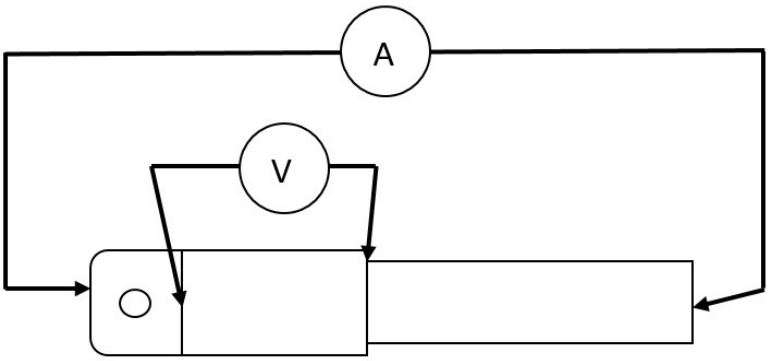


Fig. 8. Schema dell'alimentazione di corrente al cavo con capocorda crimpato e della posizione in cui le cadute di tensione sono state misurate con il metodo voltamperometrico.

La pinza di misura voltmetrica (Fig. 9) è stata costruita nel LATFC in alluminio, ha la forma di uno schiaccianoci imperniata all'estremità.

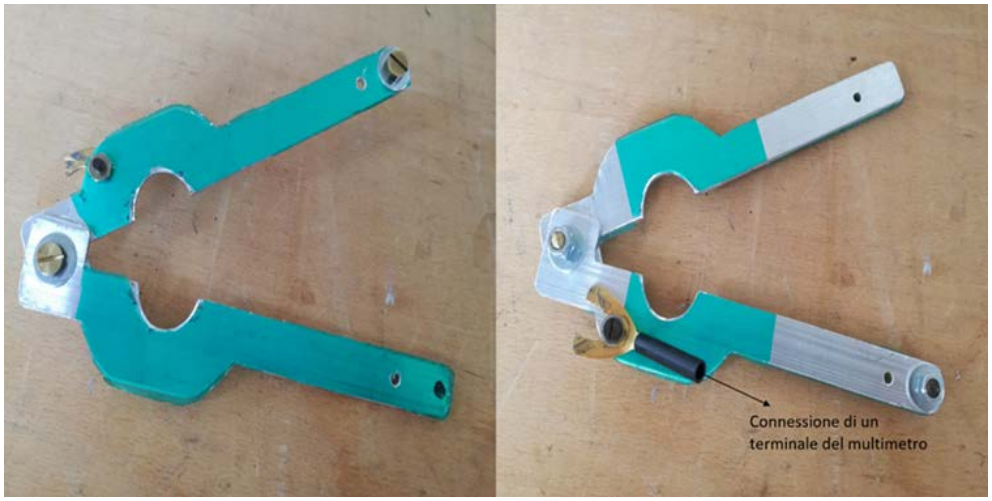


Fig.9. Pinza di misura voltmetrica.

La pinza voltmetrica è stata costruita in modo tale da avere un punto equipotenziale stabile sul conduttore per effettuare le misure. Il circuito di misura è riportato in Fig. 10 nel quale il cavo capicordato è collegato al generatore di corrente tramite due barre di rame per non avere un eccessivo riscaldamento dei capicorda. Le termocoppie, sul colletto dei capicorda servono a valutare se i capicorda hanno raggiunto l'equilibrio termico e a valutarne il surriscaldamento. Una ulteriore termocoppia è stata utilizzata per la misura della temperatura ambiente

Fig.10 Circuito di misura con zoom del collegamento dei capicorda alle barre di rame.

Per le misure voltamperometriche si è valutata la tensione tra il foro d'ispezione del capocorda e l'inizio del cavo (Fig.11), mentre la corrente viene misurata con la pinza amperometrica.

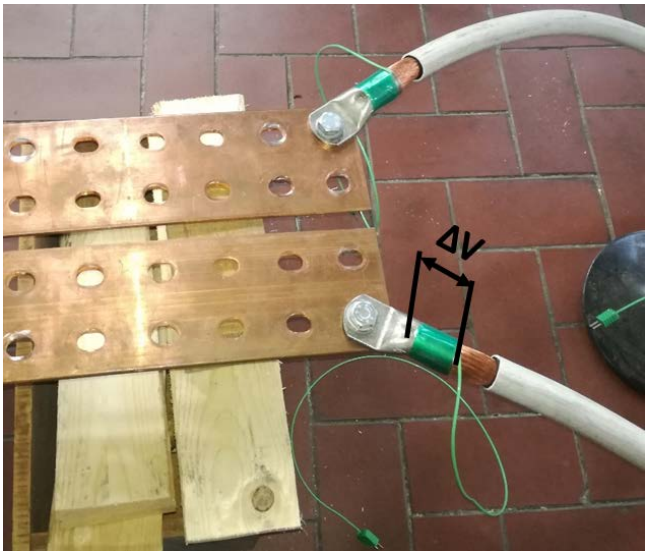


Fig.11. Valutazione della caduta di tensione

5. Comportamento della resistenza elettrica di una connessione crimpata sottoposta a stress meccanici

I cavi intestati con capicorda crimpati nelle prove di sovratemperatura sono usati per collegare l'alimentatore e l'apparecchiatura in prova e cortocircuitare l'uscita del dispositivo in prova, sono montati e smontati e sottoposti a stress meccanici quali:

- Torsione intorno al loro asse di simmetria (Fig.12) quando vengono imbullonati sulle barre di alluminio all'uscita del trasformatore elevatore di corrente;
- Rotazione sul piano del capocorda (Fig.13) quando sono collegati in un quadro elettrico come cavi di arrivo e partenza.

Questi stress provocano un indebolimento della crimpatura del capocorda e quindi una variazione della resistenza elettrica. Per valutare la dipendenza della resistenza di crimpatura R_{crimp} dagli stress meccanici sono state analizzate connessioni crimpate con capicorda di diverso profilo di crimpatura (Tabella 1) utilizzando un solo cavo per evitare influenze dovute ad altri cavi. Tutte le misure sono state effettuate entro tre giorni. Tutti i capicorda sono stati sostituiti dopo ogni prova. Le due estremità del cavo utilizzato come lato + (freccia blu) e lato – (freccia rossa), Fig.14. I capicorda sono stati crimpati al cavo ad una pressione di circa 70 MPa. Le prove sono state eseguite con capicorda di produttori diversi, indicati con A, B e C. Il cavo di prova è stato sottoposto a torsione di 180° attorno all'asse di simmetria, in senso orario e antiorario (Fig. 15a) e rotazione sul piano del capocorda (Fig. 15b).

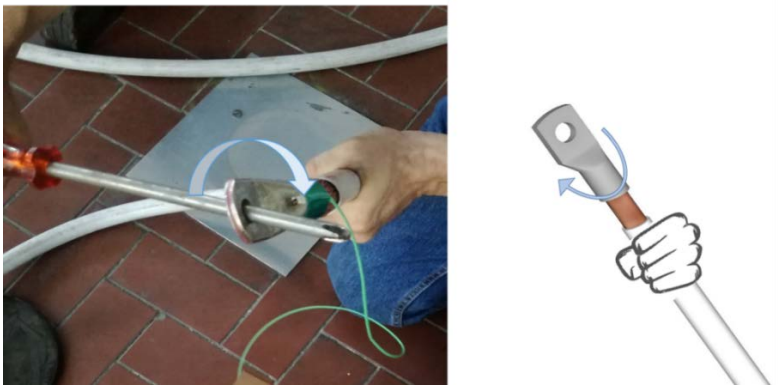


Fig.12. Torsione di un cavo di prova intorno al proprio asse di simmetria.

Fig.13. Rotazione di un cavo di prova intorno al piano del capocorda.

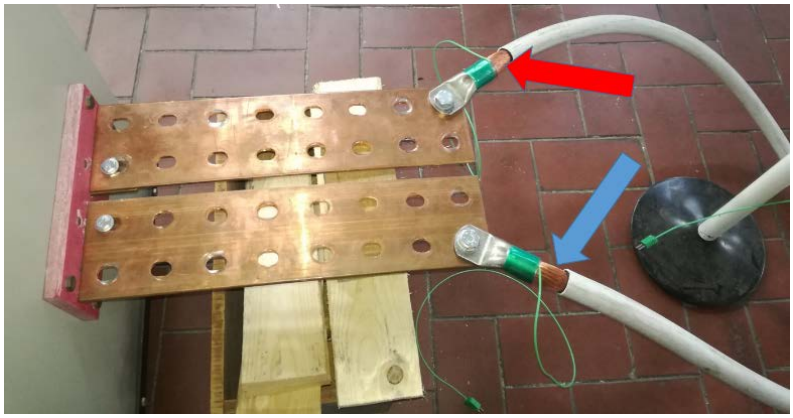


Fig.14. Distinzione delle estremità del cavo capicordato.

Fig.15a. Torsione di 180 °del cavo in senso orario ed antiorario.

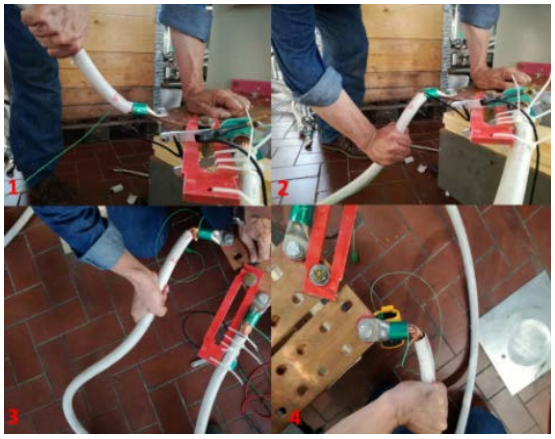


Fig.15b. Sequenza di quattro rotazioni del cavo attorno al piano del capocorda. 1) 45° verso l'alto, 2) 45° verso il basso, 3) 45° verso destra e 4) 45° verso sinistra.

La tabella 2 riporta le misure effettuate, specificando il tipo di capocorda, il profilo di crimpatura e il lato del cavo a cui sono stati collegati i capicorda testati. Sono stati esaminati cinque casi.

Tabella 1 Profili di crimpatura dei capicorda per le prove di stress meccanico.

N° profilo	Tipo	Foto
1	A singola rientranza quadra	
2	A doppia rientranza	
3	Esagonale	

Tabella 2. Prove eseguite in diversi casi.

Caso	**Tipo**	**Profilo**	**Lato cavo**	**Corrente** (A)
I	A	1	+	315
II	A	2	+	400
III	B	2	+	400
IV	C	3	+	400
V	A	Saldatura a stagno, crimpatura e ricottura	+	400

5.1 Comportamento della resistenza elettrica in una connessione crimpata ad un cavo soggetto a torsioni

Nel caso I (Fig. 16) il valore di R_{crimp} è cambiato in particolare nelle prime dieci torsioni dove si osserva un aumento di circa il 40% rispetto al valore iniziale (prima delle torsioni). Dopo la decima torsione, il valore di R_{crimp} si è stabilizzato. Infatti, tra la decima e la cinquantesima torsione si osserva solo una variazione dell'8%. Anche nei casi II e III (Fig.17 e 18) R_{crimp} ha mostrato una variazione nelle prime dieci torsioni di circa il 20%.

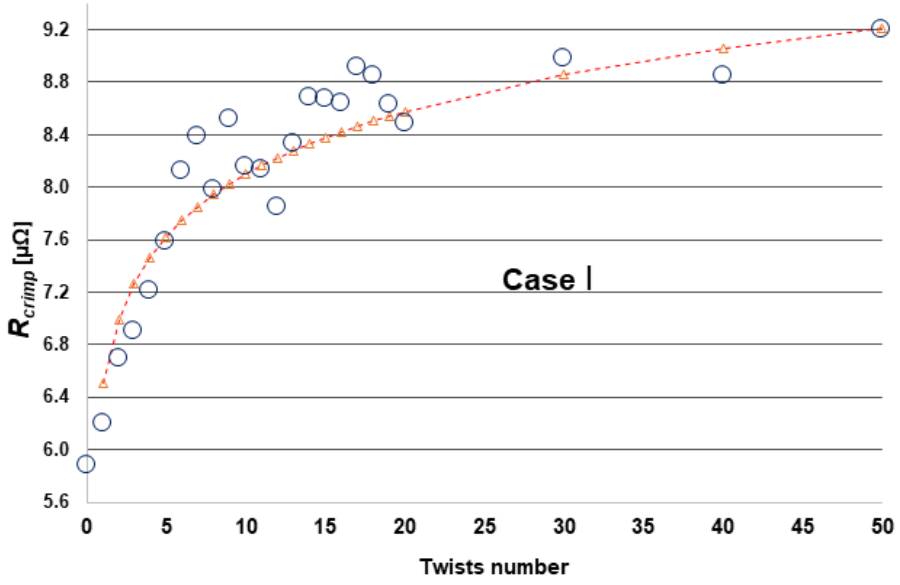


Fig. 16. Andamento di R_{crimp} nel caso I.

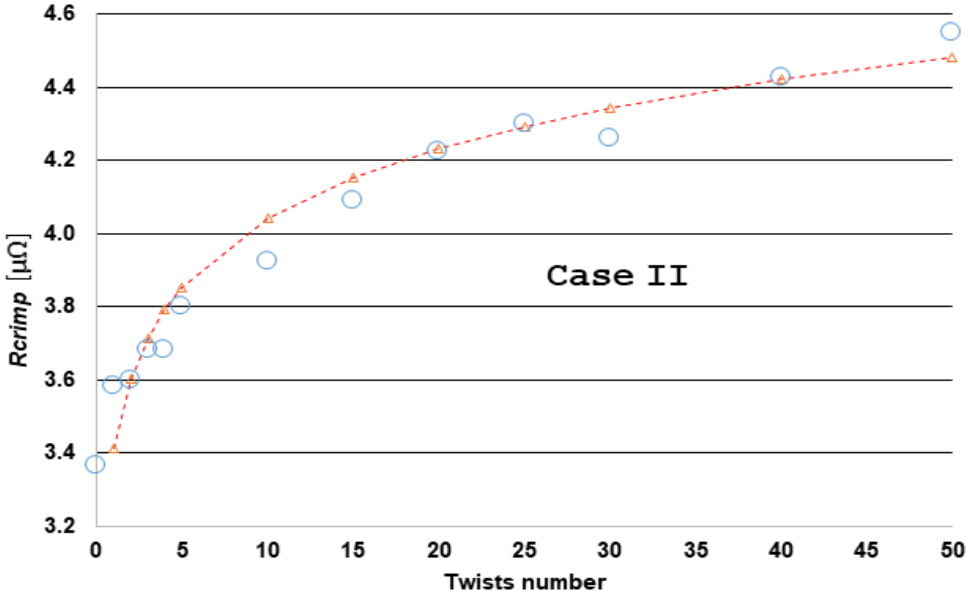


Fig. 17. Andamento di R_{crimp} nel caso II.

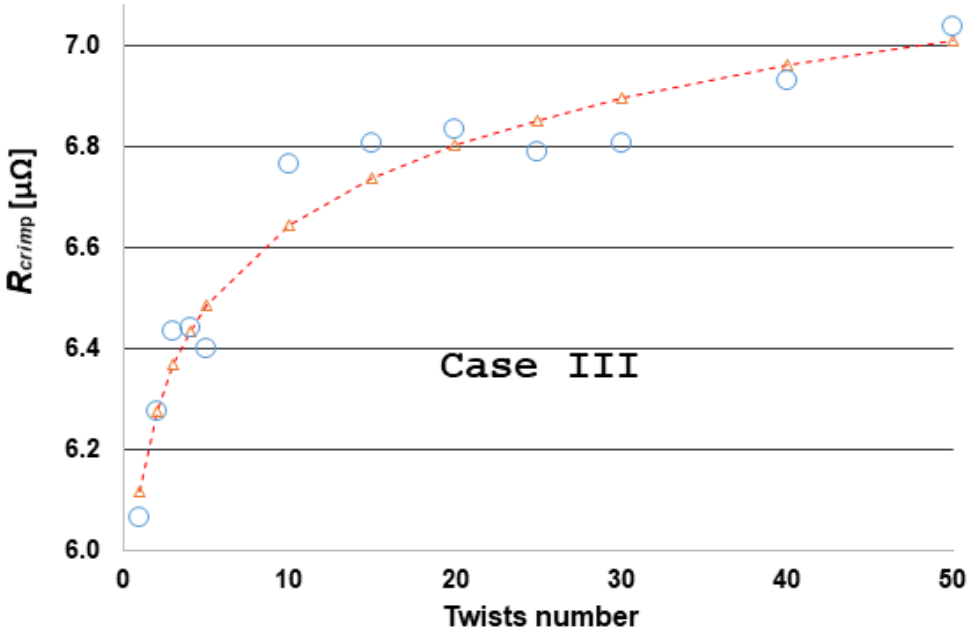


Fig. 18. Andamento di R_{crimp} nel caso III.

Ciò è presumibilmente dovuto allo stesso profilo di crimpatura dei capicorda. La differenza dei valori iniziali di R_{crimp} (3,4 μΩ vs 5,9 μΩ) potrebbe essere dovuta al diverso tipo di capocorda e alla posizione leggermente diversa delle rientranze. Ciò significa che il valore iniziale di R_{crimp} non può essere facilmente previsto se la crimpatura viene eseguita manualmente. La Fig. 19 mostra il comportamento di R_{crimp} nel caso IV.

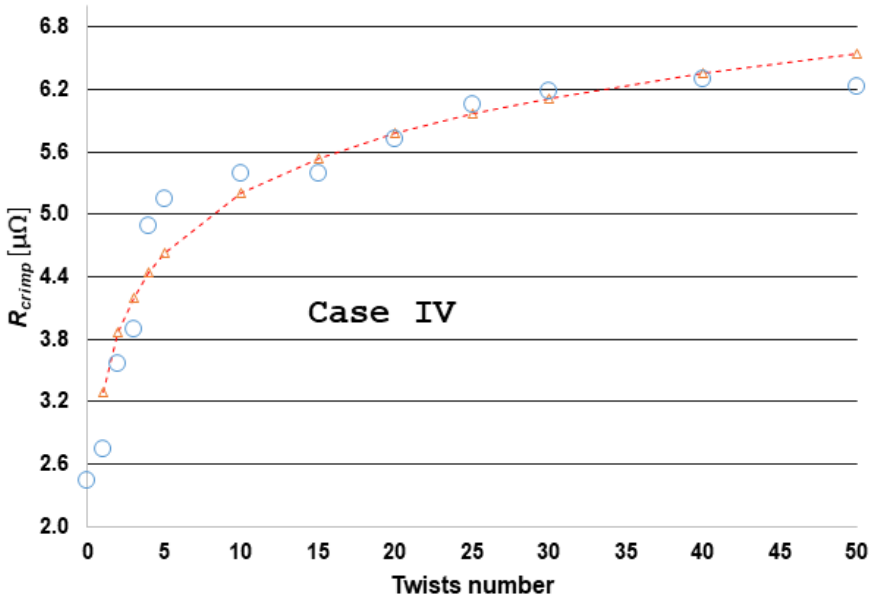


Fig. 19. Andamento di R_{crimp} nel caso IV.

R_{crimp} ha mostrato un notevole cambiamento nelle prime dieci torsioni. Alla decima torsione il valore di R_{crimp} era doppio rispetto al valore iniziale. L'andamento di R_{crimp} è di tipo logaritmico (tratteggio). La Fig. 20 riassume il comportamento di R_{crimp}

rispetto al valore iniziale nei quattro casi. Poiché nel caso IV R_{crimp} ha mostrato la variazione più alta, ciò significa che una connessione crimpata a profilo esagonale è più sensibile alle torsioni. Ciò conferma l'analogo risultato riportato in [11].

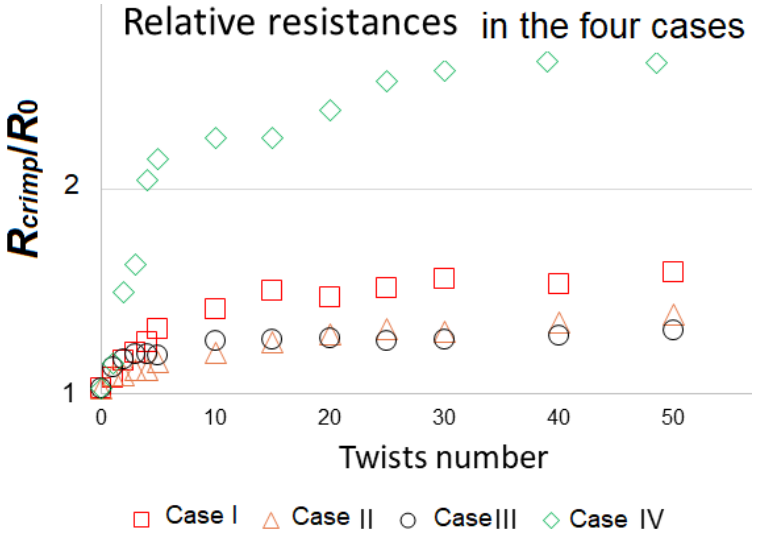


Fig. 20. Andamento di R_{crimp} nei quattro casi rispetto al rispettivo valore iniziale R_0.

Dato che nel caso IV R_{crimp} dopo cinquanta torsioni era pari a 6,2 μΩ a partire da 2,44 μΩ, ciò significa che, se il valore iniziale di R_{crimp} fosse stato 6 μΩ, come nei casi I e III, in questa connessione (con profilo esagonale), R_{crimp} avrebbe potuto raggiungere i 16 μΩ dopo cinquanta torsioni, triplicando la potenza dissipata. R_{crimp} delle connessioni con capicorda di profilo 2 (doppia rientranza, casi II e III) è risultato simile e migliore delle altre. R_{crimp} delle connessioni con capicorda di profilo 1 (singola rientranza quadrata, (caso I) ha mostrato invece una variazione di circa il 50%, con R_{crimp} massima≅ 9,2 μΩ (Fig. 16). In tutte le prove si è osservato un aumento di R_{crimp} nelle prime dieci torsioni. Poiché durante un anno, in un laboratorio di prova i cavi di prova vengono sottoposti ad almeno cinque torsioni, dopo due anni è necessaria una misura di R_{crimp} su ogni capocorda per valutarne la sostituzione. Per confrontare la connessione crimpata con un'altra tecnica di connessione, è stata anche valutata la dipendenza della resistenza di una connessione tra un capocorda di tipo A saldato ad un cavo sottoposto a venti torsioni (Fig.21). La variazione di resistenza è stata molto contenuta (media ≅ 2,8 μΩ).

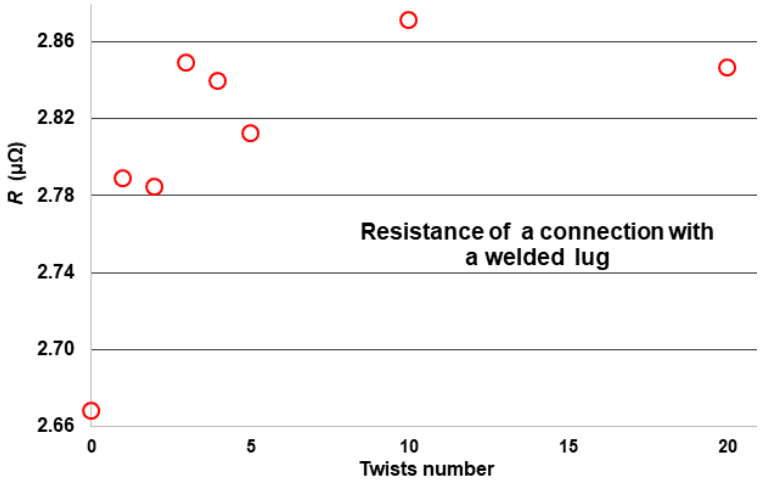


Fig. 21 Andamento della resistenza di una connessione saldata tra capocorda e cavo sottoposto a torsioni.

Successivamente, il capocorda è stato crimpato misurando successivamente R_{crimp}. I risultati in Fig. 22.

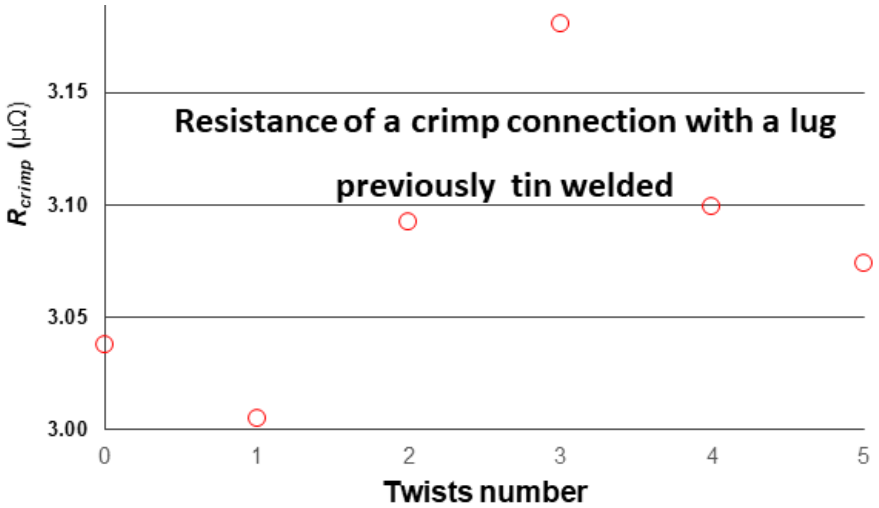


Fig. 22. Andamento di R_{crimp} di una connessione crimpata, precedentemente saldata tra capocorda e cavo sottoposto a torsioni.

Confrontando le Figure 21 e 22 si osserva un leggero aumento della resistenza (valore medio 2,8 μΩ vs. 3,05 μΩ). Ciò potrebbe essere dovuto a una frattura della saldatura in cui è stato crimpato il capocorda. Poiché non è stato osservato alcun aumento di R_{crimp}, le misure sono state effettuate solo fino alla quinta torsione. È stata eseguita quindi una ricottura del capocorda per fondere lo stagno fratturato. Dopo la ricottura, R_{crimp} ha recuperato il valore quando il capocorda era solo saldato (Fig. 23).

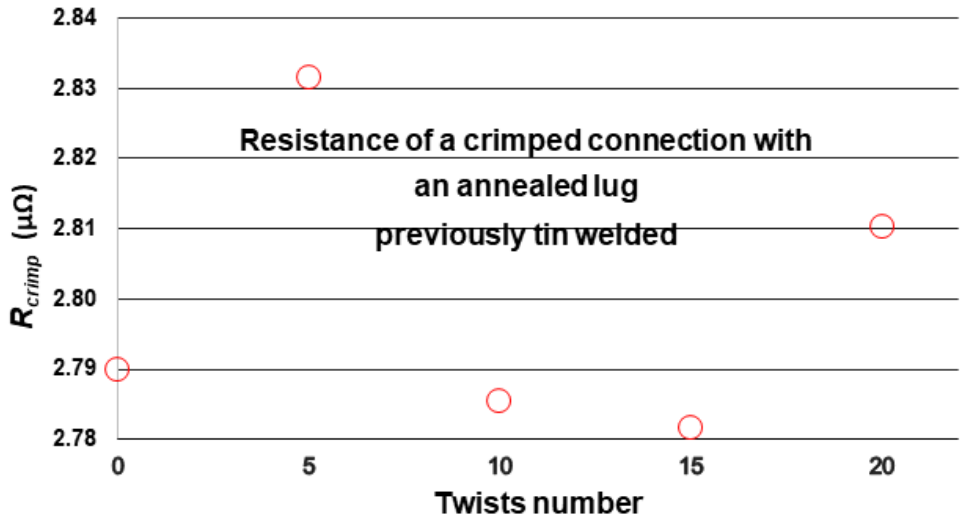


Fig. 23. Andamento di R_{crimp} di una connessione con capocorda, precedentemente saldato e poi ricotto, crimpato su un cavo sottoposto a torsioni.

5.2 Comportamento della resistenza elettrica in una connessione crimpata ad un cavo soggetto a rotazioni

Quando il cavo è stato sottoposto a rotazioni sul piano del capocorda, il valore di R_{crimp} è stato valutato misurando ΔV tra il foro di ispezione del capocorda sul lato + e l'inizio del cavo sul lato -. Al cavo è stato crimpato un capocorda di tipo A con profilo 1. La misura è stata effettuata a 315 A. Il valore di R_{crimp} è stato ottenuto sottraendo la resistenza del cavo dal valore totale misurato. In Fig. 24 si osserva un cambiamento anomalo di R_{crimp} nelle prime cinque rotazioni, quindi una stabilizzazione intorno al valore di 9 μΩ.

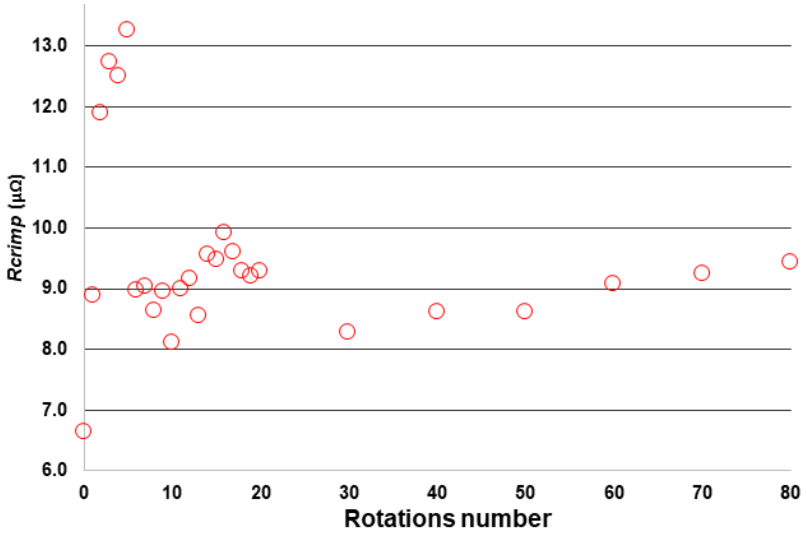


Fig. 24. Andamento di R_{crimp} di una connessione con capocorda crimpato ad un cavo sottoposto a rotazioni attorno al piano del capocorda.

5.3 Incertezza di misura

Le componenti di incertezza nella misura della resistenza di una connessione crimpata sono dovute all'accuratezza del DMM e della pinza amperometrica, alla dispersione delle misure di tensione, alla riproducibilità dovuta alla pinza Voltmetrica e al puntale. Queste ultime sono state valutate rispettivamente:

- Per la pinza voltmetrica: bloccando il puntale sul foro di ispezione del capocorda ed effettuando trenta letture della caduta di tensione tra il foro di ispezione e l'inizio del colletto dell'altro capocorda (Fig.25a) calcolandone la deviazione standard della media [4];
- Per il puntale, è stata ottenuta bloccando la pinza sull'inizio del cavo e posizionando il puntale sul foro di ispezione effettuando trenta letture della tensione sul colletto del capocorda (Fig.25b) calcolandone sempre la deviazione standard della media.

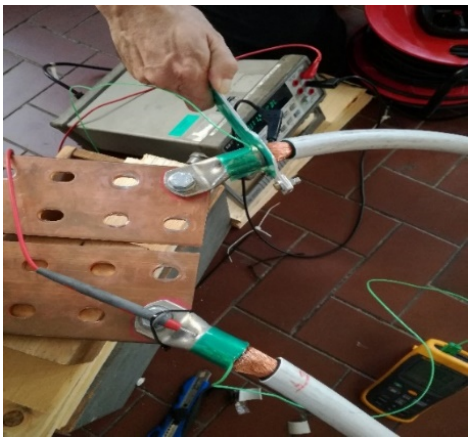


Fig.25a. Metodo per il calcolo della riproducibilità dovuta alla pinza voltmetrica

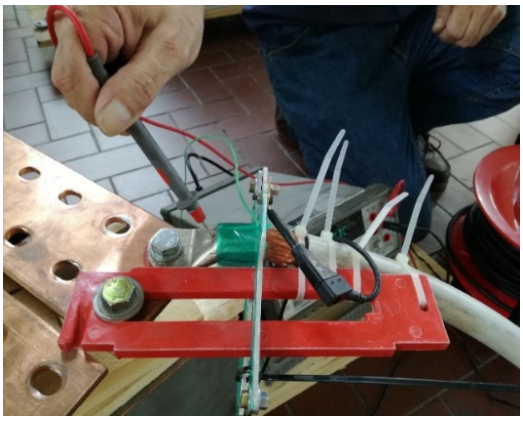


Fig.25b. Metodo per il calcolo dellaala riproducibilità dovuta al puntale

In Tabella 4 viene riportato il budget di incertezza della misura di R_{crimp} di una connessione crimpata dopo la prima torsione di 180° in senso orario. La misura è stata effettuata a 404 A alla temperatura ambiente di 25,9°C. La tensione letta dal DMM è stata di 2,45 mV, mentre R_{crimp} è stata di 6,064 μΩ. In Tabella 5 invece viene riportato il budget di incertezza della misura di R_{crimp} di una connessione crimpata dopo la seconda rotazione. La misura è stata effettuata a 312 A ad una temperatura di 26,7 °C. La tensione letta dal DMM è stata di 44,8 mV. La resistenza misurata (del cavo e connessione) è stata di 139,9 μΩ con R_{crimp} 8.88 μΩ.

Tabella 4. Budget di incertezza della misura R_{crimp} di una connessione crimpata dopo la prima torsione.

Componente	Tipo	Valore (%)	Gradi libertà ν
Riprocibilità pinza voltmetrica	A	5,0	29
Riproducibilità puntale	A	0,3	29
Accuratezza DMM	B	0,1	∞
Ripetibilità misure ΔV	A	0,05	29
Accuratezza pinza amperometrica	B	0,9	∞
u_c(R_{crimp})		**5,1**	92
U(R_{crimp})		**10,3**	

Tabella 5. Budget di incertezza della misura R_{crimp} di una connessione crimpata dopo la seconda rotazione.

Componente	Tipo	Valore (%)	Gradi libertà ν
Resistenza cavo	B	1,5	50
Riproducibilità dei puntali[1]	A	0,03	29
Accuratezza DMM	B	0,01	∞
Ripetibilità misure ΔV	A	0,1	29
Accuratezza pinza amperometrica	B	1,0	∞
u_c (R_{crimp})		**1,9**	> 50
U(R_{crimp})		**3,8**	

5.4 Discussione

È stato rilevato un aumento di R_{crimp} quando il cavo è stato sottoposto a stress meccanici dovuto presumibilmente ad un rilassamento della zona di crimpatura sul capocorda e al distacco di alcuni trefoli dal cavo quando è sottoposto a torsioni. Questi effetti aumentano la resistenza di contatto tra capocorda e cavo, aumentando il valore di R_{crimp}. Comunque, in tutte le misure, il valore di R_{crimp} è risultato inferiore a 15 μΩ, sebbene il cavo sia stato sottoposto a stress meccanici. Questo è un risultato soddisfacente in quanto15 μΩ è considerato valore tipico di una buona resistenza elettrica di una connessione crimpata [22]. Sempre in [22] si afferma inoltre che, per ottenere tale valore, dovrebbe essere necessaria una pressione di crimpatura di 8 kpsi (≅ 55 MPa). Nel LATFC è stata usata una pressione più elevata (70 MPa). Il nostro risultato conferma quanto riportato in [22] ovvero che una maggiore pressione di

[1] Poiché una parte del cavo era rigonfia, ciò non ha consentito di posizionare correttamente la pinza voltmetrica per cui la misura è stata effettuata con due puntali, una su ciascun capocorda alle estremità del cavo, includendo la resistenza del cavo e dell'altro capocorda.

crimpatura permette di ottenere una migliore conducibilità anche in caso di stress meccanici.

6. comportamento della resistenza elettrica di una connessione crimpata sottoposta a stress termici

Un interessante studio sulla dipendenza termica della resistenza elettrica delle connessioni crimpate è riportato in [12] dove connessioni crimpate in buono e cattivo stato sono state sottoposte a shock termici mostrando che la resistenza di contatto delle connessioni crimpate migliori aumentava a una velocità inferiore nel tempo. In [23], una connessione crimpata è stata invece riscaldata in forno per alcuni giorni. Dopo questo trattamento, anche se senza evidenza di danno, ha mostrato un'intermittenza di elevata resistenza di contatto. Nei laboratori di prova, durante le prove di sovratemperatura, i cavi con capicorda crimpati sono frequentemente sottoposti a stress termici poiché la loro corrente può essere superiore a quella nominale. In una prova di sovratemperatura su di un componente elettrico utilizzato nei sistemi di distribuzione (quadro, sbarra) su ciascuna fase di alimentazione dell’oggetto possono esser presenti più cavi. L’effetto pelle sulle barre del trasformatore elevatore di corrente che alimenta l’oggetto in prova, la diversa impedenza dei cavi provocano la disuniformità delle correnti nei cavi causando il surriscaldamento delle connessioni crimpate. L’elevata temperatura accelera l’ossidazione interna del capocorda e provoca un allentamento della crimpatura, portando ad un incremento sia della resistività dei materiali del capocorda, sia della resistenza di contatto tra il cavo e il connettore. La verifica della ripartizione disomogenea delle correnti è stata effettuata misurando le correnti sui cavi di prova per l’alimentazione di un condotto sbarra in bassa tensione. Ognuna delle fasi dell’apparecchiatura è stata alimentata da sei cavi. Le misure di corrente sono state eseguite una volta raggiunto l’equilibrio termico. I risultati sono riportati in Tabella 5. L'incertezza delle misure di corrente è stata stimata dalle specifiche di accuratezza della pinza amperometrica, come contributo d'incertezza di tipo B e dalla deviazione standard della media delle misure come contributo d'incertezza di tipo A [4]. Le fasi di alimentazione sono identificate come R, S e T (Fig.26) e i cavi sono numerati da uno a sei. Le correnti su ciascun cavo dovrebbero essere dell’ordine di 400 A, mentre dalle misure ottenute si ha che il cavo 6R è percorso da una corrente di circa 800 A. Al contrario ci possono essere anche cavi sotto

sfruttati, come ad esempio il cavo 2R con 232 A. Quindi, durante una prova di sovratemperatura i cavi non sono sfruttati tutti allo stesso modo.

Tabella 5. Correnti nei cavi di prova durante una verifica di sovratemperatura su di un condotto sbarra di bassa tensione

Cavo	Corrente(A)
1 T	345.8 ± 5.9
2 T	462.0 ± 6.9
3 T	371.4 ± 6.1
4 T	385.0 ± 6.2
5 T	414.0 ± 6.5
6 T	483.0 ± 7.1
Totale sulla fase T	**2518**
1 S	331.9 ± 5.8
2 S	470.5 ± 7.0
3 S	541.5 ± 7.6
4 S	284.0 ± 5.4
5 S	521.0 ± 7.4
6 S	461.0 ± 6.9
Totale sulla fase S	**2521**
1 R	277.9 ± 5.3
2 R	232.4 ± 4.9
3 R	397.6 ± 6.3
4 R	298.5 ± 5.5
5 R	541.0 ± 7.6
6 R	792.5 ± 9.7
Totale sulla fase R	**2530**

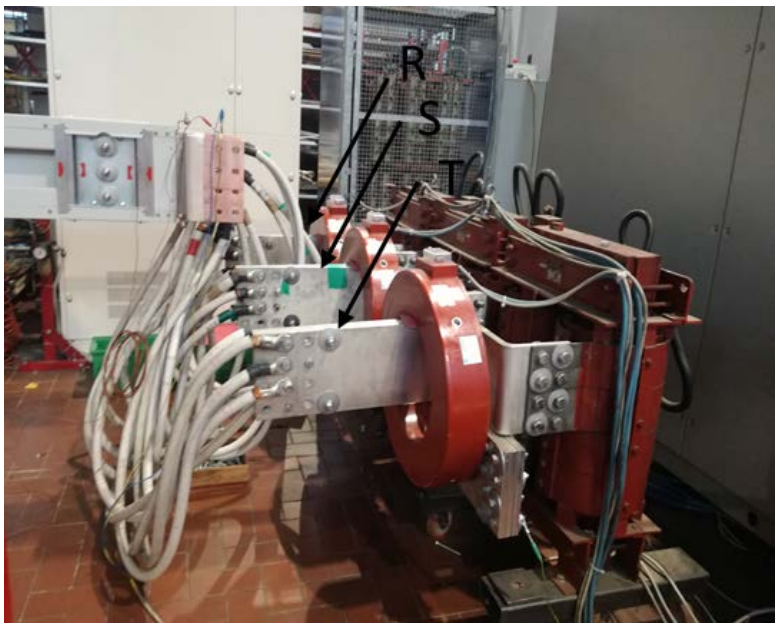


Fig.26. Collegamento dei cavi di prova su di un condotto sbarra di bassa tensione.

Ciò è dovuto al fatto che, in regime alternato, l'impedenza assume un ruolo importante poiché i cavi più esterni hanno anelli più grandi e quindi un'impedenza maggiore. Inoltre, essendo i cavi grandi e pesanti, spesso non è facile sistemarli e quindi possono avere spire anomale aumentando ulteriormente la loro impedenza. Per questo motivo, un cavo di prova è stato sottoposto a cicli termici per indagare il comportamento resistivo delle connessioni crimpate alle sue estremità. Le correnti di alimentazione sono state 800 A e 1000 A, scelte perché correnti elevate come nel cavo 6R nella prova precedente sono frequenti.

6.1 Cicli termici

Il cavo, è stato sottoposto a cinque cicli termici consecutivi con correnti di alimentazione di 800 A nel primo e negli ultimi due cicli e di 1 kA nel terzo. Due capicorda con profilo a esagonale sono stati crimpati alle sue estremità. Il capocorda 1 (lato sinistro) era stato precedentemente sottoposto a stress meccanici raggiungendo un valore di R_{crimp} di circa 6 μΩ. Le misure di R_{crimp} al termine di ogni ciclo termico (dopo il tempo di raffreddamento) e durante il tempo di riscaldamento sono state effettuate rispettivamente con il micro ohmmetro e con il metodo volt-amperometrico. Queste ultime sono state effettuate per verificare sia l'affidabilità delle misurazioni del micro ohmmetro sia se R_{crimp} stesse già cambiando durante il riscaldamento. I cicli termici sono stati realizzati per simulare lo stress termico a cui sono sottoposti i cavi durante un vero e proprio test di sovratemperatura. A partire da una temperatura di 20 °C, ogni ciclo termico consisteva in un tempo di riscaldamento, seguito da un tempo di stabilizzazione alla temperatura massima (100 ÷120) °C ed infine da un tempo di raffreddamento (Fig. 27).

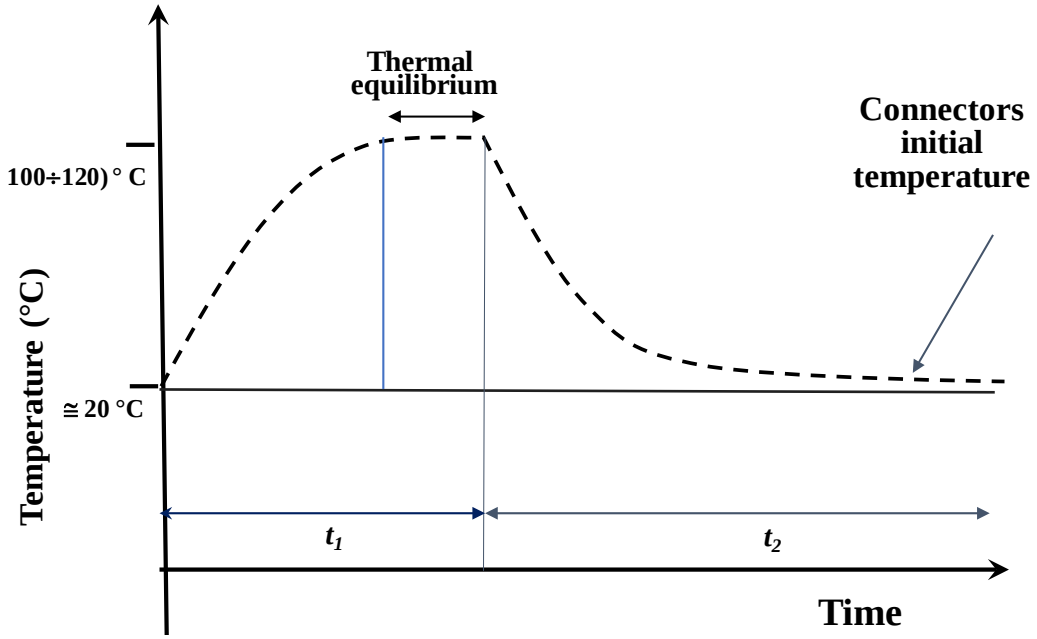


Fig.27 Ciclo termico al quale è stato sottoposto il cavo in prova. t_1 8 h, riscaldamento (6 h) e equilibrio termico (2 h). t_2 (raffreddamento) circa 12 h.

Le misure dirette col microhmmetro sono state eseguite connettendolo al capocorda come indicato in Fig. 28.

Fig.28. Collegamento del microohmmetro al capocorda per la misura diretta di R_{crimp}.

La Tabella 6 e la Fig. 29 riportano i valori di R_{crimp} dei due capicorda al termine di ogni ciclo termico. Si osserva un aumento del valore di R_{crimp} alla fine di ogni ciclo.

Tabella 6. Valore di R_{crimp} odei due capicorda al termine di ogni ciclo termico (misure col micro-ohmmetro).

Ciclo	R_{crimp} *capocorda* 1 *a* 20 °C (μΩ)	R_{crimp} *capocorda* 2 *a* 20 °C (μΩ)
0	6,0	4,0
I	7,1	4,8
II	10,4	6,8
III	18,2	23,1
IV	19,7	25,4
V	25,2	25,3

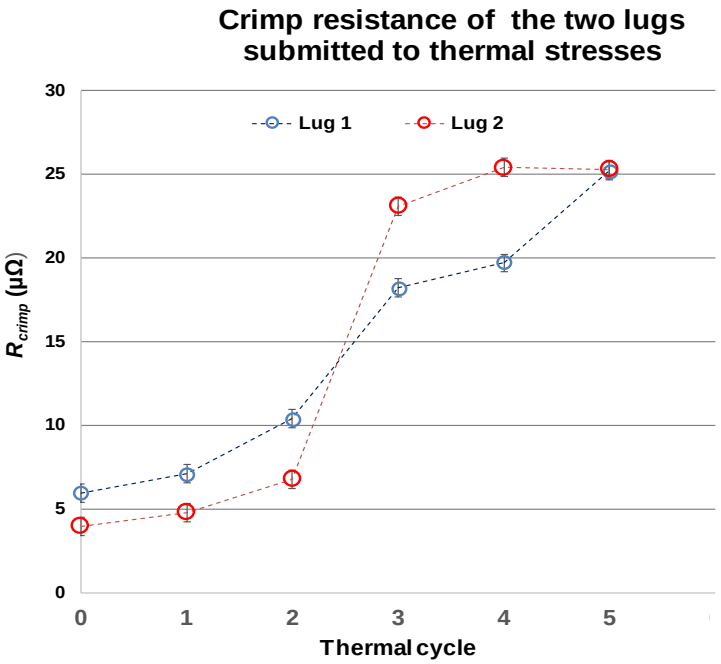


Fig. 29. Andamento del valore di R_{crimp} dei due capicorda dopo ogni ciclo termico.

Nei primi due cicli, l'andamento di R_{crimp} dei due capicorda è stato simile (Fig. 30), mentre dopo il terzo ciclo R_{crimp} del capocorda 2 è aumentata maggiormente rispetto al capocorda 1. Poiché il capocorda 2 è stato crimpato in posto diverso dal capocorda 1, il maggiore aumento di R_{crimp} è presumibilmente dovuto a questa diversa posizione di crimpatura. La corrispondente maggiore potenza dissipata dalla connessione ha portato a una temperatura di 120 °C sul capocorda. Il valore di R_{crimp} di entrambi i capicorda dopo l'ultimo ciclo termico è stato di circa 25 μΩ mentre il valore R_{crimp} massimo di 9 μΩ era stato rilevato nel caso delle connessioni crimpate sottoposte a stress meccanico. Pertanto, R_{crimp} sembra esser più sensibile agli stress termici che a quelli meccanici Tuttavia, il valore finale di R_{crimp} del capocorda 2 è dovuto verosimilmente alla sua crimpatura difettosa.

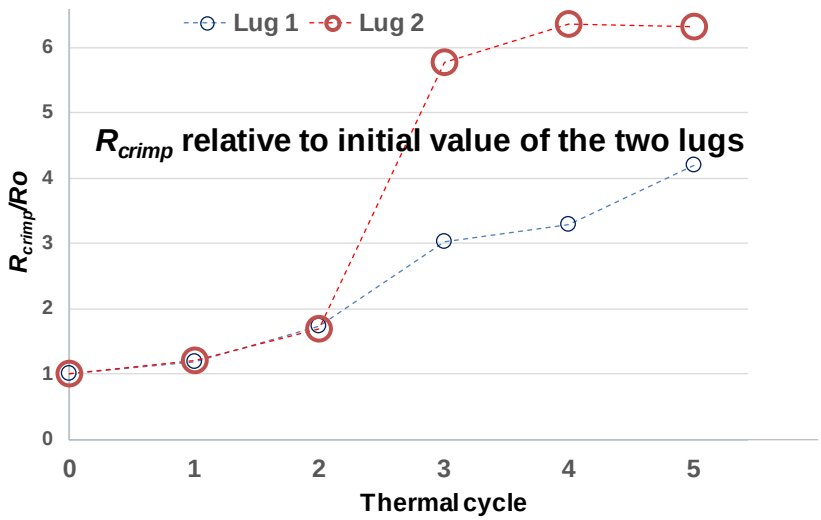


Fig. 30. Andamento del valore di R_{crimp} relativo al valore iniziale R_0 dei due capicorda dopo ogni ciclo termico.

Il valore di R_{crimp} del capocorda 1 ha subito una variazione più rapida quando sottoposto a stress termici rispetto a quelli meccanici. Tuttavia, il suo valore finale è presumibilmente dovuto anche ai precedenti stress meccanici a cui è stato sottoposto. In Fig. 31 è mostrato l'andamento di R_{crimp} del capocorda 1, partendo dalla sua crimpatura, quindi sottoposto a stress meccanici e successivamente termici.

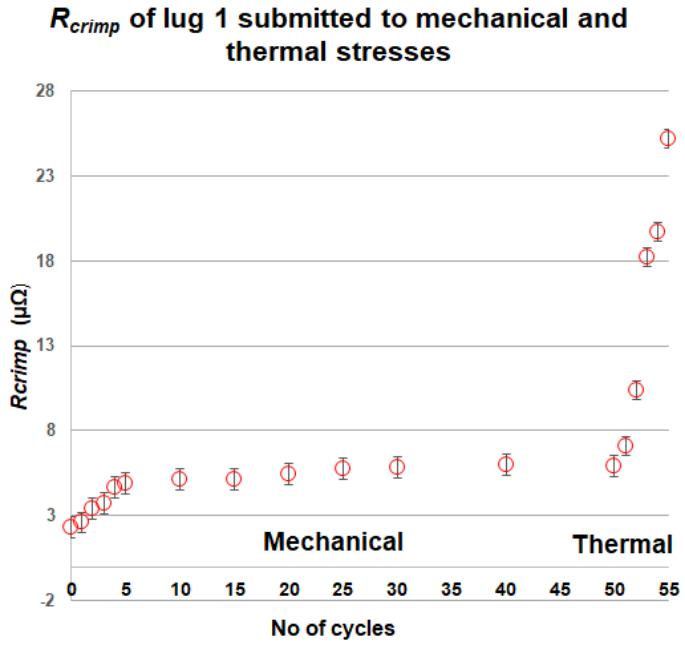
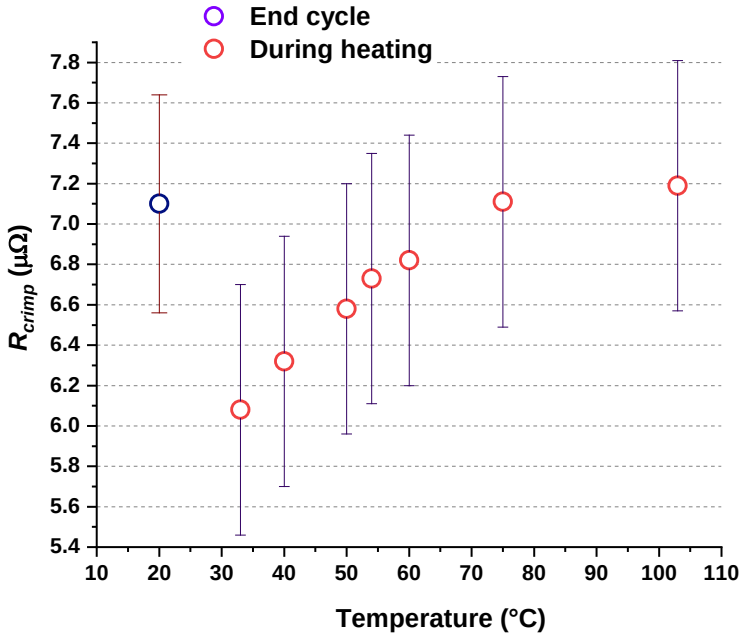


Fig. 31. Andamento del valore di R_{crimp} del capocorda 1 sottoposto prima a stress meccanici e successivamente termici.

La tabella 7 riportano invece le misure voltamperometriche sul capocorda 1 durante il riscaldamento nel ciclo termico I. Considerando le incertezze dei metodi, stimate rispettivamente nelle tabelle 8 e 11, le misure concordano in modo soddisfacente (Fig. 32).

Tabella 7. Valore di R_{crimp} del capocorda 1 durante il tempo di riscaldamento nel ciclo termico I.

Temperatura del capocorda 1 (°C)	R_{crimp}[2] (μΩ)
33	6,08
40,2	6,32
49,9	6,58
53,8	6,73
60	6,82
75	7,11
103	7,19



(Fig. 32. Confronto delle misure di R_{crimp} rispettivamente al termine del ciclo termico I dopo il periodo di raffreddamento, (punto blu) e durante il periodo di riscaldamento (punti rossi). Queste misure sono state effettuate rispettivamente con il micro ohmmetro e con il metodo voltamperometrico.

6.2 Valutazione dell'incertezza delle misure di R_{crimp} con il micro ohmmetro

Per valutare l'incertezza delle misure di R_{crimp} al termine di ogni ciclo termico, è stata valutata la riproducibilità delle misure dovute al puntale quale incertezza tipo A come illustrato in par. 5.3 ottenendo $u_A(R_{crimp}) \cong 0{,}27$ μΩ Per valutare l'incertezza totale della misura di R_{crimp} è stata aggiunta la componente dovuta all'accuratezza del micro ohmmetro. Il bilancio d'incertezza è riportato in tabella 8.

[2] Questi valori di resistenza sono stati riportati a 20 °C tenendo conto del coefficiente di temperatura del materiale del capocorda per essere confrontabili con i valori di resistenza misurati dopo il tempo di raffreddamento (a 20 °C).

Tabella 8. Budget di incertezza semplificato della misura di R_{crimp} col micro ohmmetro sui capicorda dopo ogni ciclo termico.

Componente	Tipo	Incertezza tipo μΩ)
Riproducibilità dovuta al puntale Accuracy del micro ohmmetro	Normale A Rettangolare B	0,27 0,0021
$u_c(R_{crimp})$ $U(R_{crimp})$	RSS[3]	**0,27** **0,54**

6.3 Prove di sovratemperatura

Per studiare il comportamento di R_{crimp} nelle prove di sovratemperatura, sono state eseguite due prove di sovratemperatura in cui i cavi sono stati collegati solo a due delle tre fasi di un contattore per avere condizioni speculari su entrambi i poli. La corrente di alimentazione è stata di 400 A. Le fasi coinvolte sono identificate con R e S in Fig. 33°. È stata misurata la variazione di temperatura ai terminali del contattore nei punti di collegamento con i cavi di prova. Il sistema di misura per la valutazione di R_{crimp} è stato sempre lo stesso utilizzato per le prove precedenti aggiungendo cavi a bassa tensione di 2 m di lunghezza e 240 mm^2 di sezione, normalmente utilizzati nelle prove di sovratemperatura presso il LATFC. Due cavi per ciascuna fase sono stati collegati al generatore di corrente tramite le barre di rame ed ai terminali inferiori del contattore sulle due fasi interessate. Un terzo cavo è stato cortocircuitato all'uscita del contattore. Sono stati scelti capicorda crimpati con R_{crimp} alta e bassa a 20 °C per studiare la differenza di

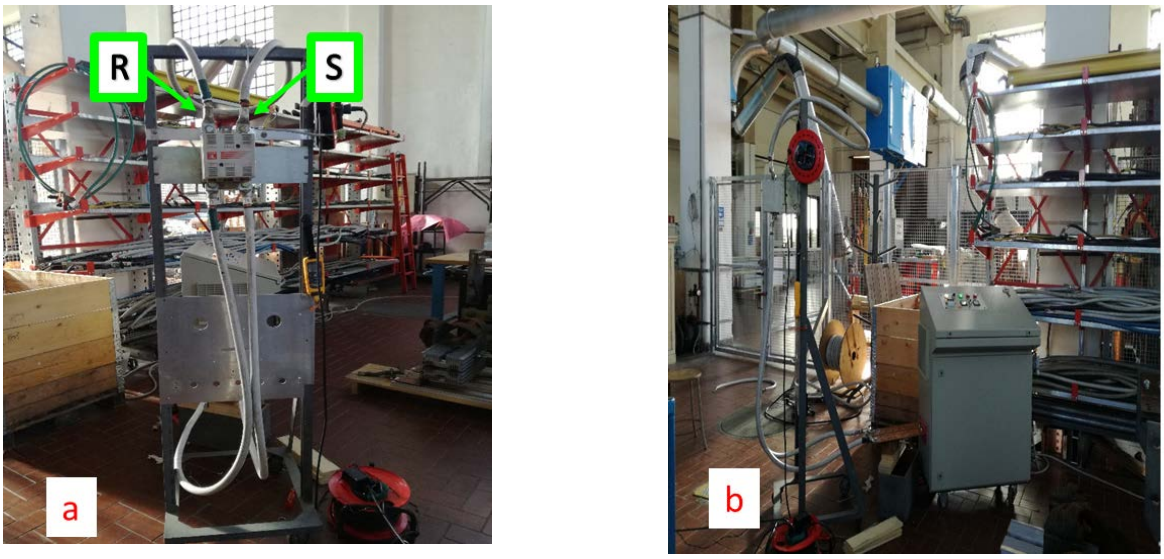


Fig.33. Sistema di misura per prove di sovratemperatura: viste frontale (a); laterale (b).

[3] RSS =Radice quadrata della somma quadratica.

temperatura sui terminali del contattore quando un capocorda crimpato è in buone o cattive condizioni. In entrambi i test sono stati usati quattro capicorda. Prima della prima prova, R_{crimp} a 20 °C di tre capicorda era circa 5 μΩ mentre il quarto presentava R_{crimp} a 20 °C circa 27 μΩ. Nella seconda prova la situazione era opposta con un capocorda con R_{crimp} iniziale cinque volte inferiore rispetto agli altri. Sono stati praticati dei fori ai terminali del contattore per misurare la temperatura. Le misure sono state eseguite una quando il contattore ha raggiunto l'equilibrio termico. Questa condizione è stata rilevata misurando la temperatura ogni 15 minuti. Nel campo delle prove di sovratemperatura, l'equilibrio di temperatura si ottiene quando la temperatura non varia di più di 1 K/h. Nelle Figg. 34° e 34b, sono mostrati rispettivamente i terminali sui quali sono state effettuate le misure di temperatura e il n. dei capicorda coinvolti nelle prove, I capicorda 1 e 3 sono stati collegati alla fase R mentre i capicorda 2 e 4 sono stati collegati alla fase S. È stata valutata la tensione tra il foro di ispezione dei capicorda e l'inizio del cavo con filo (Fig. 11). Tutte le misure di temperatura sono state effettuate tramite termocoppie mod K e il termometro Fluke 54 entrambi tarati rispetto al campione nazionale di temperatura. Le termocoppie per la misura della sovratemperatura sono state poste sul colletto dei capicorda (Fig. 35). La potenza dissipata è stata invece valutata dalle misure di corrente e di R_{crimp}. I valori di R_{crimp} e della potenza dissipata per entrambe le prove sono riportati nelle Figg. 37, 38 e in Tabelle 9 e 10.

Fig. 35°. Terminali di connessione del contattore su cui sono state eseguite le misure di temperatura.

Fig. 35b. Numero dei capicorda coinvolti nelle prove di sovratemperatura.

Fig. 36. Posizione della termocoppia per misurare l'aumento di temperatura dei capicorda nelle due prove.

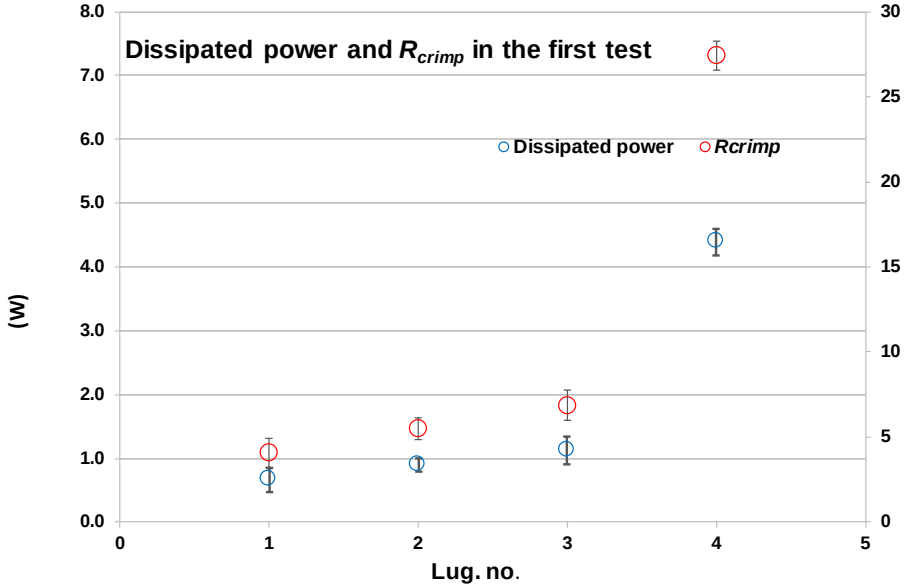


Fig. 37. Potenza dissipata e R_{crimp} e relative incertezze nella prima prova di sovratemperatura.

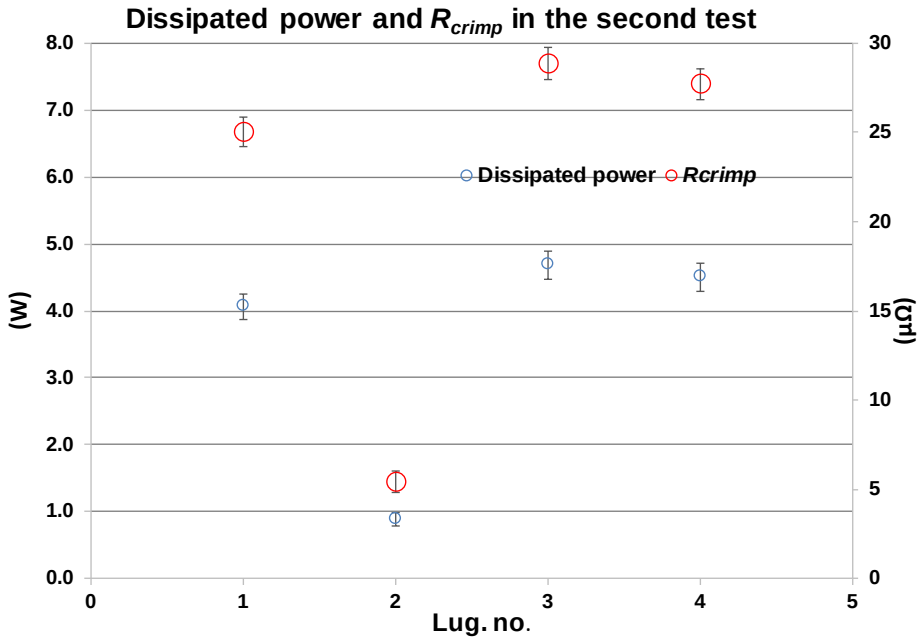


Fig. 38. Potenza dissipata e R_{crimp} e relative incertezze nella seconda prova di sovratemperatura.

Tabella 9. Risultati prima prova di sovratemperatura.

	Capocorda 1	Capocorda2	Capocorda 3	Capocorda 4
R_{crimp} a 20 °C (μΩ)	4,07 ± 0,62	5,49 ± 0,62	6,86 ± 0,63	27,42 ± 0,87
Temperatura ai terminali (°C)	71,4 ± 1,8	72,3 ± 1,8	72,8 ± 1,8	79,0± 1,8
Potenza dissipata (W)	0,67 ± 0,1	0,90 ± 0,11	1,12±0,11	4,50 ± 0,2
Sovratemperatura ai terminali (K)	50,5 ± 2,5	51,4 ± 2,5	51,9±2,5	58,1 ± 2,5

Tabella 10. Risultati della seconda prova di sovratemperatura.

	Capocorda 1	Capocorda 2	Capocorda 3	Capocorda 4
R_{crimp} a 20 °C (μΩ)	25,04 ± 0,84	5,42 ± 0,63	28,88 ± 0,91	27,73 ± 0,88
Temperatura ai terminali (°C)	79,4 ± 1,8	74,2 ± 1,8	81,8± 1,8	79,7 ± 1,8
Potenza dissipata (W)	4,07 ± 0,19	0,88 ± 0,11	4,69 ± 0,21	4,50 ± 0,20
Sovratemperatura ai terminali (K)	58,6 ± 2,5	53,4 ± 2,5	61,0 ± 2,5	58,9 ± 2,5

6.4 Incertezze di misura

Alcuni budget di incertezza semplificati delle misure di R_{crimp}, della potenza dissipata e della sovratemperatura sono riportati in Tabelle 11-13.

Tabella 11. Incertezza della misura del secondo capocorda nella prima prova.

componente	Tipo	Incertezza tipo relativa (%)
Riproducibilità pinza voltmetrica	Normale A	≅ 0,0055
Riproducibilità puntale	Normale A	≅ 0,32
Accuratezza DMM	Rettangolare B	≅ 5,5
Accuratezza pinza amperomtrica	Rettangolare B	≅ 0,92
	RSS	**≅ 5,6**

$u_{cr}(R_{crimp}) \cong$ 5,6 % e $U_r(R_{crimp}) \cong$ 11,2 %.

Moltiplicando per il valore di R_{crimp} del capocorda 2 della prima prova (5,49 μΩ) si ha:

Incertezza tipo composta $u_c(R_{crimp}) \cong$ 0,31 μΩ, incertezza estesa $U(R_{crimp}) \cong$ 0,62 μΩ.

Tabella 12. Incertezza della misura della potenza dissipata del secondo capocorda nella prima prova.

componente	Tipo	Incertezza tipo relativa (%)
Letture di corrente e resistenza	Normale A	≅ 0,89
Accuratezza microohmmetro	Rettangolare B	1,8
Accuratezza pinza amperometrica	Rettangolare B	5,6
	RSS	**≅ 5,95**

$u_{cr}(P) \cong$ 5,95 % e $U_r(P) \cong$ 11,9 %

Moltiplicando per la potenza dissipata del capocorda 2 della prima prova (0,9 W) si ha: Incertezza tipo composta $u_c(P) \cong$ 0,35 W, incertezza estesa $U(P) \cong$ 0,107 W.

Tabella 13. Incertezza della misura di sovratemperatura del capocorda 4 in entrambe le prove.

componente	Tipo	Incertezza tipo relativa (%)
Letture di temperatura	Normale A	≅ 0,017
Accuratezza termometro (T_{amb})	Rettangolare B	1,52
Accuratezza termom. ($T_{terminali}$)	Rettangolare B	1,52
	RSS	**≅ 2,15**

$u_{cr}(\Delta\theta) \cong$ 5,95 % e $U_r(\Delta\theta) \cong$ 4,3 %

Moltiplicando per la sovratemperatura del capocorda 4 di entrambe le prove 58,5 °C) si ha: Incertezza tipo composta $u_c(\Delta\theta) \cong$ 1,27 °C. incertezza estesa $U(\Delta\theta) \cong$ 2,5 °C.

7. Valutazione della resistenza massima accettabile di una connessione crimpata

La sovratemperatura in entrambe le prove per i capicorda con R_{crimp} (20 °C) ≅ 5 μΩ è stato circa 50 K. Invece, la sovratemperatura del capocorda 3 nella seconda prova con R_{crimp} (20 °C) 28,9 μΩ è risultato maggiore superiore a 60 K. Pertanto, se il contattore fosse sottoposto ad una prova di sovratemperatura reale, cioè collegato come in servizio ordinario, se avesse terminali in rame non trattato, potrebbe non essere validato[4]. È stato stimato un valore del valore della potenza dissipata dalle connessioni crimpate in una prova di sovratemperatura al di sopra di un quale può verificarsi un aumento eccessivo della temperatura sui capicorda e sui terminali del dispositivo in prova mettendone a rischio la validazione. Da questo valore è ricavabile un valore limite di R_{crimp} delle stesse connessioni crimpate, in funzione della corrente di prova. Questi valori sono stati ottenuti analizzando l'andamento della potenza dissipata nelle due prove di sovratemperatura. Le Figg. 39 e 40 mostrano questo andamento per ciascun capocorda in funzione della sovratemperatura Δθ sui terminali del contattore rispettivamente nella seconda e nella prima prova.

[4] In [24] sono indicati i limiti di sovratemperatura ai terminali di un'apparecchiatura in prova, in base al loro materiale. Quello più basso è relativo al rame non trattato, pari a 60 K.

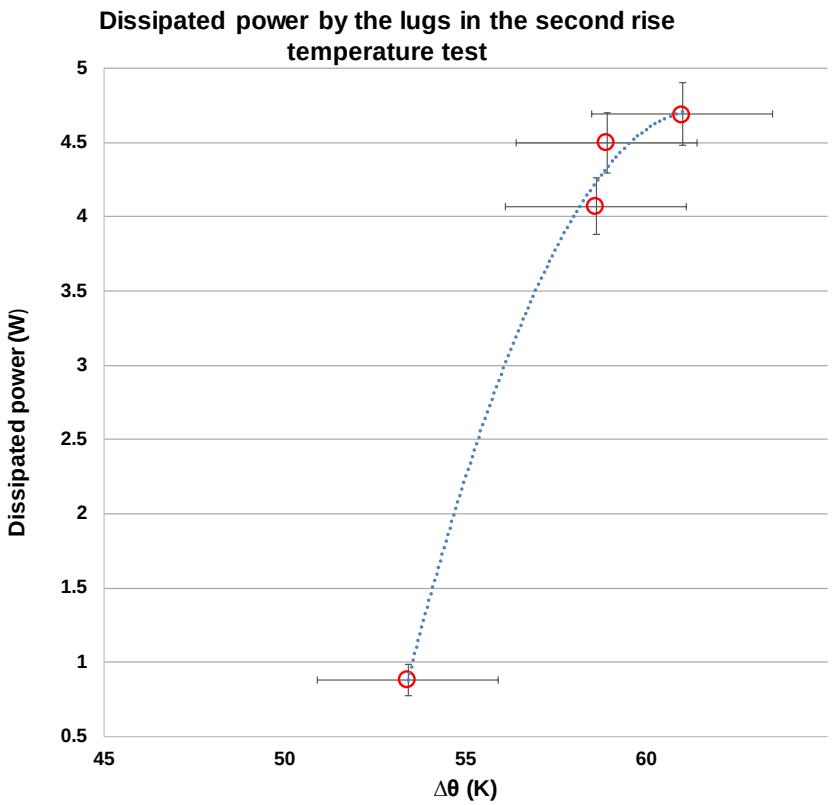


Fig. 39. Potenza dissipata W in funzione della sovratemperatura Δθ dei 4 terminali del contattore con le incertezze estese nella seconda prova di sovratemperatura.

La curva che meglio interpola i dati è una polinomiale del secondo ordine:

$$W_{diss}(\Delta\theta) = -0{,}0588 \times \Delta\theta^2 + 7{,}2287 \times \Delta\theta - 217{,}1 \qquad (1)$$

Un limite di sovratemperatura accettabile potrebbe essere 58 K in modo da essere, al di sotto dei 60 K. Per questo valore la potenza dissipata dal capocorda è:

$$W_{diss,acc} = -0{,}0588 \times 58^2 + 7{,}2287 \times 58 - 217.51 = 3.95\ W \qquad (2)$$

da cui è possibile stabilire la soglia massima di resistenza accettabile. Poiché la prova di sovratemperatura è stata effettuata a circa 400 A:

$$R_{crimp,acc} = \frac{W_{diss,acc}}{I^2} = \frac{3{,}95}{(400^2)} = 24{,}7\ \mu\Omega \qquad (3)$$

A conferma di questi valori, la stessa valutazione è stata fatta a partire dai risultati della prima prova in cui, per valori di R_{crimp} simili, gli incrementi di temperatura sono risultati leggermente inferiori rispetto a quelli della seconda prova.

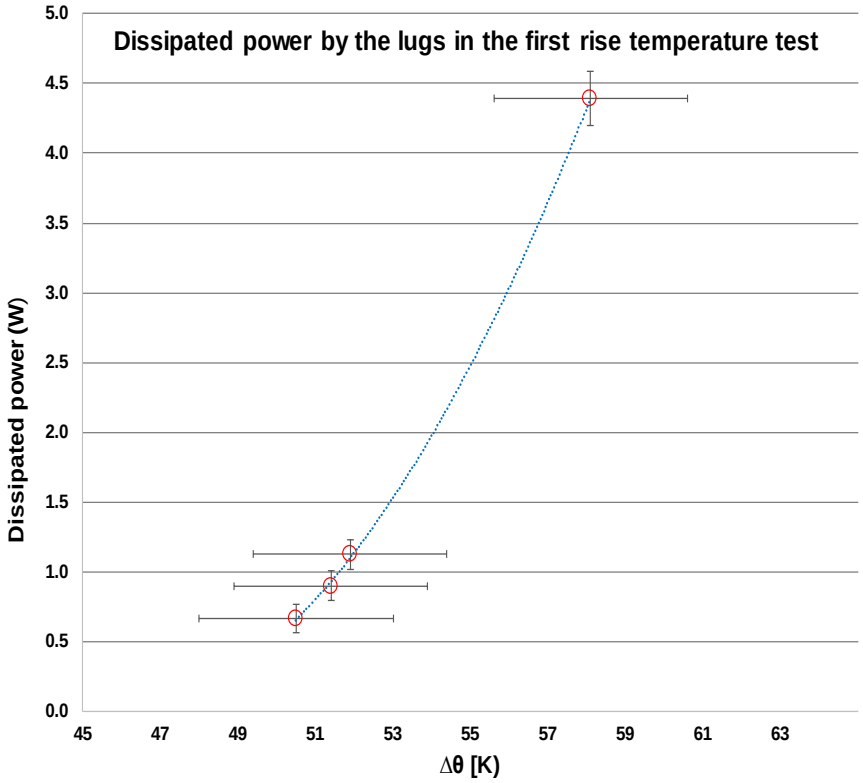


Fig. 40. Potenza dissipata W in funzione della sovratemperatura Δθ dei 4 terminali del contattore con le incertezze estese nella prima prova di sovratemperatura.

Anche per la prima prova la potenza dissipata può essere interpolata mediante una polinomiale del secondo ordine: Considerando ancora 58 K, valore limite della potenza dissipata da un capocorda:

$$W_{diss\,,lm} = 0{,}0301 \times 58^2 - 2{,}77 \times 58 + 63{,}58 = 4{,}18\ W \qquad (4)$$

$$R_{crimp\,,lm} = \frac{W_{diss\,,lm}}{I^2} = \frac{4.18}{(400^2)} = 26\ \mu\Omega \qquad (5)$$

Tenuto conto delle loro incertezze, i due valori di R_{crimp} ottenuti dalle due prove di sovratemperatura, sono in buon accordo per cui si possono considerare rispettivamente 4 W e 25 μΩ come valori limite della potenza dissipata e della resistenza elettrica delle connessioni crimpate per una corretta esecuzione di prove di sovratemperatura. Si suggerisce quindi di effettuare misure periodiche sui capicorda a disposizione e, se utilizzato per prove a 400 A, di sostituirli quando R_{crimp} è di circa 25 μΩ. Se si effettuano prove ad altre correnti, il valore di potenza dissipata di 4 W potrebbe essere considerato come valore limite da tenere in considerazione per la sostituzione dei capicorda.

Conclusioni

Quando un cavo di prova è sottoposto a stress meccanici e termici il comportamento elettrico delle connessione crimpate all'estremità dello stesso subisce delle alterazioni. In particolare, la

resistenza elettrica di crimpatura di un capocorda è maggiormente sensibile agli stress termici che a quelli meccanici. La resistenza raggiunge dei valori tali per cui la sua potenza dissipata può causare una erronea mancata validazione di un'apparecchiatura in prova collegata durante una prova di sovratemperatura. Mediante misure elettriche sperimentali riferibili ai campioni nazionali, sono stati proposti dei valori limite della potenza dissipata e della resistenza elettrica delle connessioni crimpate per eseguire correttamente le prove di sovratemperatura per la validazione dei dispositivi elettrici. Il rispetto di questi valori potrebbe essere una scelta alternativa ad altre tecniche, come la termografia e l'ispezione ad ultrasuoni, non sempre disponibili, affidabili ed economiche, per rilevare capicorda potenzialmente danneggiati. Tecnicamente la soluzione più semplice per evitare un eccessivo aumento della temperatura dalle connessioni cavo-capocorda potrebbe essere quella di adottare connessioni saldate, molto meno sensibili agli stress meccanici, al posto di quelle crimpate. Tuttavia, saldare tutte le connessioni dei cavi di prova in un laboratorio sarebbe estremamente costoso rispetto a realizzare connessioni crimpate. Si consiglia quindi di misurare la resistenza elettrica di quest'ultime non appena i cavi di prova siano disponibili in laboratorio per identificare tempestivamente capicorda potenzialmente danneggiati. Devono inoltre essere eseguite misure periodiche per identificare l'eventuale indebolimento delle connessioni crimpate. Nelle norme per le prove elettriche potrebbero essere inseriti requisiti indicanti i valori limite della resistenza di crimpatura e della potenza dissipata dei capicorda come riferimento per la loro sostituzione. Obbiettivo futuro potrebbe essere l'indagine della struttura interna dei materiali e alla superficie reale di contatto tra il capocorda e il cavo quando la connessione crimpata è soggetta a stress termici e meccanici. In questo modo si potrebbe creare un modello simulativo della connessione crimpata per quantificare il peso con il quale agiscono l'ossidazione, la formazione di inter-metalli e l'allentamento della crimpatura.

Bibliografia

[1] IEC 60947-4-1:2018 Low-voltage switchgear switchgear and controlgear - Part 4-1: Contactors and motor-starters - Electromechanical contactors and motor-starters Ed. 1.0.

[2] IEC 61439-1 Low-voltage switchgear and controlgear assemblies - Part 1: General rules Ed. 3.0 2020.

[3] ISO IEC 61238-1: 2004 Compression and mechanical connectors for power cables for rated voltages up to 36 kV (Um = 42 kV), Part 1: Test methods and requirements Ed. 1.0.

[4] JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement First edition.

[5] M. Finc et al, Use of Thermography and Ultrasonic Inspection for Evaluation of Crimped Wire Connection Quality, 18th World Conf. on Non-destr. Test. Durban, South Africa (2012) 1–10.

[6] K. E. Cramer et al., Wire crimp connectors verification using ultrasonic inspection, IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires, 2007.

[7] F. D. Cottrell, T. E. Kirejczyk, Crimp connection reliability Final technical rept. Sep 76-Sep 77, https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA050505, 1978.

[8] Corcoran R E, The Effect of Wire Plating on the Reliability of Crimped Contacts AD 677900 TRW Systems, 1968.

[9] Gould D H A Procedure for Assuring Reliable Crimp Joints The Bendix Corporation Fourth Ann. Connector Symp Cherry Hill, 1971.

[10] G. Rosazza et al, A new method to investigate electrical conduction in crimp joints. Influence of the compaction ratio and electrical model Proc. 48th IEEE Holm Conf Electrical Contacts. pp 246–51 2002.

[11] M M Mohd Ruzlin et al, A study of cable crimping factors affecting contact resistance of medium voltage cable ferrule and lug, 22nd Int. Conf. Electricity Distribution, Stockholm (2013) paper no. 1017.

[12] R Liu et al, Contact resistance comparison of good and bad crimp joints with tinned wires under thermal shock, Proc. 47th IEEE Holm Conf. Elec.Cont. Montreal, QC, Canada (2001) 35–43.

[13] C.F. Ocoleanu, I. Popa, A. I. Dolan, V. Ivanov (2014) Crimped Connections Heat Transfer Coefficient Law Determination Using Experimental and Numerical Results Applied and Theor. Elec pp. 1–4.

[14] C.F. Ocoleanu et al. Temperature investigations in two types of crimped connection using experimental determinations Int. J. Mech. Mechatron. Eng. 8 1638–41, 2014.

[15] R. Liu, C. E. Heaton, "Failure Analysis of the Electric Crimp Joint on a Harness in an Automotive Environment," SAE Technical Paper 2002-01-1054, (2002). https://doi.org/10.4271/2002-01-105.

[16] Ogihara S., Takata K., Hattori Y., Yoshida K. Mechanical Analysis of the Crimping Connection in 2006 Elec. Contacts Proc. 52th IEEE Holm Conf. pp 89–94.

[17] C.F. Ocoleanu, G. Cividjian, Gh. Manolea, "Solutions for Quality Pre-Control of Crimp Contacts Used in Electric Power Systems and Electrical Machines", 3nd International Symposium On Environment Friendly Energies and Applications, pp. 1-6, 2014.

[18] Molex, Quality Crimp Handbook Rev.C, Release Date: 09-04-03, (2009) https://media.digikey.com/pdf/data%20sheets/molex%20pdfs/quality%20crimp%20handbook.pdf.

[19] G. A. Cividjian, C. F. Ocoleanu, G. Manolea, Current distribution in crimped connections, Appl. Theor. Elec. (ICATE) 2t. Conf. on, Craiova, Romania (2014) 23–25.

[20] P. Roccato et al., Influence of crimped connections in temperature rise tests, Meas. Sci. Tech. 31 (2020): 1–6.

[21] Holm, Ragnar, Holm, Else Williamson, J. B. P. (ed.). Electric Contacts: Theory and Application (reprint of 4th revised ed.). Berlin: Springer Science & Business Media. ISBN 3-540-03875-2. SELIBR 5362583. (NB. A rewrite of the earlier "Electric Contacts Handbook"), (1979) [1967].

[22] D. Fournier Aging of defective electrical joints in underground power distribution systems 44th IEEE Holm Conf. on Electric. Contacts, 1998, 179–192.

[23] R. Liu, C. E. Heaton, "Failure Analysis of the Electric Crimp Joint on a Harness in an Automotive Environment," SAE Technical Paper 2002-01-1054, (2002). https://doi.org/10.4271/2002-01-105

[24] IEC 60947-4-1:2020 Low-voltage switchgear and controlgear - Part 1: General rules.

Allegato. Simulazione delle correnti in un condotto barra sottoposto a test di sovratemperatura

Un sistema equivalente a quello di Fig. 26 è stato simulato in Fig.41 considerando la configurazione asimmetrica del circuito di prova. Tutti i cavi hanno la stessa autoinduttanza ma ognuno di essi ha mutua induttanza diversa rispetto agli altri cavi del circuito.

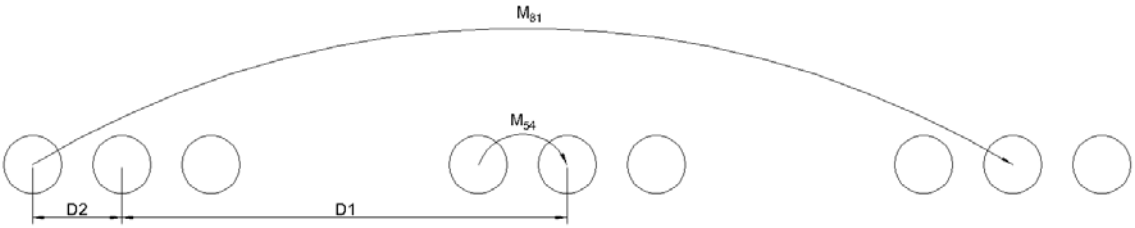


Fig.41. Distribuzione spaziale dei cavi.

Per la legge di Ohm:

$$V = Z \cdot I \tag{6}$$

dove Z è la matrice delle impedenze calcolata come:

$$Z = R + j \cdot w \cdot L \tag{7}$$

L'autoinduttanza di un cavo si calcola con le equazioni di Maxwell:

$$L_{ii} = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\left(\ln\frac{4l}{d} - \frac{3}{4}\right) \tag{8}$$

Mentre la mutua induttanza tra cavo e cavo si calcola secondo la:

$$M_{iy} = \frac{\mu_0}{4\pi}\left(l\ \ln\frac{l + \sqrt{l^2 + D^2}}{-l + \sqrt{l^2 + D^2}} - 2\sqrt{l^2 + D^2} + 2D\right) \tag{9}$$

dove μ_0 l, d e D sono rispettivamente la permeabilità del vuoto, la lunghezza, il diametro del cavo e la distanza tra due cavi in esame. La matrice L del Sistema in esame è:

$$\boldsymbol{L} = \begin{bmatrix} L_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & M_{1j} & M_{19} \\ M_{21} & L_{22} & & & & \vdots \\ M_{31} & & L_{33} & & & \vdots \\ M_{41} & & & L_{44} & & \vdots \\ M_{j1} & & & & L_{jj} & \vdots \\ M_{91} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & L_{99} \end{bmatrix} \tag{10}$$

Le resistenze del circuito sono rappresentate da una matrice diagonale, assumendo che tutti i cavi abbiano approssimativamente la stessa resistenza:

$$\boldsymbol{R} = R \cdot \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & 0 & \\ & & 1 & & & \\ & & & 1 & & \\ & 0 & & & \ddots & \\ & & & & & 1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

Dopo il calcolo di Z con (7), conoscendo la tensione (imposta), si può facilmente ottenere la soluzione del circuito:

$$I = Z^{-1} \cdot V \tag{12}$$

Nella simulazione sono stati utilizzati i seguenti parametri:

- n =3: n. di cavi per fase;
- d = 2,5 cm: diametro del cavo;
- R = 150 μΩ: resistenza del cavo
- l = 2 m: lunghezza del cavo;
- D_1 = 0,4 m: distanza tra ogni fase;
- D_2 = 0,1 m :distanza tra cavi della stessa fase.

Le tensioni imposte sono tensioni trifase simmetriche con ampiezza di 0,4 V. Le correnti del circuito simulato sono riportate in Tabella 14 dove si può osservare una notevole differenza nelle correnti nei diversi cavi. La differenza tra il caso reale riportato in questo lavoro e la simulazione è dovuta al fatto che nel caso reale le tensioni non sono perfettamente uguali tra le diverse fasi e la disposizione del circuito è più complessa.

Tabella 14. Correnti nei cavi nel circuito simulato.

Cavo	Corrente (A)
1	479,5
2	440,8
3	703,0
Totale sulla fase 1	1623
4	665,3
5	517,9
6	756,3
Totale sulla fase 2	1940
7	624,8
8	421,4
9	479,9
Totale sulla fase 3	1526