

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Elettrica**

Tesi di Laurea Magistrale

**Influenza delle connessioni crimpate nelle prove di
sovratemperatura**



Relatore:

Prof. Gianfranco Chicco

Candidato:

Arcangela Perta

Co-relatore:

Dr. Paolo Emilio Roccato

A.A. 2017/2018

Ringraziamenti

Gli ultimi mesi del mio percorso universitario penso siano stati i più importanti, perché ho avuto la possibilità di conoscere un nuovo mondo, quello del lavoro e della ricerca scientifica. Per questa ragione vorrei ringraziare il prof. Gianfranco Chicco che mi ha permesso di intraprendere questa nuova avventura e il Dr. Paolo Emilio Roccato, nonché mio Co-relatore, che mi ha seguito e confortato costantemente durante il lavoro di tesi.

I miei ringraziamenti più importanti vanno però a mia madre e mio padre, che mi hanno permesso di affrontare questi cinque anni nella più totale serenità, senza mai rimproverarmi nulla, anzi spronandomi in ogni cosa. Vorrei poi ringraziare mio fratello Giuseppe, che con la sua ironia è riuscito a sdrammatizzare anche i momenti più difficili, facendomi sentire sempre la più “Testona”. Mia nonna Anna, che posso dire anche essere il quinto membro del mio nucleo familiare. Non si è mai allontanata da me, superando anche la sua ostilità per la tecnologia, cercando sempre un povero volontario che facesse delle videochiamate per lei. Mia zia Antonella e la sua famiglia, che con i loro pranzi domenicali mi hanno fatto sempre sentire un po’ come se fossi a casa, colmando le lunghe distanze.

Al mio fianco però non c’è solo stata la mia famiglia, ma anche la persona che forse ha subito più di chiunque altro le mie angherie, il mio ragazzo Luca. È stato il più coraggioso, perché non mi ha mai e dico mai abbandonato, nonostante le mie ansie, le mie paure e la distanza che ci ha diviso in questi anni.

Oltre all’affetto di tutti loro, Torino mi ha anche regalato nuove e importanti amicizie che spero di non perdere mai. Vorrei per questo ringraziare Marina, Ornella, Federica, Lorita, Gerardo, Emilio e Emanuele. Senza di loro la mia esperienza universitaria non sarebbe stata divertente, entusiasmante e piena di sorprese.

Infine, ma non per questo meno importanti, vorrei ringraziare i miei amici di giù, perché nonostante le distanze che ci separano siamo sempre riusciti a trovare dei momenti di ritrovo che ci ricordassero i vecchi tempi.

Sommario

Indice delle figure.....	3
Indice delle tabelle.....	5
I Introduzione	6
I.1 Laboratorio Alte Tensioni e Forti Correnti	7
I.2 Prova di sovratemperatura.....	9
I.3 Cos'è un capocorda?	12
I.4 Conessioni crimpate	14
1. Analisi del comportamento resistivo della connessione capocorda-conduttore di prova sottoposta a stress meccanici	23
1.1 Strumentazione e schema di prova	26
1.2 Stima dell'incertezza di misura	29
1.3 Procedura di prova.....	33
1.4 Risultati.....	38
2. Analisi del comportamento resistivo della connessione capocorda-conduttore di prova sottoposta a stress termico	48
2.1 Prove termiche.....	50
3. Verifica della sovratemperatura.....	58
4. Valutazione sui massimi valori ammissibili della resistenza elettrica di una connessione crimpata	67
5. Creazione di un modello FEMM.....	74
6. Conclusioni.....	83
Appendice.....	85
Bibliografia	92

Indice delle figure

Fig.1 Gruppo Alternatore Trifase e Motore di lancio.....	9
Fig.2 Schema per la prova di riscaldamento di un quadro di BT [1]	10
Fig.3 Capocorda Cembre A-48 M-14.....	13
Fig.4 Procedimento per la realizzazione di una crimpatura	15
Fig.5 Pinza crimpatrice Intercable modello PMT16 [16].....	16
Fig.6 Testa oleodinamica Intercable modello PP130-H [4]	16
Fig.7 Pompa oleodinamica a batteria Intercable modello CP700 [5].....	17
Fig.8 Pompa oleodinamica alimentata da rete Intercable modello NP220-1[7].....	17
Fig.9 Pompa oleodinamica a pedale Intercable modello FP70S [8].....	18
Fig.10 Crimpatura a doppia rientranza (a) a rientranza a punta(b) esagonale(c) [11].....	19
Fig.11 Sezione trasversale di una connessione compressa con una crimpatura a singola rientranza	20
Fig.12 Circuito equivalente resistivo di un tratto della connessione crimpata.....	20
Fig.13 Generazione di macro e micro-costrizioni tra due superfici a contatto [13].....	22
Fig.14 Andamento qualitativo della resistenza elettrica di una connessione crimpata in funzione della forza di contatto tra il conduttore e il capocorda [13].....	22
Fig.15 Trasformatore elevatore di corrente utilizzato per le prove di sovratemperature	23
Fig.16 Derivazioni di un quadro di BT.....	24
Fig.17 Torsione di un conduttore di prova intorno al proprio asse di simmetria	25
Fig.18 Rotazione di un conduttore di prova sul piano del capocorda	25
Fig.19 Rotazione di un conduttore di prova intorno al piano del capocorda.....	25
Fig.21 Disegno tecnico di una delle due parti simmetriche della pinza di misura voltmetrica.	28
Fig.20 Pinza di misura voltmetrica.....	28
Fig.22 Schema di prova con zoom del collegamento dei capicorda alle barre	29
Fig.23 Valutazione della caduta di tensione.....	30
Fig.24 Metodo per il calcolo dell'incertezza del puntale	31
Fig.25 Metodo per il calcolo dell'incertezza della pinza	31
Fig.26 Distinzione fra le due estremità del conduttore di prova	35
Fig.27 Torsione di 180°	36
Fig.28 Sequenza delle quattro rotazioni subite dal conduttore.....	36
Fig.29 Rigonfiamento della zona del conduttore nudo	38
Fig.30 Andamento della resistenza di crimpatura nel caso I.....	39
Fig.31 Andamento della resistenza di crimpatura nel caso II.....	40
Fig.32 Andamento della resistenza di crimpatura nel caso III	40
Fig.33 Andamento della resistenza di crimpatura nel caso IV	42
Fig.34 Andamento della resistenza di crimpatura relativa nel caso I, II, III e IV	43
Fig.35 Andamento della resistenza elettrica del capocorda A saldato	45
Fig.36 Andamento della resistenza di crimpatura del capocorda A saldato e successivamente compresso	45

Fig.37 Andamento della resistenza di crimpatura del capocorda A ricotto in seguito alla compressione	46
Fig.38 Andamento della resistenza di crimpatura del capocorda A nelle prove di rotazione ..	47
Fig.39 Collegamento dei conduttori di prova su di un condotto sbarra di bassa tensione	49
Fig.40 Ciclo termico al quale è sottoposto il conduttore di prova.....	52
Fig.41 Ossidazione del tratto di conduttore nudo.....	53
Fig.42 Evidenziazione delle differenze geometriche dei capicorda 1 e 2 legate ad un'errata crimpatura.....	54
Fig.43 Andamento del comportamento resistivo dei capicorda 1 e 2	55
Fig.44 Confronto tra la variazione della resistenza relativa del capocorda 1 e quella del capocorda 2.....	56
Fig.45 Comportamento resistivo del capocorda 1	57
Fig.46 Schema utilizzato per effettuare le prove di sovratemperatura: vista frontale (a); vista laterale (b).....	60
Fig.47 Terminali sui quali è stata effettuata la misura della temperatura.	61
Fig.48 Identificazione dei differenti capicorda utilizzati durante le prove di sovratemperatura	61
Fig.49 Rappresentazione dei risultati ottenuti dalla prima prova di sovratemperatura	62
Fig.50 Rappresentazione dei risultati ottenuti dalla seconda prova di sovratemperatura	62
Fig.51 Esempio di un tratto di conduttore nudo ossidatosi pur non avendo una resistenza di crimpatura elevata.....	66
Fig.52 Potenza dissipata dalle connessioni crimpate nella seconda prova di riscaldamento in funzione della sovratemperatura raggiunta ai terminali del contattore	68
Fig.53 Potenza dissipata dalle connessioni crimpate nella prima prova di riscaldamento in funzione della sovratemperatura raggiunta ai terminali del contattore	69
Fig.54 Misura della resistenza elettrica sul colletto del capocorda [3]	71
Fig.55 Misura della resistenza elettrica del conduttore di riferimento [3]	71
Fig.56 Sezionamento di un capocorda.....	74
Fig.57 Rappresentazione delle zone nelle quali è stato suddiviso il modello simulativo della connessione crimpata.....	75
Fig.58 Quotatura del modello simulativo	75
Fig.59 Sezione trasversale della crimpatura esagonale	76
Fig.60 Differenza tra il raggio del colletto del capocorda con e senza crimpatura	77
Fig.61 Confronto tra la resistenza di crimpatura del modello simulativo e sperimentale	79
Fig.62 Modulo della tensione ad inizio simulazione.....	79
Fig.63 Modulo della tensione a fine simulazione.....	80
Fig.64 Modulo della densità di corrente ad inizio simulazione.....	80
Fig.65 Modulo della densità di corrente a fine simulazione	81
Fig.66 Composti intermetallici derivanti dall'interazione dello stagno e il rame [14].....	82
Fig.A1 Creazione di un problema su FEMM	85
Fig.A2 Riquadro su FEMM per la definizione del problema da analizzare.....	86
Fig.A3 Barra degli strumenti di FEMM	87
Fig.A4 Definizione dei materiali e delle condizioni al contorno su FEMM.....	88

Indice delle tabelle

Tabella 1. Conduttori di prova in rame per correnti nominale inferiori o uguali a 400 A [10]	12
Tabella 2. Descrizione dei profili di crimpatura stampati sui capicorda utilizzati per le prove di stress meccanico	34
Tabella 3 . Suddivisione delle prove eseguite in diversi casi	37
Tabella 4. Correnti di prova utilizzate nelle diverse verifiche	39
Tabella 5. Correnti nei conduttori di prova durante una verifica di sovratemperatura su di un condotto sbarra di BT	50
Tabella 6. Variazione del comportamento resistivo dei capicorda soggetti a stress termici	54
Tabella 7. Esiti ottenuti dalla prima prova di sovratemperatura	63
Tabella 8. Esiti ottenuti dalla seconda prova di sovratemperatura	63
Tabella 9. Limiti di sovratemperatura dei morsetti [12].....	66
Tabella 10. Cambiamenti della conduttività elettrica imposti in FEMM per simulare la risposta della connessione crimpata agli stress meccanici eseguiti sul conduttore di prova	78
Tabella 11. Cambiamenti della conduttività elettrica imposti in FEMM per simulare la risposta della connessione crimpata agli stress termici eseguiti sul conduttore di prova.	78
Tabella A1	87

I Introduzione

Lo scopo del seguente lavoro di tesi è di valutare come i capicorda compressi sui conduttori di prova, utilizzati nelle prove di sovratemperatura, possano influenzare la validazione delle apparecchiature elettriche soggette a tali verifiche.

Può infatti accadere che, a causa di una non corretta crimpatura del capocorda o di un invecchiamento della stessa, la potenza termica dissipata dal cavo capicordato aumenti notevolmente. Ciò può portare ad un aumento della temperatura dell'apparecchiatura elettrica soggetta alla prova, al di sopra del limite previsto dalle norme; invalidando quindi la prova stessa.

L'aumento della potenza termica dissipata dal conduttore di prova è proporzionale all'aumento della resistenza elettrica di crimpatura del capocorda. Per tale ragione ci si pone l'obiettivo di valutare come vari la resistenza di crimpatura del capocorda, quando esso è sottoposto a stress meccanici e termici.

La resistenza elettrica di crimpatura è stata valutata attraverso la misura della caduta di tensione tra il foro di ispezione del capocorda e l'inizio del conduttore cordato.

Una volta effettuate tali misure, si è analizzata la correlazione tra la resistenza elettrica di crimpatura e il corretto funzionamento del capocorda. Oltre determinati valori di resistenza del capocorda, la temperatura raggiunta dall'apparecchiatura elettrica sottoposta alla prova di sovratemperatura può far in modo che questa non riesca a superare la prova.

Per riuscire nello scopo di questo lavoro, come già precedentemente detto, c'è stato bisogno di compiere delle misure voltamperometriche e delle prove di sovratemperatura, che sono state eseguite presso il laboratorio Alte Tensioni e Forti correnti dell'INRiM (Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica); all'interno del quale erano già state realizzate delle prime misurazioni della resistenza di crimpatura delle connessioni compresse di alcuni conduttori di prova. Infatti, questa tesi rappresenta uno studio e un'analisi maggiormente approfondita di un primo lavoro riguardante lo stesso argomento.

I.1 Laboratorio Alte Tensioni e Forti Correnti

Il laboratorio di Alte Tensioni e Forti Correnti (LATFC) fu fondato dall'ufficiale di Marina Sergio Bruno Toniolo all'incirca verso la fine degli anni '50. Oltre a lui, alla nascita del laboratorio hanno contribuito molti altri personaggi importanti a livello scientifico, quali: Ing. Giovanni Cantarella, Ing. Elio Tessitore, Ing. Michele Tartaglia, Ing. De Bernochi e Dott. Giovanni Farina.

Il laboratorio di Alte Tensioni e Forti Correnti (LATFC) era parte integrante dell'Istituto Nazionale Elettrotecnico "Galileo Ferraris" (IEN) nato intorno al 1934. L'IEN era un istituto di ricerca elettrotecnica situato nell'unica sede che possedeva, esistente ancora oggi, che è quella a Torino in Corso Massimo d'Azeglio. Al suo interno, a partire dagli anni '50, erano presenti il laboratorio LATFC, il laboratorio di acustica e di materiali magnetici, la sede amministrativa e una biblioteca in materia elettrotecnica, acustica, misure elettriche, metrologia e informatica. Nello stesso periodo storico Gustavo Colonnetti, al tempo Presidente del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), propose la fondazione di un istituto metrologico che fosse di ausilio all'IEN e ne sostenesse il progresso. Fu così che nel 1956 venne fondato l'Istituto Dinamometrico, diretto da Colonnetti, e nel 1957 l'Istituto Termometrico, diretto da Cesare Codegone. Da queste due strutture nacque nel 1968 l'Istituto di Metrologia Gustavo Colonnetti (IMGC). Nel 2006 nacque poi l'INRiM dalla fusione tra l'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris e l'Istituto di Metrologia Gustavo Colonnetti. Attualmente, la sede principale dell'INRiM è situata a Torino in Strada delle Cacce.

Il laboratorio LATFC è suddiviso principalmente in due reparti separati, uno dedicato alle alte tensioni e l'altro alle forti correnti. In questo laboratorio ci si occupa principalmente di ricerca in campo elettrotecnico, servizi di tarature e di verifica delle apparecchiature elettriche, attraverso prove di sovratemperatura, di cortocircuito, di misura di tensione e prove dielettriche. In seguito alla verifica delle apparecchiature, dai responsabili del LATFC viene rilasciato il rapporto di prova.

Nel LATFC si sviluppano e conservano i sistemi campioni per le tarature di sorgenti, sensori e sistemi di misura per laboratori di taratura, per i laboratori di prova industriale e costruttori di dispositivi di alta tensione. I servizi di taratura offerti dal laboratorio sono:

- Taratura di sorgenti di tensione e sistemi di misura AC.
- Taratura di sistemi di misura e divisori di DC.
- Taratura di calibratori di scariche parziali.
- Taratura di condensatori in gas per alta tensione.
- Taratura di ponti di misura per trasformatori di tensione;

Nel reparto di Forti Correnti sono allocati tutti i macchinari necessari per svolgere le prove di sovratemperatura e di cortocircuito. Per attuare queste prove sono presenti quattro trasformatori denominati rispettivamente come: TR1, TR2, TR3 e TR4. Sono tutti trasformatori abbassatori con una tensione primaria di 22 kV e svolgono attualmente le seguenti funzioni:

1. Il TR1 presenta una potenza apparente nominale (S_n) pari a 1000 kVA. È utilizzato per alimentare il motore di lancio (motore asincrono rotante) dell'alternatore trifase utilizzato per le prove di corto circuito da macchina. Oltre a ciò, viene anche utilizzato per le prove di durata elettrica.
2. Il TR2 presenta una $S_n=500$ kVA, ed è utilizzato per le prove di sovratemperatura da rete a forti correnti.
3. Il TR3 presenta una $S_n=800$ kVA, ed è utilizzato per le prove di cortocircuito da rete e anch'esso come il TR1 per le prove di durata elettrica.
4. Il TR4 presenta una $S_n=250$ kVA, ed è utilizzato per l'alimentazione dell'impiantistica civile.

Il fiore all'occhiello del reparto di Forti Correnti è l'alternatore trifase S.A. Brown Boveri & CIE n°17138 (Fig.1) utilizzato per le prove di cortocircuito da macchina. Questa macchina risale all'inizio del 1900 ed è l'unico modello presente a livello nazionale. Infatti, possiede delle caratteristiche singolari, quali: $S_{cc}=60$ MVA, $I_{cc}=8700$ A, peso rotore=15 t, peso statore=20 t, $n_r=1000$ rpm, $S_n=5$ MVA, 6 poli e un diametro del rotore pari a 1.5m.

Per quanto riguarda il reparto di Alte Tensioni, le principali attività che si svolgono al suo interno sono prove dielettriche e misure di tensioni per riuscire a calcolare le potenze scambiate tra sistemi elettrici. Perciò, all'interno del reparto sono presenti molteplici impianti di generazione di alte tensioni per la realizzazione di prove dielettriche. Questi impianti sono utilizzati per generare tensioni in alternata, tensioni in continua e tensioni impulsive.



Fig.1 Gruppo Alternatore Trifase e Motore di lancio

Un esempio di impianto di generazione di tensione alternata, utilizzato all'interno del laboratorio, è costituito da due trasformatori elevatori di tensione monofasi entrambi aventi una tensione primaria di 500 V e una tensione secondaria di 200 kV. Questi due trasformatori sono posti in cascata per riuscire a realizzare tensioni che arrivino ad un valore nominale di 400 kV.

Nel laboratorio LATFC è anche presente un impianto di prova del grado di protezione IP contro i liquidi e un laboratorio metrologico.

I.2 Prova di sovratemperatura

I componenti elettrici utilizzati negli impianti di trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica, per essere validati secondo le norme, devono rispettare determinati limiti di sovratemperatura in condizioni di lavoro alla loro corrente nominale. La verifica che questi componenti riescano ad essere entro tali limiti, avviene sottoponendoli ad una prova di sovratemperatura.

Le apparecchiature elettriche non devono raggiungere dei valori di temperatura troppo elevati, nelle condizioni di funzionamento ordinario. Altrimenti ciò porterebbe ad un invecchiamento troppo precoce dei materiali isolanti e ad un aumento della resistività e dell'ossidazione superficiale dei conduttori dai quali è composta. Tutto ciò può portare alla rottura del componente e quindi ad eventi di guasto.

Durante la prova di sovratemperatura, si fa fluire all'interno dei conduttori dell'oggetto in prova la loro corrente nominale, fino al momento in cui l'oggetto in prova non raggiunge l'equilibrio termico con l'ambiente esterno. Ciò avviene quando la temperatura dell'oggetto in prova dopo un'ora dall'ultima misura di temperatura effettuata non cambia più di 1 K.

Per riuscire a sviluppare la prova di riscaldamento c'è bisogno di un laboratorio di prova che possieda:

- Generatore di corrente.
- Sistemi di misura della corrente.
- Sistemi di misura della temperatura (es. termocoppie).

Le termocoppie sono disposte in diversi punti dell'oggetto in prova, che sono indicate dalle norme oppure concordate con il costruttore dell'apparecchiature. I punti di misura possono essere i terminali per la connessione con i conduttori di prova, gli involucri, le connessioni tra barrature interne e gli accessori che possono essere utilizzati da un operatore durante il normale funzionamento dell'apparecchiatura. Inoltre, c'è bisogno di termocoppie che misurino la temperatura ambiente, dato che il fine della prova è quello di valutare se il componente rispetti o meno determinati limiti di sovratemperatura. Quest'ultima rappresenta, appunto, la differenza tra la temperatura dell'oggetto in prova e quella ambiente. Si fa riferimento alla sovratemperatura e non alla temperatura assoluta dell'oggetto in prova in modo da svincolarsi dalla temperatura ambiente che può influire in modo negativo soprattutto quando ci si trova in ambienti particolarmente caldi.

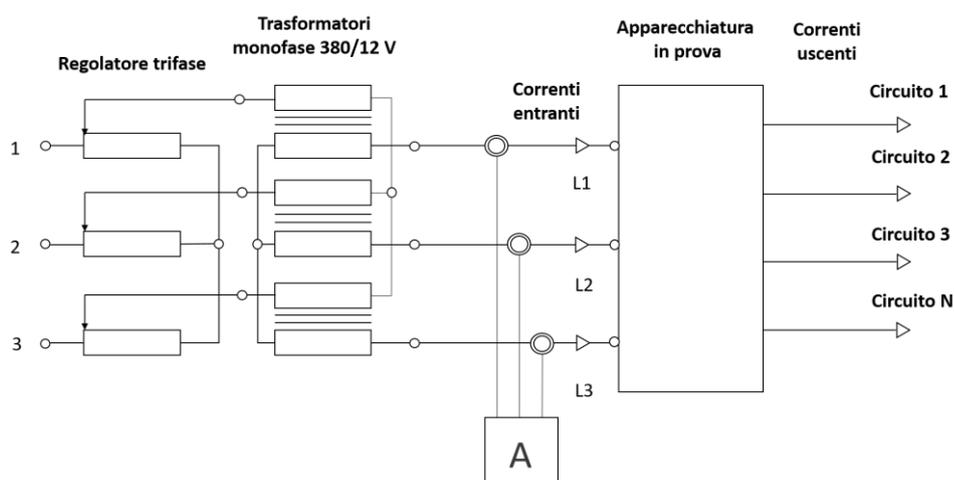


Fig.2 Schema per la prova di riscaldamento di un quadro di BT [1]

In Fig.2 è possibile visualizzare lo schema utilizzato nel LATFC, per lo sviluppo della prova, nel caso in cui l'oggetto in esame fosse un quadro di BT (bassa tensione). Inizialmente, si ha un regolatore di tensione, costituito da tre autotrasformatori, collegato ad un trasformatore elevatore di corrente, costituito da tre singoli trasformatori. Il gruppo composto dal regolatore di tensione più elevatore di corrente rappresenta la parte di generazione, attraverso la quale variare il valore della tensione di alimentazione e della corrente da utilizzare per la prova.

Dopo il trasformatore elevatore di corrente si hanno i conduttori di prova, per il collegamento tra la sorgente elettrica e l'oggetto in prova. In base all'oggetto in esame si devono utilizzare dei conduttori di sezione opportuna, in modo tale da non trasferire e sottrarre calore all'apparecchiatura in prova. Ad esempio per le prove dei quadri in BT, la norma CEI EN 61439-1 specifica le sezioni dei conduttori da utilizzare, in base al valore di corrente al quale si vuole effettuare la verifica (Tabella 1).

All'uscita dell'oggetto vengono disposti ulteriori conduttori di prova posti in cortocircuito. Se i conduttori hanno una sezione modesta sono direttamente imbullonati tra loro. In caso contrario, sono cortocircuitati su di una barra di rame. Tutto ciò avviene per motivi di praticità. Nel caso in cui l'apparecchiatura fosse un quadro con più derivazioni in uscita, per regolare la corrente sui diversi conduttori bisognerebbe introdurre dei nuclei magnetici posti intorno ai conduttori in uscita dall'oggetto in modo da variare l'induttanza, oppure modificare la lunghezza degli stessi conduttori in modo da cambiare la resistenza. Mentre, se l'oggetto in prova fosse un singolo componente (contattore, interruttore, etc.) basterebbe regolare la corrente in ingresso all'apparecchiatura; poiché per ogni fase si ha un solo conduttore.

Tabella 1. Conduttori di prova in rame per correnti nominale inferiori o uguali a 400 A [10]

Campo della corrente nominale ^a		Sezione del conduttore ^{b, c}	
		mm ²	AWG/MCM
0	8	1,0	18
8	12	1,5	16
12	15	2,5	14
15	20	2,5	12
20	25	4,0	10
25	32	6,0	10
32	50	10	8
50	65	16	6
65	85	25	4
85	100	35	3
100	115	35	2
115	130	50	1
130	150	50	0
150	175	70	00
175	200	95	000
200	225	95	0000
225	250	120	250
250	275	150	300
275	300	185	350
300	350	185	400
350	400	240	500

^a Il valore della corrente nominale deve essere maggiore del primo valore indicato nella prima colonna e minore o uguale al secondo valore in essa indicato.

^b Per praticità di prova e previo consenso del costruttore, possono essere utilizzati conduttori di sezione inferiore a quella indicata per stabilire la corrente nominale.

^c Si può utilizzare indifferentemente uno dei due conduttori specificati.

I passaggi da eseguire per effettuare la prova di sovratemperatura sono:

1. Posizionamento delle termocoppie.
2. Alimentazione dell'oggetto in prova.
3. Raggiungimento dell'equilibrio termico dell'oggetto in prova.
4. Misura e calcolo della sovratemperatura.

I.3 Cos'è un capocorda?

Il capocorda rappresenta una terminazione metallica utilizzata nei cablaggi degli impianti civili, industriali, automobilistici e dei laboratori di prova. A seconda di qual è il campo d'impiego di un capocorda, questo può variare le proprie dimensioni, forma e materiale. Esistono, infatti, innumerevoli differenti tipologie di capicorda.

La definizione di capocorda secondo la norma CEI EN 61238-1 è: «Dispositivo metallico per collegare un conduttore ad altre apparecchiature metalliche». La stessa norma esplicita anche la struttura del capocorda, che risulta costituito da una patella d'attacco e da un colletto. La

prima parte viene definita come: «parte di un capocorda utilizzata per effettuare la connessione a un'apparecchiatura elettrica». Mentre, il colletto viene definito: «parte di un dispositivo nella quale il conduttore da collegare viene introdotto». Per riuscire meglio a comprendere quanto detto si fa riferimento alla figura 3, dove è possibile visualizzare un capocorda marchiato Cembre, modello A-48 M-14.



Fig.3 Capocorda Cembre A-48 M-14

Lo si realizza a partire da un tubo di rame elettrolitico. Successivamente, viene ricotto e protetto superficialmente mediante stagnatura elettrolitica. La presenza di rame elettrolitico fa sì che il capocorda abbia un'adeguata resistenza alla trazione e all'ossidazione. Mentre, la ricottura permette al capocorda di essere maggiormente malleabile e quindi ottimizzare la crimpatura che sarà successivamente effettuata. Il colletto del capocorda è smussato e presenta anche un foro d'ispezione in modo tale da introdurre semplicemente e correttamente il conduttore. Infatti, attraverso il foro di ispezione è possibile osservare che il conduttore sia stato completamente inserito all'interno del capocorda.

Sull'esterno riporta incisi:

- Marcatura.
- Diametro della vite in mm.
- Natura e sezione del conduttore da introdurre nel colletto.

Tutte le caratteristiche del capocorda appena descritte, non sono proprie della tipologia di capicorda A48-M14, ma accomunano tutti i capicorda di potenza nudi che sono quelli analizzati in questo elaborato. In particolare sono stati esaminati solamente quelli usati su cavi con una sezione di 240 mm².

I.4 Connessioni crimpate

Un capocorda può essere fissato ad un conduttore elettrico nelle seguenti diverse modalità:

- Connessione per serraggio meccanico.
- Connessione saldata.
- Connessione per compressione o crimpata.

Nella connessione per serraggio meccanico o connessione a vite, il connettore (capocorda) viene fissato al conduttore, per esempio attraverso una vite o un bullone. È possibile utilizzare anche altri metodi alternativi. Nella connessione saldata, già come intuibile dal nome, la connessione fisica ed elettrica tra il capocorda ed il conduttore avviene attraverso un processo di saldatura.

Dopo aver dato una brevissima descrizione su queste due modalità di connessione, ci soffermeremo in modo più dettagliato sulla connessione crimpata.

La connessione per compressione consiste nel fissare il connettore al conduttore attraverso l'utilizzo di uno specifico utensile denominato crimpatrice. Tale operazione prende il nome di crimpatura ed è un'operazione irreversibile, in quanto deforma in modo permanente sia il connettore che il conduttore. Una volta effettuata tale connessione è impossibile sfilare il conduttore dal capocorda senza che entrambi si danneggino. In Fig.4 è rappresentato uno schema esemplificativo dei passi da eseguire per realizzare una crimpatura.

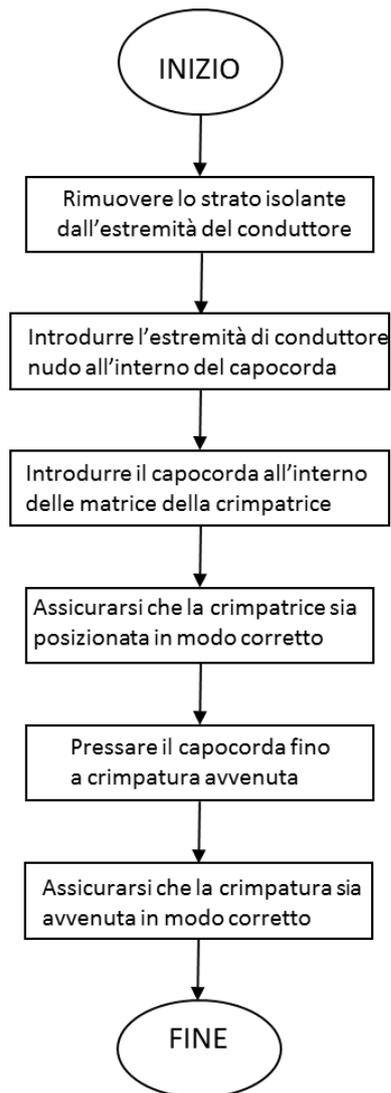


Fig.4 Procedimento per la realizzazione di una crimpatura

Gli elementi necessari da utilizzare per effettuare una crimpatura sono:

- Crimpatrice.
- Conduttore.
- Capocorda.

La crimpatrice da utilizzare, può essere una pinza crimpatrice o crimpatrice manuale (Fig.5) oppure dispositivi costituiti da una testa oleodinamica (Fig.6) abbinata ad una:

- Pompa oleodinamica a pedale (Fig.9).
- Pompa oleodinamica a batteria (Fig.7).
- Pompa oleodinamica ad alimentazione da rete (Fig.8).



Fig.5 Pinza crimpatrice Intercable modello PMT16 [16]



Fig.6 Testa oleodinamica Intercable modello PP130-H [4]



Fig.7 Pompa oleodinamica a batteria Intercable modello CP700 [5]



Fig.8 Pompa oleodinamica alimentata da rete Intercable modello NP220-1[7]



Fig.9 Pompa oleodinamica a pedale Intercable modello FP70S [8]

Pur sembrando molto semplice il processo di crimpatura può essere soggetto a errori durante la sua esecuzione, che possono influire fortemente sulla resistenza elettrica di crimpatura del capocorda. Tali errori possono essere:

- Errore nella scelta del capocorda da utilizzare rispetto al cavo che si ha a disposizione.
- Pressione di crimpatura errata.
- Errore nella scelta della matrice della crimpatrice

A seconda della matrice utilizzata si possono ottenere diversi profili di crimpatura, alcuni dei quali sono rappresentati in Fig.10. I diversi profili si differenziano per molteplici aspetti, come forma, lunghezza e profondità della crimpatura; oppure numero e forma delle rientranze di compressione.

La tipologia del profilo di crimpatura utilizzata influenza la resistenza elettrica della connessione. Infatti, all'aumentare della lunghezza e della profondità del profilo di compressione stampato sul colletto del capocorda la resistenza elettrica tende a diminuire. Inoltre, nel caso in cui la crimpatura avvenisse con la stessa pressione ma con profili differenti, il comportamento resistivo del capocorda cambierebbe ulteriormente. Ad esempio, con un profilo a singola rientranza il capocorda è più sensibile agli stress meccanici rispetto ad un profilo a doppia rientranza. Mentre, il profilo esagonale risulta maggiormente sensibile di quello a singola rientranza. Quindi, in base alla profilatura della compressione il comportamento resistivo della connessione crimpata cambia notevolmente.

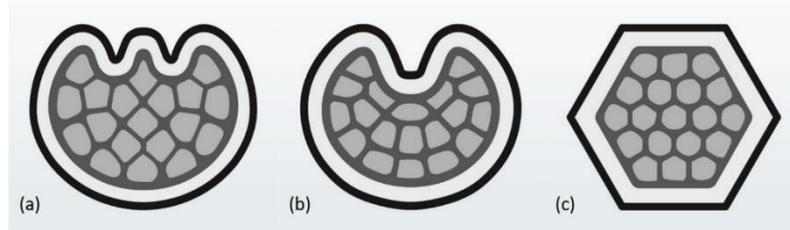


Fig.10 Crimpatura a doppia rientranza (a) a rientranza a punta(b) esagonale(c) [11]

Quanto appena detto rappresenta solo alcuni degli errori possibili che si possono verificare durante il processo di crimpatura. Inoltre, bisogna considerare che ci sono altri aspetti che influenzano negativamente la resistenza di crimpatura, come:

- Valori elevati di temperatura.
- Ossidazione atmosferica e galvanica del capocorda.
- Vibrazioni.
- Stress meccanici.
- Dimensioni del capocorda.

Tutti questi aspetti legati ad un'errata crimpatura, possono creare dei punti di surriscaldamento, portando ad un deterioramento dell'estremità del conduttore.

Si consideri la sezione trasversale di un modello assialsimmetrico di un capocorda (Fig.11). La misura della resistenza di crimpatura è valutata attraverso la caduta di tensione mostrata nella stessa figura. Allora, il modello resistivo equivalente di un tratto della connessione compressa può essere considerato qualitativamente come quello rappresentato in Fig.12, dove è possibile osservare la presenza di una resistenza di contatto, del conduttore e del capocorda. Queste ultime due sono delle resistenze di masse date dalla formula canonica dell'elettrotecnica che risulta essere:

$$\rho = \frac{l}{S} \quad (1)$$

dove:

- ρ : resistività elettrica del materiale.

- l: lunghezza.
- S: sezione.

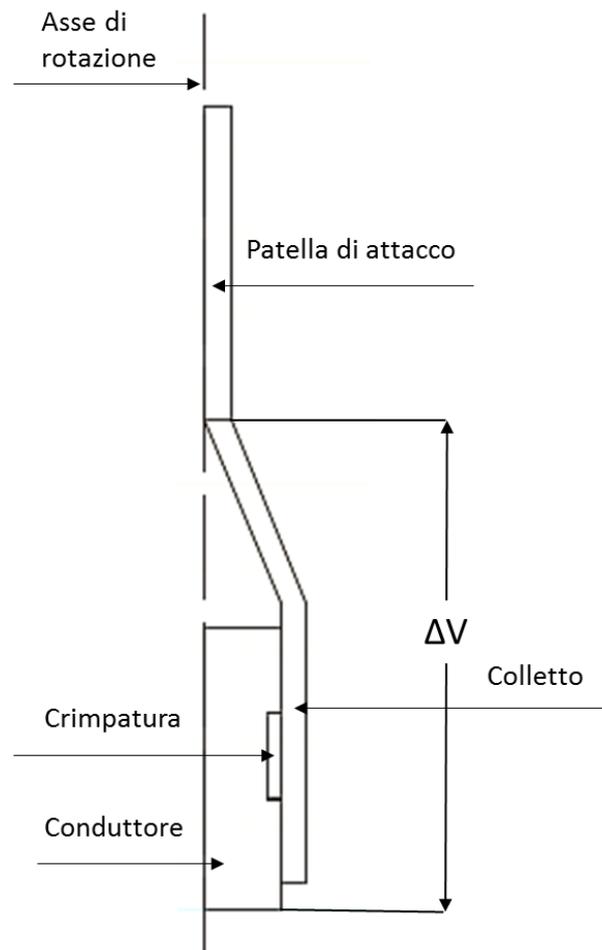


Fig.11 Sezione trasversale di una connessione compressa con una crimpatura a singola rientranza

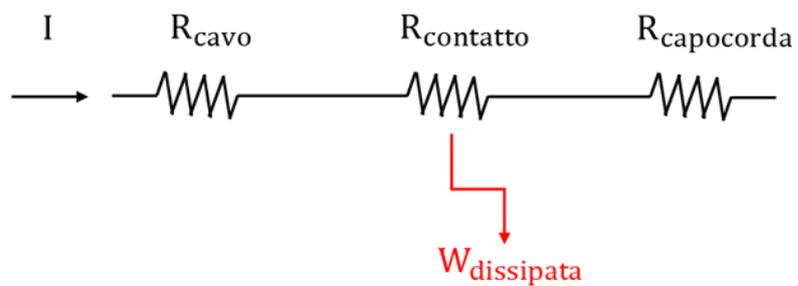


Fig.12 Circuito equivalente resistivo di un tratto della connessione crimpata

mentre la resistenza di contatto è la resistenza elettrica associata all'interfaccia tra due corpi separabili. Essa è data dalla somma della:

- Resistenza di costrizione
- Resistenza dei film

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 microaree chiamate "a" spot e la superficie di contatto reale sarà minore rispetto all'area apparente di contatto. La resistenza di costrizione di un singolo spot circolare è stata derivata da Ragnar Holm, ed è la seguente:

$$R_{\text{spot}} = \frac{\rho}{d} \quad (2)$$

dove:

- d: diametro dell'asperità di contatto.
- ρ : resistività media dei due materiali a contatto.

Quando la forza di contatto che permette l'aderenza tra due superfici, aumenta, il numero degli "a" spot aumenta di conseguenza ed in particolare queste microaree tendono ad essere molto vicine l'una con l'altra fino a creare delle macrocostrizioni o macroaree dette anche cluster e la resistenza di costrizione è data dal parallelo delle resistenze elettriche dei singoli "a" spot più un termine legato alla formazione del cluster. Il calcolo della resistenza risulta essere:

$$R_c = \frac{\rho}{n \times d} + \frac{\rho}{D} \quad (3)$$

in cui D è il diametro della macrocostrizione.

La resistenza dei film è legata alla generazione di film superficiali sui materiali. Questi film possono essere ossidi o solfuri. Nel caso di questo lavoro, poiché sono stati considerati capicorda ricotti in stagno, il film superficiale che si forma è l'ossido di stagno; composto che protegge il rame da un'eventuale corrosione.

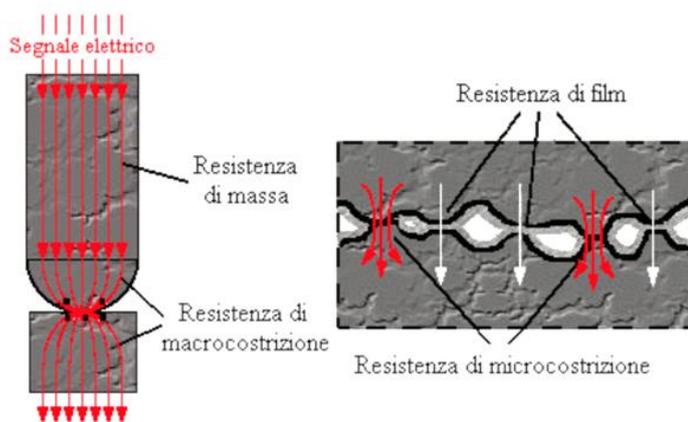


Fig.13 Generazione di macro e micro-costrizioni tra due superfici a contatto [13]

Benchè questi film presentino una maggiore resistività e rallentino il passaggio del flusso di corrente, se sufficientemente sottili (< 10 nm) conducono energia grazie all'effetto tunneling, che permette una transizione ad uno stato impedita dalla meccanica classica.

Se a causa di stress meccanici o termici o dalla combinazione di entrambi, la forza di contatto in corrispondenza della crimpatura tendesse a diminuire, la resistenza di contatto potrebbe aumentare (Fig.14) a tal punto da dissipare una potenza per cui non sarebbe più possibile utilizzare il conduttore in successive prove di sovratemperatura. Inoltre, questo potrebbe condurre anche ad un'ossidazione della zona di conduttore nudo posta tra il capocorda e l'inizio del conduttore isolato.

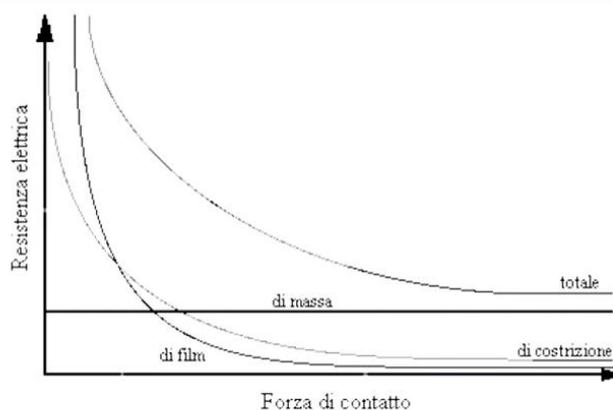


Fig.14 Andamento qualitativo della resistenza elettrica di una connessione crimpata in funzione della forza di contatto tra il conduttore e il capocorda [13]

1. Analisi del comportamento resistivo della connessione capocorda-conduttore di prova sottoposta a stress meccanici

I cavi intestati con capicorda compressi sono utilizzati durante le prove di sovratemperatura sia per permettere il collegamento tra la sorgente di alimentazione e l'apparecchiatura in prova, sia per cortocircuitare all'uscita il componente sottoposto a verifica. Questi cavi sono soggetti durante il loro montaggio e smontaggio, prima e dopo la prova, ad innumerevoli stress meccanici. Ad esempio, possono subire una torsione intorno al loro asse di simmetria (Fig.15) quando vengono imbullonati sulle barre di alluminio situate all'uscita del trasformatore elevatore di corrente; oppure ad una rotazione sul piano del capocorda (Fig.16) quando sono collegati in un quadro elettrico come cavi di arrivo e partenza dal quadro. Tutto ciò favorisce un rilassamento della crimpatura del capocorda e quindi una variazione della resistenza elettrica di compressione dello stesso. Questi sono solo alcuni possibili stress meccanici che possono subire i conduttori utilizzati in un laboratorio di prova. Ciò non succede nelle installazioni impiantistiche, dove i conduttori una volta montati restano collegati per diversi anni; subendo solo stress termici per i quali sono verificati secondo le normative di riferimento.



Fig.15 Trasformatore elevatore di corrente utilizzato per le prove di sovratemperature

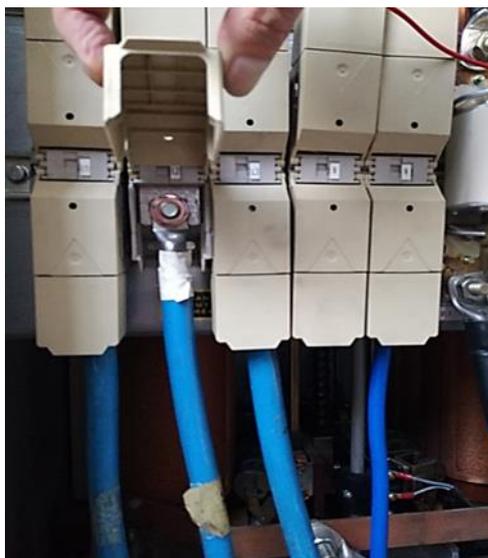


Fig.16 Derivazioni di un quadro di BT

Per riuscire meglio a comprendere il fenomeno nonché cercare di quantificare la variazione della resistenza elettrica di crimpatura quando i cavi sono sottoposti a stress meccanici, sono state effettuate alcune prove di laboratorio variando i parametri singolarmente.

Per lo sviluppo delle verifiche è stato utilizzato un solo cavo intestato con capicorda compressi, in modo tale da non avere parametri di influenza sulle misure legati all'utilizzo di più conduttori. Ad esempio, i cavi con lunghezza maggiore hanno uno scambio termico con l'ambiente migliore rispetto a quelli con una minor lunghezza, poiché maggiore è la superficie di scambio a disposizione. Questo può influire sulla temperatura dei capicorda.

Il cavo è stato sottoposto ad una sola delle due estremità a tre tipologie di stress meccanici, quali:

- Torsione intorno al proprio asse di simmetria (Fig.17).
- Rotazione sul piano del capocorda (Fig.18).
- Rotazione intorno al piano del capocorda (Fig.19).



Fig.17 Torsione di un conduttore di prova intorno al proprio asse di simmetria

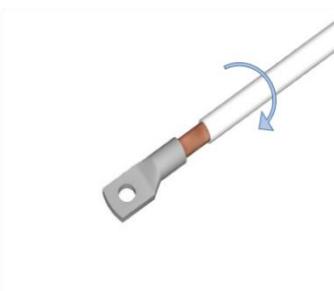


Fig.18 Rotazione di un conduttore di prova sul piano del capocorda



Fig.19 Rotazione di un conduttore di prova intorno al piano del capocorda

Nella prima prova effettuata il conduttore ha subito solamente delle torsioni. In seguito, è stato eliminato il capocorda posizionato all'estremità del conduttore sottoposta a stress meccanico ed è stato connesso, sempre per compressione, un nuovo capocorda. Su di esso è stata eseguita una prova di rotazione, durante la quale è avvenuta una deformazione non realistica del tratto di conduttore nudo situato tra il punto di inizio del conduttore isolato e il capocorda crimpato, che ha portato a risultati delle prove poco significativi. Gli esiti della prova di torsione hanno dimostrato che la resistenza elettrica di crimpatura è sensibile al fenomeno meccanico.

Successivamente è stato connesso al conduttore tramite saldatura a stagno un nuovo capocorda, che ha subito in seguito una crimpatura e una ricottura. Le misure della resistenza elettrica sono state effettuate sia dopo la saldatura, sia dopo la compressione e la ricottura. I risultati di queste prove hanno evidenziato un effettivo miglioramento dell'andamento della resistenza elettrica quando l'estremità del conduttore di prova è sottoposta a torsione.

Una volta compreso che il metodo di connessione di un capocorda su di un conduttore influisce notevolmente sul valore e sulla variazione della resistenza elettrica di crimpatura, ci si è concentrati su quanto potesse influire la tipologia di compressione e di capocorda utilizzate. Perciò si è proseguito con:

- Prova di torsione con lo stesso capocorda utilizzato in precedenza, ma con diversa compressione.
- Prove di torsione con diverso capocorda e diversa crimpatura rispetto a tutte le altre prove precedentemente effettuate.

1.1 Strumentazione e schema di prova

Per eseguire le misure della resistenza elettrica dei capicorda fissati sull'estremità di conduttore sottoposta a stress meccanici, sono stati utilizzati i seguenti strumenti:

- Generatore di corrente O.S.A.T. Elettronica SRL, con una tensione massima di 8 V e una corrente massima di 1200 A.
- Cavo di bassa tensione siglato CEI FG7R-O 0.6/1 kV 1x240 mm² CEI 20-2 con una lunghezza di circa 2 m.

- Capicorda.
- Barre di rame con 16 fori e una sezione trasversale di 600 mm².
- Pinza amperometrica Fluke 355.
- Multimetro digitale 34401a hp.
- Pinza di misura voltmetrica.
- Teste oleodinamiche.
- Pompe oleodinamiche a pedale.
- Termocoppie.
- Termometro Fluke 54 ii.

La pinza di misura voltmetrica (Fig.20) è stata costruita nel laboratorio LATFC durante lo svolgimento del lavoro di tesi. Ha la forma di uno schiaccianoci imperniata all'estremità ed è completamente in alluminio. Il diametro della zona di chiusura della pinza intorno al conduttore è stato scelto di dimensioni tali da poter utilizzare l'utensile anche in seguito agli stress meccanici che contribuiscono ad un leggero rigonfiamento del conduttore. In prossimità di tale zona è stato praticato un foro per collegare uno dei due terminali del multimetro. La lunghezza di questo strumento permette, inoltre, di poterlo afferrare in modo agevole.

Per la costruzione della pinza si è partiti da due parti simmetriche (Fig.21), che sono state successivamente fissate tra loro.

La pinza di misura voltmetrica è stata costruita in modo tale da avere un punto equipotenziale stabile sul conduttore per effettuare le misure. Non è stato utilizzato un equalizzatore come suggerito dalla norma CEI EN 61238-1, poiché l'equalizzatore tende a bloccare i movimenti a cui è soggetto il conduttore, rendendo poco realistica la manovra meccanica effettuata e durante i movimenti a cui è stato sottoposto il conduttore poteva essere soggetto anche a rottura. Inoltre, la pinza è uno strumento facilmente rimovibile e potrebbe rappresentare un utensile ottimale da utilizzare durante la misura della resistenza di crimpatura per la valutazione periodica dello stato di ammaloramento dei capicorda.

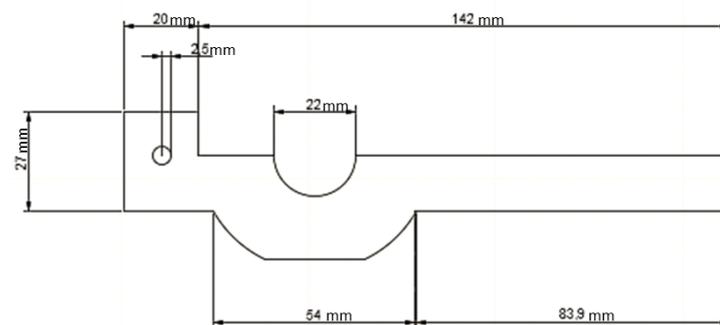


Fig.21 Disegno tecnico di una delle due parti simmetriche della pinza di misura voltmetrica.

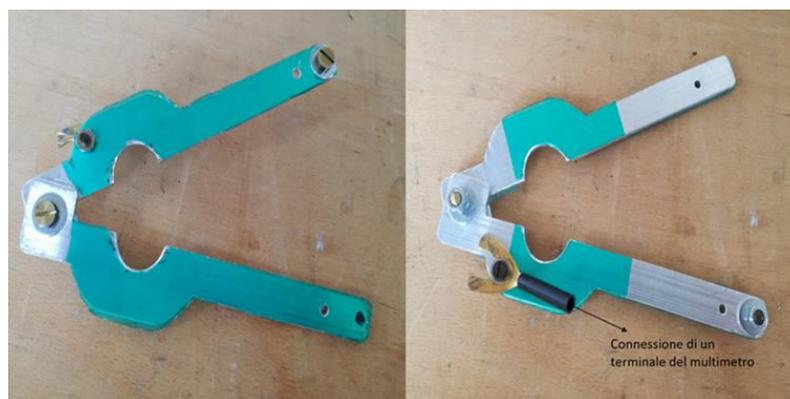


Fig.20 Pinza di misura voltmetrica

Lo schema di prova utilizzato è quello in Fig.22, nel quale il conduttore capicordato è collegato al generatore di corrente tramite due barre di rame. Esse sono state utilizzate in modo tale da non avere un eccessivo riscaldamento dei capicorda, che possa compromettere i risultati delle prove con un ulteriore parametro di influenza. Oltre ciò è possibile visualizzare la presenza di termocoppie, posizionate sul colletto dei capicorda per assicurarsi che abbiano raggiunto l'equilibrio termico e valutarne il surriscaldamento. Una ulteriore termocoppia è stata utilizzata per la misura della temperatura ambiente.



Fig.22 Schema di prova con zoom del collegamento dei capicorda alle barre

1.2 Stima dell'incertezza di misura

La stima dell'incertezza di misura è una delle operazioni più importanti nell'esecuzione di una misurazione ed esprime l'inesattezza nella conoscenza del misurando.

Il metodo di misurazione utilizzato per il calcolo della resistenza elettrica dei capicorda è un metodo indiretto. La stima della resistenza deriva dalla lettura di un multimetro digitale e di una pinza amperometrica. La lettura effettuata sul multimetro digitale ha indicato il valore della caduta di tensione tra il foro d'ispezione del capocorda e l'inizio del conduttore cordato (Fig.23), mentre la lettura effettuata sulla pinza amperometrica ha indicato il valore di corrente al quale è stata realizzata ciascuna misura.

I principali contributi di incertezza considerati per la valutazione della resistenza elettrica dei capicorda, sono:

- Incertezza strumentale dovuta al multimetro digitale.
- Incertezza strumentale dovuta alla pinza amperometrica.
- Incertezza di lettura dovuta al puntale.

- Incertezza di lettura dovuta alla pinza di misura voltmetrica.

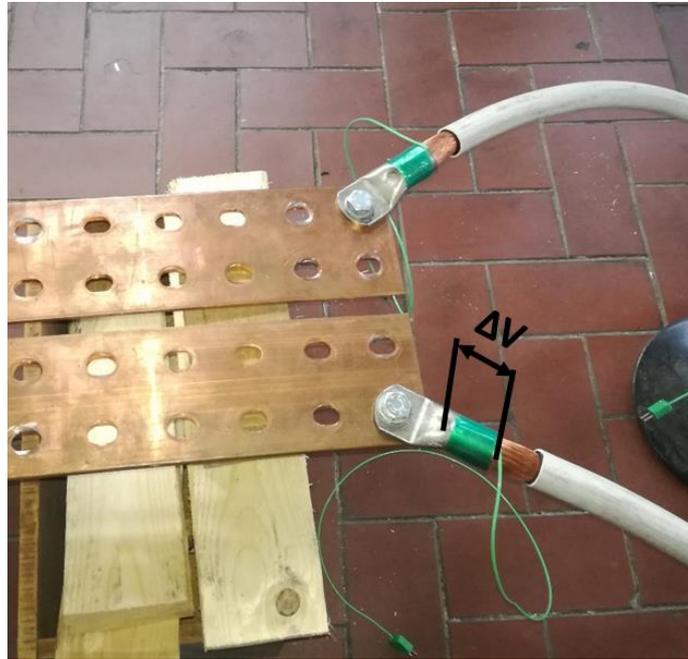


Fig.23 Valutazione della caduta di tensione

È stata valutata l'incertezza di categoria A per il calcolo dell'incertezza tipo dovuta alla pinza e al puntale e l'incertezza di categoria B per il calcolo dell'incertezza tipo del multimetro digitale e della pinza amperometrica.

La valutazione dell'incertezza di categoria A per la pinza di misura voltmetrica è stata ottenuta bloccando il puntale sul foro di ispezione del capocorda ed effettuando trenta letture ripetute della caduta di tensione tra il foro di ispezione e l'inizio del colletto dell'altro capocorda (Fig.25). Mentre, la valutazione dell'incertezza di categoria A per il puntale, è stata ottenuta bloccando la pinza sull'inizio del conduttore cordato e posizionando il puntale sul foro di ispezione (Fig.24); valutando così la caduta di tensione sul colletto del capicorda. Anche in questo caso sono state effettuate trenta misure ripetute.

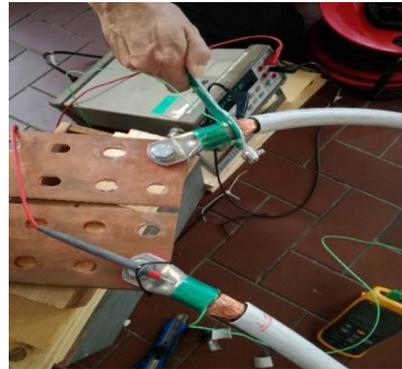
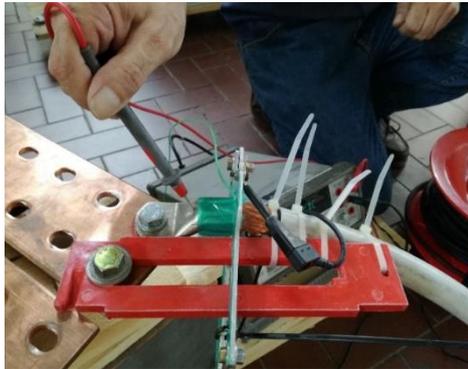


Fig.24 Metodo per il calcolo dell'incertezza del puntale

Fig.25 Metodo per il calcolo dell'incertezza della pinza

Completate queste letture, è stata stimata l'incertezza tipo della pinza e del puntale.

I passi eseguiti sono:

1. Calcolo del valor medio:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \times \sum_{k=1}^N x_k \quad (4)$$

2. Calcolo della varianza empirica corretta:

$$s^2(x) = \frac{1}{N-1} \times \sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x})^2 \quad (5)$$

3. Calcolo dello scarto tipo sperimentale:

$$s(x) = \sqrt{s(x)^2} \quad (6)$$

4. Calcolo dello scarto tipo sperimentale della media:

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{N}} \quad (7)$$

5. Da cui l'incertezza tipo:

$$u_A(x) = s(\bar{x}) \quad (8)$$

dove:

- N: numero di letture.
- x_k : valore della singola lettura.

L'incertezze tipo ottenute sono:

$$u(v)_{\text{puntale}} = \pm 0.0066 \text{ mV} \quad (9)$$

$$u(v)_{\text{pinza}} = \pm 0.124 \text{ mV} \quad (10)$$

Per il calcolo dell'incertezza tipo del multimetro e della pinza amperometrica sono state utilizzate le seguenti formule:

$$u(v) = \pm \frac{\{(0.005\% \times V_{\text{in}}) + (0.003\% \times \text{range})\}}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

$$u(A) = \pm \frac{\{(1.5\% \times I_{\text{in}}) + (5 \times \text{digits})\}}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

dove:

- $u(v)$: incertezza tipo del multimetro.
- $u(A)$: incertezza tipo della pinza amperometrica.
- V_{in} : lettura di tensione.
- I_{in} : lettura di corrente.

Successivamente è stata valutata l'incertezza tipo complessiva della caduta di tensione, data dal contributo di incertezza del multimetro, del puntale e della pinza ed espressa nel modo seguente:

$$u(V) = \sqrt{(u(v)_{\text{puntale}})^2 + (u(v)_{\text{pinza}})^2 + (u(v))^2} \quad (13)$$

Una volta ottenute le incertezze tipo di tensione e corrente, sono state calcolate l'incertezza tipo e l'incertezza estesa della resistenza elettrica del capocorda, come:

$$u(R) = \pm \left\{ \frac{1}{I_{in}} \times \sqrt{[(u(V))^2 + \left(\frac{V_{in}^2}{I_{in}^2} \times u(A)^2\right)]} \right\} \quad (14)$$

$$U(R) = \pm(k \times u(R)) \quad (15)$$

dove:

- $u(R)$: incertezza tipo della resistenza elettrica;

- $U(R)$: incertezza estesa della resistenza elettrica.

- k : fattore di copertura.

In tutti i calcoli effettuati è stato considerato un fattore di copertura pari a due.

Il valore del fattore di copertura dipende dalla distribuzione di probabilità della variabile aleatoria in misura, che nella maggior parte delle applicazioni si può ritenere una distribuzione gaussiana. Esso può essere ricavato utilizzando apposite tabelle che in base al livello di fiducia scelto indicano il corrispondente valore di k . In questo caso il livello di fiducia scelto è stato del 95% al quale corrisponde un fattore di copertura uguale a due.

1.3 Procedura di prova

Nelle prove di misura resistiva, tra una verifica e la consecutiva è stato sempre sostituito il capocorda utilizzato. Partendo dallo schema di prova (Fig.22) distingueremo le due estremità del conduttore utilizzato come lato + (freccia blu) e lato - (freccia rossa), come riportato in Fig.26. Poi, dato che tra tutte le prove eseguite sono stati utilizzati capicorda di differenti produttori, per distinguerli parleremo di capicorda A, B e C. Inoltre, i capicorda sono stati compressi con diversi profili di crimpatura ottenuti dall'utilizzo di differenti teste oleodinamiche. Anche in questo caso, la distinzione avviene denominando i differenti profili come profilo 1, 2 e 3, descritti in Tabella 2.

Tabella 2. Descrizione dei profili di crimpatura stampati sui capicorda utilizzati per le prove di stress meccanico

N° profilo	Tipo di profilo	Immagine identificativa
1	Profilo di crimpatura a singola rientranza quadra	
2	Profilo di crimpatura a doppia rientranza	
3	Profilo di crimpatura esagonale	

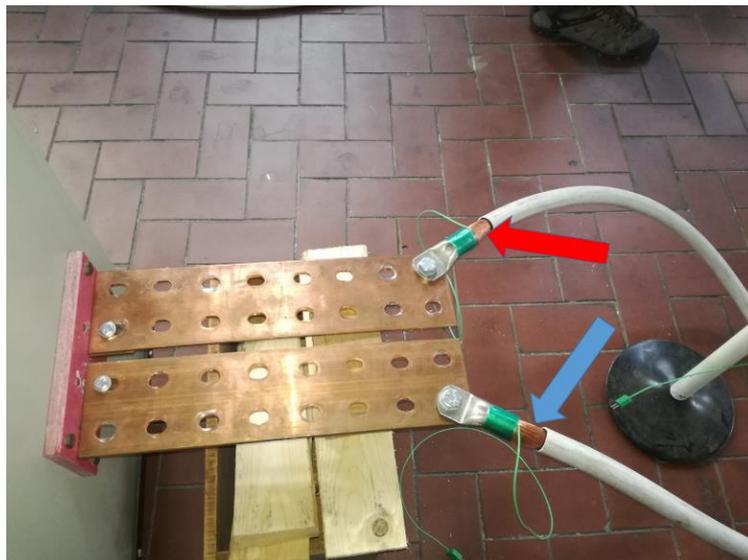


Fig.26 Distinzione fra le due estremità del conduttore di prova

Come già precedentemente detto, il conduttore di prova è stato sottoposto a tre differenti tipologie di stress meccanico che sono avvenute nel modo seguente:

- Ciascuna torsione è avvenuta bloccando parte di una dell'estremità del conduttore e ruotando il capocorda di 180° , prima in senso orario e successivamente in senso antiorario, permettendo il ritorno del capocorda al proprio punto di partenza (Fig.27).
- Le rotazioni intorno e sul piano del capocorda sono avvenute seguendo una sequenza di quattro movimenti (Fig.28), eseguiti nel seguente ordine:
 1. Rotazione intorno al piano del capocorda di 45° verso l'alto.
 2. Rotazione intorno al piano del capocorda di 45° verso il basso.
 3. Rotazione sul piano del capocorda di 45° verso destra.
 4. Rotazione sul piano del capocorda di 45° verso sinistra.



Fig.27 Torsione di 180°

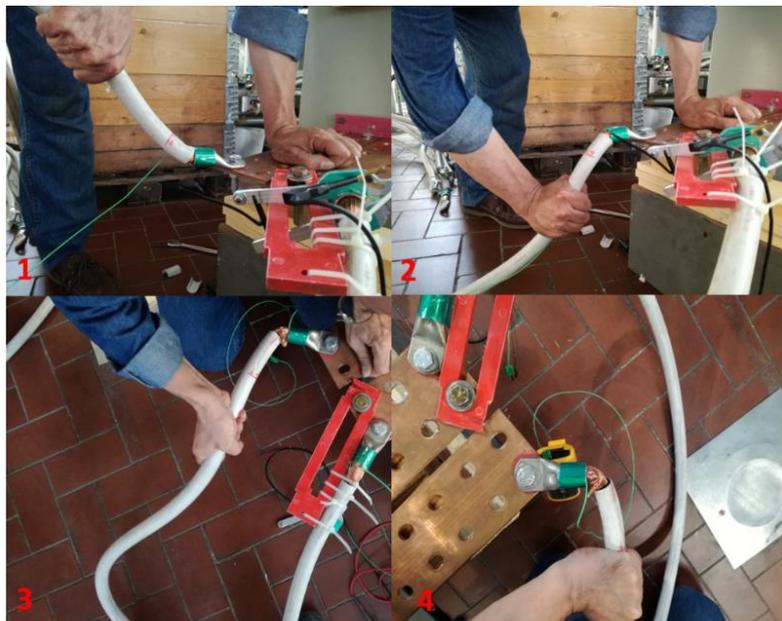


Fig.28 Sequenza delle quattro rotazioni subite dal conduttore

Nelle prove con stress torsionale le misure voltamperometriche sono state valutate su:

- Un capocorda A compresso con un profilo 1 e posizionato sul lato + del conduttore.
- Un capocorda A connesso sul lato + con una saldatura a stagno, successivamente crimpato con un profilo 1 ed infine ricotto.
- Un capocorda A sul lato + del conduttore e compresso con un profilo 2.

- Un capocorda B compresso con un profilo 2 e posizionato sul lato + di un conduttore siglato sempre CEI FG7R-O 0.6/1 kV 1x240 mm² CEI 20-2, ma differente rispetto a quello utilizzato in tutte le altre prove.
- Un capocorda C compresso con profilo 3, posto sul lato + di un ulteriore conduttore siglato sempre allo stesso modo.

In Tabella 3 sono schematizzate le misure effettuate, specificandone il tipo, il profilo di crimpatura e il posizionamento sul conduttore di prova del capocorda soggetto alle misure. Per semplificare il tutto le prove sono state suddivise in diversi casi.

Tabella 3. Suddivisione delle prove eseguite in diversi casi

Capocorda	Profilo di crimpatura	Lato del conduttore sul quale è posizionato il capocorda	Caso
A	1	+	I
A	2	+	II
B	2	+	III
C	3	+	IV
A	Saldatura a stagno, crimpatura e ricottura	+	V

Quando il conduttore è stato sottoposto a rotazione intorno e sul piano del capocorda, le misure resistive sono state valutate misurando la corrente di alimentazione e la caduta di tensione tra il

foro di ispezione del capocorda posto sul lato + e l'inizio del conduttore sul lato -. Questa differenziazione rispetto al caso torsionale, è dovuta al fatto che durante le manovre c'è stato un evidente rigonfiamento della zona di conduttore nudo sul lato + (Fig.29), che non ha permesso di installare in modo adeguato la pinza di misura al cavo; ciò è stato causa di risultati poco significativi.

Nel caso in cui si verificasse questo evidente rigonfiamento durante il normale funzionamento del conduttore di prova, nel laboratorio avverrebbe una sostituzione del capocorda. Per questa ragione è stata effettuata una sola prova di rotazione, utilizzando un capocorda A compresso con un profilo 1.



Fig.29 Rigonfiamento della zona del conduttore nudo

Durante tutte le prove effettuate la sezione di contatto tra la barra di rame ed il capocorda è stata mantenuta la stessa, in modo da evitare che ciò influenzasse le misure.

1.4 Risultati

Inizialmente sarà analizzato il comportamento resistivo delle connessioni crimpate ed in seguito quello delle connessioni saldate in stagno. In entrambi i casi di studio il conduttore è stato soggetto a torsioni. Le correnti alle quali sono state effettuate le prove sono riportate in Tabella

4. In tutti questi casi il capocorda sul quale sono state eseguite le misure è stato posizionato sull'estremità del conduttore di prova sottoposto a torsione.

Tabella 4. Correnti di prova utilizzate nelle diverse verifiche

Caso	Corrente [A]
I	315
II	400
III	400
IV	400
V	400

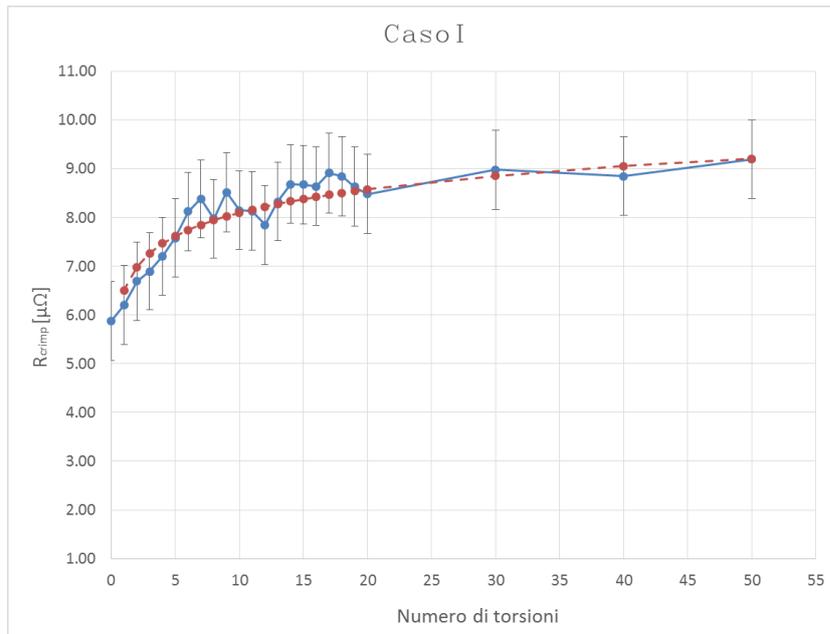


Fig.30 Andamento della resistenza di crimpatura nel caso I

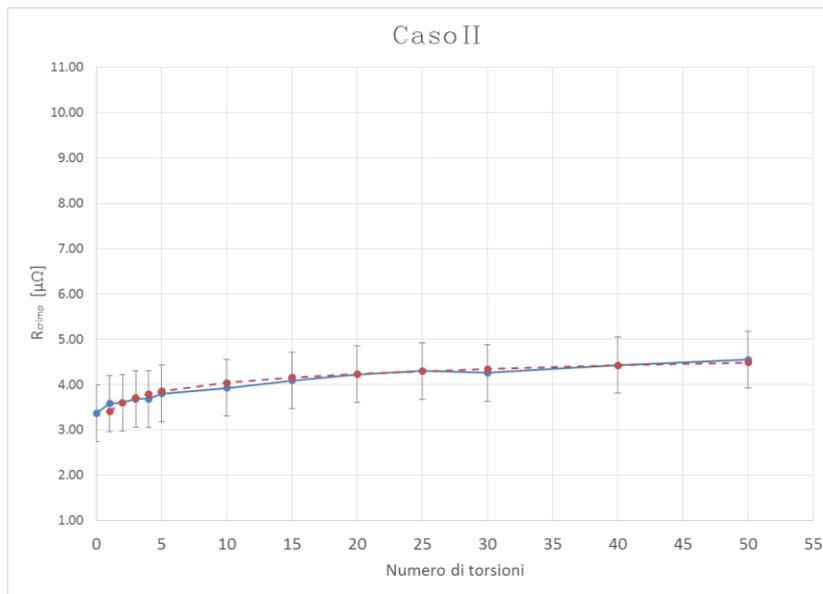


Fig.31 Andamento della resistenza di crimpatura nel caso II

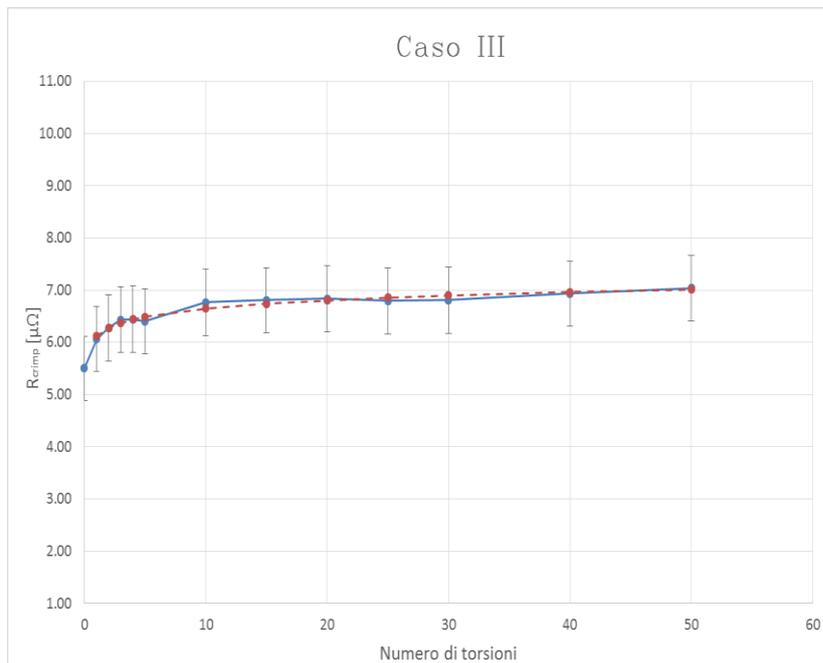


Fig.32 Andamento della resistenza di crimpatura nel caso III

Dal caso I (Fig.30) è possibile osservare una variazione molto significativa della resistenza di crimpatura (R_{crimp}), in particolare già dalle prime dieci torsioni effettuate si ha un cambiamento di circa il 40% rispetto al valore iniziale della resistenza elettrica. Successivamente l'andamento tende a stabilizzarsi. Infatti, tra la decima e la cinquantesima torsione si ha una variazione del 8%, assumendo dei valori che rientrino all'interno dell'intervallo di incertezza della misura effettuata alla nona torsione.

Anche nel caso II e III (Fig.31 e Fig.32), la resistenza di compressione ha una variazione percentuale molto più evidente nelle prime dieci torsioni che non nelle successive. In entrambe le prove la resistenza varia di circa il 20% dalla misura iniziale a quella realizzata alla decima torsione. Questi due andamenti risultano essere molto simili tra loro e questo potrebbe essere giustificato dal fatto che il profilo di crimpatura compresso su entrambi i capicorda sia lo stesso. Ciò che risulta essere molto evidente sono i diversi valori di partenza. Infatti, prima delle torsioni nel caso II la $R_{\text{crimp}}=5.88 \mu\Omega$ mentre nel caso III $R_{\text{crimp}}=3.37 \mu\Omega$. Questa discrepanza potrebbe essere dovuta sia alla diversa tipologia di capocorda utilizzato, sia alla possibilità che durante il di crimpatura le rientranze siano state stampate su una posizione leggermente diversa sul colletto. Quindi, il valore di partenza non può essere univocamente definito perché dipende da molteplici fattori non controllabili nel caso in cui la compressione avvenga per mano dell'uomo.

Per rigor di logica il valore di partenza della resistenza di crimpatura, misurato in tutti i casi analizzati, deve essere minore della resistenza elettrica del tratto di conduttore equivalente introdotto nel capocorda.

La verifica di quanto appena detto è stata eseguita calcolando la resistività del rame ad una temperatura di 35°C , poiché questa rappresenta la temperatura media misurata sui capicorda durante le prove. Successivamente per il calcolo della resistenza è stata considerata una lunghezza del conduttore equivalente pari a 30 mm, una sezione di 240 mm^2 e un coefficiente di temperatura del rame uguale a $0.004 [^{\circ}\text{C}]^{-1}$.

I calcoli effettuati sono i seguenti:

$$\rho_{35^{\circ}\text{C}} = \rho_{20^{\circ}\text{C}} \times (1 + 0.004 \times (35 - 20)) \quad (16)$$

$$R_{eq} = \rho_{35^{\circ}C} \times \frac{l_{eq}}{S} \quad (17)$$

dove:

- l_{eq} : lunghezza del tratto di conduttore equivalente;
- S : sezione del conduttore;

Il risultato ottenuto è $R_{eq} = 2.2 \mu\Omega$. Tutti i valori misurati risultano inferiori.

Quello che ci si propone di andare ad analizzare in questo paragrafo è però la variazione del comportamento resistivo. Nel caso II e III rispetto al I si ha un netto miglioramento di questo fattore, che è da attribuire alla tipologia di crimpatura ultimata.

Per approfondire maggiormente lo studio e comprendere se l'andamento resistivo dipendesse soprattutto dal profilo di crimpatura è stato preso in esame il caso IV (Fig.33).

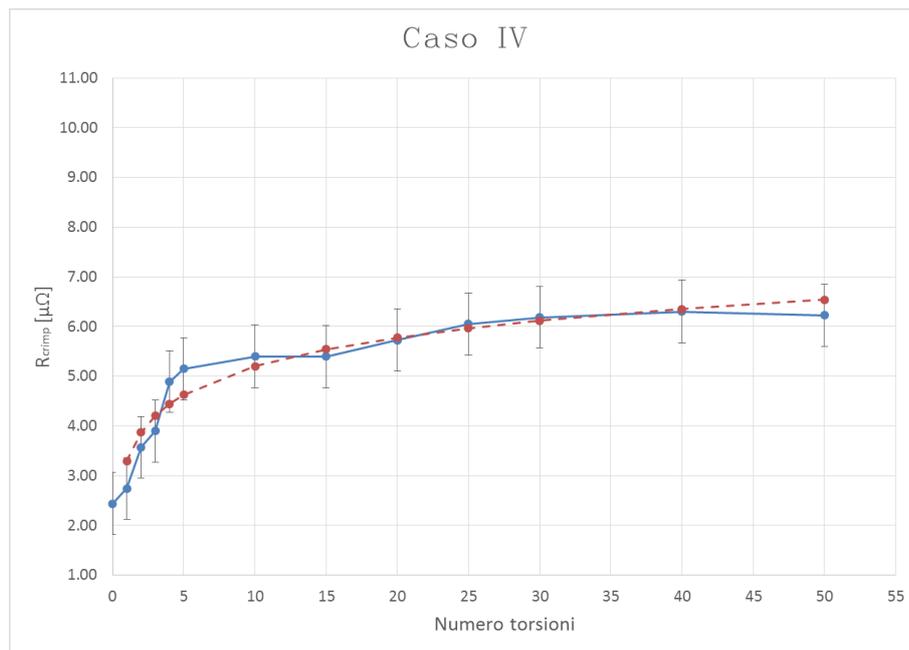


Fig.33 Andamento della resistenza di crimpatura nel caso IV

Da questa ulteriore verifica viene confermato che la variazione più significativa si ha in prossimità della decima torsione, in corrispondenza della quale la resistenza di crimpatura è all'incirca raddoppiata rispetto al valore di partenza. Questo comportamento resistivo risulta quindi essere differente rispetto a tutti gli altri ma anche il peggiore in termini incrementali.

In tutti e quattro i casi le curve ottenute sono approssimabili ad un andamento logaritmico (linea tratteggiata in rosso), in rapporti diversi a seconda della prova. L'evidente aumento della resistenza di crimpatura può essere dovuto ad un allentamento della zona compressa sul capocorda e ad una tendenza a distaccarsi dalla zona del foro di ispezione di alcuni trefoli del conduttore, quando l'estremità del conduttore di prova è soggetta a torsioni. Tutto ciò andrebbe ad aumentare la resistenza di contatto tra il capocorda e il conduttore, aumentando di conseguenza anche la resistenza di crimpatura. Un altro aspetto che influenza la resistenza di compressione è quello termico. Per quantificare il suo contributo il conduttore di prova è stato sottoposto a cicli termici che saranno discussi in seguito.

Per confrontare i diversi esiti ottenuti è risultato vantaggioso introdurre una resistenza relativa rispetto al valore iniziale (R_0), in modo tale da fare una analisi che risulti indipendente dai valori assoluti di resistenza (Fig.34).

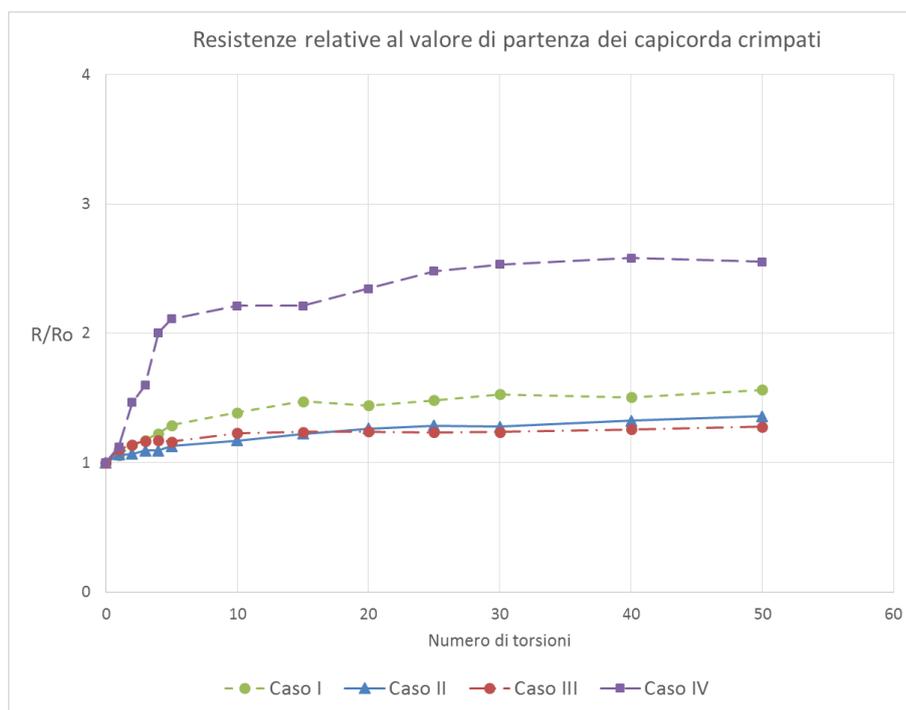


Fig.34 Andamento della resistenza di crimpatura relativa nel caso I, II, III e IV

Dalla figura è possibile visualizzare che nel caso IV il cambiamento percentuale di resistenza è nettamente superiore agli altri tre casi. Questo porta a concludere che nel caso di un profilo di crimpatura esagonale il contatto tra il capocorda e il conduttore risulti maggiormente sensibile

agli stress torsionali. Se si avesse una compressione del capocorda non effettuata in modo corretto, facendo ad esempio avvenire la crimpatura ad una pressione minore rispetto a quella appropriata si potrebbero raggiungere dei valori elevati di resistenza, che possono influire notevolmente sulla validazione dell'apparecchiatura durante la prova di sovratemperatura. In questa analisi i valori raggiunti dal capocorda con un profilo 3 arrivano a $6.2 \mu\Omega$ partendo da $2.44 \mu\Omega$. Ma, nel caso in cui si avesse un valore di partenza all'incirca di $6 \mu\Omega$, come quelli nel caso I e III, si arriverebbe a circa $16 \mu\Omega$ con una potenza dissipata che, a parità di corrente, aumenterebbe di un fattore tre.

Per quanto riguarda il comportamento resistivo relativo dei capicorda compressi con un profilo 2, esso risulta molto simile ed anche sicuramente migliore rispetto a quello ottenuto nel caso I e nel caso IV. Il capocorda crimpato con profilo 1 (caso I) ha una variazione percentuale complessiva di circa il 50%. L'aspetto negativo di questo capocorda è che, in termini di valore assoluto, ha raggiunto il livello di resistenza maggiore tra quelli che sono stati misurati in tutte le prove, pari a $9.2 \mu\Omega$.

In tutte le verifiche effettuate è evidente una variazione abbastanza sensibile della resistenza elettrica alla decima torsione.

Poiché, in un laboratorio di prova durante un anno i conduttori di prova possono subire un numero compatibile con le cinque torsioni, vuol dire che dopo un paio di anni bisognerebbe effettuare le misure voltamperometriche su ciascun capocorda e valutare se sostituirli o meno.

Per comprendere quanto potesse influire la tipologia di connessione sul comportamento resistivo di un capocorda, sono state realizzate delle prove su di un capocorda A fissato al conduttore con una saldatura a stagno e sottoponendo il conduttore a venti torsioni (Fig.35). Poiché non si è riscontrata una variazione evidente della resistenza elettrica del capocorda che ha oscillato intorno ad un valor medio di $2.8 \mu\Omega$, si è limitato il numero di torsioni.

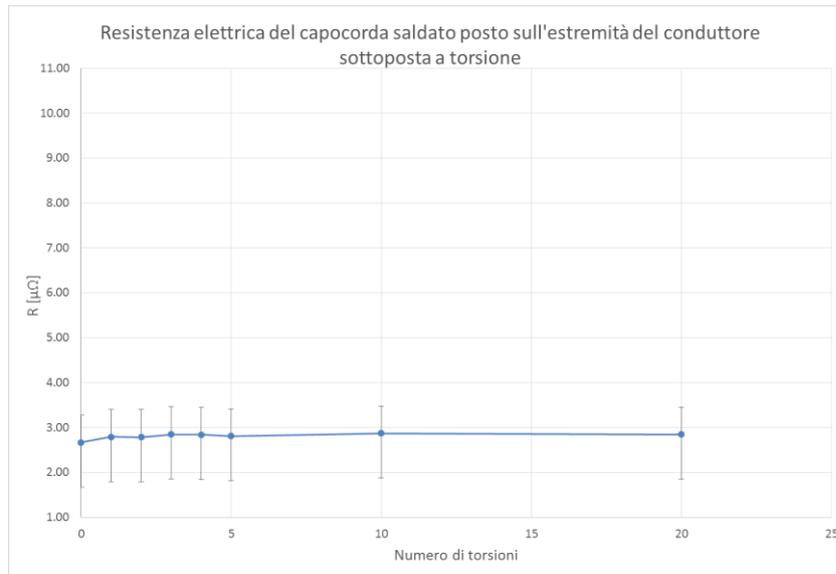


Fig.35 Andamento della resistenza elettrica del capocorda A saldato

I risultati ottenuti dimostrano una quasi totale insensibilità, del capocorda saldato, agli stress meccanici. Ciò è dovuto alla trasmissione dello stress sul conduttore cordato quando avviene la torsione. Successivamente il capocorda è stato crimpato e ricotto, ottenendo i risultati in Fig.36 e Fig.37.

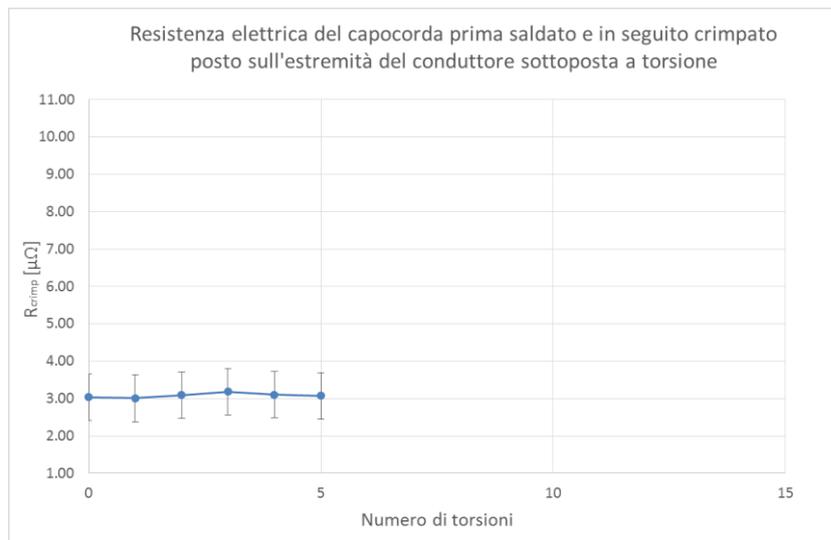


Fig.36 Andamento della resistenza di crimpatura del capocorda A saldato e successivamente compresso

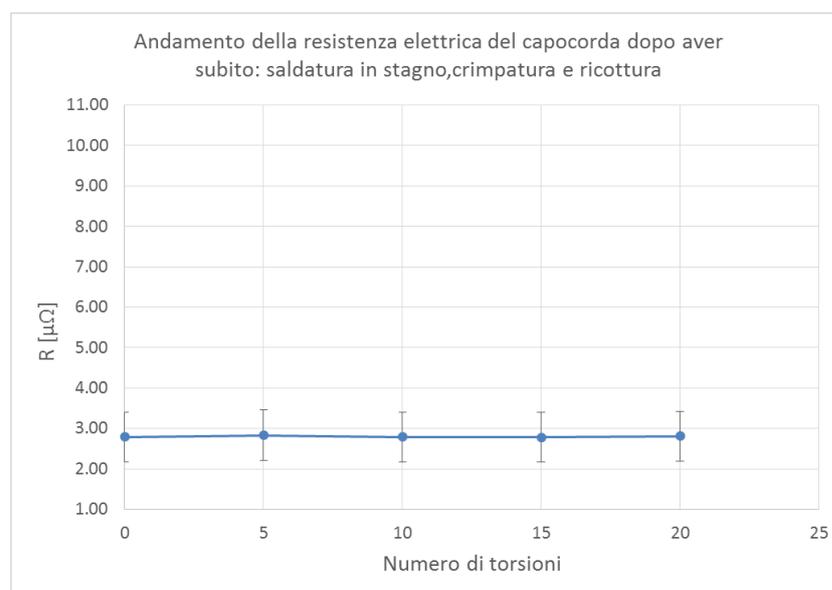


Fig.37 Andamento della resistenza di crimpatura del capocorda A ricotto in seguito alla compressione

Dai grafici in Fig. 35, Fig.36 e Fig.37 si può notare un leggero aumento della resistenza elettrica di crimpatura quando il capocorda è stato successivamente compresso con un profilo 1, passando da $2.8 \mu\Omega$ a $3.05 \mu\Omega$. Questo incremento può essere dovuto alla frattura della saldatura nella zona in cui il capocorda è stato compresso. Nonostante ciò, nelle successive torsioni non si è avuto alcun incremento della resistenza, tale avvenimento ha portato a terminare la prova a cinque torsioni. In seguito è stata fatta una ricottura del capocorda, in modo tale da far fondere lo stagno che era stato portato a frattura. Una volta eseguita la ricottura il valore della resistenza di crimpatura si è riportato a quello ottenuto con il capocorda solamente saldato.

Dagli esiti di tutte le prove di torsione è possibile comprendere che la tipologia di connessione più vantaggiosa risulta essere la connessione saldata, sia in termini di valore assoluto che di variazione della resistenza elettrica del capocorda. Quindi, per evitare che i capicorda dissipino una potenza troppo elevata durante le verifiche di sovratemperatura, una soluzione potrebbe essere quella di saldare tutti i capicorda presenti in un laboratorio di prova. Utilizzare questa connessione vuol dire però impiegare maggior tempo e denaro rispetto ad una connessione semplicemente crimpata.

Pur non avendo portato a risultati accettabili, come ultima analisi consideriamo gli esiti ottenuti dalle prove di rotazione (Fig.38). La verifica è stata eseguita ad una corrente di 315 A. I risultati riportano il valore della resistenza di crimpatura del capocorda posto sull'estremità del

conduttore soggetta a rotazione. Per ottenere questi esiti è stata sottratta, al valore ottenuto, la resistenza dello spezzone di cavo considerato durante la misura. Ciò ha portato a risultati non attendibili, poiché come è possibile osservare nelle prime cinque rotazioni si ha una variazione eccessiva della resistenza, che tende poi a stabilizzarsi intorno ai $9 \mu\Omega$.

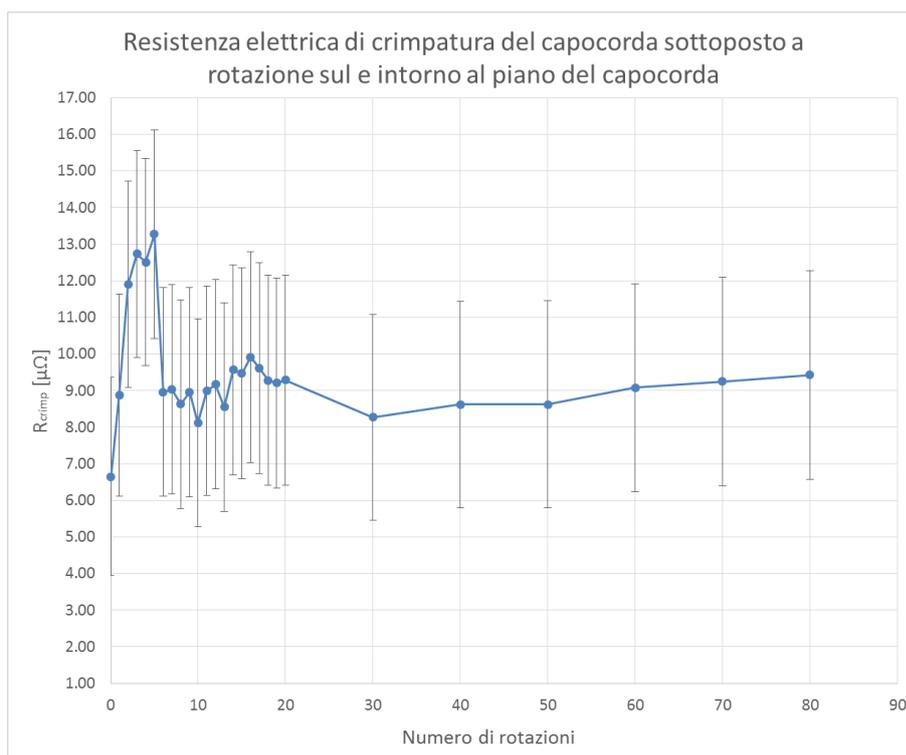


Fig.38 Andamento della resistenza di crimpatura del capocorda A nelle prove di rotazione

Dai risultati ottenuti una considerazione ragionevole è che, per valutare il comportamento resistivo di un capocorda soggetto a stress meccanici non bisogna sottoporli a questa tipologia di stress, poiché porta ad una deformazione del conduttore per la quale non si riescono ad ottenere delle misure significative e analizzabili

2. Analisi del comportamento resistivo della connessione capocorda-conduttore di prova sottoposta a stress termico

Durante le verifiche di sovratemperatura i conduttori di prova sono sottoposti a stress termici, poiché la corrente all'interno dei cavi può raggiungere valori molto più elevati rispetto a quelli prestabiliti.

Quando si esegue una prova di sovratemperatura su di un componente elettrico utilizzato nei sistemi di distribuzione (quadro, sbarra, ecc...) su ciascuna fase di alimentazione dell'oggetto possono essere presenti più conduttori. La presenza dell'effetto pelle sulle barre del trasformatore elevatore di corrente che alimenta l'oggetto in prova, la possibilità di avere una impedenza diversa dei conduttori e quant'altro fanno in modo che le correnti nei conduttori si distribuiscano in modo disuniforme, portando ad un surriscaldamento delle connessioni crimpate. L'elevata temperatura potrebbe accelerare l'ossidazione interna del capocorda e provocare un allentamento della compressione, portando ad un incremento sia della resistività dei materiali dai quali è costituito il capocorda, sia della resistenza di contatto tra il cavo e lo stesso connettore. Il tutto provocherebbe un aumento della potenza dissipata dal cavo capicordato, portando il tratto di conduttore nudo in prossimità della connessione compressa ad ossidarsi.

La verifica della ripartizione disomogenea delle correnti è stata effettuata misurando le correnti sui conduttori di prova utilizzati per l'alimentazione di un condotto sbarra in bassa tensione. Ognuna delle fasi dell'apparecchiatura è stata alimentata da sei conduttori. Le misure di corrente sono state eseguite una volta raggiunto l'equilibrio termico e hanno portato ai risultati presenti in Tabella 5. Le fasi di alimentazione sono identificate come R, S e T (Fig.39) e i conduttori sono numerati da uno a sei. Le correnti che percorrono ciascun cavo dovrebbero aggirarsi intorno ai 400 A, mentre dalle misure ottenute si ha che il conduttore 6R è percorso da una corrente efficace di circa 800 A. Al contrario ci possono essere anche cavi sottosfruttati, come ad esempio in questo caso il conduttore 2R percorso da 232 A. Quindi, durante una prova di sovratemperatura i conduttori non sono sfruttati tutti allo stesso modo.

Partendo da questo aspetto si è deciso di sottoporre un conduttore di prova a dei cicli termici. Le correnti di alimentazione utilizzate per effettuare i cicli sono state 800 A e 1000 A. Le prove

ad 800 A sono state realizzate poichè nel caso pratico appena analizzato si è misurata una corrente massima di 793 A, mentre quelle a 1000 A perché ciò non preclude che ci possano essere situazioni estreme in cui la corrente in uno dei conduttori di prova arrivi a valori superiori.

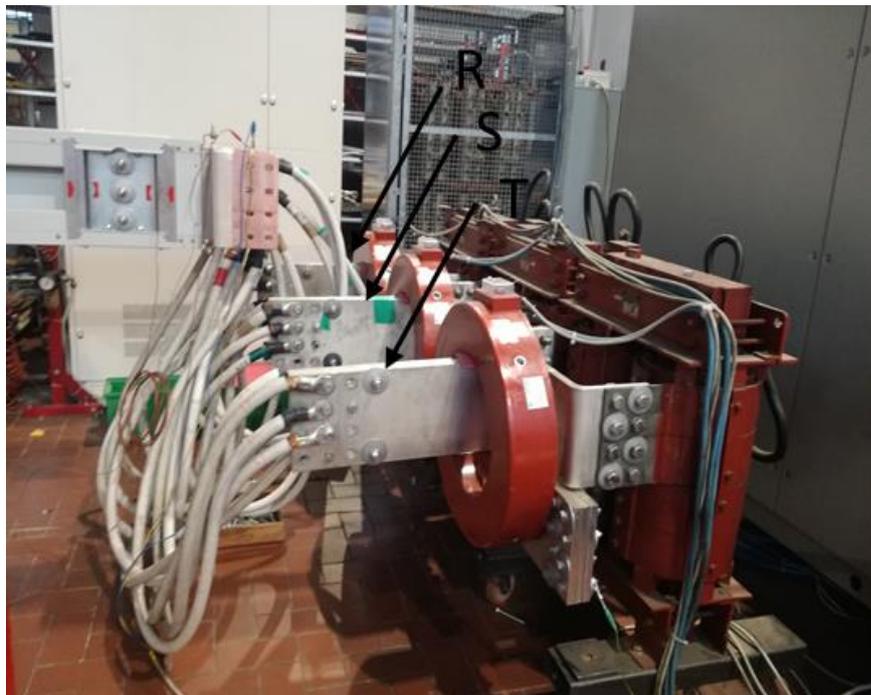


Fig.39 Collegamento dei conduttori di prova su di un condotto sbarra di bassa tensione

Tabella 5. Correnti nei conduttori di prova durante una verifica di sovratemperatura su di un condotto sbarra di BT

Conduttore	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

2.1 Prove termiche

La strumentazione utilizzata per effettuare le prove termiche è composta, oltre che da tutte le apparecchiature utilizzate nell'analisi del comportamento resistivo della connessione conduttore di prova-capocorda sottoposta a stress meccanici, da un:

- 20022 Precision Micro ohmmeter.

Inoltre, lo schema di prova utilizzato è identico a quello realizzato per le misure voltamperometriche sulle connessioni crimpate e saldate di un conduttore di prova soggetto a stress meccanici (Fig. 22).

Il conduttore è stato sottoposto a cinque cicli termici realizzati in modo consecutivo. Nei primi e negli ultimi due cicli la corrente di alimentazione è stata impostata ad 800 A, mentre il terzo ciclo è stato realizzato con una corrente di 1000 A.

Alla fine di ogni ciclo sono state misurate le resistenze di crimpatura di entrambi i capicorda, che distingueremo come capocorda 1, posto sul lato sinistro del conduttore, e capocorda 2 posto sul lato destro. In questo caso, i due capicorda sono della stessa tipologia e presentano entrambi un profilo di crimpatura esagonale. In particolare, il capocorda 1 ha precedentemente subito degli stress meccanici che hanno portato ai risultati di resistenza elettrica analizzati nel caso IV. Le misure resistive finali sono state effettuate con il micro ohmmetro digitale citato in precedenza, mentre durante l'alimentazione del conduttore sono state effettuate misure voltamperometriche in modo tale da verificare, sia l'affidabilità delle letture effettuate con il micro ohmmetro, sia per comprendere se la variazione del comportamento resistivo delle connessioni crimpate fosse già evidente con il solo riscaldamento del conduttore.

Durante le prove è stato riscontrato un aumento della resistenza di crimpatura al termine di ogni ciclo. Mentre, nella fase di riscaldamento le variazioni erano minime se non trascurabili nella maggior parte dei cicli.

I cicli termici sono stati realizzati in modo da simulare lo stress termico al quale sono realmente sottoposti i conduttori durante una prova di sovratemperatura. La modalità dei cicli eseguiti è quella in Fig.40, con un periodo di riscaldamento che in seguito si stabilizza alla massima temperatura e infine un periodo di raffreddamento.

Nelle prove termiche il periodo t_1 ha avuto una durata di circa otto ore e successivamente si è lasciato raffreddare il conduttore per tutta la notte. È stata scelta questa durata del periodo di riscaldamento poiché durante una prova di riscaldamento è all'incirca di tale valore il tempo che trascorre affinché l'apparecchiatura raggiunga l'equilibrio termico. Si è poi deciso di lasciar raffreddare tutta la notte in modo tale che i capicorda raggiungano l'equilibrio termico con l'ambiente.

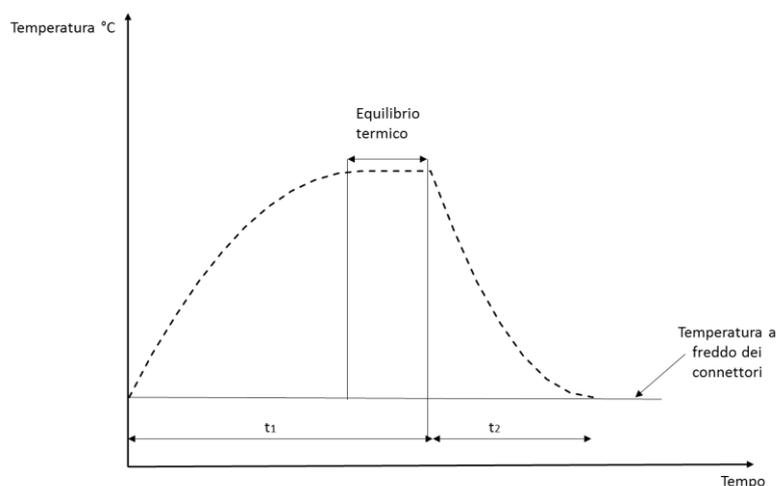


Fig.40 Ciclo termico al quale è sottoposto il conduttore di prova.

In questo caso per valutare l'incertezza tipo legata all'utilizzo della pinza di misura voltmetrica e il puntale sono state effettuate dieci misure ripetute della resistenza elettrica tra il foro di ispezione del capocorda e l'inizio del conduttore cordato, ed il risultato ottenuto è stato di:

$$u(R)_{\text{pinza+puntale}} = 0.27 \mu\Omega \quad (18)$$

Successivamente sono state valutate l'incertezza tipo del micro ohmmetro e l'incertezza tipo estesa della misura resistiva, nel seguente modo:

$$u(R)_{\mu\Omega} = \frac{(0.05\% \times R_{in} + 2 \times \text{digit})}{\sqrt{3}} \quad (19)$$

$$U(R) = k \times \sqrt{(u(R)_{\mu\Omega})^2 + (u(R)_{\text{pinza+puntale}})^2} \quad (20)$$

dove:

- R_{in} : lettura della resistenza elettrica.

I risultati ottenuti alla fine di ogni ciclo sono elencati in Tabella 6, mentre in Fig. 43 sono rappresentati gli andamenti del comportamento resistivo dei capicorda 1 e 2.

Durante i primi due cicli dalla Fig.43 è possibile osservare che le variazioni resistive dei due capocorda sono state simili, mentre alla fine del terzo la resistenza di crimpatura del capocorda 2 è aumentata di circa tre volte e mezzo rispetto a quella misurata al termine del secondo ciclo. Il capocorda 2 presentava una compressione posizionata in modo differente rispetto a quella del capocorda opposto. Cioè, la compressione interessava la stessa lunghezza del colletto ma, il tratto di capocorda tra l'inizio della crimpatura e il conduttore cordato (Fig.42) risultava all'incirca la metà rispetto a quello dell'altro capocorda, che aveva una lunghezza di 5 mm. Tale differenza potrebbe aver portato ad un aumento anticipato della resistenza di crimpatura dovuto probabilmente all'ossidazione interna del capocorda e ad una diminuzione della pressione di contatto tra di esso e il conduttore. Ciò ha portato anche ad un aumento della potenza dissipata dalla connessione crimpata, che ha prodotto una temperatura di 120 °C sul capocorda 2. Il tutto potrebbe aver provocato l'ossidazione del tratto di conduttore nudo in prossimità del capocorda (Fig.41), avvenuta durante la realizzazione del terzo ciclo termico. Successivamente, la resistenza del capocorda 2 si è stabilizzata, mentre tra il terzo ciclo e il quinto la resistenza del capocorda 1 è aumentata di una volta e mezzo, raggiungendo i valori assunti dal capocorda 2.



Fig.41 Ossidazione del tratto di conduttore nudo

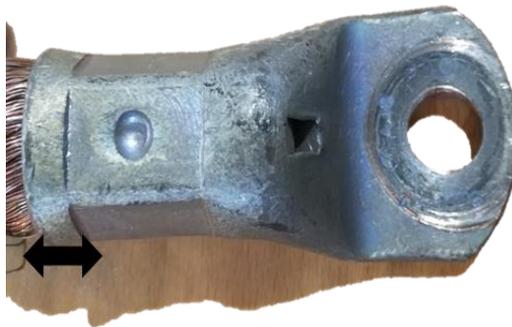


Fig.42 Evidenziazione delle differenze geometriche dei capicorda 1 e 2 legate ad un'errata crimpatura

Tabella 6. Variazione del comportamento resistivo dei capicorda soggetti a stress termici

Ciclo termico	Resistenza di crimpatura del capocorda 1 a 20°C [μΩ]	Resistenza di crimpatura del capocorda 2 a 20°C [μΩ]
0	6.00±0.54	4.00±0.54
I	7.10±0.54	4.80±0.54
II	10.40±0.54	6.80±0.54
III	18.20±0.54	23.10±0.54
IV	19.70±0.54	25.40±0.54
V	25.20±0.54	25.30±0.54

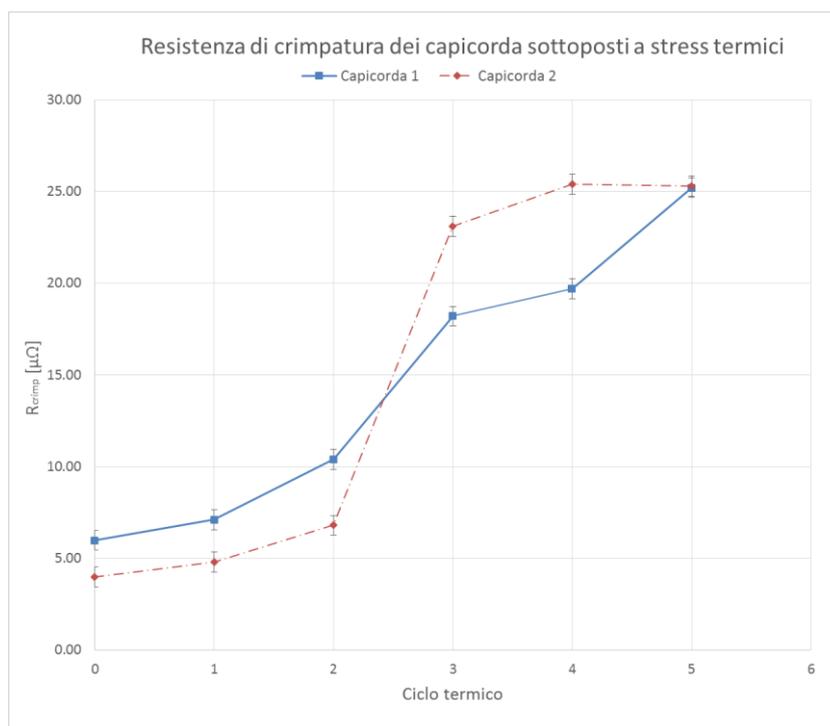


Fig.43 Andamento del comportamento resistivo dei capicorda 1 e 2

All'interno del laboratorio su alcuni conduttori di prova le resistenze di compressione misurate raggiungevano nei casi peggiori valori intorno ai $29 \mu\Omega$. Lo studio del comportamento resistivo delle connessioni crimpate soggette a stress termici ha motivato il fenomeno, dato che i valori della R_{crimp} dei due capicorda soggetti a tale stress hanno raggiunto entrambi i $25 \mu\Omega$.

Se pur vero che le connessioni sono sensibili agli stress meccanici, comunque il valore assoluto massimo raggiunto nei casi studiati è stato all'incirca di $9 \mu\Omega$.

I risultati ottenuti sul capocorda 2 potrebbero far pensare che gli stress meccanici non contribuiscano in modo significativo all'aumento della resistenza elettrica, dato che questo connettore non aveva subito precedentemente torsioni, al contrario del capocorda 1. Ma, come già esplicitato la causa dell'aumento considerevole della R_{crimp} è stata probabilmente una compressione errata, che ha portato a fenomeni di ossidazione visibili anche ad occhio nudo. Infatti, l'andamento della resistenza elettrica di crimpatura relativa ai valori iniziali (Fig.44) dei due capicorda nei primi due cicli è stata la stessa. Mentre, successivamente al fenomeno dell'ossidazione i due andamenti si sono discostati per poi raggiungersi.

Se ciò non fosse avvenuto il valore finale della resistenza elettrica del capocorda 2 sarebbe stato minore. Si consideri ad esempio, che la variazione percentuale della resistenza elettrica del

capocorda 2 tra il secondo e il terzo ciclo sia uguale a quella subita dal capocorda 1, mentre in tutti gli altri intervalli temporali sia la stessa di quella misurata. Allora, il valore finale della resistenza di crimpatura del capocorda risulterebbe pari a $13 \mu\Omega$.

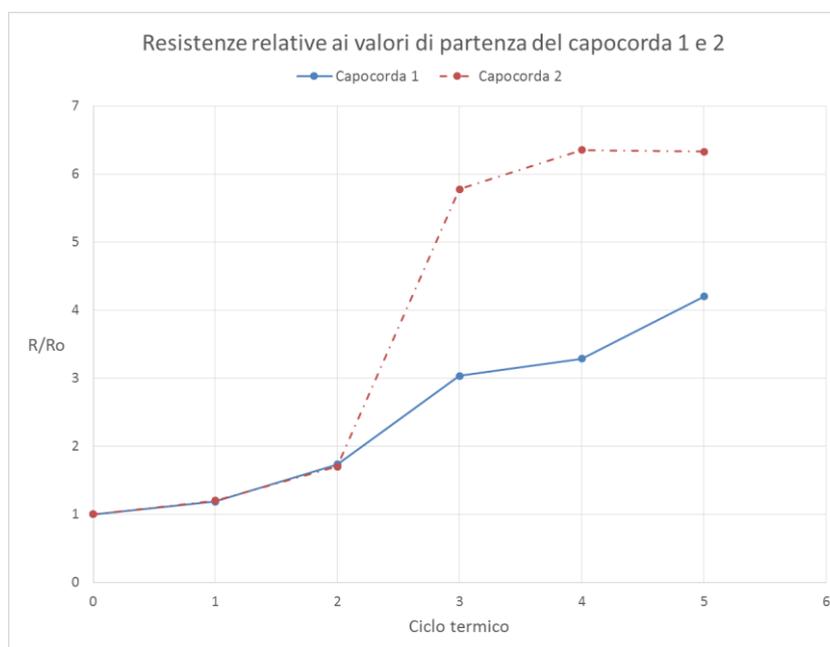


Fig.44 Confronto tra la variazione della resistenza relativa del capocorda 1 e quella del capocorda 2

Lo stress termico ha contribuito alla variazione della resistenza di crimpatura del capocorda 1 con una percentuale sicuramente maggiore rispetto a quello meccanico ma, non si raggiungerebbero comunque i valori misurati se il capocorda non fosse stato precedentemente sottoposto a stress meccanici. Ad esempio, se non avesse subito in primis delle sollecitazioni meccaniche raggiungendo i $6 \mu\Omega$, ma fosse partito dal suo valore iniziale di R_{crimp} , il valore finale raggiunto sarebbe stato attorno a $10 \mu\Omega$ invece che $25.2 \mu\Omega$. In Fig. 45 è possibile visualizzare l'andamento della resistenza di compressione del capocorda 1 a partire dal valore misurato subito dopo la crimpatura e quello raggiunto in seguito e durante le sollecitazioni meccaniche e termiche.

Si può quindi osservare che l'unione delle due tipologie di sollecitazioni è dannosa per una connessione crimpata.

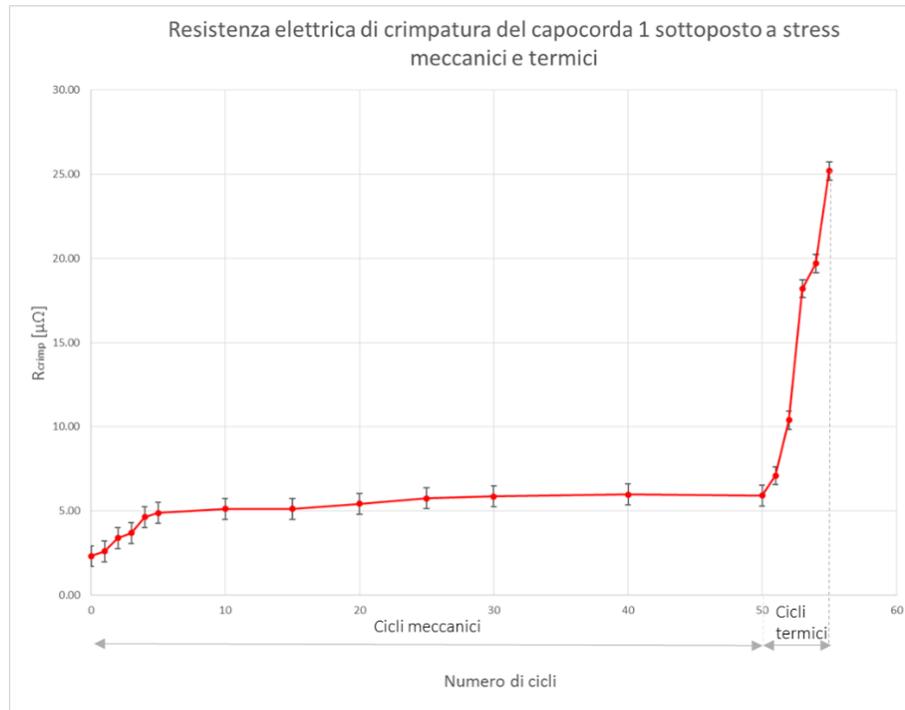


Fig.45 Comportamento resistivo del capocorda 1

3. Verifica della sovratemperatura

La resistenza di crimpatura di un capicorda può influire notevolmente sulla validazione di un'apparecchiatura elettrica, poiché durante le prove di riscaldamento, la potenza dissipata dall'estremità capicordata dei conduttori di prova può far in modo che, sui punti di misura della temperatura dell'oggetto (terminali), ci sia un aumento tale da invalidare la prova. Per questa ragione, dopo aver analizzato il comportamento resistivo e termico delle connessioni compresse si è pensato di realizzare delle prove di sovratemperatura, in modo tale da quantificare il fenomeno. La prova di riscaldamento è stata effettuata su di un contattore, valutando poi le temperature raggiunte sui terminali di connessione dell'apparecchiatura con i conduttori di prova (Fig.47).

Sono state eseguite due prove in cui i cavi sono stati collegati solo a due delle tre fasi del contattore, in modo tale da avere condizioni speculari su entrambi i poli. Le fasi utilizzate saranno identificate come fase R e fase S.

La strumentazione utilizzata per effettuare le prove di sovratemperatura è composta da:

- Generatore di corrente O.S.A.T. Elettronica SRL, con una tensione massima di 8 V e una corrente massima di 1200 A.
- Cavi di bassa tensione siglati CEI FG7R-O 0.6/1 kV 1x240 mm² CEI 20-2 con una lunghezza di circa 2 m.
- Capicorda.
- Barre di rame con 16 fori e una sezione trasversale di 600 mm².
- Pinza amperometrica Fluke 355.
- Multimetro digitale 34401° hp.
- Pinza di misura voltmetrica.
- Termometro Fluke 54 ii.
- Contattore con una corrente nominale di impiego pari a 400 A.
- Telaio metallico.
- Termocoppie.

Il layout di prova utilizzato è in Fig.46. Al generatore di corrente sono stati collegati due dei tre conduttori utilizzati per ogni verifica, attraverso delle barre di rame. Questi due conduttori di

prova sono collegati ai terminali inferiori del contattore sulle due fasi utilizzate per eseguire la prova. Il terzo conduttore è cortocircuitato all'uscita del contattore. I cavi utilizzati sia nella prima che nella seconda prova sono tutti siglati CEI FG7R-O 0.6/1 kV 1x240 mm² CEI 20-2 e sono gli stessi conduttori utilizzati nelle prove di sovratemperatura effettuate ordinariamente nel laboratorio. Nella scelta dei conduttori si è cercato di identificare quelli con i valori maggiori e minori della resistenza di crimpatura, in modo tale da comprendere quale fosse la differenza di temperatura raggiunta sui terminali dell'oggetto nel caso in cui si utilizzi un capocorda in ottime o in pessime condizioni. Infatti, nella prima verifica sono stati collegati ai terminali del contattore tre capicorda con valori di resistenza elettrica relativamente bassi (intorno ai 5 $\mu\Omega$), mentre il quarto presentava una resistenza all'incirca cinque volte superiore. Al contrario, nella seconda prova solo uno dei quattro capicorda utilizzati presentava una resistenza elettrica inferiore a tutti gli altri.

Per effettuare le misure di temperatura, sono stati praticati dei fori in corrispondenza dei terminali del contattore, in modo tale da valutare la temperatura utilizzando il Fluke 54 abbinato a una termocoppia. Le misure sono state eseguite una volta che l'apparecchiatura ha raggiunto l'equilibrio termico, valutando che ciò sia avvenuto attraverso delle misure ripetitive precedenti all'ultima, realizzate con una scansione temporale di quindici minuti.

Per individuare i diversi capicorda utilizzati, essi saranno distinti in base alla posizione di collegamento sul contattore in capocorda 1, 2, 3 e 4 (Fig.48). In particolare dalla figura è possibile osservare che i capicorda 1 e 3 sono collegati alla fase R, invece 2 e 4 alla fase S.

In entrambe le prove la corrente di alimentazione utilizzata è di 400 A e le misure di resistenza di crimpatura sono state sempre valutate tra il foro di ispezione dei capicorda e l'inizio del conduttore cordato.

I risultati ottenuti dalle due verifiche sono in Tabella 5 e Tabella 6. In Fig.49 e Fig.50 sono state diagrammate le potenze dissipate da ciascun capocorda e i valori delle resistenze elettriche di crimpatura ottenuti dalle due prove.



Fig.46 Schema utilizzato per effettuare le prove di sovratemperatura: vista frontale (a); vista laterale (b)



Fig.47 Terminali sui quali è stata effettuata la misura della temperatura.



Fig.48 Identificazione dei differenti capicorda utilizzati durante le prove di sovratemperatura

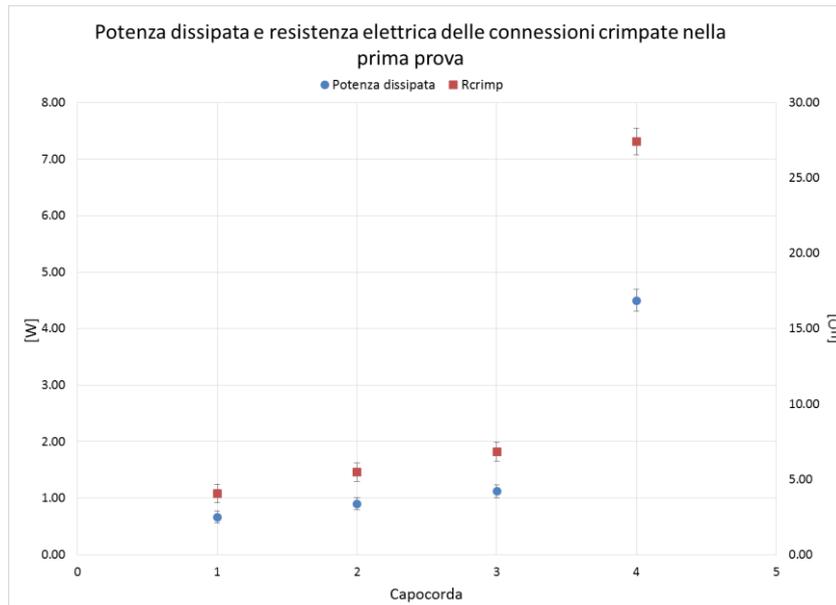


Fig.49 Rappresentazione dei risultati ottenuti dalla prima prova di sovratemperatura

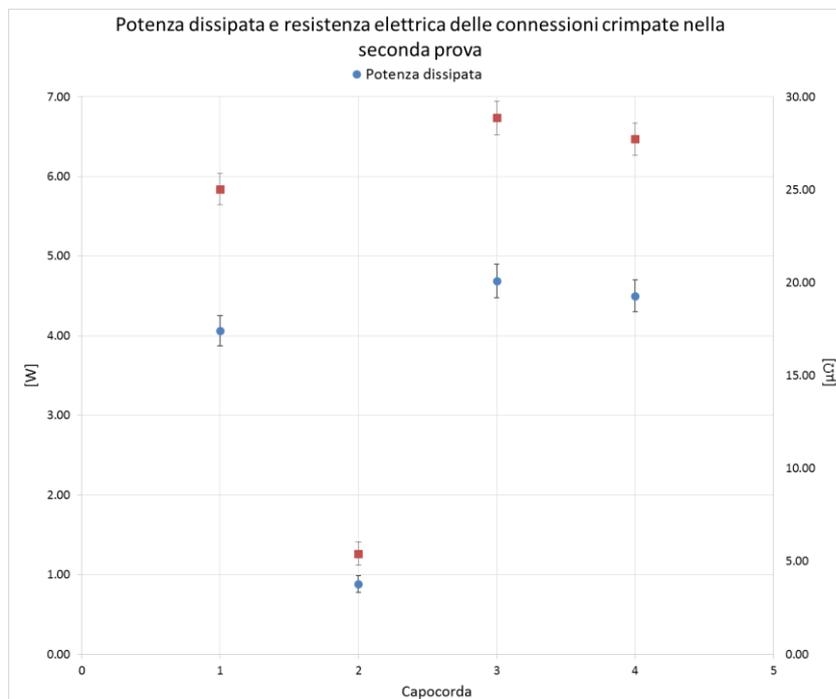


Fig.50 Rappresentazione dei risultati ottenuti dalla seconda prova di sovratemperatura

Tabella 7. Esiti ottenuti dalla prima prova di sovratemperatura

	Capocorda 1	Capocorda 2	Capocorda 3	Capocorda 4
Resistenza a 20 °C [$\mu\Omega$]	4.07 \pm 0.62	5.49 \pm 0.62	6.86 \pm 0.63	27.42 \pm 0.87
Temperatura ai terminali [°C]	71.4 \pm 1.8	72.3 \pm 1.8	72.8 \pm 1.8	79.0 \pm 1.8
Potenza dissipata [W]	0.67 \pm 0.10	0.90 \pm 0.11	1.12 \pm 0.11	4.50 \pm 0.20
Sovratemperatura ai terminali [K]	50.5 \pm 2.5	51.4 \pm 2.5	51.9 \pm 2.5	58.1 \pm 2.5

Tabella 8. Esiti ottenuti dalla seconda prova di sovratemperatura

	Capocorda 1	Capocorda 2	Capocorda 3	Capocorda 4
Resistenza a 20 °C [$\mu\Omega$]	25.04 \pm 0.84	5.42 \pm 0.63	28.88 \pm 0.91	27.73 \pm 0.88
Temperatura ai terminali [°C]	79.4 \pm 1.8	74.2 \pm 1.8	81.8 \pm 1.8	79.7 \pm 1.8
Potenza dissipata [W]	4.07 \pm 0.19	0.88 \pm 0.11	4.69 \pm 0.21	4.50 \pm 0.20
Sovratemperatura ai terminali [K]	58.6 \pm 2.5	53.4 \pm 2.5	61.0 \pm 2.5	58.9 \pm 2.5

La valutazione dell'incertezza tipo estesa della potenza dissipata da ciascuna connessione crimpata è stata calcolata nel modo seguente:

$$U(W) = \pm \left\{ k \times \sqrt{[(I_{in} \times I_{in})^2 \times u(R)^2] + 2 \times [(I_{in} \times R_{in})^2 \times u(A)^2]} \right\} \quad (21)$$

Mentre, l'incertezza tipo estesa dei valori di temperatura misurati è stata calcolata utilizzando le specifiche descritte dal manuale del termometro, che sono:

$$U(\theta) = \pm k \times \frac{(0.05\% \times \theta_{in} + 0.4 \text{ °C} + 1.1 \text{ °C})}{\sqrt{3}} \quad (22)$$

da cui è possibile calcolare l'incertezza tipo estesa della sovratemperatura, come:

$$U(\Delta\theta) = \pm k \times \sqrt{u(\theta)_{terminale}^2 + u(\theta)_{ambiente}^2} \quad (23)$$

dove:

- θ_{in} : lettura di temperatura.
- $u(\theta)_{terminale}$: incertezza tipo assoluta della misura di temperatura su di un terminale del contattore.
- $u(\theta)_{ambiente}$: incertezza tipo assoluta della temperatura ambiente.

Nella prima prova di riscaldamento realizzata, i risultati evidenziano una netta differenza tra la temperatura raggiunta sul terminale a cui è collegato il capocorda 4 e quella raggiunta su tutti gli altri terminali. Ciò è dovuto al valore della resistenza di crimpatura di questo capocorda che risulta essere all'incirca cinque volte superiore alla resistenza elettrica di tutti gli altri. Risultati simili sono stati riscontrati nella seconda prova, infatti dalle Tabelle 7 e 8 è possibile vedere che per valori comparabili della resistenza di crimpatura si raggiungono all'incirca gli stessi valori di temperatura ai terminali del contattore (confrontare i risultati del capocorda 4 nella seconda prova e nella prima prova). In particolare, prendendo in esame il risultato migliore e il peggiore, che corrispondono al valore massimo e minimo di temperatura sui terminali, è possibile constatare che:

- Nella prima prova, la temperatura raggiunta sul terminale dove è connesso il capocorda 4 è maggiore di 7.6 K rispetto a quella raggiunta sul terminale dove è connesso il capocorda 1. Questa differenza di temperatura è dovuta ha una maggiore potenza dissipata dal capocorda 4. Infatti, tra i due capicorda presi in esame si ha una differenza di potenza dissipata pari a 3.83 W.
- Nella seconda prova, la temperatura raggiunta sul terminale dove è connesso il capocorda 3 è maggiore di 7.6 K rispetto a quella raggiunta sul terminale dove è connesso il capocorda 2. La differenza di potenza dissipata tra i due capicorda è di 3.81 W.

Utilizzare durante una prova di sovratemperatura un capocorda con una resistenza elettrica relativamente elevata vuol dire compromettere la validazione dell'oggetto in prova, dato che l'uso di questo connettore può influire sulla sovratemperatura raggiunta ai terminali del componente di 7 K in più rispetto ad un capocorda in buone condizioni (resistenza elettrica di crimpatura inferiore di circa $20 \mu\Omega$). Quindi, è di fondamentale importanza effettuare delle misure resistive sulle connessioni crimpate prima di iniziare la verifica di sovratemperatura.

Si potrebbe pensare di eseguire un'ispezione visiva dei capicorda per poter comprendere quale si possa utilizzare o meno, poiché un aumento considerevole della resistenza di crimpatura genera anche un incremento della temperatura in corrispondenza della zona del conduttore cordato posta vicino al connettore, provocandone un cambiamento cromatico dovuto al fenomeno dell'ossidazione. Purtroppo questo tipo di verifica sarebbe fallace, dato che non sempre l'aumento della potenza dissipata dalla connessione compressa porta ad un'ossidazione e viceversa. In Fig.51 è riportato un esempio nel quale la resistenza di crimpatura misurata è di $20 \mu\Omega$.



Fig.51 Esempio di un tratto di conduttore nudo ossidatosi pur non avendo una resistenza di crimpatura elevata

La norma CEI EN 60947-4-1 esplicita i limiti di sovratemperatura ammissibili sui morsetti di un contattore (Tabella 9). Dai risultati ottenuti nella seconda prova di sovratemperatura, se il materiale del terminale del contattore fosse stato del rame non trattato, l'apparecchiatura non sarebbe stata approvata.

Tabella 9. Limiti di sovratemperatura dei morsetti [12]

Materiale del morsetto	Limiti di sovratemperatura ^{a, c}
	K
Rame non trattato	60
Ottone non trattato	65
Rame o ottone stagnato	65
Rame o ottone argentato o nichelato	70
Altri metalli	b

a L'uso in servizio di conduttori di connessione di sezione significativamente inferiore a quelle indicate nelle Tab. 9 e 10 potrebbe portare a temperature dei morsetti e di parti interne elevate e tali conduttori non dovrebbero essere usati senza il consenso del costruttore, in quanto temperature più elevate potrebbero provocare danni all'apparecchio.

b Limiti di sovratemperatura da stabilirsi in base all'esperienza in servizio o prove di vita ma comunque non superiori a 65 K.

c Valori diversi possono essere prescritti dalle norme di prodotto per condizioni diverse di prova e per dispositivi di piccole dimensioni. Questi valori diversi non devono comunque superare di 10 K quelli indicati nella presente tabella.

4. Valutazione sui massimi valori ammissibili della resistenza elettrica di una connessione crimpata

Le prove di sovratemperatura effettuate sul contattore e delle quali si è discusso nel precedente capitolo sono simulazioni e non verifiche reali. Ciò è evidenziato già dall'uso di due sole fasi dell'apparecchiatura elettrica. Infatti, per la validazione di questa apparecchiatura le verifiche devono essere realizzate utilizzando tutti e tre i poli, come specificato dalla norma CEI EN 60947-4-1.

Dagli esiti di entrambe le prove di riscaldamento potrebbe essere stabilito un valore di soglia della resistenza di crimpatura entro il quale il capocorda possa essere ulteriormente utilizzato, in modo tale da non provocare un aumento considerevole della temperatura sui terminali dell'apparecchiatura in prova. Nei casi in cui la R_{crimp} ha raggiunto dei valori prossimi ai $5 \mu\Omega$ i valori di sovratemperatura si aggirano intorno ai 50 K. Mentre, nella seconda prova con una R_{crimp} di $28.88 \mu\Omega$ la sovratemperatura ha superato i 60 K. Se queste condizioni si fossero verificate durante una reale prova di sovratemperatura, in cui il contattore sarebbe dovuto essere pulito, nuovo e collegato come nel servizio ordinario, e se i terminali fossero stati di rame non trattato, allora l'apparecchiatura non sarebbe stata validata.

Una soglia da fissare potrebbe riguardare la massima potenza dissipata, in modo tale da tradurre poi questo limite in uno di resistenza di crimpatura in base al valore di corrente al quale è realizzata la prova.

Prendendo in esame gli esiti ottenuti dalla seconda prova, è stato tracciato un andamento che riporta la potenza dissipata da ogni singolo capocorda in funzione della sovratemperatura sui terminali del connettore ($W(\Delta\theta)$), che è possibile visualizzare in Fig. 52.

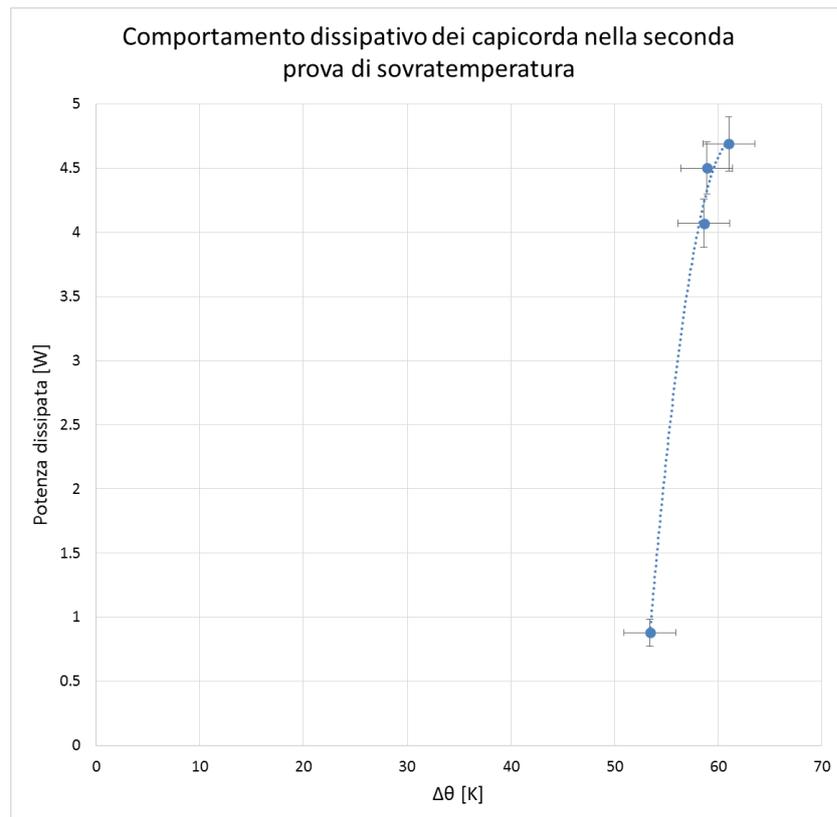


Fig.52 Potenza dissipata dalle connessioni crimpate nella seconda prova di riscaldamento in funzione della sovratemperatura raggiunta ai terminali del contattore

La curva risultante è una polinomiale del secondo ordine con la seguente equazione:

$$W_{\text{diss}}(\Delta\theta) = -0.0588 \times \Delta\theta^2 + 7.2287 \times \Delta\theta - 217.51 \quad (24)$$

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

$$W_{\text{diss,acc}} = -0.0588 \times 58^2 + 7.2287 \times 58 - 217.51 = 3.95 \text{ W} \quad (25)$$

da cui è possibile stabilire la soglia massima di resistenza accettabile, poiché la prova di sovratemperatura è stata effettuata a circa 400 A, che risulta essere di :

$$R_{\text{crimp,acc}} = \frac{W_{\text{diss,acc}}}{I^2} = \frac{3.95}{(400^2)} = 24.7 \mu\Omega \quad (26)$$

Lo stesso procedimento appena analizzato è stato eseguito considerando i risultati ottenuti dalla prima prova, in modo da verificare se per lo stesso limite di sovratemperatura la soglia della resistenza di crimpatura fosse comparabile con quella ottenuta precedentemente.

In Fig.53 è rappresentato l'andamento della potenza dissipata da ciascuna connessione crimpata, utilizzata nella prima prova, in funzione della sovratemperatura sui terminali dell'apparecchiatura in prova.

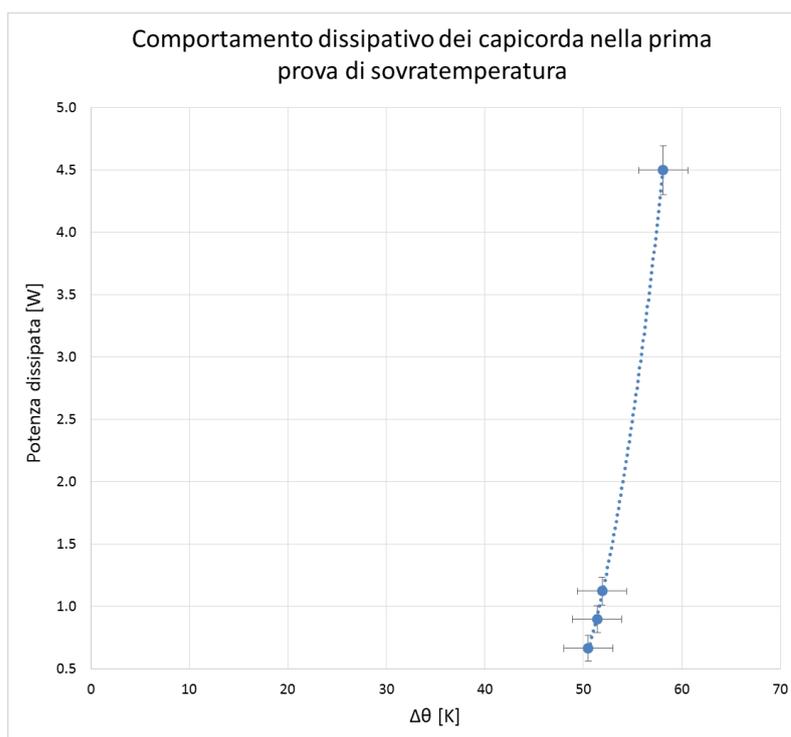


Fig.53 Potenza dissipata dalle connessioni crimpate nella prima prova di riscaldamento in funzione della sovratemperatura raggiunta ai terminali del contattore

Anche in questo caso l'andamento è approssimabile ad una polinomiale del secondo ordine. Quello che cambia rispetto alla seconda prova, oltre all'equazione che descrive l'andamento della potenza dissipata in funzione della sovratemperatura, è la concavità di questa curva che è rivolta verso l'altro, mentre nel caso precedente era opposta. Per valori simili della R_{crimp} le sovrature raggiunte in questa prova sono state leggermente inferiori rispetto alla seconda prova. Tralasciando queste differenze, è stato calcolato il massimo valore della resistenza di crimpatura ammissibile ripetendo gli stessi passi eseguiti in precedenza:

$$W_{\text{diss}}(\Delta\theta) = 0.0301 \times \Delta\theta^2 - 2.77 \times \Delta\theta + 63.58 \quad (27)$$

$$W_{\text{diss,acc}} = 0.0301 \times 58^2 - 2.77 \times 58 + 63.58 = 4.18 \text{ W} \quad (28)$$

$$R_{\text{crimp,acc}} = \frac{W_{\text{diss,acc}}}{I^2} = \frac{4.18}{(400^2)} = 26 \mu\Omega \quad (29)$$

I due risultati si discostano di circa un microohm, ma considerando anche l'incertezza delle misure effettuate sono state fatte le seguenti valutazioni:

- Per comprendere se il capocorda debba essere o meno sostituito bisogna effettuare dei controlli periodici e nel caso in cui le correnti di prova siano di 400 A sostituirlo quando la R_{crimp} raggiunge i $25 \mu\Omega$.
- Bisogna ricordare che per un conduttore di prova con una sezione di 240 mm^2 le correnti ammissibili sono comprese tra 315 e 400 A. Quindi, se le verifiche vengono effettuate con correnti diverse dai 400 A la soglia da considerare è quella della potenza dissipata che risulta di 4W circa.

Un'ulteriore conclusione potrebbe essere quella di fissare dei limiti in termini di valore relativo e non assoluto, in modo tale da cercare di ottenere un metodo comune di valutazione dei capicorda crimpati che sia ancora più generale. Per fare ciò si fa riferimento alla norma CEI EN 61238-1 che riporta:

«Lo scopo di definire i metodi delle prove tipo (prove meccaniche ed elettriche) e le prescrizioni da applicare ai connettori a compressione e meccanici per cavi di energia con conduttori di rame o di alluminio».

Tra le prescrizioni per le prove elettriche, la norma definisce λ (rapporto del fattore di resistenza), calcolato con la seguente formula:

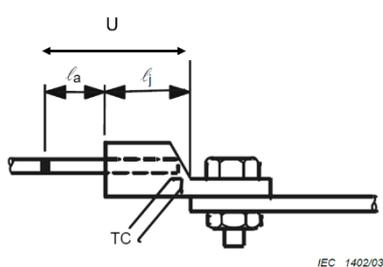
$$\lambda = \frac{k}{k_0} \quad (30)$$

dove:

- k : fattore di resistenza del connettore misurato durante la prova.

- k_0 : fattore di resistenza misurato ad inizio prova.

Nel caso in cui le misure della resistenza elettrica siano effettuate sul colletto del capocorda il fattore di resistenza deve essere calcolato come mostrato in Fig.54, nella quale è presente una resistenza R_r (resistenza del conduttore di riferimento) valutata come mostrato da Fig. 55.



Formule:

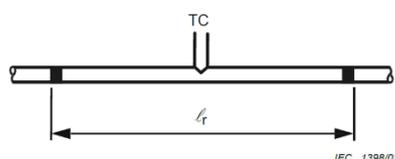
$$R = \frac{U}{I} \times \frac{1}{1 + (\alpha - 20)}$$

$$R_j = R - R_r \times \frac{l_a}{l_r}$$

$$k = \frac{R_j}{R_r} \times \frac{l_r}{l_j}$$

T_c : Punto di misura della temperatura

Fig.54 Misura della resistenza elettrica sul colletto del capocorda [3]



Formule:

$$R_r = \frac{U_r}{I_r} \times \frac{1}{1 + \alpha(\theta_r - 20)}$$

T_c : Punto di misura della temperatura

Fig.55 Misura della resistenza elettrica del conduttore di riferimento [3]

Secondo la norma i risultati delle misure di λ effettuate durante le prove elettriche devono avere un valore minore o uguale a due, altrimenti il connettore non è conforme alla presente regolamentazione.

Allora, facendo riferimento a questa prescrizione potrebbe essere definito un rapporto di resistenza relativo al valore iniziale, che risulti:

$$\zeta = \frac{R_{\text{crimp}}}{R_{\text{crimp},0}} \quad (31)$$

dove:

- R_{crimp} : resistenza elettrica di crimpatura riferita a 20°C e misurata tra il foro di ispezione del colletto e l'inizio del conduttore cordato dopo che il capocorda sia stato utilizzato in almeno una prova di sovratemperatura.
- $R_{\text{crimp},0}$: resistenza elettrica di crimpatura riferita a 20°C e misurata tra il foro di ispezione del colletto e l'inizio del conduttore cordato prima che il conduttore capicordato abbia subito alcuna prova di sovratemperatura .

Per fissare il valore limite di ζ è stata fatta una media delle resistenze di crimpature misurate prima che il conduttore di prova fosse soggetto a torsione intorno al proprio asse nel caso I,II,III e IV. In questo modo si considera un ipotetico valore iniziale della resistenza elettrica che tenga conto di diverse tipologie di capicorda, profili di crimpatura e compressioni. Il valore medio ottenuto è risultato di 4 $\mu\Omega$. Dato che un limite plausibile del valore assoluto della resistenza di crimpatura, scaturito dalle prove di sovratemperatura, è di 25 $\mu\Omega$, allora il fattore ζ avrà come soglia massima un valore pari a sei.

Tutte queste analisi potrebbero essere validate o meno in studi futuri, cercando un andamento della potenza dissipata dai capicorda in funzione della sovratemperatura raggiunta sull'apparecchiatura che possa essere sempre riproducibile e da cui trovare il limite di resistenza di crimpatura e di conseguenza il fattore ζ .

Inoltre, non è stato possibile fissare delle soglie in termini differenziali della potenza dissipata e della resistenza di crimpatura tra una connessione in ottime condizioni (circa 5 $\mu\Omega$) e pessime (circa 25 $\mu\Omega$), poiché i due andamenti in Fig. 52 e Fig. 53 si discostano man mano che la sovratemperatura diminuisce. Questo perché nella seconda prova il terminale a cui è stato collegato l'unico capocorda con un buon valore della resistenza di crimpatura (capocorda 2) ha raggiunto una sovratemperatura più elevata rispetto a quella raggiunta nella prima prova sui terminali ai quali sono stati collegati capicorda con una resistenza di compressione assimilabile. Essendo nella seconda prova, le temperature sui tre terminali dove non è stato collegato il capocorda 2 molto più elevate rispetto alla temperatura sul quale è stato connesso questo

capocorda, probabilmente c'è stata una conduzione del calore attraverso il contattore che ha innalzato la temperatura del terminale più freddo.

5.Creazione di un modello FEMM

L'aumento della resistenza di crimpatura di un capocorda, in seguito all'esecuzione di stress meccanici e termici sul conduttore di prova, potrebbe essere dovuto a diversi fenomeni di natura fisica, alcuni dei quali sono:

- Formazione di ossidi internamente al capocorda.
- Deformazione meccanica a livello microscopico del capocorda.
- Diminuzione della pressione di contatto sia nella zona della crimpatura, sia in tutta la restante zona di contatto tra il capocorda e il conduttore.

Tutto ciò provoca l'aumento della resistività dei materiali. Per verificare quanto appena detto è stato costruito un modello assialsimmetrico di una connessione compressa con un capocorda del tipo C con un profilo di crimpatura esagonale ed in seguito è stata fatta un'analisi del suo comportamento resistivo.

Dovendo applicare delle variazioni della conduttività elettrica nella zona di crimpatura che rappresentassero la diminuzione della pressione di contatto, si è cercato di comprendere se internamente alla connessione in seguito alle applicazioni degli stress meccanici fosse avvenuto un completo distacco del conduttore o un allentamento della crimpatura. Allora, è stato applicato un taglio lungo la sezione trasversale del capocorda analizzato nel caso I del capitolo 1 con disco diamantato. Dopo aver applicato la dissezione del connettore purtroppo non è stato possibile osservare in modo dettagliato ciò che fosse avvenuto internamente alla connessione compressa, però sicuramente le torsioni non hanno provocato un evidente distacco del cavo (Fig.56).



Fig.56 Sezionamento di un capocorda

Il software utilizzato per l'esecuzione e l'analisi del modello è stato FEMM (Finite Element Method Magnetics). Il disegno tecnico (Fig.57) è stato realizzato con l'ausilio di un software CAD (Computer Aided Drafting), le cui dimensioni sono state misurate da un campione e sono quelle riportate in Fig.58. Il software di modellazione ha permesso di determinare l'andamento della resistenza elettrica, valutata a partire dalla caduta di tensione mostrata in Fig.57, al variare della conduttività elettrica dei materiali costituenti le diverse zone della connessione compressa.

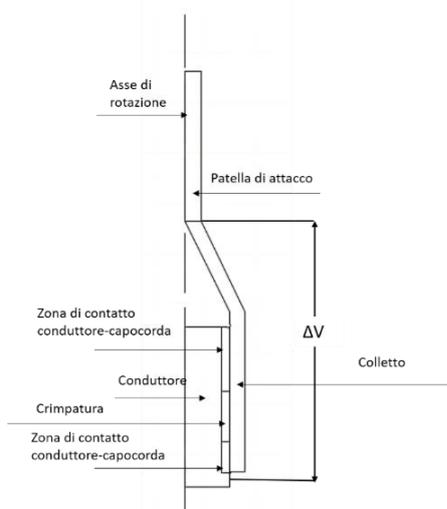


Fig.57 Rappresentazione delle zone nelle quali è stato suddiviso il modello simulativo della connessione crimpata

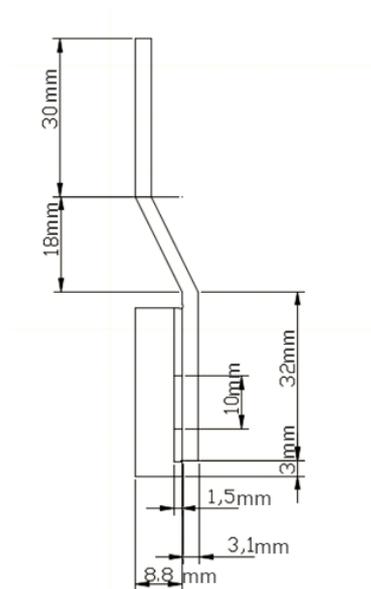


Fig.58 Quotatura del modello simulativo

Osservando attentamente il modello in Fig.57, è possibile vedere una zona rettangolare che rappresenta la crimpatura. L'altezza di tale area è stata semplicemente misurata, mentre per riuscire a comprendere quale fosse l'ampiezza della base è stato effettuato il seguente procedimento:

1. Misura del raggio esterno del colletto del capocorda non compresso, che è risultato di:

$$R_1 = 13.5 \text{ mm} \quad (32)$$

2. Misura dei lati della crimpatura esagonale, i cui valori sono mostrati in Fig.59.

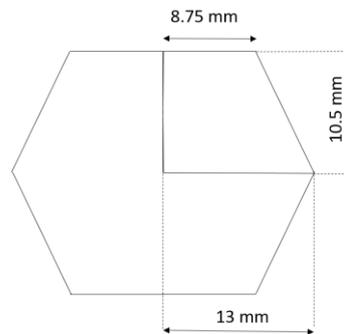


Fig.59 Sezione trasversale della crimpatura esagonale

3. Calcolo dell'area dell'esagono sommando le aree dei quattro trapezi rettangoli nei quali è scomponibile il poligono:

$$A_{\text{trapezio}} = \frac{h \times (b + B)}{2} = \frac{10.5 \times (8.75 + 13)}{2} = 114 \text{ mm}^2 \quad (33)$$

$$A_{\text{esagono}} = 4 \times A_{\text{trapezio}} = 4 \times 114 = 456 \text{ mm}^2 \quad (34)$$

dove:

- h: altezza del trapezio;
- b: base minore del trapezio;
- B: base maggiore del trapezio;

4. Calcolo del raggio del cerchio equivalente, cioè con area uguale a quella dell'esagono:

$$R_2 = \frac{A_{\text{esagono}}}{\pi} = \sqrt{\frac{456}{\pi}} = 12 \text{ mm} \quad (35)$$

5. Calcolo dell'ampiezza della crimpatura:

$$l_{\text{crimp}} = R_1 - R_2 = 13.5 - 12 = 1.5 \text{ mm} \quad (36)$$

In Fig.60 è rappresentato il modello utilizzato per il calcolo della lunghezza della crimpatura.

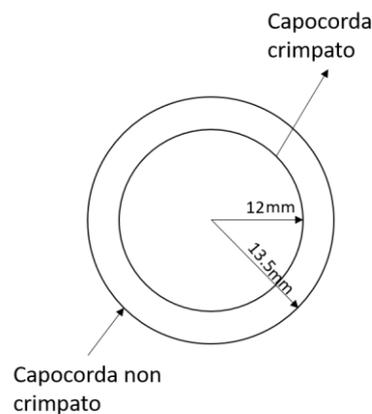


Fig.60 Differenza tra il raggio del colletto del capocorda con e senza crimpatura

Inoltre, per ottenere dei risultati confrontabili con quelli prodotti dall'attività sperimentale, sono state effettuate delle variazioni della conduttività elettrica dei materiali che simulassero prima il comportamento della connessione crimpata quando il conduttore di prova è sottoposto a torsione e in seguito a cicli termici. In Tabella 10 e 11 sono elencati i cambiamenti imposti, realizzati grazie alla stesura di un codice in linguaggio "lua" riportato in Appendice. In particolare, dalle due tabelle è possibile osservare l'ipotesi di una perdita delle proprietà elettriche del capocorda soprattutto durante i cicli termici, motivata dalle elevate temperature raggiunte sul connettore durante le prove, che si aggiravano intorno ai 120°C. Mentre nella zona della crimpatura e di contatto tra il conduttore e il capocorda, è stata ipotizzata una variazione percentuale della conduttività elettrica maggiore durante l'esecuzione degli stress meccanici che non nel corso dei cicli termici. È stato applicato un differente cambiamento della conduttività elettrica poiché è stata presupposta una diminuzione maggiore della forza di

contatto tra il conduttore e il capocorda nel momento in cui la connessione crimpata è stata soggetta a movimenti meccanici che non ad elevate temperature.

Tabella 10. Cambiamenti della conduttività elettrica imposti in FEMM per simulare la risposta della connessione crimpata agli stress meccanici eseguiti sul conduttore di prova

Variatione della conduttività del colletto del capocorda [MS/m]	Variatione della conduttività della patella di attacco del capocorda [MS/m]	Variatione della conduttività del conduttore [MS/m]	Variatione della conduttività della zona di contatto cavo-capocorda [MS/m]	Variatione della conduttività della zona di crimpatura [MS/m]
58÷40	58÷48	58÷48	58÷20	58÷20

Tabella 11. Cambiamenti della conduttività elettrica imposti in FEMM per simulare la risposta della connessione crimpata agli stress termici eseguiti sul conduttore di prova.

Variatione della conduttività del colletto del capocorda [MS/m]	Variatione della conduttività della patella di attacco del capocorda [MS/m]	Variatione della conduttività del conduttore [MS/m]	Variatione della conduttività della zona di contatto cavo-capocorda [MS/m]	Variatione della conduttività della zona di crimpatura [MS/m]
40÷10	48÷38	48÷38	20÷10	20÷10

L'esecuzione della simulazione su FEMM è descritta in Appendice ed ha portato ai risultati mostrati in Fig.61, dove è tracciato anche l'andamento ottenuto sul capocorda 1 analizzato nel precedente capitolo per permettere un confronto tra la simulazione e la sperimentazione.

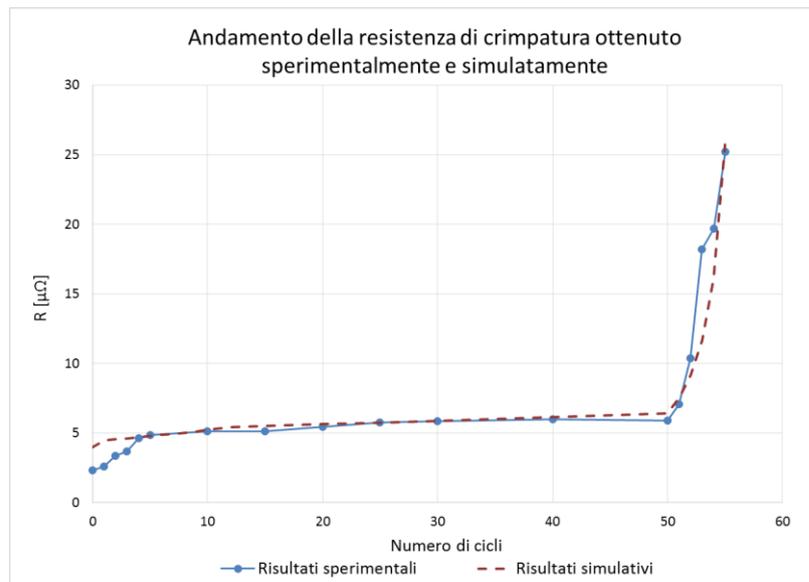


Fig.61 Confronto tra la resistenza di crimpatura del modello simulativo e sperimentale

Dalla Fig.61 è possibile osservare che i due andamenti sono risultati simili, soprattutto nel tratto dei cicli meccanici. In Fig.62 e Fig.64 sono riportati i risultati ottenuti su FEMM, della tensione e della densità di corrente ad inizio simulazione, mentre in Fig.63 e Fig.65 quelli al termine della simulazione. Osservando le tabelle affiancate ai capicorda nelle figure 62 e 63, è possibile notare un netto aumento della tensione tra inizio e fine simulazione, soprattutto nella zona del capocorda.

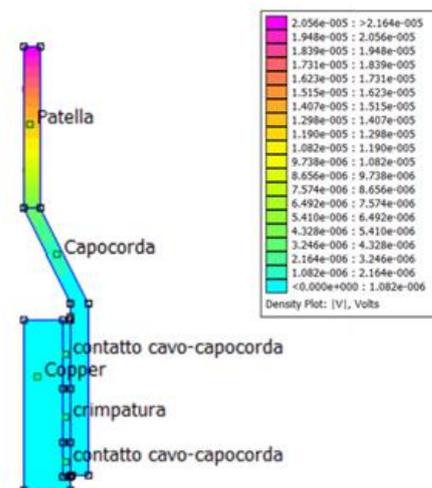


Fig.62 Modulo della tensione ad inizio simulazione

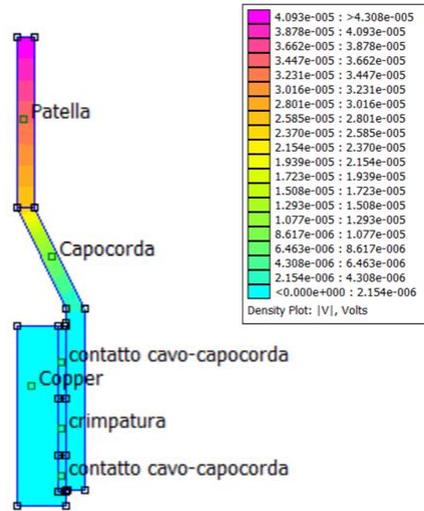


Fig.63 Modulo della tensione a fine simulazione

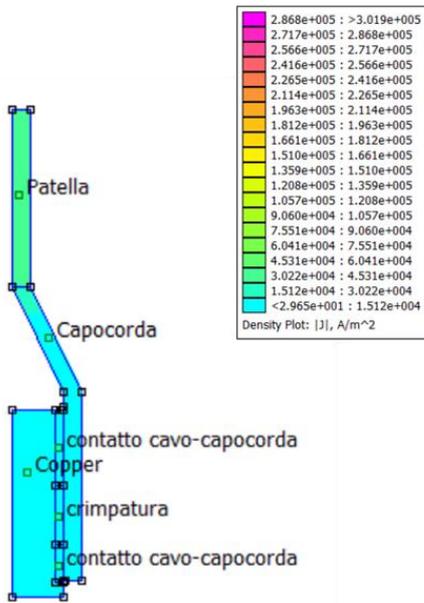


Fig.64 Modulo della densità di corrente ad inizio simulazione

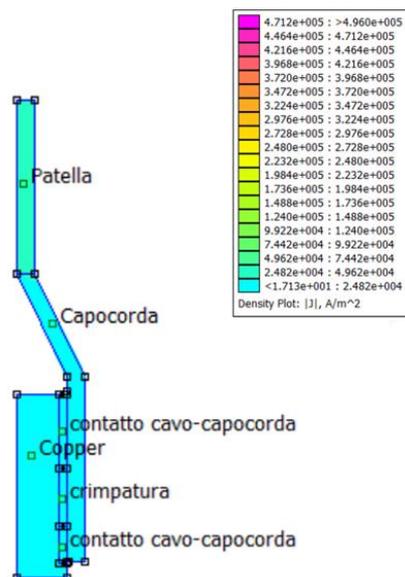


Fig.65 Modulo della densità di corrente a fine simulazione

Bisogna ricordare che lo studio eseguito è del tutto qualitativo e non va ad approfondire quali sono state le reali cause dell'aumento della resistenza elettrica di crimpatura, che invece sono state ipotizzate in modo considerevole. Infatti, già solo a causa delle temperature raggiunte sui capicorda durante i cicli termici la conduttività elettrica si ridurrebbe del 30%; cioè partendo da $58 \times 10^6 \frac{S}{m}$ si ha che:

$$\rho_{120^{\circ}C} = \rho_{20^{\circ}C} \times [1 + 0.004 \times (120 - 20)] = 0.017 \times 10^{-6} \times [1 + 0.004 \times (100)] = 0.024 \times 10^{-6} \Omega \frac{mm^2}{m} \quad (37)$$

$$\sigma_{120^{\circ}C} = \frac{1}{\rho_{120^{\circ}C}} = 42 \times 10^6 \frac{S}{m} \quad (38)$$

$$\Delta\sigma_{\%} = \frac{\sigma_{20^{\circ}C} - \sigma_{120^{\circ}C}}{\sigma_{20^{\circ}C}} \times 100 = 28\% \quad (39)$$

L'intera variazione percentuale imposta sul colletto del capocorda durante i cicli termici e meccanici, invece, è stata del 83%. Il restante 55% è stato attribuito alla formazione di strati di ossidi e intermetalli causati dall'interazione del rame e dello stagno, i cui spessori aumentano nel tempo e soprattutto con la temperatura (Fig.66).

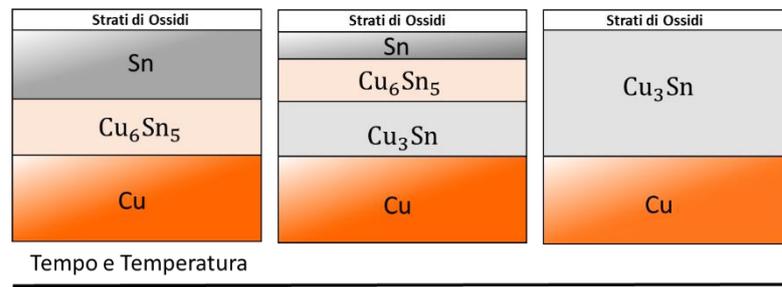


Fig.66 Composti intermetallici derivanti dall'interazione dello stagno e il rame [14]

Invece, le variazioni attuate sul conduttore sono state scelte in base ai valori di temperatura raggiunti da esso durante lo svolgimento delle prove. In particolare, nelle verifiche durante le quali sono stati compiuti stress meccanici il cavo ha raggiunto valori di circa 75°C. Mentre, nelle prove termiche la temperatura è arrivata a quasi 150 °C. Replicando i calcoli svolti nelle equazioni 37 e 38, i risultati sono $\sigma_{75^{\circ}\text{C,conduttore}} = 48 \times 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}}$ e $\sigma_{150^{\circ}\text{C,conduttore}} = 38 \times 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}}$. Le stesse identiche modifiche sono state apportate sulla patella del capocorda, poiché più fredda del colletto ma probabilmente soggetta anch'essa a fenomeni di ossidazione.

6. Conclusioni

Gli sforzi meccanici e termici applicati su di un conduttore di prova influenzano il comportamento elettrico delle connessioni crimpate posizionate alle sue estremità. In particolare, la resistenza elettrica di compressione di un capocorda è maggiormente sensibile a dei cicli termici piuttosto che meccanici. La resistenza raggiunge dei valori tali per cui la sua potenza dissipata può far in modo che l'apparecchiatura in prova, alla quale è collegato il connettore durante una verifica di sovratemperatura, non venga validata.

Per risolvere parzialmente il problema si potrebbe pensare di sostituire le connessioni compresse con quelle saldate, dato che quest'ultime sono del tutto insensibili agli stress meccanici. Bisogna però fare delle valutazioni economiche, poiché realizzare connessioni saldate su tutti i conduttori di prova presenti in un laboratorio significa maggior dispendio di tempo e denaro rispetto alla realizzazione di connessioni compresse. Ad esempio, se l'intervallo temporale durante il quale si debbano sostituire i capicorda su un cavo è tale per cui la sostituzione di entrambi i suoi connettori si ripeta all'incirca un paio di volte in due anni, allora potrebbe risultare più conveniente effettuare delle connessioni saldate. Questo perché considerando che per la sostituzione di un capocorda il conduttore debba essere tagliato di circa 50 mm si avrebbe un accorciamento totale del cavo di 20 cm, portandolo probabilmente ad avere una lunghezza minore di due metri e quindi a non essere più conforme secondo le norme. Invece, se l'intervallo temporale fosse tale per cui si verifici prima il deterioramento del conduttore che non della connessione, avere dei capicorda saldati comporterebbe solo delle spese maggiori.

Oltre queste osservazioni, sicuramente quello che si consiglia di fare è di controllare il valore della resistenza di crimpatura delle connessioni crimpate già quando i conduttori di prova arrivano per la loro prima volta in un laboratorio. In questo modo si riesce a comprendere se è presente una connessione più danneggiata delle altre. Una volta realizzato ciò bisogna effettuare anche dei controlli periodici in modo tale da valutare costantemente lo stato di ammaloramento dei capicorda.

Per avere un riferimento comune che indichi quando debba avvenire la sostituzione dei capicorda, un'idea potrebbe essere quella di inserire all'interno delle norme una nuova

prescrizione per le prove elettriche indicante il massimo valore ammissibile della resistenza relativa di crimpatura dei capicorda.

Tutti questi controlli possono essere eseguiti attraverso misure voltamperometriche, realizzate alimentando il conduttore di prova con un generatore di corrente continua oppure utilizzando un micro ohmmetro. Sicuramente l'impiego di quest'ultima strumentazione velocizza l'attività, poiché basta semplicemente collegare i quattro terminali dello strumento al campione oggetto di misura. Mentre, usando un generatore di corrente, innanzitutto viene fatta una misura indiretta della resistenza elettrica e quindi c'è bisogno di ulteriori strumentazioni oltre al generatore, quali il multimetro ed una pinza amperometrica; ed inoltre prima di realizzare la misura il conduttore deve raggiungere l'equilibrio termico con l'ambiente esterno.

Comunque, qualunque modalità si scelga tra le due, c'è bisogno di un puntale e di uno strumento simile alla pinza di misura voltmetrica realizzata in questo lavoro per eseguire le misure. Si può pensare di utilizzare una pinza geometricamente uguale a quella costruita durante questo lavoro e magari cercare di migliorarla cambiandone leggermente le dimensioni, ispessendola in modo tale da renderla più agevole da manovrare e anche utilizzando, invece dell'alluminio, dei materiali con una conduttività termica più bassa. In sostanza, partire da questa pinza come base per la costruzione di una strumentazione futura più confortevole che permetta sempre di aver un punto equipotenziale stabile sul conduttore. Inoltre, la pinza di misura voltmetrica potrebbe essere indicata dalle norme di riferimento per i connettori come strumento da utilizzare per le misure resistive.

Poi, si potrebbero effettuare degli studi futuri per approfondire cosa avviene alla struttura interna dei materiali e alla superficie reale di contatto tra il capocorda e il conduttore quando la connessione crimpata è soggetta a stress termici e meccanici. In questo modo si riuscirebbe a realizzare un modello simulativo della connessione crimpata che riesca a quantificare scrupolosamente il peso con il quale agiscono il fenomeno dell'ossidazione, della formazione di intermetalli e dell'allentamento della crimpatura.

Appendice

Esecuzione della simulazione su femm

Per iniziare la simulazione su FEMM c'è stato bisogno di creare un nuovo problema e definirne la categoria (Fig.A1). Il problema da analizzare in questo caso riguarda i flussi di corrente e per la sua risoluzione il software fa riferimento alle equazioni di Maxwell che descrivono i campi quasi stazionari e sono:

$$\nabla \times H = J + \dot{D} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times E = -\dot{B} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (4)$$

dove:

- E: campo elettrico.
- B: campo magnetico.
- D: induzione elettrica.
- ρ : densità di carica elettrica.

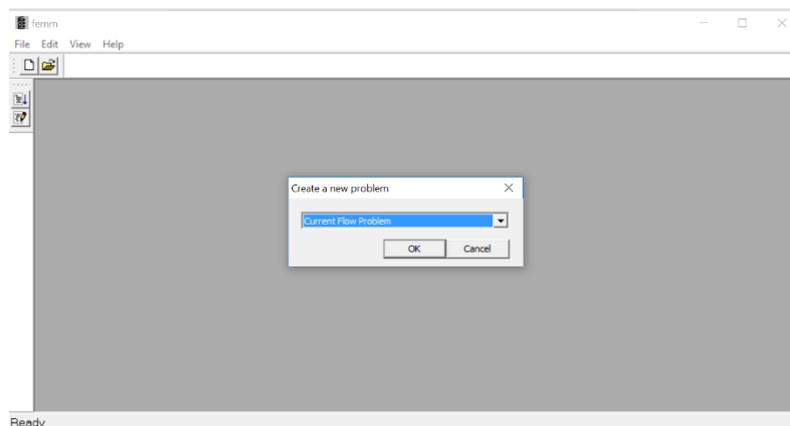


Fig.A1 Creazione di un problema su FEMM

Una volta creato il problema c'è stato bisogno di definirlo, scegliendo:

- Il tipo di problema.
- La lunghezza di ogni unità.
- La frequenza.
- La risoluzione.
- L'angolo minimo delle *mesh* create.

Le scelte effettuate sono riportate in Fig.A2.

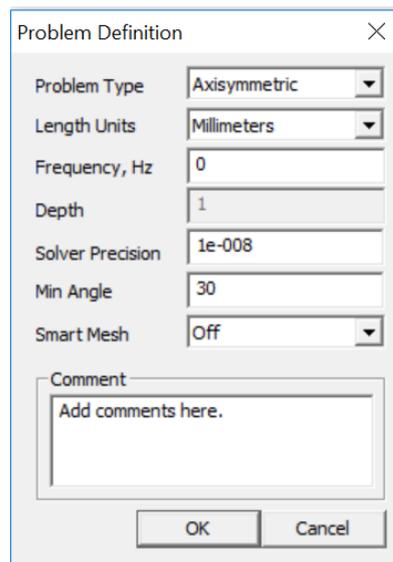


Fig.A2 Riquadro su FEMM per la definizione del problema da analizzare

Poi è stato importato il file *dxf*, sviluppato su AutoCAD per la rappresentazione della sezione trasversale del modello assialsimmetrico della connessione crimpata, tramite la casella file presente sulla barra degli strumenti (Fig.A3). Dopo sono stati creati i materiali da utilizzare nel modello e definite le proprietà dei conduttori e dei punti usati per la definizione delle condizioni al contorno. Ciò è possibile farlo utilizzando la casella *properties* presente nella barra degli strumenti (Fig.A3). Tutti i materiali definiti presentavano inizialmente una conduttività elettrica sia sull'asse x che y pari a $58 \frac{MS}{m}$, una permittività elettrica relativa su entrambe le direzioni di 1 e una tangente di perdita della permittività elettrica nulla. In Tabella A1 sono riportati i materiali e le proprietà dei conduttori e puntuali prodotte.

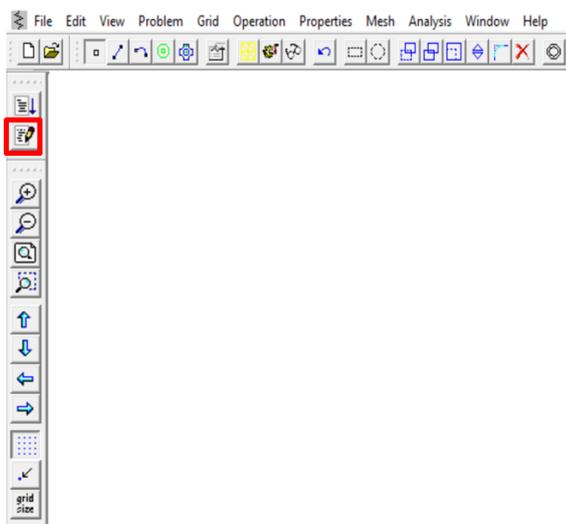


Fig.A3 Barra degli strumenti di FEMM

Tabella A1

Materiali	Proprietà dei conduttori	Proprietà puntuali
Copper	+	0V
Patella	-	0J
Capocorda	Valori di corrente fissati nelle proprietà dei conduttori	Valori fissati nelle proprietà puntuale
Contatto cavo-capocorda	+: 1 A	0V: tensione nulla
Crimpatura	-: -1 A	0J: densità di corrente nulla

Affinchè il software riesca ad analizzare il problema ed estrapolare dei risultati bisogna definire sia il materiale di ciascuna zona (definita da ogni sezione chiusa attraverso dei segmenti), sia le condizioni al contorno. In Fig.A4 sono riportate tutte le scelte adoperate.

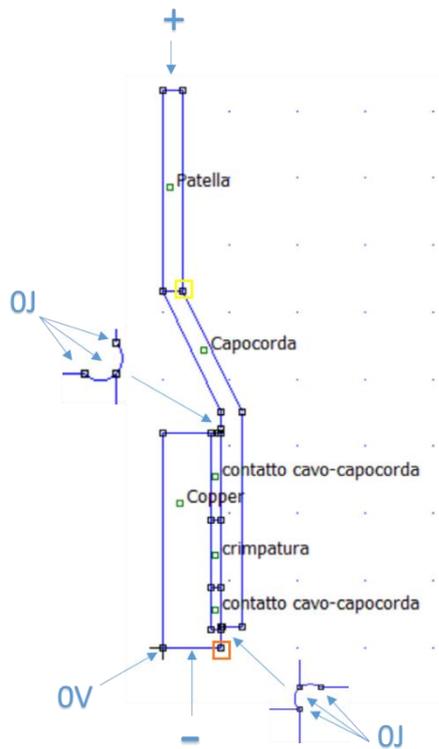


Fig.A4 Definizione dei materiali e delle condizioni al contorno su FEMM

Infine, per ottenere i risultati è stato inserito il codice seguente nella finestra di comando *lua* apertasi dopo aver cliccato nella casella evidenziata in rosso in Fig.A3.

```

ci_modifymaterial("Capocorda", 1 , 58000000)
ci_modifymaterial("Capocorda", 2 , 58000000)
ci_modifymaterial("crimpatura", 1 , 58000000)
ci_modifymaterial("crimpatura", 2 , 58000000)
ci_modifymaterial("contatto cavo-capocorda", 1 , 58000000)
ci_modifymaterial("contatto cavo-capocorda", 2 , 58000000)
ci_modifymaterial("Copper", 1 , 58000000)
ci_modifymaterial("Copper", 2 , 58000000)
ci_modifymaterial("Patella", 1 , 58000000)
ci_modifymaterial("Patella", 2 , 58000000)
vettoreR={}
sigmacrimpatura=58000000
sigmacapocorda=58000000
    
```

Appendice

```
sigmacontatto=58000000
sigmapatella=58000000
sigmacopper=58000000
for k=1,20 do
ci_modifymaterial("Capocorda", 1 , sigmacapocorda-900000)
ci_modifymaterial("Capocorda", 2 , sigmacapocorda-900000)
sigmacapocorda=sigmacapocorda-900000
ci_modifymaterial("crimpatura", 1 , sigmacrimpatura-1900000)
ci_modifymaterial("crimpatura", 2 , sigmacrimpatura-1900000)
ci_modifymaterial("contatto cavo-capocorda", 1 , sigmacontatto-1900000)
ci_modifymaterial("contatto cavo-capocorda", 2 , sigmacontatto-1900000)
sigmacrimpatura=sigmacrimpatura-1900000
sigmacontatto=sigmacontatto-1900000
ci_modifymaterial("Copper", 1 , sigmacopper-500000)
ci_modifymaterial("Copper", 2 , sigmacopper-500000)
sigmacopper=sigmacopper-500000
ci_modifymaterial("Patella", 1 , sigmapatella-500000)
ci_modifymaterial("Patella", 2 , sigmapatella-500000)
sigmapatella=sigmapatella-500000
ci_createmesh()
ci_analyze(0)
ci_loadsolution()
V2=co_getpointvalues(3.1,53)
R=V2
vettoreR[k]=R
end
for i=21,25 do
ci_modifymaterial("Capocorda", 1 , sigmacapocorda-600000)
ci_modifymaterial("Capocorda", 2 , sigmacapocorda-600000)
sigmacapocorda=sigmacapocorda-600000
ci_modifymaterial("crimpatura", 1 , sigmacrimpatura-200000)
ci_modifymaterial("crimpatura", 2 , sigmacrimpatura-200000)
```

Appendice

```
ci_modifymaterial("contatto cavo-capocorda", 1 , sigmacontatto-2000000)
ci_modifymaterial("contatto cavo-capocorda", 2 , sigmacontatto-2000000)
sigmacrimpatura=sigmacrimpatura-2000000
sigmacontatto=sigmacontatto-2000000
ci_modifymaterial("Copper", 1 , sigmacopper-2000000)
ci_modifymaterial("Copper", 2 , sigmacopper-2000000)
sigmacopper=sigmacopper-2000000
ci_modifymaterial("Patella", 1 , sigmapatella-2000000)
ci_modifymaterial("Patella", 2 , sigmapatella-2000000)
sigmapatella=sigmapatella-2000000
ci_createmesh()
ci_analyze(0)
ci_loadsolution()
V2=co_getpointvalues(3.1,53)
R=V2
vettoreR[i]=R
end
print("Resistenza di crimpatura")
for l=1,25 do
print(vettoreR[l])
end
```

Nel codice inizialmente le conduttività elettriche (σ) di tutti i materiali, sia in direzione radiale che assiale, sono state impostate a $58 \times 10^6 \frac{S}{m}$ per assicurarsi che tutti i materiali si portassero a tale valore. In seguito è stato definito un vettore delle resistenze elettriche nel quale salvare tutti i risultati ottenuti al termine del processo e sono state anche inizializzate le variabili usate per procedere con la diminuzione delle conduttività elettriche. Fatto ciò, è stato creato un ciclo *for* suddiviso in venti step, durante i quali sono state effettuate le variazioni delle σ in modo regolare. Cioè, considerando il primo ciclo *for* che simula i cambiamenti delle proprietà elettriche dei materiali quando il cavo di prova è sottoposto a torsione e i valori delle σ iniziali e finali dell'intera prova meccanica (riportati in Tabella 10 del capitolo 5), allora ad ogni step per ciascun materiale si avrà una diminuzione della σ pari a:

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_{\text{iniziale}} - \sigma_{\text{finale}}}{20} \frac{S}{m} \quad (5)$$

Ad esempio, se consideriamo il colletto del capocorda, la variazione della conduttività elettrica impostata su di esso è stata uguale a:

$$\Delta\sigma_{\text{capocorda}} = \frac{(58-20) \times 10^6}{20} = 1.9 \times 10^6 \frac{S}{m} \quad (6)$$

Al termine di ogni modifica viene salvato in un vettore il valore della resistenza di crimpatura risultante, che è stata impostata pari alla tensione sul punto evidenziato in giallo in Fig.A4. Questo perché la corrente alla quale è stata effettuata la simulazione è di 1 A ed il secondo punto sul quale dovrebbe essere valutata la caduta di tensione (evidenziato in arancione in Fig.A4) ha un potenziale nullo.

Terminato il primo ciclo *for* ne è stato introdotto un secondo per simulare il cambiamento del comportamento elettrico della connessione durante i cicli termici. Esso è suddiviso in cinque step, in ognuno dei quali la variazioni di σ sono state effettuate applicando lo stesso ragionamento descritto precedentemente. I valori delle conduttività elettriche iniziali e finali di questo ciclo sono elencati nella Tabella 11 del capitolo 5.

Infine, sulla finestra di comando viene stampato un vettore con tutti i valori risultanti, che è stato utilizzato per diagrammare l'andamento della resistenza di crimpatura.

Bibliografia

- [1] Appunti del corso 01APP "Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica" Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica A.A. 2013-2014.
- [2] Ocoleanu C. F. , Cividjian G. , Manolea G. (2015). Technological Solution for Increasing the Quality of Crimped Connections. Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a Better Tomorrow (RTSI), 2015 IEEE 1st International Forum on, pp. 213-218.
- [3] CEI EN 61238-1. Compression and mechanical connectors for power cables for rated voltages up to 36 kV ($U_m = 42$ kV). Part 1: Test methods and requirements.
- [4] Intercable Group: PP130-H, 2018, da <https://www.intercable.com/it/Electrical/Prodotti/Utensili-oleodinamici/Utensili-per-la-compressione/Teste-per-la-compressione/PP130-H>.
- [5] Intercable Group: CP700, 2018, da <https://www.intercable.com/it/Electrical/Prodotti/Utensili-oleodinamici/Pompe-oleodinamiche/Pompe-a-batteria/CP700>.
- [6] Roccato P. E., Cinnirella L., Bellavia L., Manganaro S., Le Donne E. (2018). Influenza delle connessioni crimpate nelle prove di sovratemperatura. A&T, Torino.
- [7] Intercable Group: NP220-1 / NP220-2, 2018, da <https://www.intercable.com/it/Electrical/Prodotti/Utensili-oleodinamici/Pompe-oleodinamiche/Pompe-a-rete/NP220-1-NP220-2>.
- [8] Catalogo intercable: *Intercable*- UTENSILI PER PROFESSIONISTI (2003).
- [9] Cembre, 2018, da <http://www.cembre.it/family/details/4369>.
- [10] CEI EN 61439-1. Low-voltage switchgear and controlgear assemblies. Part 1: General rules.
- [11] PHOENIX CONTACT | Utensili, 2018, da https://www.phoenixcontact.com/online/portal/it?ldmy&urile=wcm%3apath%3a/itit/web/main/products/subcategory_pages/tools_p-25/3d7b966e-fe2c-4aab-ad5f-b98db236d62a.
- [12] CEI EN 60947-1. Low-voltage switchgear and controlgear. Part 1: General rules.
- [13] Parametri fondamentali della fisica dei connettori, 2018, da <http://www.ing.unitn.it/~colombo/Connettori/CAPITOLI/Fisica%20del%20contatto.html>

[14] Appendice: diffusione e formazione di intermetallici, 2018, da http://www.ing.unitn.it/~colombo/Connettori/CAPITOLI/Appendice_diffusione%20e%20formazione%20intermetallici.html.

[15] Carullo A., Pisani U., Vallan A. (2006). Fondamenti di misure e strumentazione elettronica. Torino: C.L.U.T.

[16] Catalogo intercable: *Intercable*- GROSSISTI DI MATERIALE ELETTRICO (2018).