

È da notare che le precedenti formule asintotiche non contengono alcun termine ondulatorio, in accordo col fatto che questo è smorzato esponenzialmente nella (16).

Si consideri ora il caso in cui la corrente applicata è impulsiva di forma

$$(18) \quad i(t) = I_0 e^{-at} [u(t) - u(t - T_0)]$$

per striscia di larghezza unitaria. Una valutazione approssimata della profondità equivalente di penetrazione si può ottenere seguendo un ragionamento simile a quello usato per un impulso di corrente costante. Per valori di z sufficientemente piccoli la (16) può essere semplificata trascurando l'ultimo termine, ottenendo

$$(19) \quad J(z, t) \cong \frac{I_0}{h\sqrt{\pi t}} (1 - 2at) e^{-z^2/4ht^2}$$

Se si pone $u = \frac{z}{2h\sqrt{t}}$ e si considera z costante, tale relazione si può scrivere

$$(20) \quad J(z, u) = \frac{I_0}{2z} \left(1 - \frac{\alpha z^2}{2h^2 u^2}\right) \Phi_2(u)$$

Per trovare il valore di u per cui $J(z, u)$ diviene massima, basta eguagliare a zero la derivata $\frac{\partial J}{\partial u}$,

$$(21) \quad 4h^2 u^4 - 2(h^2 + \alpha z^2)u^2 + 3\alpha z^2 = 0$$

in cui è stato fatto uso delle relazioni (5). La radice positiva della (19) è

$$u^2 = \frac{1}{4} + \alpha \left(\frac{z}{2h}\right)^2 + \frac{1}{4} \sqrt{1 - 10\alpha \left(\frac{z}{h}\right)^2 + \left(\frac{\alpha z^2}{h^2}\right)^2}$$

Per valori di a piccoli si può sviluppare il radicale in potenze di a e terminare la serie al termine di prima potenza, ottenendo

$$u^2 \cong \frac{1}{2} - \alpha \left(\frac{z}{h}\right)^2$$

Per $t = T_0$ la profondità z' per cui la densità di corrente raggiunge un valore massimo è quindi

$$(22) \quad Z' = h \sqrt{\frac{2T_0}{1 + 4\alpha T_0}} = \sqrt{\frac{2T_0}{\sigma\mu(1 + 4\alpha T_0)}}$$

Tale valore può essere assunto in prima approssimazione come profondità equivalente di penetrazione di un impulso di corrente di forma esponenziale smorzata.

Lucio Vallesse

Brooklyn, U.S.A. - Polytechnic Institute.

BIBLIOGRAFIA

- (1) J. A. STRATTON, *Electromagnetic theory*, McGraw-Hill Co., New York, 1941.
- (2) K. W. MILLER, *Diffusion of electric current into rods, tubes and flat surfaces*, Trans. AIEE, voi. 66, 1947, p. 1446-1507.
- (3) E. JAHNKE, F. EMDE, *Tables of functions*.
- (4) CAMPBELL, FOSTER, *Fourier integrals for practical applications*, Van Nostrand Co., New York, 1948, p. 92.
- (5) J. BARKLEY ROSSER, *Theory and application of $\int_0^z e^{-x^2} dx$* , Mapleton House, Brooklyn, N. Y., 1948.

a Giancarlo Vallauri

Variazione dell'isolamento di conduttori con la temperatura

Si espongono i risultati di alcune misure di variazione della resistenza di coperture isolanti di conduttori in funzione della temperatura, entro e poco oltre i limiti normali di esercizio. L'entità della variazione è maggiore di quanto comunemente si crede ed il valore della resistenza, per una data temperatura sotto i 100 °C, può essere molto diversa secondo il ciclo di temperatura a cui è stato sottoposto in precedenza il materiale e l'umidità dell'ambiente.

Generalità. — La variazione della resistività degli isolanti solidi ed anche delle perdite dielettriche, col variare della temperatura, è un fenomeno universalmente noto, ma non tutti forse, anche se elettrotecnici, hanno un'idea abbastanza precisa dell'entità e dell'andamento della variazione. Sta il fatto che essa può essere molto diversa da un isolante all'altro e cambiare secondo le condizioni di prova.

Uno dei casi più interessanti in pratica è quello degli isolanti che ricoprono i conduttori delle macchine e degli apparecchi elettrici e, in questo caso, è particolarmente difficile la misura in condizioni analoghe a quelle di esercizio, specialmente riguardando alla costanza delle superfici di contatto ed alla misura esatta della temperatura dell'isolante.

Si descrive brevemente, di seguito, una serie di misure i cui risultati potranno forse avere qualche interesse anche per chi non è elettrotecnico, pur se eseguite, per la maggior parte, parecchi anni or sono.

Apparecchio usato per le prove. — È costituito da una scatola di metallo (fig. 1) aperta alle due estremità, entro la quale si dispongono i pezzi tagliati dal conduttore isolato in prova, lunghi 14 cm, in due strati sovrapposti in modo che, mettendo a nudo il conduttore ad uno degli estremi per il primo strato e all'altro estremo per il secondo strato e collegando tutti gli estremi di ciascuno strato, si possa applicare fra i due strati una tensione continua per misurare la resistenza ed eventualmente una alternata per misurare capacità e perdite.

Sul fondo e sui fianchi della scatola e sopra i due strati di conduttori si mette un foglio di mica-nite, come indicato nel disegno. Sopra ai conduttori si posa un pezzo di ferro a T, forato in più punti per diminuire la sua inerzia termica e per introdurre il bulbo di un termometro. Sopra ancora si dispone un blocco di piombo per mantenere una determinata pressione, che nelle misure eseguite era di circa 110 gr/cm² per la vaschetta larga 4 cm.

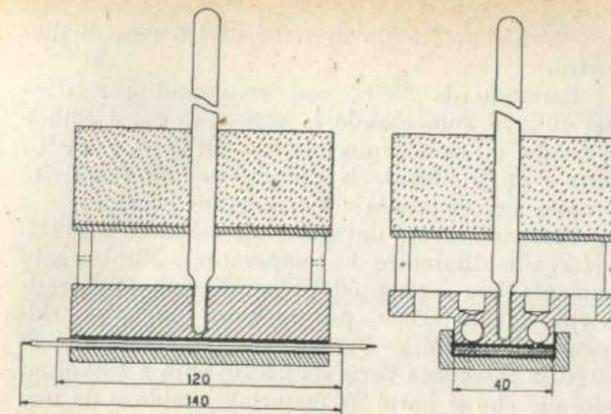
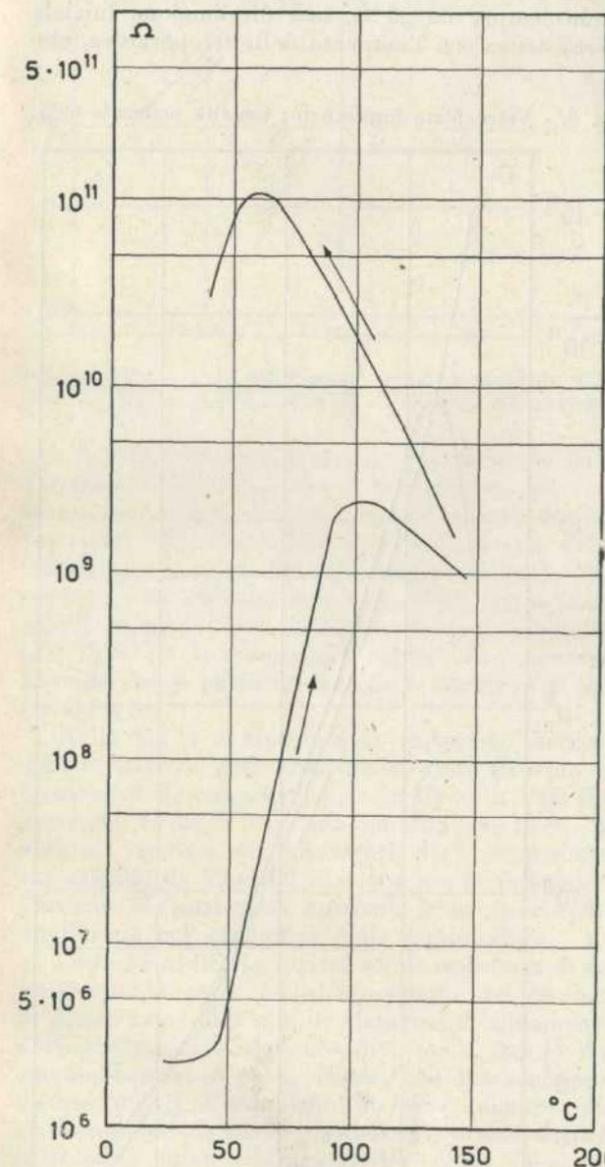


Fig. 1. - Apparecchio usato per le prove.

Fig. 2. - Cotone bianco non impregnato; umidità amb. 70%.



Procedimento della misura. — L'apparecchio sopra descritto viene introdotto in un termostato e i capi dei due strati si collegano a due passanti muniti di anello di guardia.

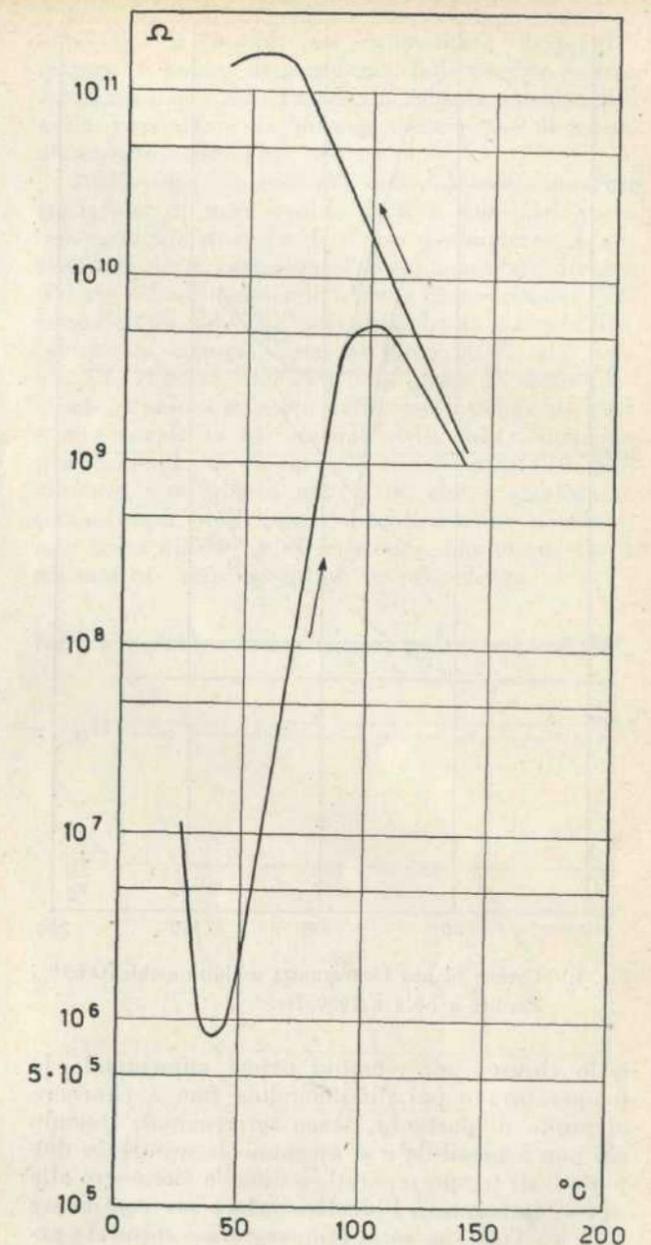


Fig. 3. - Cotone bianco impregnato; umidità ambiente 66%.

Il rilievo della temperatura viene fatto per mezzo del termometro infilato nel blocco di ferro a T e per mezzo di una coppia termoelettrica filiforme collocata al posto di uno dei fili del provino. Si regola la temperatura del termostato finché i due termometri indicano lo stesso valore, entro circa mezzo grado, e si mantiene a tale valore per 15 minuti. Si esegue allora la misura di resistenza applicando ai conduttori una tensione continua di circa 300 V.

La misura delle perdite si può eseguire eventualmente subito dopo, col ponte di Schering a 50 Hz e col ponte di Wien a 1000 Hz.

I risultati delle misure hanno soltanto un valore relativo, hanno cioè significato solo i rapporti fra i diversi valori. È perciò essenziale eseguire tutte le misure di seguito, compiendo possibilmente un

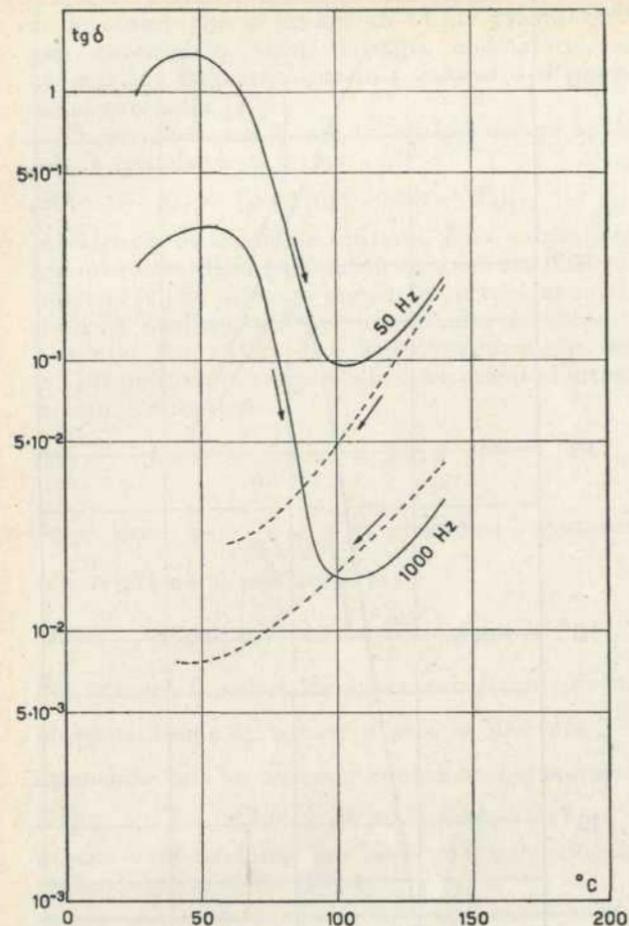


Fig. 4. - Cotone bianco impregnato; umidità ambiente 65%. Perdite a 50 e a 1000 Hz.

ciclo chiuso, per esempio prima aumentando la temperatura e poi diminuendola fino a ritornare al punto di partenza, senza interruzioni. Quando ciò non è possibile e si eseguono le misure in due periodi di tempo separati, è difficile riottenere alla stessa temperatura l'identico valore per continuare il ciclo. Tuttavia, se la temperatura è misurata accuratamente, la differenza non è molto grande.

Per verificare se è variata la superficie di contatto per spostamento o per deformazione del provino, si può verificare se la resistenza e la capacità sono rimaste le stesse, alla stessa temperatura ambiente, prima e dopo il ciclo.

Esempi di misure eseguite. — La temperatura è stata fatta variare entro limiti alquanto più ampi di quelli consentiti in esercizio dalle Norme, arrivando fino a 180 °C. I rapporti fra le resistenze misurate a diverse temperature arrivano anche a 1 su 100 000 e perciò le curve sono in scala logaritmica. Il verso della variazione è indicato con una freccia. Per ogni materiale è indicata la umidità percentuale dell'ambiente in partenza; si aveva cura che detta umidità fosse rimasta abbastanza costante per 24 ore prima della prova.

La fig. 2 indica la variazione della resistenza di un isolamento di cotone bianco, in doppio strato,

non verniciato su filo di rame di 1,6 mm di diametro.

Partendo da 25 °C, con una umidità relativa del 70 % e aumentando la temperatura, il cotone si essicca e l'isolamento migliora fin verso i 100 °C, oltre i quali prevale la diminuzione di resistività propria del materiale e l'isolamento peggiora.

Partendo invece dal materiale già secco a 140 °C e facendo diminuire la temperatura, l'isolamento aumenta fino a circa 60 °C, per l'aumento di resistività del materiale, poi peggiora per l'assorbimento di umidità. Per la stessa temperatura di 60 °C la resistenza varia da 2×10^7 ohm a 10^{11} ohm, secondo che si parte da materiale umido o da materiale secco.

La fig. 3 si riferisce invece ad un isolamento di cotone uguale al precedente, ma impregnato con vernice essiccata al forno. In questo caso si ha, partendo sempre da 25 °C, una diminuzione iniziale di resistenza con l'aumento della temperatura, che

Fig. 5. - Vetro filato impregnato; umidità ambiente 65%.

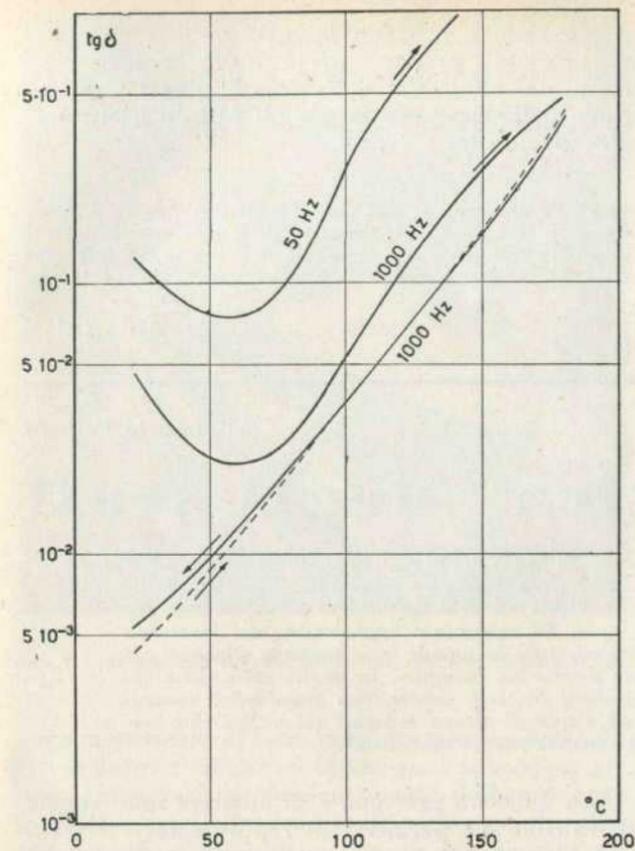
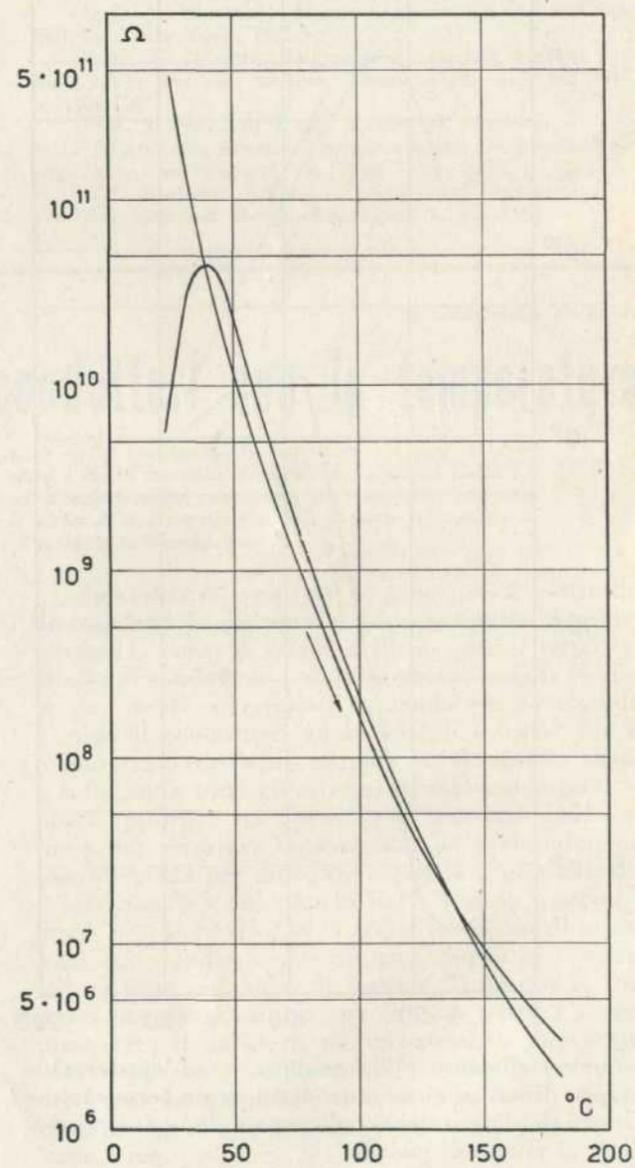


Fig. 6. - Vetro filato impregnato; umidità ambiente 62%. Perdite a 50 e a 1000 Hz e ciclo dopo essiccamento.

non è facilmente spiegabile, poi l'andamento della variazione è analogo al caso precedente, ma l'aumento è maggiore che nel caso del cotone non impregnato. Così anche per la discesa, ma le differenze non sono molto grandi, ciò che dimostra l'importanza del supporto per i materiali impregnati. Anche in questo caso, però, per la stessa temperatura di 60 °C, la resistenza varia da 10^7 a 10^{11} ohm secondo che si parte da materiale umido o da materiale secco.

Nella fig. 4 è riportata la variazione dell'angolo di perdita dielettrica dello stesso provino in funzione della temperatura, a 50 Hz ed a 1000 Hz, partendo da 25 °C con una umidità del 65 %. Si nota un regolare miglioramento delle caratteristiche salendo da 50 a 100 °C, come per la resistenza. Partendo da materiale essiccato le caratteristiche migliorano col diminuire della temperatura.

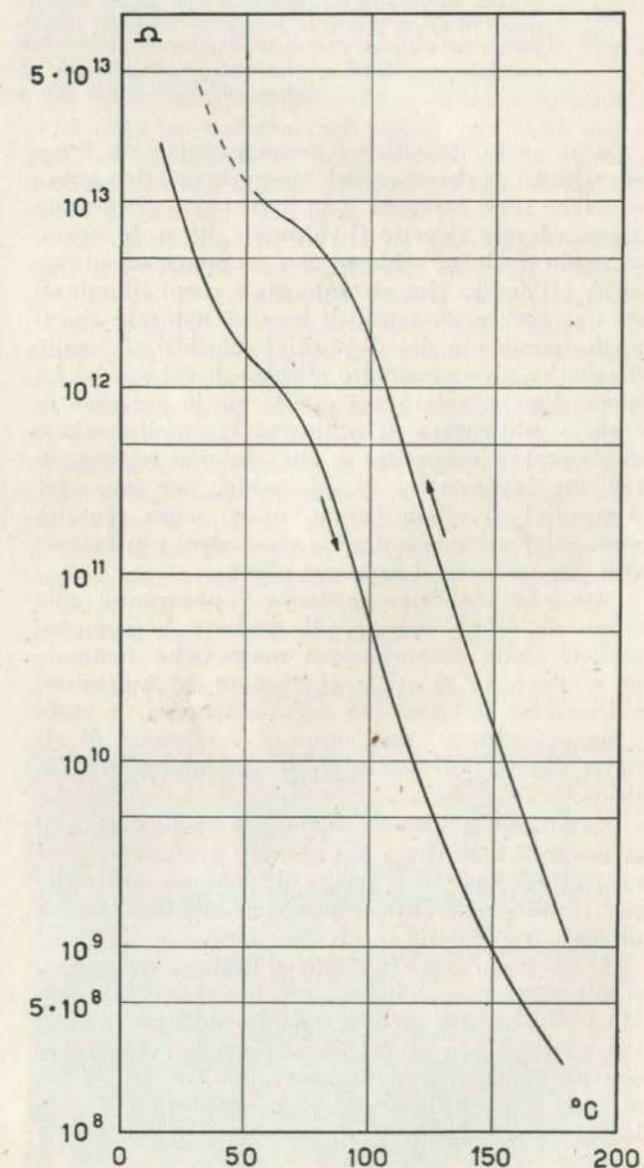
La fig. 5 indica la variazione di resistenza di un isolamento di vetro filato impregnato con vernice, su filo di rame di 2 mm di diametro. L'andamento delle variazioni è alquanto diverso da quello del cotone; benchè si parta da una umidità ambiente uguale (65 %), si nota solo un breve aumento iniziale fino a 40 °C, poi la curva scende regolarmente; la seconda curva ricavata subito dopo l'essiccamento coincide praticamente con la precedente dai 40 °C in su.

La variazione dell'angolo di perdita, indicata nella fig. 6, ha un andamento quasi inverso di quello del cotone impregnato e mostra una diminuzione,

come per il cotone, con l'aumentare della frequenza. L'ordine di grandezza delle perdite è circa lo stesso per i due materiali. Questa misura può avere particolare importanza nelle prove di invecchiamento artificiale.

Nella fig. 7 è indicata infine la variazione di resistenza di uno smalto di tipo normale, rosso scuro, su filo di rame di 1 mm di diametro. L'andamento della variazione è completamente diverso dai precedenti mancando la zona di inversione; l'effetto dell'umidità dell'ambiente risulta trascurabile, benchè la misura parta da circa 20 °C, con una umidità relativa dell'85 %. La curva di raffreddamento, qualora si parta dallo stesso valore di resistenza raggiunta al massimo della salita, coincide praticamente con la curva di riscaldamento. Si può ritenere, per questo materiale, che a qualunque temperatura, nella zona di utilizzazione normale, non vi sia differenza di resistenza, qualunque sia il trattamento termico subito in precedenza.

Fig. 7. - Smalto rosso scuro comune; umidità ambiente 83%.



Oltre agli esempi citati sono stati eseguiti parecchi altri cicli su diversi campioni dello stesso tipo, ma sempre con andamento analogo a quello indicato.

Nota - Se potesse interessare l'ordine di grandezza della resistenza per metro lineare di conduttore (tenendo conto che esso, nella prova, è a contatto di solito con due conduttori dell'altro strato) si può ricavarlo facilmente considerando che la scatola conteneva, per ogni strato, da 18 a

Le misure e il tracciamento delle curve sono stati eseguiti, in gran parte e con molta cura e perizia, dal Dott. Carlo Tabaracci, durante il periodo della sua permanenza all'Istituto Elettrotecnico Nazionale.

19 fili di diametro 2 mm, circa 24 fili di diametro 1,6 mm e ancora 18 o 19 fili del diametro di 1 mm, essendosi usata in quest'ultimo caso una scatoletta di soli 2 cm di larghezza utile. La lunghezza utilizzata è, per ciascun filo, di 12 cm.

Carlo Chioldi

Torino - Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris.

a Giancarlo Vallauri

L'«ombra magnetica» degli scafi

Uno scafo produce variazioni nella configurazione delle linee di flusso del campo magnetico terrestre nello spazio circostante, a cagione dell'anisotropia che il materiale ferromagnetico contenuto nello scafo costituisce nello spazio stesso. La perturbazione è rilevabile mediante adatti dispositivi, e può quindi essere utilizzata per denunciare a distanza la presenza di una nave. La conoscenza approfondita del fenomeno e delle possibilità di attenuarne con mezzi pratici la manifestazione ha grande importanza in relazione coi mezzi di offesa a innesco magnetico, azionati senza contatto diretto col bersaglio. In questi studi viene applicato il criterio di similitudine mediante modelli equivalenti in scala ridotta, con grandissimo vantaggio delle possibilità sperimentali. Nella presente nota si dà cenno di alcune indagini sui criteri che presiedono all'applicabilità dei modelli magneticamente equivalenti.

Uno scafo metallico è accompagnato da fenomeni di perturbazione del campo magnetico terrestre, che sono percepibili in uno spazio circostante ragguardevole rispetto al volume dello scafo stesso, in modo analogo, sebbene non geometricamente simile, all'ombra che accompagna i corpi illuminati da una sorgente esterna di luce. È naturale che il perfezionamento dei dispositivi sensibili al campo magnetico abbia condotto all'idea di valersi del fenomeno per rivelare per questa via la presenza di scafi, e addirittura di utilizzare la manifestazione dell'«ombra magnetica», che anticipa convenientemente la presenza di uno scafo, per innescare dispositivi di offesa (mine, siluri) senza contatto materiale, nel modo e nelle condizioni più favorevoli per ottenere il massimo effetto.

Ne è venuta di conseguenza l'opportunità, allo scopo di difesa passiva, di studiare la compensazione delle perturbazioni magnetiche tentando di rendere, se si vuole continuare ad esprimersi nei termini dell'analogia sopra accennata, lo scafo «magneticamente trasparente», o almeno di ridurre per quanto possibile la sua «ombra magnetica».

Si è condotti così ad affrontare un problema di conoscenza fisica fra i più antichi, e tuttavia ancor oggi appassionante e fertile di risultati utili, che per la loro generalità si può dire stiano alla base di molti rami della tecnica moderna.

Il merito di avere iniziato nel nostro paese questo studio suggestivo va indubbiamente al prof. G. Vallauri, che vi si è accinto quando, anche nei paesi tecnicamente più progrediti e spinti da contingenze più pressanti, non si disponeva di risultati sperimentali apprezzabili, nè si era impostato il problema sulle indispensabili premesse rigorosamente scientifiche.

La difficoltà precipua è di adattare uno schema di calcolo che permetta di rappresentare il fenomeno, consentendo di raggiungere risultati sufficientemente approssimati, senza perdere i necessari requisiti di agevolezza, di accessibilità e nello stesso tempo di generalità.

Ma, a differenza di quanto avviene in altri campi della tecnica, alle difficoltà di ordinare una trattazione di calcolo sufficientemente aderente al fenomeno fisico che ci appare, si aggiungono difficoltà e disagi sperimentali che, pure essendo di tutt'altro ordine, ostacolano fortemente la raccolta di risultati sperimentali validi, su cui verificare ed appoggiare lo sviluppo della teoria.

È facile concretare l'importanza delle difficoltà sperimentali, quando si ponga mente alle condizioni richieste per le determinazioni: si tratta di procedere a rilievi differenziali di campo magnetico, in presenza di un elemento perturbatore di dimensioni estremamente rilevanti (scafi con lunghezze dell'ordine del centinaio di metri), in zone sottostanti alla chiglia, e quindi sotto acqua, e in fondali sufficientemente discosti da cause perturbatrici estranee (non in prossimità di altri scafi, o di installazioni portuali, o di relitti ferromagnetici di qualsiasi genere). I risultati ottenuti dal Vallauri su una Nave da battaglia, a prezzo di ingegnosi accorgimenti e di una lunghissima e costante applicazione, superando con favorevole successo la scarsa disponibilità di adeguati dispositivi di misura e le difficoltà inerenti, hanno dato conferma non soltanto dell'attendibilità degli schemi di calcolo proposti, ma anche della possibilità di ottenere la compensazione magnetica con mezzi accessibili, e di valutare e concretare l'entità dei dispositivi di compensazione.

Il principio della compensazione magnetica consiste nel creare sullo scafo convenienti distribu-