

# STATO ATTUALE DELLE TECNICHE DI COSTRUZIONE DI ELETTROMAGNETI SUPERCONDUTTORI

G. PASOTTI - N. SACCHETTI - G. SACERDOTI - G. SANNA (\*)

Nel presente articolo vengono passati in rassegna i principali fenomeni osservati nella sperimentazione con i magneti superconduttori e sono messi in evidenza i problemi inerenti alla loro realizzazione pratica. Si passa anche in rassegna le principali caratteristiche e le tecniche di preparazione dei materiali per la costruzione di tali magneti. Viene poi tracciato un quadro sommario delle realizzazioni più importanti avente lo scopo di indicare i limiti attuali della tecnica costruttiva. Sono inoltre analizzati i problemi collaterali all'impiego di questo tipo di magneti e vengono infine indicate le loro possibilità di utilizzazione nella ricerca e nelle applicazioni tecniche.

## 1. - INTRODUZIONE.

Fino a qualche anno fa, non era stato possibile realizzare elettromagneti con bobine superconduttrici (che, nel seguito, chiameremo brevemente magneti superconduttori) capaci di fornire intensi campi magnetici senza dissipazione di calore. Ciò era dovuto al fatto che non erano noti materiali capaci di conservare lo stato superconduttore in presenza di un elevato campo magnetico. Solo intorno al 1961 furono scoperti materiali dotati di questa speciale caratteristica [1, 2].

Da allora vari laboratori ed industrie si impegnarono a fondo nello studio e nella realizzazione di fili o nastri costituiti da leghe Nb-Zr, o composti intermetallici quali il Nb<sub>3</sub>Sn, V<sub>3</sub>Ga ecc. che sembrarono i più idonei allo scopo suddetto. Le prove eseguite in laboratorio furono in genere eseguite con le seguenti modalità:

a) si portava un corto spezzone del filo in esame a basse temperature (1) in presenza di un campo magnetico trasversale  $H$  (2) di intensità costante; si aumentava poi la corrente  $I$  nello spezzone fino alla scomparsa della superconduttività;

b) alternativamente si faceva passare una corrente costante nello stesso spezzone di filo e si aumentava il campo magnetico (sempre mantenuto perpendicolare) sino alla scomparsa della superconduttività.

Le due curve  $I = f(H)$  ottenute con questi due modi di procedere non risultavano né coincidenti tra di loro né ripetibili. La ripetibilità di queste misure poteva essere ottenuta solo dopo aver eseguito un certo numero di prove consecutive. Di solito i valori ottenibili ripetibilmente di  $H$  e di  $I$  risultavano maggiori di quelli ottenuti nelle prime curve. Tale fenomeno fu perciò indicato con il nome di « training » [3].

Le curve così ottenute per il filo trafilato a freddo da

leghe di Nb-Zr con percentuali di Zr comprese tra il 25 % ed il 40 % circa e per fili o nastri di Nb<sub>3</sub>Sn ricotto a circa 1 000 °C per 12 ore, indicavano questi materiali particolarmente adatti per la fabbricazione di magneti superconduttori. I campi magnetici critici  $H_c$  ( $T = 0$  °K) risultavano dell'ordine di 70-80 kGs nel caso del Nb-Zr e circa 200 kGs per il Nb<sub>3</sub>Sn e le correnti critiche raggiungevano, a bassi campi magnetici, densità dell'ordine di migliaia di A/mm<sup>2</sup>.

Disponendo di tali materiali si poteva ragionevolmente pensare di aver risolto il problema della costruzione di magneti superconduttori, invece si presentarono ulteriori difficoltà, alcune previste, altre scoperte solo nella realizzazione pratica dei magneti stessi. Tra le prime ricordiamo:

— le difficoltà di lavorazione di questi materiali che risultano duri e fragili (particolarmente il Nb<sub>3</sub>Sn ed il V<sub>3</sub>Ga);

— i problemi connessi al raffreddamento di tutta la massa dell'avvolgimento a causa della scarsa conduttività termica del filo;

— il problema posto dalla comparsa della resistenza elettrica in seguito alla improvvisa perdita dello stato superconduttore (quenching della superconduttività). Ciò determina dei riscaldamenti fortemente localizzati in brevi tratti del filo tali da danneggiarlo e, in certi casi, fonderlo. Se il filo si interrompe, a causa della elevata energia magnetica immagazzinata nella bobina, si producono sovratensioni che provocano scariche elettriche tra le spire e tra queste e massa;

— le difficoltà relative all'isolamento elettrico;

— il problema dell'ancoraggio meccanico delle spire in presenza degli ingenti sforzi elettrodinamici dovuti all'interazione della corrente con l'elevato campo magnetico;

— il problema dell'alimentazione dei magneti con forti correnti nel bagno d'elio e del corto circuito superconduttore del magnete quando si voglia usarlo con campo persistente.

Un fenomeno invece non previsto fu quello della « degradazione ». Infatti un filo di un materiale già provato in spezzoni, quando sia avvolto in bobine presenta sempre un campo magnetico ed una corrente critici inferiori in misura più o meno grande a quelli precedentemente misurati. Questo fenomeno è tanto più evidente quanto maggiore è la quantità di filo di cui è costituita la bobina. In un primo tempo si era creduto che tale « degradazione » fosse causata da qualche tratto di filo scadente la cui presenza è ovviamente più probabile quanto più lungo è il filo; attualmente si tende a giustificare questo comportamento in un'altra maniera ricorrendo al fenomeno così detto dei « flux jumps » [4-9]. Su questa base, una spiegazione plausibile, per quanto non completamente sicura, sembra essere la seguente: per bassi va-

(\*) G. Pasotti - Dr. N. Sacchetti - Prof. Ing. G. Sacerdoti - Dr. G. Sanna - Laboratori Nazionali di Frascati del CNEN.

(1) Immergendolo in elio liquido a 4.2 °K.

(2) In campo magnetico longitudinale, si ottengono generalmente risultati migliori.

lori della corrente, la corrente superconduttrice si distribuisce sulla superficie del filo; superato un certo campo magnetico caratteristico  $H_{c1}$  (che è assai basso), si ha che la supercorrente passa da una distribuzione prevalentemente superficiale ad una distribuzione filamentaria con densità quasi uniforme attraverso tutta la sezione del filo. In questo cambiamento della distribuzione della corrente si producono i « flux jumps » e quindi piccoli riscaldamenti locali nelle zone a resistenza normale. Se nel magnete vi è già immagazzinata un'energia magnetica sufficientemente elevata ed il raffreddamento non è sufficientemente rapido ed efficace, il processo può divenire catastrofico ed il filo perde la sua proprietà superconduttrice. Questa interpretazione del fenomeno sembra convalidata dal fatto che la perdita della superconduttività avviene in regioni della bobina dove il campo magnetico è basso (ossia negli strati più esterni), quando però già vi è una notevole energia magnetica immagazzinata nella bobina stessa. In questo caso predisponendo un campo magnetico continuo esterno, anche non elevato (un migliaio di gauss), si potrebbe migliorare le prestazioni del magnete, provocando la predetta variazione di distribuzione di corrente quando ancora l'energia magnetica è bassa.

Anche presso il nostro laboratorio è stato ripetutamente osservato il fenomeno dei « flux jumps » nel corso di esperimenti su anelli toroidali di Sn ed Nb ricotti a 970 °C per 12 ore. Nella fig. 1 riportiamo un grafico tipico ottenuto nel corso di queste esperienze [10].

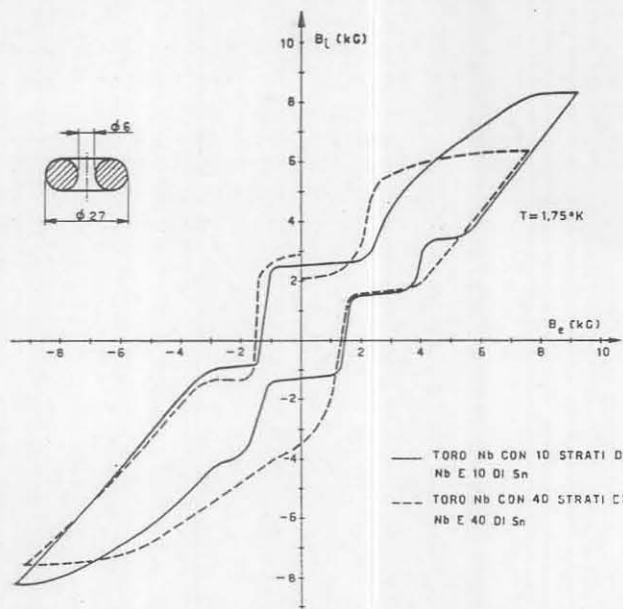


Fig. 1. — Andamento del campo magnetico interno ( $B_i$ ) in funzione del campo esterno applicato ( $B_e$ ) in un anello toroidale superconduttore. L'anello di Nb è ricoperto con  $Nb_3Sn$  ottenuto per evaporazione sotto vuoto di strati alternativi di Nb ed Sn spessi  $\approx 1000 \text{ \AA}$  e successiva ricottura a 970 °C per 12 ore.

Vogliamo d'altra parte notare, che vi possono essere limitazioni di principio nella realizzazione di magneti di grandi dimensioni [11].

Una di queste limitazioni può essere la seguente: consideriamo un magnete superconduttore non eccitato ( $I = 0$ ); l'energia dello stato superconduttore è inferiore a quella dello stato normale di una certa quantità  $\Delta E_{ns}(I = 0)$ ; quando il magnete è eccitato l'energia dello stato normale è aumentata della quantità  $(I/2)LI^2$  mentre la differenza  $\Delta E_{ns}(I \neq 0)$  è inferiore a  $\Delta E_{ns}(I = 0)$  a causa del

fatto che gli elettroni superconduttori hanno un'energia maggiore rispetto a quella da essi posseduta nello stato superconduttore in assenza di corrente.

Il rapporto  $\Delta E_{ns}(I \neq 0)/(I/2)LI^2$  per piccoli magneti è stimato dell'ordine  $10^{-9}$  ed è chiaro allora come vi possano essere instabilità capaci di produrre la transizione verso lo stato normale di un magnete superconduttore per alte correnti. Inoltre queste instabilità si accentuano all'aumentare delle dimensioni a causa del fatto che  $\Delta E_{ns}(I \neq 0)$  resta circa costante <sup>(3)</sup> mentre  $(I/2)LI^2$  ovviamente cresce.

Altre limitazioni possono nascere da considerazioni di meccanica quantistica e statistica su cui non insistiamo ulteriormente.

## 2. - STATO ATTUALE DELLA PREPARAZIONE DEI MATERIALI.

Come detto al § 1, i materiali che presentano le migliori prospettive per la costruzione di magneti sono in generale leghe o composti intermetallici a base di Nb e di V [2, 12, 13, 14].

Per quel che riguarda il  $V_3Ga$  non si dispone ancora di una produzione industriale per le difficoltà che si incontrano nella preparazione dei fili; per quanto ci risulta le sue proprietà sono state studiate fino a campi di circa 150 kgauss, su spezzoni ottenuti nelle seguenti maniere [12]:

- a) diffusione del Ga in fili di V dalla fase di vapore;
- b) diffusione del Ga in fili di V dalla fase liquida per immersione del filo in Ga fuso a 800 °C per 1' e successivo trattamento in forno a 1200 °C per tempi compresi tra 0,5 e 10 ore.

Il  $V_3Ga$  è stato anche ottenuto da vari sperimentatori tra i quali Kunzler [15] sinterizzando polveri di V e di Ga in tubi di V, trafilendo e ricuocendo poi il tutto.

Nelle figg. 2 e 3 si riportano per il  $V_3Ga$  ottenuto con i metodi ora descritti le correnti critiche in funzione del campo magnetico applicato [12].

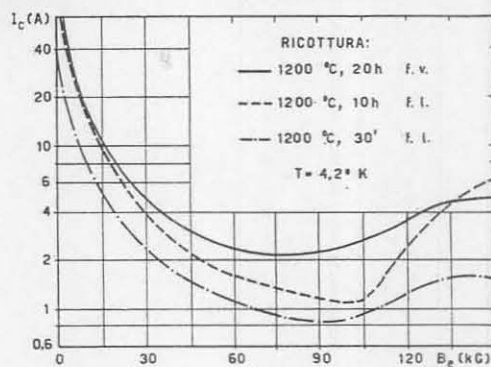


Fig. 2. — Corrente critica ( $I_c$ ) in funzione del campo magnetico applicato ( $B_e$ ) per un filo di V del diametro di 0,5 mm ricoperto di  $V_3Ga$  (f. v. = campione preparato per diffusione del Ga nel V dalla fase di vapore; f. l. = c. s. dalla fase liquida).

Per quanto riguarda invece i conduttori di  $Nb_3Sn$  essi sono preparati con procedimenti tecnologici assai diversi tra loro e tra questi ricordiamo:

- a) il procedimento usato dal Bell Telephone Laboratory: un tubo di Nb è riempito con polveri di Nb e Sn proporzioni circa stechiometriche e viene poi trafileto con

<sup>(3)</sup>  $\Delta E_{ns}(I \neq 0)$  resta circa costante (o almeno cresce con le dimensioni del magnete meno rapidamente di quanto aumenti  $(I/2)LI^2$ ) poiché essa non è l'energia riferita a tutti gli elettroni contenuti nell'avvolgimento, bensì è molto più piccola, in quanto basta che una piccola parte del filo perda le proprietà superconduttrici per dar luogo a processi dissipativi catastrofici.

tecniche particolari. Il filo, dopo essere stato avvolto nella bobina viene ricotto a circa 1000 °C per alcune ore. Il filo risulta molto fragile;

b) il procedimento seguito dalla General Electric Co: un filo di Nb viene ricoperto con Sn e poi con isolamento

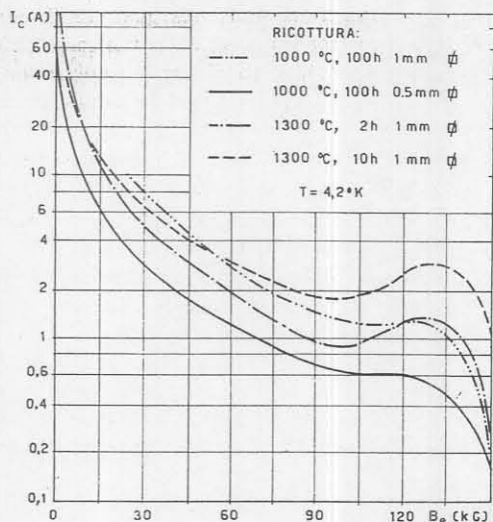


Fig. 3. — Corrente critica ( $I_c$ ) in funzione del campo applicato ( $B_e$ ) per filo di V con nucleo di  $V_3 Ga$  ottenuta per sinterizzazione.

ceramico; si avvolge la bobina e poi si ricuocce il tutto a 950 °C per formare il composto. Con questo procedimento è stata fatta la prima bobina che ha superato i 100 kGs;

c) il procedimento della RCA [16]: un nastro di acciaio inox viene fatto passare in vapori di cloruro di niobio e cloruro di stagno ad alta temperatura; i cloruri vengono poi ridotti passando in atmosfera di idrogeno e formando così una sottile pellicola superficiale di  $Nb_3Sn$  cristallino. Il composto viene poi ricoperto con una deposizione di Ag. Non è necessaria alcuna ricottura dopo aver avvolto la bobina. Riportiamo in fig. 4 un grafico

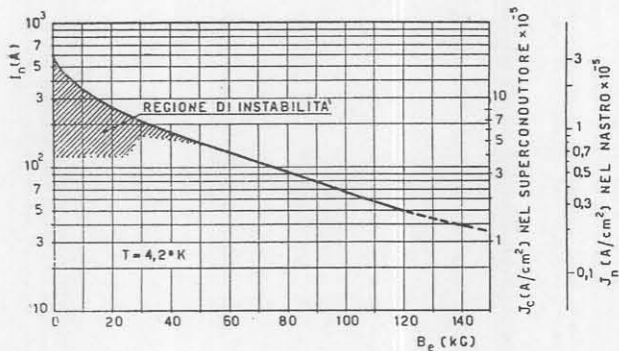


Fig. 4. — Andamento della corrente totale nel nastro ( $I_n$ ), della densità di corrente nel solo stato di  $Nb_3Sn$  ( $J_c$ ) e della densità di corrente relativa all'intero nastro ( $J_n$ ) per la piattina tipo R 60214 della RCA in funzione del campo applicato ( $B_e$ ).

in cui sono riportati la corrente del nastro  $I_n$  e le densità di corrente nel nastro  $J_n$  e nel composto  $J_c$  in funzione del campo magnetico. In fig. 5 è riportata una sezione del nastro suddetto;

d) il procedimento della National Research Corp. (NRC): la NRC ha preparato del nastro di  $Nb_3Sn$  (NIO-STAN) ricoprendo una piattina di Nb con Sn fuso la-

sciandolo poi reagire a temperatura elevata per formare pochi micron di  $Nb_3Sn$ . Il nastro può essere avvolto in solenoide senza ulteriore ricottura. Anche questa piattina nelle ultime versioni viene ricoperta con Cu o Ag.

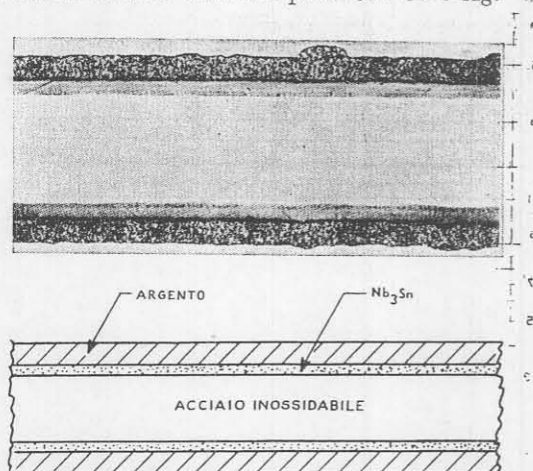


Fig. 5. — Sezione del nastro di cui a fig. 4.

Riportiamo a titolo comparativo alcuni dati indicativi sulle prestazioni dei materiali della NRC ed RCA (v. figure 6 e 7) (\*).

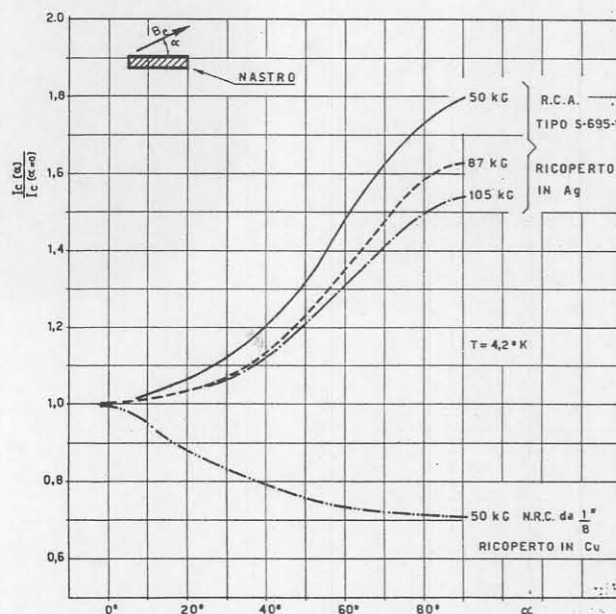


Fig. 6. — Rapporto tra la corrente critica  $I_c(\alpha)$ , corrispondente ad un campo magnetico ( $B_e$ ) applicato in una direzione formante un angolo  $\alpha$  rispetto alla dimensione maggiore della sezione del nastro, a la corrente critica  $I_c$  nel caso  $\alpha = 0$ . Le varie curve si riferiscono a diverse intensità del campo applicato  $B_e$  a due diversi tipi di nastro.

Il Nb-Zr è stato il primo materiale ad essere venduto in fili per la costruzione di magneti (soprattutto nelle versioni al 25 % ed al 33 % di Zr).

Tutti i fabbricanti di Nb-Zr ottengono il materiale trafilando a freddo una barra del diametro di 10÷100 volte il filo finito. Sembra che la qualità del materiale migliori aumentando il rapporto tra il diametro della barra iniziale ed il diametro del filo finito (rapporto di trafilatura):

(\*) Comunicazione privata.

Il Nb-Zr, come il Nb<sub>3</sub>Sn, presenta il fenomeno della « degradazione », quando viene avvolto in bobine. Le

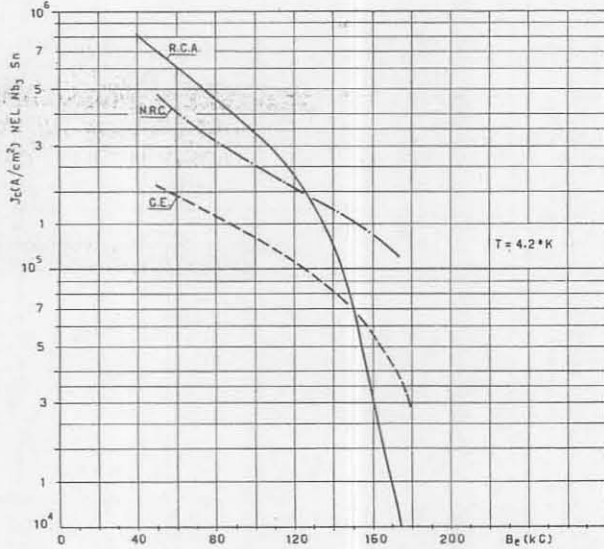


Fig. 7. — Densità di corrente critica relativa al solo stato di Nb<sub>3</sub>Sn ( $J_c$ ) in funzione del campo applicato ( $B_e$ ) per nastro della RCA, NRI, e General Electric.

curve caratteristiche di questi materiali in fili sono riportate in fig. 8.

Sebbene la densità di corrente a basso campo magnetico del Nb-Zr sia confrontabile a quella del Nb-Sn, i

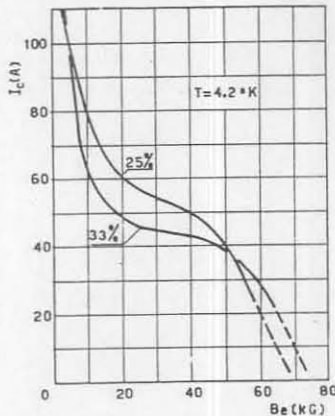


Fig. 8. — Corrente critica ( $I_c$ ) in funzione del campo applicato ( $B_e$ ) per fili di Nb-25% Zr ed Nb-33% Zr del diametro di 0,25 mm, ricoperti in Cu della NRC.

campi magnetici praticamente ottenibili da bobine costruite con i due materiali risultano notevolmente diversi (cfr. successivo § 3).

Il Nb-Zr essendo stato il primo materiale disponibile commercialmente è quello di cui sono meglio conosciute le proprietà superconduttrici, in relazione anche all'influenza delle impurezze, ai metodi di lavorazione, ecc. Questo materiale, a differenza del Nb<sub>3</sub>Sn presenta un accentuato fenomeno di « training » (cfr. § 1). Questa caratteristica porta in ultima analisi ad una maggiore « degradazione » della corrente passando da spezzoni a bobine non potendo effettuare su queste un « training » adeguato. Inoltre il Nb-Zr dà minori garanzie di ripetibilità del Nb<sub>3</sub>Sn. Per tutte queste ragioni si tende ora a preferire quest'ultimo materiale.

Recentemente c'è stato un rilancio del Nb-Zr non più in fili singoli ma riunito in cavi [17] o piattine <sup>(5)</sup> formati da parecchi conduttori (5, 7 o anche più) tra loro a contatto tramite una ricopertura di Cu o addirittura immersi in una fusione di indio. Talvolta questi cavi contengono anche fili di Cu e di acciaio. In questa maniera, si riesce a ridurre di molto l'instabilità propria del filo di Nb-Zr; infatti se per qualche ragione in uno dei fili costituenti il cavo si ripristina la resistenza elettrica, non si ha interruzione del circuito superconduttore poiché la corrente continua a fluire negli altri fili paralleli. Chiaramente in questa maniera si facilita il recupero delle proprietà superconduttrici da parte di quei tratti di filo tornati allo stato normale.

Recenti esperienze [37] sono state eseguite per trovare l'ottimo del rapporto tra la sezione del rame (che deve avere alta conducibilità elettrica a bassa temperatura) e la sezione del superconduttore. La disposizione sperimentale usata è riportata in fig. 9. Portando il punto C del

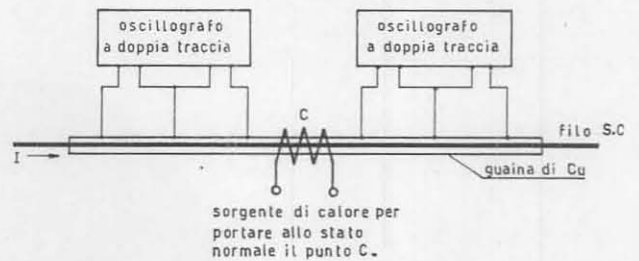


Fig. 9. — Schema della disposizione sperimentale per la misura della velocità con cui si estende una zona allo stato normale lungo un filo inizialmente allo stato superconduttore.

superconduttore allo stato normale si rileva la velocità con cui si espande questa zona allo stato normale lungo il filo. Aumentando la sezione del rame tale velocità diminuisce fino ad annullarsi: in queste condizioni il superconduttore si può considerare perfettamente « stabilizzato ». Si può quindi pensare di costruire dei magneti superconduttori anche di grosse dimensioni ed alti campi magnetici con sufficiente garanzia di un buon funzionamento.

Per fili della lega Nb-Ti sono disponibili pochi dati poiché sono state eseguite prove in numero più limitato.

In tabella I riportiamo alcuni dati riguardanti i materiali superconduttori [11, 18, 19].

### 3. - MAGNETI SUPERCONDUTTORI.

Nel grafico di fig. 10 [20] è riportata la situazione all'estate del 1963 relativa alle realizzazioni pratiche di magneti superconduttori. Da questo grafico si può vedere che più grande è la dimensione del magnete, più piccolo è il campo magnetico ottenibile. Naturalmente per i fini di una pratica utilizzazione si tende a progettare e costruire bobine di dimensioni sempre più grandi e capaci di raggiungere campi magnetici quanto più possibile elevati.

Il filo usato nelle prime realizzazioni era in generale di Nb-Zr. I campi magnetici massimi che si ottenevano erano dell'ordine di 50÷60 kGs [21]. In prove eseguite presso il nostro laboratorio, una bobina costruita con filo di Nb-25% Zr, ha raggiunto un campo massimo di ~ 50 kGs [22].

<sup>(5)</sup> « SG 700 Supergenic strip » della AVCO AVERET Research Laboratory.

TABELLA I.

	$T_c$ (°K)	$H_c$ (*) ( $T = 0$ ) (kgauss)	$J_c$ (4.2 °K) (A/cm <sup>2</sup> )	Campo magnetico trasversale (kgauss)	Caratteristiche meccaniche
V <sub>3</sub> Ga . . . . .	14.5	270	10 <sup>5</sup>	80	molto fragile
Nb <sub>3</sub> Sn . . . . .	18.0	210	2 × 10 <sup>5</sup>	80	molto fragile
Nb-Ti . . . . .	9.7	145	2 × 10 <sup>4</sup>	80	molto duttile
Nb-Zr . . . . .	10.8	70-130 (**)	5 × 10 <sup>4</sup>	80	duttile

(\*) Stimati

(\*\*) Dipendente dalla percentuale di Zr. I dati sono ottenuti da fonti di informazione diversa.

In queste prime realizzazioni però le bobine difficilmente raggiungevano i campi magnetici per cui erano state progettate ed il loro funzionamento non garantiva quasi mai una sufficiente riproducibilità [23, 24] (6). An-

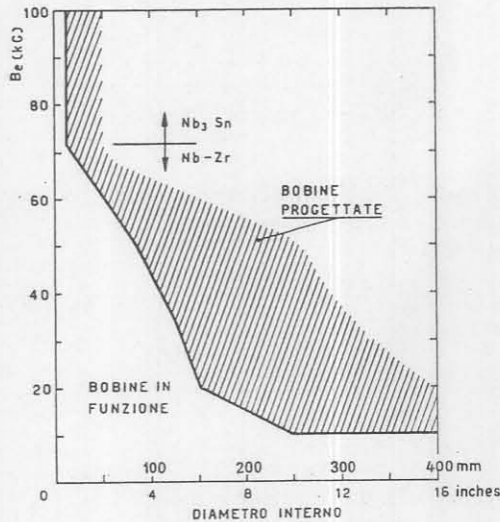


Fig. 10. — Situazione della costruzione di bobine superconduttrici nell'estate 1963.

che presso le industrie, specialmente americane ed inglesi, si è iniziata la costruzione di bobine superconduttrici; tra queste ricordiamo: la Varian, la Westinghouse, la General Electric, la Magnion, la AVCO, ecc.

I magneti di produzione industriale avevano un diametro interno di 1 o 2 cm al massimo, erano alti una decina di cm, ed avevano campi magnetici compresi tra 40 e 60 kGs (7). Alcuni di questi magneti erano realizzati con due bobine separate così da consentire un accesso radiale alla regione utile.

Per la costruzione di queste bobine si è poi cominciato ad usare strati successivi di materiale di diverse qualità. Ultimamente utilizzando i materiali di recente scoperta di cui si è parlato al § precedente (come per esempio i nastri di Nb<sub>3</sub>Sn che non necessitano di ricottura, ecc.), si sono realizzati magneti di buona riproducibilità e si sono costruite anche bobine a campi magnetici più elevati (maggiori di 80 kGs) [25]. Inoltre in vari laboratori si sono realizzate bobine capaci di superare anche i 100 kGs [26].

Utilizzando 700 m di nastro di Nb<sub>3</sub>Sn di produzione RCA stabilizzato con un rivestimento di argento, presso

(6) Per contare su di una sufficiente riproducibilità bisogna scendere a valori di campo di ~ 40 kGs.

(7) Anche per questi magneti la riproducibilità del campo massimo era incerta.

il nostro laboratorio è stata realizzata una bobina superconduttrice di piccole dimensioni (diametro interno = 14 mm, altezza = 93 mm). Questa bobina, progettata per ottenere un'induzione di 60 kGs supera agevolmente tale valore ed in una prova ha raggiunto 75 kGs.

D'altra parte si è iniziata anche la progettazione e la costruzione di magneti di dimensioni maggiori [27-31].

Una bobina di 45 cm di diametro interno e 17 kgauss di campo magnetico massimo è stata realizzata alla Argonne National Laboratory nel 1964 [27] con cavo costituito da 7 fili di Nb-Zr al 25 % rivestiti di rame e circondati da 12 fili di rame. L'energia immagazzinata dalla bobina superava i 200 kJ ed il tempo necessario per raggiungere il campo magnetico massimo era di 30 minuti.

La AVCO-EVERETT ha prodotto nel maggio 1964 una bobina di 27 cm di diametro interno e 33 kGs con filo di Nb-Zr e recentemente [37] ha realizzato un magnete che produce un campo magnetico di 42 kGs su di un volume di circa 2 m<sup>3</sup> ed ha un'energia immagazzinata di 12 MJ.

Ricordiamo ancora che sono stati costruiti magneti di tipo particolare come, per esempio, lenti magnetiche superconduttrici [32] e coppie di Helmholtz [33].

Come detto nel § 1 alla costruzione e all'impiego dei magneti superconduttori sono connessi diversi problemi. Ci limiteremo a citare i principali senza entrare nei dettagli anche perchè su molti non sono state raggiunte soluzioni definitive.

Un primo problema è quello dell'ancoraggio dei conduttori: infatti sembra che fissando meccanicamente bene i conduttori, si riducano i fenomeni di instabilità di carattere elettrico. Ricordiamo che trattandosi di alti campi magnetici in gioco gli sforzi elettrodinamici sono considerevoli. Per bobine con campi magnetici sino a qualche decina di migliaia di gauss sembra conveniente incollare i conduttori con araldite oppure spalmare ogni strato dell'avvolgimento con grasso al silicone che, alle temperature dell'elio liquido, divenendo solido, blocca le spire tra loro.

La corrente viene addotta in generale ai magneti in bagno d'elio mediante fili di rame o di altri metalli puri [34, 35] che discendono dall'alto del dewar; questi fili conducono molto calore e fanno aumentare il consumo d'elio. Questo inconveniente è ovviamente tanto più grave quanto maggiore è la corrente di alimentazione del magnete. Un conduttore ben dimensionato per una corrente di circa 50 A provoca l'evaporazione di qualche decimo di l/h di elio liquido. Se il dewar è ben progettato i conduttori di discesa rappresentano la maggior fonte di consumo di elio.

Quando è richiesto un campo magnetico di intensità costante nel tempo, si può ovviare all'inconveniente predetto realizzando dispositivi per cortocircuitare la bobina con un filo superconduttore in modo che dopo averla ec-

citata si possa disconnettere i cavi di alimentazione e toglierli addirittura dal bagno d'elio. Naturalmente durante il periodo di alimentazione del magnete questo filo di corto circuito deve essere mantenuto allo stato normale (per es. tenendone una sua parte a temperatura maggiore a quella di transizione). Questa soluzione inoltre ha il vantaggio di permettere una stabilizzazione del campo entro valori molto stretti.

Per l'eccitazione di un magnete superconduttore sono stati proposti anche dei dispositivi noti come « pompe di flusso » [11] il cui principio di funzionamento è il seguente (v. fig. 11): il magnete superconduttore è corto-

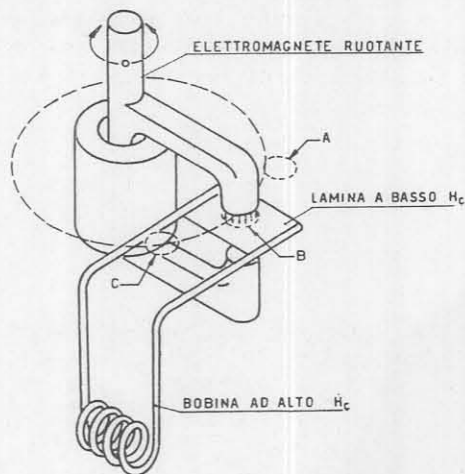


Fig. 11. — Schema di funzionamento delle « pompe di flusso ».

circuitato da una lamina di materiale superconduttore a basso campo magnetico critico; un elettromagnete con traferro viene spostato in modo da passare dalla posizione A alla posizione C; nella posizione A il flusso da esso prodotto non è concatenato col magnete superconduttore; nella posizione C esso è invece concatenato. A questo punto si inverte la corrente nell'elettromagnete e si inducono così nella bobina superconduttrice delle correnti; l'elettromagnete viene poi riportato nella posizione A, quindi si inverte di nuovo il campo e il procedimento si ripete. Così ad ogni ciclo di funzionamento si inducono delle correnti corrispondenti ad una variazione di flusso pari a  $2\varphi$  dove  $\varphi$  è il flusso dell'elettromagnete. La laminetta perde la superconduttività solo nella macchia mobile (B) attraversata dal flusso dell'elettromagnete.

Altri problemi che si presentano sono quelli delle connessioni tra filo superconduttore e conduttori di alimentazione e tra due fili superconduttori; quest'ultimo problema diminuisce d'importanza man mano che aumenta la lunghezza degli spezzoni di filo superconduttore forniti dalle ditte. Attualmente si possono avere fili superconduttori lunghi fino a 10 000 m.

L'isolamento di questi magneti può essere eseguito sia con i metodi classici sia con metalizzazione delle parti superconduttrici mediante metalli normali (per es. rame). Con questo secondo tipo d'isolamento si hanno due vantaggi: a) il raffreddamento di tutta la massa di avvolgimento risulta più efficace; b) in caso di transizione verso lo stato normale le sovratensioni sono minori e più rapido è lo smaltimento del calore prodotto.

Qualora si usi invece un isolamento di tipo convenzionale (per es. Mylar) si può ovviare al pericolo delle sovratensioni cortocircuitando tra loro i terminali dei vari

strati di avvolgimento con conduttori di rame oppure addirittura cortocircuitando tra loro tutte le spire dopo aver asportato una piccola parte dell'isolamento.

Un isolamento di tipo convenzionale presenta per contro il vantaggio di conferire una costante di tempo minore alla bobina e rendere più breve il tempo necessario all'eccitazione.

#### 4. - UTILIZZAZIONE DEI MAGNETI SUPERCONDUTTORI.

La possibilità di avere a disposizione alti campi magnetici riveste una notevole importanza sia per i laboratori di fisica sia per le applicazioni di tipo elettrotecnico.

Per quanto riguarda le utilizzazioni nel campo della fisica ricorderemo che magneti superconduttori di piccole dimensioni sono ormai correntemente impiegati in ricerche di fisica dello stato solido a bassa temperatura (proprietà di trasporto dei solidi, superconduttività, effetti magneto-ottici, effetto De Haas van Alphen, ecc.). Nel campo della fisica nucleare e delle alte energie sono previste molte applicazioni (magneti per camere a bolle, lenti magnetiche, analizzatori, acceleratori di particelle, ecc.) che però richiedono magneti di dimensioni notevoli.

Dimensioni notevoli ( $1 \div 2 \text{ m}^3$  di volume utile) e campi dell'ordine di 40 kGs sono pure richieste nella fisica dei plasmi, in particolare per ciò che riguarda la conversione diretta del calore in energia elettrica (macchine MHD) [36]. A questo riguardo si può senz'altro affermare che proprio la realizzazione di magneti superconduttori di questo tipo assicurerebbe soluzioni economicamente accettabili per le tecniche MHD il cui impiego altrimenti sarebbe limitato dall'enorme costo d'esercizio dei magneti tradizionali.

Ricordiamo infine alcune applicazioni di tipo elettrotecnico quali magneti per forni ad induzione, trasformatori, macchine elettriche, ecc.

Manoscritto pervenuto il 14 marzo 1966.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] J. E. KUNZLER et al.: *Superconductivity in  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  at high current density in a magnetic field of 88 kgauss.* - « Phys. Rev. Letters », 6, 89, (1961).
- [2] J. E. KUNZLER: *Superconductivity in high magnetic fields at high current densities.* - « Rev. Mod. Phys. », 33, 501, (1961).
- [3] M. TANENBAUM and W. V. WRIGHT: *Superconductors.* - « Interscience Publ. », New York, 1962.
- [4] H. RIEMERSMA et al.: *Flux jumping and degradation in superconducting solenoids.* - « Westinghouse Res. Lab. », Scientific paper, 63-128-280.
- [5] Y. B. KIM: *Superconducting magnets and hard superconductivity.* - « Phys. Today », 17, 21, (1964).
- [6] E. S. BOROVIK et al.: *Magnetic flux jumps in hard superconductors in pulsed magnetic fields.* - Jetp 22 (1966).
- [7] B. B. GOODMAN: *The electrodynamic of flux penetration in superconductors.* - « Phys. Letters », 18, 8, (1965).
- [8] H. O. LORCH: *On the movement of flux lines in a type II superconductors.* - « Phys. Letters », 17, 196, (1965).
- [9] R. HANCOX: *Stability against flux jumping in sintered  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ .* - « Phys. Letters », 16, 208, (1965).
- [10] G. PASOTTI, N. SACCHETTI, G. SACERDOTI, G. SANNA e A. SUSANNA: *« Flux jumps » in anelli superconduttori « hard ».* - In preparazione.
- [11] T. G. BERLINCOURT: *High magnetic fields by means of superconductors.* - « Brit. J. Appl. Phys. », 14, 749, (1963).
- [12] J. BABIŠKIN et al.: *Critical currents of  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  and  $\text{V}_3\text{Ga}$  in trasverse magnetic fields up to 150 kOe.* « Z. Physik », 180, 383, (1964).
- [13] J. B. VETRANO: *High critical current in superconducting Nb-Ti alloy.* - « J. Appl. Phys. », 36, 1179, (1965).
- [14] B. T. MATTHIAS et al.: *Superconductivity of  $\text{Nb}_3\text{Ge}$ .* - « Phys. Rev. », 139, A 1501, (1965).
- [15] J. E. KUNZLER et al.: « Proc. AIME Conf. », Philadelphia 1962 (Interscience Publ., New York, 1963), pag. 105.

- [16] « RCA Rev. », 25, 3, (1964).
- [17] *Technical report « Supercon »* (N. R. C.). - General catalog and specification sheet (July, 2, 1964).
- [18] *Material with superconductivity near the boiling point of hydrogen*. - « Cryogenic Information Report », 3, sez. III, (1965).
- [19] B. W. ROBERTS: *Superconducting materials and some of their properties*. - « Progress in Cryogenics », 4, (1964).
- [20] Z. J. J. STEKLY: *The feasibility of large superconducting coils*. - « AVCO EVERETT Research Report », 160, (1963).
- [21] H. KOLM et al.: *High magnetic fields*. - « J. Wiley and Sons », New York, 1962.
- [22] G. PASOTTI, N. SACCHETTI, G. SACERDOTI and G. SANNA: *Some experimental results of superconducting solenoids*. - « Nuclear Instr. and Meth. », 27, 275, (1964).
- [23] V. G. MANUCLOV: *The calculation of the characteristics of superconducting solenoids*. - Trad. « Soviet Phys. », 10, (1965).
- [24] C. H. ROSNER: *Flux-jumping behaviour of some Nb<sub>3</sub>Sn solenoids*. - « J. Appl. Phys. », 36, 1175, (1965).
- [25] *83 300 gauss 2'' bore superconducting magnet*. - « Cryogenic Information Report », 3, sez. III, (1965).
- [26] W. B. SAMPSON: *112 kgauss superconducting magnet*. - « Rev. Sci. Instr. », 36, 4, (1965).
- [27] C. LAVERIK and G. M. LOBEL: *A large high-field superconducting magnet system*. - « Rev. Sci. Instr. », 36, 825, (1965).
- [28] D. N. CORNISH et al.: *Eight-inch aperture superconducting coils*. - « Cryogenics », 5, 132, (1965).
- [29] Z. J. J. STEKLY et al.: *27.6 cm internal diameter superconducting magnet*. - « Rev. Sci. Instr. », 36, 1291, (1965).
- [30] J. R. ROTH et al.: *Superconducting magnet facility for plasma physics research*. - « Rev. Sci. Instr. », 36, 1481, (1965).
- [31] D. N. CORNISH et al.: *Some experiments relating to degradation of large superconducting coils*. - « Phys. Letters », 16, 18, (1965).
- [32] *Superconducting magnetic lens*. - « Cryogenic Information Report », 3, sez. III, (1965).
- [33] W. B. SAMPSON et al.: *Superconducting pseudo Helmholtz coil*. - « Rev. Sci. Instr. », 36, 1081, (1965).
- [34] S. DEINNESS: *The production and optimization of high current leads*. - « Cryogenics », 5, 269, (1965).
- [35] P. W. MATTHEWS et al.: *A study of heat leaks into cryostats due to electrical leads*. - « Cryogenics », 5, 213, (1965).
- [36] G. DE LILE: *Etude comparee de divers procedes d'obtention d'un champ magnetique pour generateurs MHD*. - *Industriel Symposium International sur la Production MHD d'Energie Electrique*, Paris 1964, vol. II, pag. 1009.
- [37] *The 4th Symposium on Engineering Problems in Thermonuclear Research*. - Roma, 1966.