

COMITATO NAZIONALE PER L'ENERGIA NUCLEARE
Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-63/26
23. 4. 1963.

G. Pasotti, N. Sacchetti, G. Sacerdoti, G. Sanna:
I MAGNETI SUPERCONDUTTORI. -

Nota interna : n. 195

Servizio Documentazione
dei Laboratori Nazionali di Frascati del CNEN
Casella Postale 70 - Frascati (Roma)

Nota interna: n. 195
23 Aprile 1963

G. Pasotti, N. Sacchetti, G. Sacerdoti e G. Sanna:
I MAGNETI SUPERCONDUTTORI

- 1) I superconduttori "hard" e la possibilità di costruire magneti ad alto campo.

L'esistenza di elementi superconduttori, tali cioè che a temperatura sufficientemente bassa possono portare correnti elettriche senza nessuna dissipazione termica, suggerì, già all'epoca delle prime ricerche in questo campo, l'idea di costruire solenoidi e magneti capaci di generare alti campi.

D'altra parte il fatto che, la maggior parte dei superconduttori quando siano posti in un campo magnetico sufficientemente intenso (campo critico H_C) perdano le loro insolite proprietà elettriche e ritornino nello stato di conduzione normale, limita notevolmente le applicazioni prima accennate.

Il campo critico H_C dipende dalla temperatura e s'aggira su un valore medio di poche centinaia di gauss per la maggior parte dei superconduttori noti (superconduttori "soft"). Inoltre la massima densità di supercorrente sopportabile è condizionata dal valore del campo critico nel senso che quando il campo magnetico creato dalla corrente stessa raggiunge il valore critico si ha la transizione verso lo stato normale. In queste condizioni fluisce nel superconduttore quella che è comunemente chiamata "corrente critica". Un altro fenomeno strettamente legato allo stato superconduttore è che l'induzione magnetica B all'interno di un materiale superconduttore è nulla (effetto Meissner)⁽¹⁾.

Conseguenza di tale effetto è che le correnti supercondut-

trici praticamente scorrono alla superficie dei superconduttori penetrando all'interno del materiale solo per una distanza λ di circa 10^{-5} cm (profondità di penetrazione).

Questi fatti sperimentali, per quanto accennati in maniera sommaria ed incompleta, caratterizzano il comportamento magnetico della maggior parte dei superconduttori, altrimenti detti superconduttori "soft", e pongono chiaramente un limite alla costruzione di bobine superconduttrici con questo metodo.

Nel 1930, tuttavia, De Haas e Voogd⁽²⁾ scoprirono che alcune leghe, ad esempio l'eutettico Pb - Bi hanno campi critici notevolmente alti, dell'ordine di 15 Kgauss, ed una temperatura di transizione relativamente elevata, compresa tra 10 e 20 °K.

Successivamente analoghe proprietà furono scoperte in altre leghe e anche in alcuni elementi come il niobio.

Questi nuovi superconduttori vennero denominati superconduttori "hard" ed è utile dire brevemente in cosa si differenziano da quelli "soft" per meglio comprendere come con essi sia possibile costruire solenoidi ad alto campo.

a) In essi non si manifesta più l'effetto Meissner e quindi l'induzione B non è nulla nel loro interno. La corrente non è più di tipo superficiale ma probabilmente scorre in filamenti⁽³⁾ (Mendelsohn, 1935) di diametro variabile inferiore ai 100 Å e il cui numero è proporzionale all'area della sezione di filo superconduttore in esame. L'origine fisica di tali filamenti non è ben capita ma presumibilmente essi sono associati alla presenza di dislocazioni nella matrice cristallina, ipotesi, questa, suffragata dal fatto che la massima corrente sopportabile da un filo aumenta notevolmente a seconda che il materiale è stato lavorato a freddo o no.

b) Il campo critico è in genere molto alto e s'aggira di solito tra 50 ÷ 100 Kgauss potendo arrivare a valori dell'ordine di 300 Kgauss per le leghe V-Ga.

c) La densità di corrente critica è anch'essa elevata, dell'ordine di 10^5 Amp/cm².

E' chiaro che con questo tipo di superconduttori si possono realizzare bobine ad alto campo progettabili, entro certi limiti, con le usuali relazioni valide per i conduttori normali. Vedremo d'altra parte in seguito quali sono i fenomeni collaterali che si manifestano in simili bobine, dovuti al fatto che sfruttiamo un modo di conduzione del tutto insolito.

2) Alcuni dati sperimentali sui superconduttori ad alto campo critico. Materiali utilizzati per la costruzione dei magneti.

Le prime indagini sistematiche sulle proprietà magnetiche di certe leghe superconduttrici in vista dell'utilizzazione di tali composti per la costruzione di magneti iniziano praticamente nel 1959(4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12). Si tratta in genere di misure effettuate su spezzoni di filo superconduttore percorsi da forte corrente ed immersi in campi magnetici elevati normali alla direzione della corrente. Le misure di solito venivano condotte in due maniere diverse:

a) A campo magnetico costante si aumentava la corrente I fino a rilevare ai capi del filo superconduttore una piccolissima caduta di tensione. Il valore di I per cui avveniva questo si assumeva come corrente critica relativa a quel campo magnetico.

b) A corrente costante si determinava H_c con operazioni analoghe.

Di solito entrambe le misure coincidevano. In fig. 1 è riportato l'andamento generico delle curve ottenute con questi

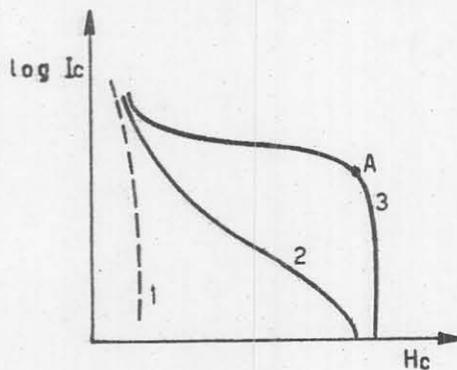


FIG.-1-

metodi. Le tre curve si distinguono tra loro in quanto la 1 si riferisce a materiale ricotto, la 2 a materiale parzialmente incrudito e la 3 a materiale molto incrudito.^(*)

A titolo d'esempio nel caso della lega Nb-Zr 33% non ricotta il punto A è individuato dai valori $I_c=10^4$ Amp/cm² e $H_c=70$ Kgauss.

La figura 1 precisa inoltre quanto detto al paragrafo 1

circa l'influenza dell'incrudimento sulle caratteristiche magnetiche dei superconduttori "hard". In genere queste caratteristiche migliorano, nel senso che un materiale incrudito, a parità

^(*) - Pare inoltre che le tre curve tendano tutte allo stesso valore limite di campo per correnti tendenti a zero.

di densità di corrente, sopporta un campo magnetico molto più elevato rispetto a quello tollerabile da un materiale ricotto. I materiali fino ad oggi ottenuti non sono stati scoperti empiricamente ma sfruttando le cosiddette "regole di Matthias" che possiamo brevemente riassumere come segue:

- a) Gli elementi superconduttori sono compresi tra gli elementi di valenza 2 e 8.
- b) Per gli elementi di transizione, la temperatura critica T_c ha un massimo per le valenze 3, 5 e 7.
- c) Per una data valenza, certe strutture cristalline sono più favorevoli a che l'elemento sia superconduttore.

In base a questi criteri e tenendo presente come si modifica il numero d'elettroni di valenza d'una lega al variare della percentuale d'uno dei suoi componenti, si comprende come sia possibile ottenere leghe superconduttrici ed ottimizzarne le caratteristiche.

I migliori materiali che è stato possibile ottenere sono i seguenti:

- a) Mo_3Re , facilmente trafilabile e capace di sopportare a 4,2°K, un campo di circa 14 Kgauss con una densità di corrente pari a $2 \cdot 10^4$ Amp/cm².
- b) Il composto intermetallico Nb_3Sn con una densità di corrente approssimativamente di $1,5 \cdot 10^5$ Amp/cm² e un campo critico circa di 88 Kgauss. Purtroppo tale composto è molto fragile ed è impossibile trafilarlo. Una via aperta alla utilizzazione di questo materiale è di depositarlo su nastri sia metallici che isolanti. In questo caso il problema di costruire bobine risulterebbe ulteriormente complicato da questioni di forma legate alla particolare geometria del deposito.
- c) Le leghe Nb - Zr. Questi due elementi sono alligabili in diverse percentuali e le leghe che si ottengono si possono trafilare con relativa facilità. Il campo magnetico critico aumenta col crescere della percentuale di zirconio fino a raggiungere il massimo valore per un contenuto di zirconio compreso tra il 65 e il 75%; poi decresce molto rapidamente. La corrente critica è massima per un contenuto di zirconio tra

il 25 e il 35% poi si riduce notevolmente a concentrazioni inferiori. E' con queste leghe che fino ad ora sono stati ottenuti i risultati migliori.

Aggiungiamo a questo elenco i composti intermetallici a struttura tipo tungsteno β , V_3Si e V_3Ga non ancora completamente studiati ed il cui campo critico dovrebbe raggiungere i 300 Kgauss. Sfortunatamente come nel caso del Nb_3Sn questi materiali sono fragili e di preparazione difficoltosa, ma sono a tutt'oggi gli unici su cui si possa contare per costruire in qualche modo (p. es. depositi su nastro) solenoidi ad altissimo campo, oltre i 100 Kgauss.

3) Criteri per la costruzione delle bobine superconduttrici.

Usualmente i solenoidi superconduttori vengono costruiti suddividendo l'avvolgimento in due o più sezioni coassiali(13, 14, 15, 16, 17). Questo per il semplice motivo che man mano che ci si allontana verso l'esterno il filo superconduttore è immerso in un campo magnetico sempre meno intenso e di conseguenza sopporta senza pericoli una corrente superiore. La figura 2 illustra schematicamente com'è costituita tale tipo di bobina nel caso di tre sezioni sovrapposte.

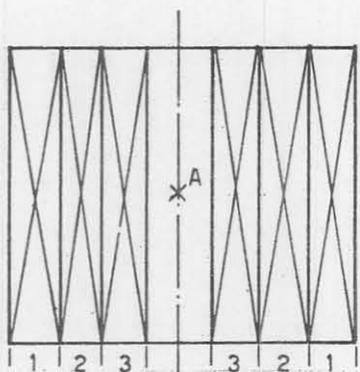


FIG.-2-

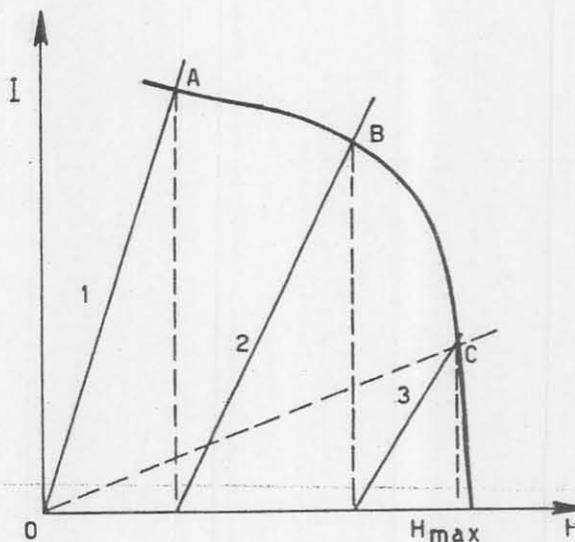


FIG.-3-

Si possono allora alimentare separatamente le varie sezioni con correnti diverse, crescenti verso l'esterno. E' logico che le varie correnti devono essere scelte in modo che in nessuna sezione si superino le condizioni critiche.

Il vantaggio che si ottiene con tale disposizione appare chiaro considerando la curva I_C in funzione di H_C per un certo materiale. In figura 3 è riportata una curva generica di questo tipo mentre le rette contrassegnate dai numeri 1, 2 e 3 rappresentano le relazioni lineari tra H ed I per le rispettive sezioni che compongono una bobina. I punti A, B e C sono i punti di lavoro "ottimo" per ciascun avvolgimento. In effetti ogni sezione lavora in condizioni inferiori a quelle critiche. Evidentemente il campo massimo raggiungibile con questo sistema è quello che corrisponde al punto C.

La linea tratteggiata OC rappresenta invece la retta di lavoro d'un solenoide ad avvolgimento unico che raggiunge lo stesso campo H_{max} . Col primo sistema vi è un risparmio notevole sulla quantità di filo da impiegare, il che da un punto di vista pratico permette minor ingombro e minor quantità d'elio per il raffreddamento ed economicamente, trattandosi di materiale molto costoso, un risparmio non indifferente.

Questa tecnica costruttiva può essere ulteriormente migliorata se s'impiega per la costruzione d'un solenoide filo di diversa costituzione per ogni sezione in modo che esternamente si trovi il filo ad alta corrente critica e basso campo critico e il contrario accada per le sezioni interne.

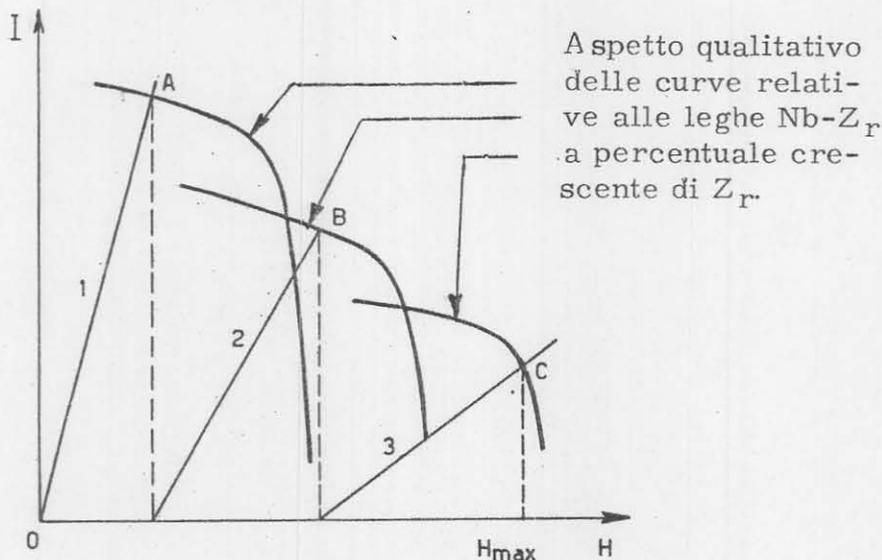


FIG.-4-

La figura 4 illustra chiaramente questa maniera di procedere. Così, sfruttando le leghe a diversa percentuale Nb-Zr, Riemersma e collaboratori hanno costruito recentemente (dicembre 1962) un solenoide a sei sezioni coassiali che ha raggiunto 68 Kgauss di campo massimo.

Notiamo ancora che la corrente che scorre in un filo superconduttore è proporzionale al raggio o al quadrato del raggio secondo che il superconduttore è "soft" oppure "hard". Questo può essere immediatamente capito ricordando quanto detto circa la profondità di penetrazione e la struttura a filamenti. In questo senso si può dire che la conduzione elettrica attraverso un filo superconduttore "hard" assomiglia in qualche modo alla conduzione normale.

Prima di concludere questo paragrafo vogliamo accennare ancora al problema tecnico dei contatti tra il filo superconduttore e l'alimentazione esterna, problema estremamente importante perchè qualsiasi resistenza ai contatti genera calore danneggiando così le caratteristiche superconduttrici del filo adiacente. Uno dei metodi migliori per evitare questo effetto, metodo adottato in pratica nei nostri solenoidi, consiste nel realizzare il contatto pressando per una certa lunghezza tra due dischi di rame ben puliti i terminali del filo.

Senza insistere sui particolari costruttivi diremo che questo sistema è l'unico che ci ha dato risultati soddisfacenti anche con correnti elevate.

4) Risultati sperimentali.

Per la costruzione dei nostri solenoidi abbiamo usato filo di Nb - Zr a percentuale diversa di zirconio, del diametro di 0,25 mm, fornitoci dalla Wah Chang Corporation, Albany, Oregon.

Le tabelle I e II riassumono i principali dati costruttivi e sperimentali delle bobine da noi realizzate, tralasciando naturalmente i risultati meno interessanti.

I valori di campo e di corrente riportati nella tabella II sono quelli oltre i quali si aveva transizione verso lo stato normale. La corrente è stata misurata direttamente dall'amperometro dell'alimentatore mentre il campo massimo è stato ricavato estrapolando la retta di lavoro del solenoide, determinata sperimentalmente, fino a quel valore della corrente.

La bobina A, contrariamente alle previsioni, sopportava corrente superiore nella sezione interna. Ciò può imputarsi ad una differenza nella lavorazione a freddo delle due sezioni causata da un diverso maneggiamento durante l'avvolgimento delle stesse ed al fatto che il filo all'inizio della sezione esterna conteneva probabilmente residui dei materiali spuri provenienti dall'operazione di trafilatura. Questa ultima ipotesi è confermata dal fatto che le caratteristiche superconduttrici di questo filo miglioravano nettamente amputandone le estremità.

La qualità del filo superconduttore è molto sensibile a qualsiasi ricottura che avvenga anche in zone limitate di esso. E' questo che comunemente accade durante la transizione verso lo stato normale in cui il filo percorso da elevata corrente sviluppa calore danneggiandosi.

In generale il solenoide che abbia subito un trattamento di questo genere non è più "buono" nel senso che non è più capace di arrivare ad una elevata corrente critica. Abbiamo spesso trovato che I_c si riduceva fino all'80% del valore prima della transizione. Può essere comunque che l'incrudimento che si ottiene disfacendo e riavvolgendo il solenoide sia sufficiente per ripristinare, se non addirittura migliorare, le caratteristiche superconduttrici del filo.

Vogliamo ancora sottolineare che il più alto campo raggiunto (38.000 gs) ottenuto con la bobina A, è rappresentato dal punto A vicino al "ginocchio" della curva I_c in funzione di H_c per filo Nb-Zr 25%. In sostanza questo vuol dire che si è riusciti a lavorare in condizioni abbastanza buone perchè è evidente che i valori di corrente e di un campo corrispondenti al "ginocchio" sono un giusto compromesso tra la necessità d'ottenere un alto campo e l'economia di spazio e di materiale.

Non è possibile fare un confronto, che abbia significato, con i risultati di altri sperimentatori, in particolare quelli di Hulm⁽¹⁶⁾ e collaboratori che riferiscono un campo di 58.000 gs a 12 e di Hake e collaboratori⁽¹⁵⁾ che riportano 59.000 gs a 19 A. Questo perchè non conosciamo esattamente le caratteristiche del loro materiale. Tali caratteristiche possono essere diverse in quanto sono molto sensibili a piccole differenze nel contenuto d'impurezza e nel processo di alligaggio e di trafilatura del filo.

Resta comunque da dire che essi hanno impiegato molto più materiale e di conseguenza maggior numero di spire dei nostri solenoidi.

Tabella I

Bobina	Numero Sezioni Coassiali	Peso filo (Kg)	Numero spire sezione esterna	Numero spire sezione interna	diametro interno (mm)	diametro esterno (mm)	Altezza (mm)	Materiale
A	2	0,220	4.020	2.666	6	48	30	Nb - Zr 25%
B	1	0,950	21.320	-	6	57	85	Nb - Zr 33%
C	2	0,950	10.550	10.550	6	57	85	Nb - Zr 33%
D	1	0,280	8.260	-	22	38	120	Nb - Zr 33%

N. B. - La bobina A era di filo nudo; l'ossido superficiale era sufficiente per assicurare l'isolamento tra spira e spira; tra strato e strato c'era invece un foglio di rame. - Le bobine B, C e D erano invece isolate con nylon.

Tabella II

Bobina	Campo max in gauss	Corrente max (Amp)		Densità di corrente max (Amp/cm ²)		Osservazioni
		sez. est.	sez. int.	sez. est.	sez. int.	
A	36.000	11	24	$2,2 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	Dopo aver disfatto e riavvolto la bobina da 36 Kgs scambiando i fili delle due sezioni.
A	38.000	30	19	$6 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	
B	29.000	9	-	$1,8 \cdot 10^4$	-	Dopo aver disfatto e riavvolto la bobina da 29 Kgs.
B	16.000	5	-	$0,9 \cdot 10^4$	-	
C	29.500	10	10	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	Avvolta col filo che costituiva la bobina B. Le due sezioni erano alimentate in serie.
D	8.200	8	-	$1,6 \cdot 10^4$	-	Con questa corrente la bobina era ancora superconduttrice.

5) Fenomeni che limitano il funzionamento dei solenoidi superconduttori. Il campo residuo.

Dal grafico della figura 5 appare subito come il punto massimo di lavoro d'un solenoide superconduttore giaccia al di sotto della curva I_c in funzione di H_c , curva relativa ad una spezzatura di filo percorso da corrente ed immerso in un campo magnetico esterno.

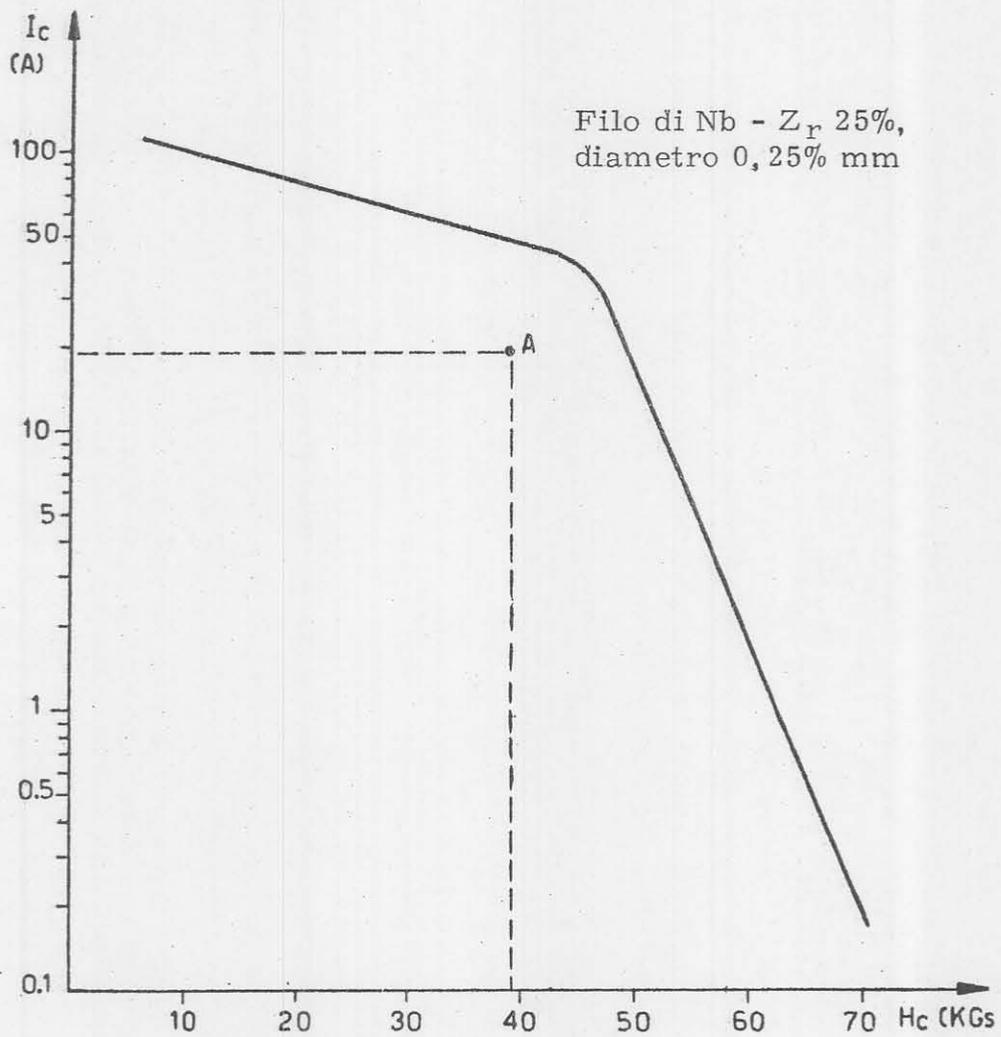


Fig. 5

Questo è un fatto del tutto generale; cioè un solenoide superconduttore possiede caratteristiche di corrente e di campo critici inferiori a quelle di un tratto corto di filo.

Le ragioni per cui accade questo non sono interamente capite e sono legate a tutta la fisica dei superconduttori "hard" che non è a tutt'oggi completamente chiarita.

Innanzitutto è statisticamente molto probabile che su tutta la lunghezza del filo che costituisce un solenoide vi sia qualche zona con cattive caratteristiche superconduttrici. Ciò naturalmente basta per compromettere il buon funzionamento del magnete.

Questo però non basta da solo per giustificare il fenomeno accennato prima e dobbiamo tener conto di altri fattori. E' stata avanzata l'ipotesi che esista un "effetto di prossimità" secondo il quale il numero di filamenti che vi sono in una spira superconduttrice è influenzato dalla vicinanza o meno di altre spire. In queste condizioni il numero di filamenti si riduce e si spiegherebbe così perchè un solenoide superconduttore funziona peggio di quanto calcolato. C'è anche una certa evidenza sperimentale di tutto questo, dimostrata dal fatto che avvolgendo una bobina prima con le spire accostate poi con le spire un pò distanziate tra di loro migliorano le sue caratteristiche superconduttrici. Non esiste però una valutazione quantitativa di tale effetto.

Il fenomeno invece che più desta interesse nello studio delle proprietà dei solenoidi superconduttori e più da vicino sembra legato al peggioramento delle caratteristiche superconduttrici è l'esistenza di un campo magnetico residuo. Brevemente questo fenomeno consiste nel fatto che un magnete superconduttore dopo essere stato diseccitato mantiene intrappolato nel suo interno una parte del campo magnetico.

Questo campo residuo è lungi dall'essere uniforme e misurando il suo andamento lungo l'asse del solenoide si vede che in generale assume il suo massimo valore vicino alle estremità della bobina. La sua direzione è inoltre di solito contraria a quella del campo principale.

L'origine di questo campo residuo non è del tutto chiara. Evidentemente non può trattarsi d'un effetto di correnti persistenti che si chiudono sulle spire del solenoide in quanto esse sono isolate tra di loro e la geometria del dispositivo non è tale da dar luogo a regioni superconduttrici molteplicemente connesse per cui

il flusso concatenato si conserva.

Si ricorre allora ad una descrizione del fenomeno supponendo che si generino all'interno del filo piccoli anelli di corrente persistente, come illustrato in figura 6, il che corrisponde alla formazione di dipoli magnetici distribuiti spazialmente in una certa maniera. L'effetto globale di questi dipoli è allora di generare un campo magnetico che si sovrappone a quello creato dalla corrente di alimentazione e che resta anche quando il magnete è diseccitato.



FIG.-6-

Fisicamente si pensa che questi dipoli siano associati a deformazioni locali cristalline o ad impurità chimiche, cosa del resto plausibile dal momento che molte proprietà dei superconduttori "hard" sono legate a tali fattori.

Il motivo per cui s'inducono queste correnti è da ricercarsi nel fatto che il solenoide reagisce al campo creato dalla corrente che lo alimenta cercando di mantenere il flusso concatenato costante. E' difficile valutare a priori qual'è la distribuzione spaziale dei dipoli; essa non è legata in modo semplice agli effetti di autoinduzione come i risultati sperimentali dimostrano, conviene piuttosto ricavarla a posteriori dopo aver misurato il campo residuo.

E' chiaro, dopo quanto esposto, come queste correnti di dipolo, sovrapposte alla corrente d'alimentazione, possono portare qualche zona dell'avvolgimento in condizioni critiche prima d'aver raggiunto al centro del solenoide queste condizioni.

Abbiamo effettuato misure di campo residuo sui nostri solenoidi e i principali risultati da noi ottenuti sono riassunti qui sotto:

a) Campo residuo dopo aver portato il magnete oltre le condizioni critiche. Dopo questo ciclo il magnete aveva preso le sue caratteristiche e non sopportava più di 1 ampère di corrente. I grafici relativi a misure di questo tipo sono riportati in figura 7 e si riferiscono al campo residuo delle bobine B e C.

I diagrammi a), b) e c) danno l'andamento assiale del campo residuo della bobina B dopo che aveva raggiunto 16.000 gs e si era tentato inutilmente per due volte di risalire in corrente. Il diagramma d) si riferisce invece alla bobina C dopo transizione a 29.500 gs. Se chiamiamo h il rapporto percentuale tra valore massimo del campo residuo e campo alla transizione si ha nel caso a) $h = 2,5\%$ e nel caso d) $h = 1\%$.

b) Campo residuo senza aver superato le condizioni critiche del magnete. Nella figura 8 sono riportate alcune misure di questo tipo, nel grafico a) quelle relative alla bobina C dopo salita a 29.500 gs e nel grafico b) quelle relative alla bobina D dopo salita a 8.200 gs.

Si aveva rispettivamente nei due casi $h = 2,3\%$ e $h = 5\%$. Confrontando i grafici di fig. 7 con quelli di fig. 8 risulta subito evidente l'andamento più regolare di questi ultimi; questo corrisponde semplicemente al fatto che nel magnete di fig. 8 le condizioni fisiche macroscopiche sono esattamente definite: il materiale è tutto superconduttore e non sono intervenute sostanziali modifiche a questo stato. Viceversa negli altri solenoidi le cose non sono più così semplici. Evidentemente vi sono ancora larghe zone superconduttrici della cui esistenza la presenza d'un così elevato campo residuo è la miglior prova. Vi sono d'altra parte zone in cui si è avuta ricottura all'atto della transizione e che non sono quindi più capaci di sopportare elevate correnti. Si può dall'andamento del campo residuo risalire alla distribuzione di queste zone e delle correnti di dipolo indotte nelle zone superconduttrici, ma un calcolo di questo genere non è molto significativo in quanto il fenomeno ha di volta in volta un aspetto diverso. Resta cioè difficile "predire" dove si può avere transizione verso lo stato normale, essendo questo essenzialmente legato allo stato di formazione plastica del filo difficilmente controllabile punto per punto.

Notiamo ancora nel caso di fig. 8 che il rapporto h è notevolmente diverso per i due grafici ed è minore per quel solenoide con diametro interno maggiore. Non abbiamo ancora sufficienti dati per poter stabilire una correlazione precisa tra questi due parametri, comunque c'è un'indicazione secondo cui muovere alcune nostre prossime ricerche.

A conclusione vogliamo sottolineare che la presenza del campo residuo e lo studio dei parametri su cui giocare per diminuirlo hanno una notevole importanza per la futura progettazione di magneti sia per quanto riguarda i massimi campi ottenibili sia per ciò che concerne l'uniformità degli stessi.

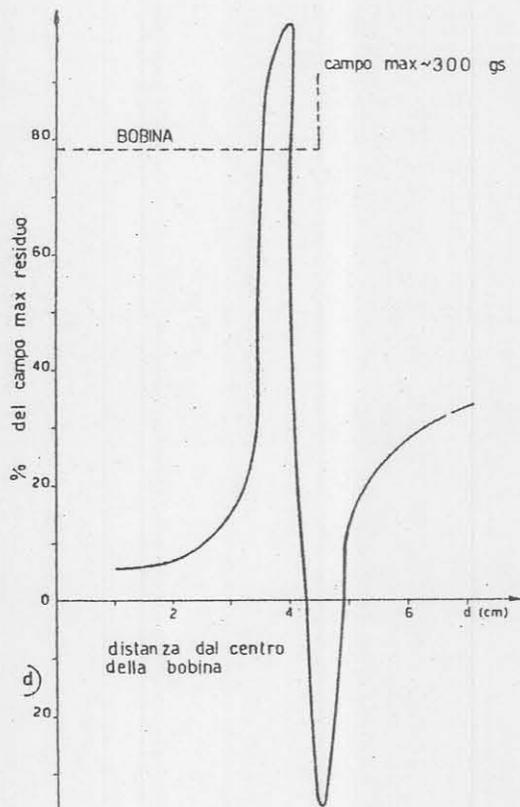
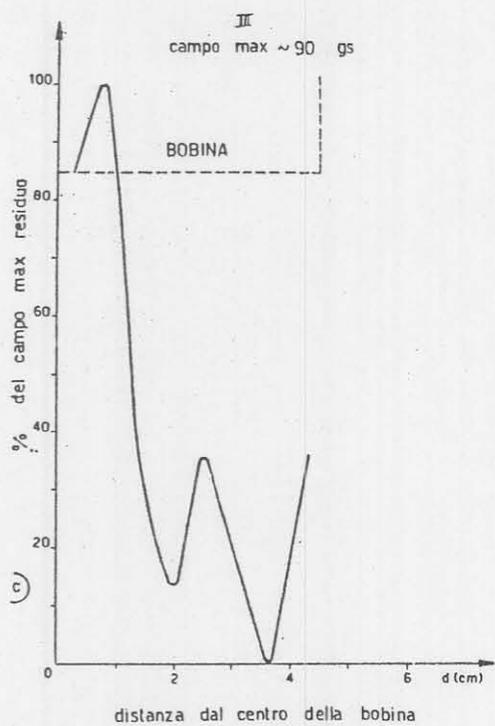
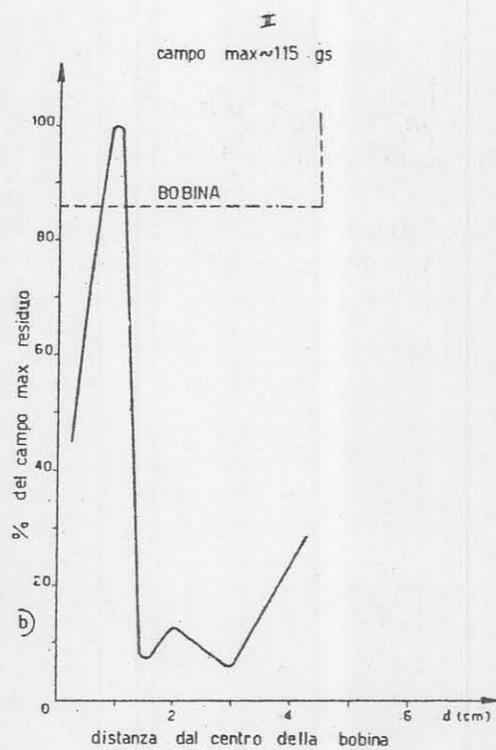
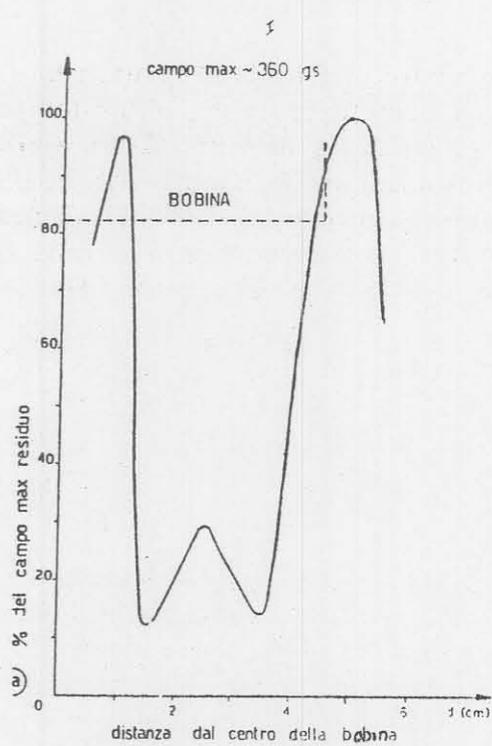


FIG. 7

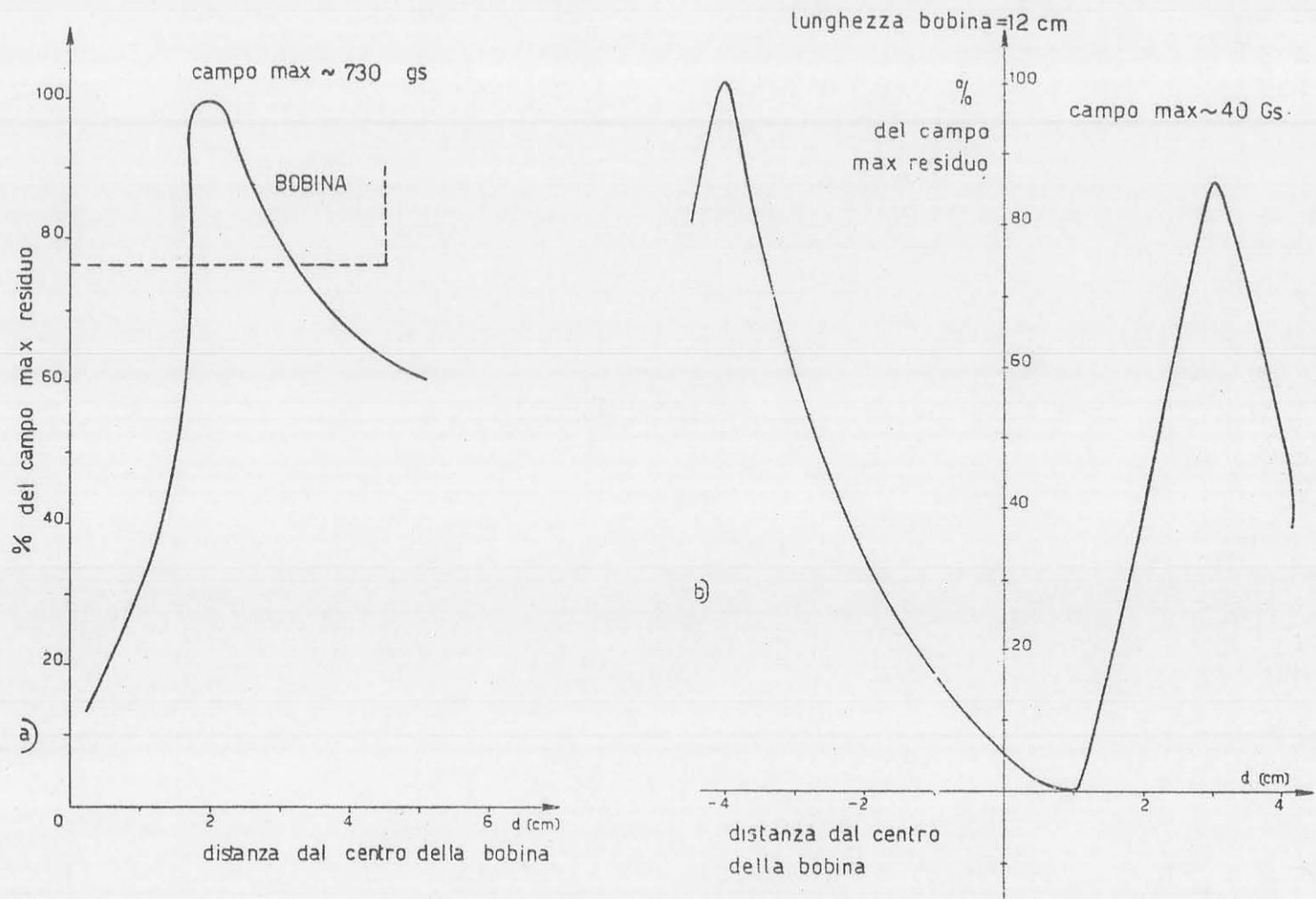


FIG. 8

Desideriamo vivamente ringraziare il Dr. Modena ed il Dr. Scaramuzzi per averci fornito l'attrezzatura e l'elio per le prove di cui sopra.

Bibliografia

- (1) - Meissner W. e Ichsenfeld R., *Naturwissenschaften* 21, 787 (1933)
- (2) - De Haas W. J. e Voogd J., *Commun. Phys. Lab. Univ.* (1930)
- (3) - Mendelssohn K., *Proc. Roy. Soc. A* 152, 34 (1935)
- (4) - Aron P. R. e Hernandez H. P. - UCRL 9819 (1961)
- (5) - Aron P. R. e coll., UCRL 9939 (1961)
- (6) - Arp V. D. e coll., *Phys. Rev. Letters* 6, 453 (1961)
- (7) - Autler S. H., *High magnetic fields* (The M. I. T. Press, Cambridge, 1962) p. 324
- (8) - Betterton J. O. e coll., *Phys. Rev. Letters* 6, 532 (1961)
- (9) - Berlincourt T. G. e coll., *Phys. Rev. Letters* 6, 671 (1961)
- (10) - Kunzler J. E. e coll., *Phys. Rev. Letters* 6, 89 (1961)
- (11) - Kunzler J. E., *Revs. Modern Phys.* 33, October 1, (1961)
- (12) - Le Blanc M. A. R., *Phys. Rev.* 124, Dec. 1 (1961)
- (13) - Arp V. e Kropschot R. H., *Cryogenics*, 2 Oct. (1962)
- (14) - Autler S. H., *Rev. Sci. Instr.* 31, 369 (1960)
- (15) - Hake R. R. e coll., *High magnetic fields* (The M. I. T. Press, Cambridge, 1962) p. 341
- (16) - Hulm J. K. e coll., *High magnetic fields* (The M. I. T. Press, Cambridge, 1962) p. 332
- (17) - Kunzler J. E. e coll., *J. Appl. Phys.* 32, 325 (1961)
- (18) - Riemersma H. e coll., *J. Appl. Phys.* 33, Dec. (1962)
- (19) - Aron P. R. e Hitchcock H. C., *Bull. Am. Phys. Soc.* 7, 408 (1962)
- (20) - Montgomery D. B., *Appl. Phys. Letters* 1, 41 (1962)