

Copus 260
coll. 2

ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE

Sezione di Milano

INFN/TC-98/11
10 Aprile 1998

L. Rossi, G. Volpini, L. Bigoni, S. Zannella, A. Baldini, R. Garrè:

**STUDIO DEL COMPORTAMENTO DEI CAVI SUPERCONDUTTORI AD ALTA
TEMPERATURA CRITICA E COSTRUZIONE DI PROTOTIPI DI AVVOLGIMENTI
MEGNETICI. ACCORDO CISE - EUROPA METALLI - INFN**

PACS: 85.25

*Published by SIS-Pubblicazioni
Laboratori Nazionali di Frascati*

INFN/TC-98/11
10 Aprile 1998

STUDIO DEL COMPORTAMENTO DEI CAVI SUPERCONDUTTORI AD ALTA TEMPERATURA CRITICA E COSTRUZIONE DI PROTOTIPI DI AVVOLGIMENTI MAGNETICI. ACCORDO CISE - EUROPA METALLI - INFN.

L. Rossi, G. Volpini

**Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Milano, INFN-Sezione di Milano
Laboratorio LASA, via fratelli Cervi 201, 20090 Segrate MI - I**

L. Bigoni, S. Zannella

Cise SpA, via Reggio Emilia 39, 20090 Segrate (MI)

A. Baldini, R. Garrè

Europa Metalli, Divisione Superconduttori, Piazzale Luigi Orlando, 55052 Fornaci di Barga (LU)

RIASSUNTO

Questo rapporto riassume l'attività svolta nell'ambito dell'accordo di cooperazione tra CISE, Europa Metalli e INFN (laboratorio LASA della sezione di Milano) sui superconduttori ad alta temperatura critica. Il materiale scelto per raggiungere lo scopo, avvolgimenti per generare campi magnetici, è stato il Bi-2223 stabilizzato con guaina di argento puro in forma di nastro sottile. CISE ha eseguito gli studi volti alla ottimizzazione dei cicli termo-meccanici sul materiale, curando anche gli stadi finali di lavorazione; EM ha curato la parte di design del nastro e la lavorazione fino allo stadio di filo tondo; INFN-LASA ha progettato e realizzato il magnete, come pure i test criogenici. I risultati sono stati abbastanza positivi per quanto riguarda la possibilità di costruire magneti con pezzature di conduttore dell'ordine di 10-20 metri.

1. - INTRODUZIONE

Come stabilito nell'Art.2 e nel relativo Allegato 1 del "Accordo di Cooperazione" si considera raggiunto l'obiettivo stabilito nella prima fase del progetto di ricerca e sviluppo denominato "Studio del comportamento dei cavi superconduttori ad alta temperatura critica per trasporto di energia e costruzione di prototipi di avvolgimenti". Tale obiettivo consiste nella realizzazione di un avvolgimento in grado di generare un campo magnetico di 100 mT alla temperatura di 20 K.

2. - SVILUPPO DI CONDUTTORI DI LUNGHEZZA SUPERIORE AI 100 M

Vengono di seguito riassunte le prove condotte al fine di ottimizzare il processo di fabbricazione di nastri Bi-2223/Ag di lunghezza superiore ai 100 m e le condizioni operative dei vari cicli termomeccanici di rullatura e successiva sinterizzazione. Tali prove miravano a risolvere i problemi di omogeneità della distribuzione della corrente critica lungo i nastri ottenuti per renderli idonei al loro impiego nella produzione di avvolgimenti SAT (Superconduttori ad Alta Temperatura Critica).

Due diversi tipi di nastro Bi-2223/Ag multifilamentare, entrambi realizzati a partire dall'estrusione a caldo di una billetta, sono stati utilizzati per la realizzazione del prototipo di avvolgimento SAT:

- A) nastro 350-filamenti realizzato utilizzando polveri commerciali $\text{Bi}_{1,7}\text{Pb}_{0,3}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ prodotte dalla ditta Solvay avente 350 inserti superconduttivi ed un "fill factor" pari a circa 0,15;
- B) nastro 55-filamenti realizzato utilizzando polveri commerciali $\text{Bi}_{1,8}\text{Pb}_{0,34}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ prodotte dalla ditta Merck avente 55 inserti superconduttivi ed un "fill factor" pari a circa 0,36.

In Fig. 1 sono riportate foto delle billette di assemblaggio e le sezioni dei nastri allo stato finale per il 350 filamenti; il materiale di assemblaggio e la sezione per il nastro a 55 filamenti è invece riportato in Fig.2.

I campioni compositi Bi-2223/Ag hanno subito due trattamenti termomeccanici secondo i quali il filo a sezione circolare avente diametro 1,7 (A) e 1,9 mm (B), è stato trasformato in nastro a sezione rettangolare secondo un percorso di deformazione che prevede una riduzione di spessore per passo pari a circa 10%. La rullatura è stata realizzata imponendo rapporti di riduzione fissi ed uguali per tutti i campioni. Sono stati così ottenuti nastri aventi lunghezza $l \approx 100$ m di sezione $0,285 \times 3,1 \text{ mm}^2$ nel caso dei campioni 350 filamenti e $0,285 \times 3,55 \text{ mm}^2$ nel caso dei campioni 55 filamenti. Successivamente numerose pezzature di entrambi i nastri, aventi lunghezza tipicamente 17 m, sono stati avvolti su supporti cilindrici in materiale refrattario (stumatite) aventi $\phi = 100$ mm

ed hanno subito un primo trattamento termico di sinterizzazione. Il trattamento di sinterizzazione è stato eseguito alla temperatura di 830 °C per 80 ore in atmosfera Ar/O₂ (10% mol di ossigeno).

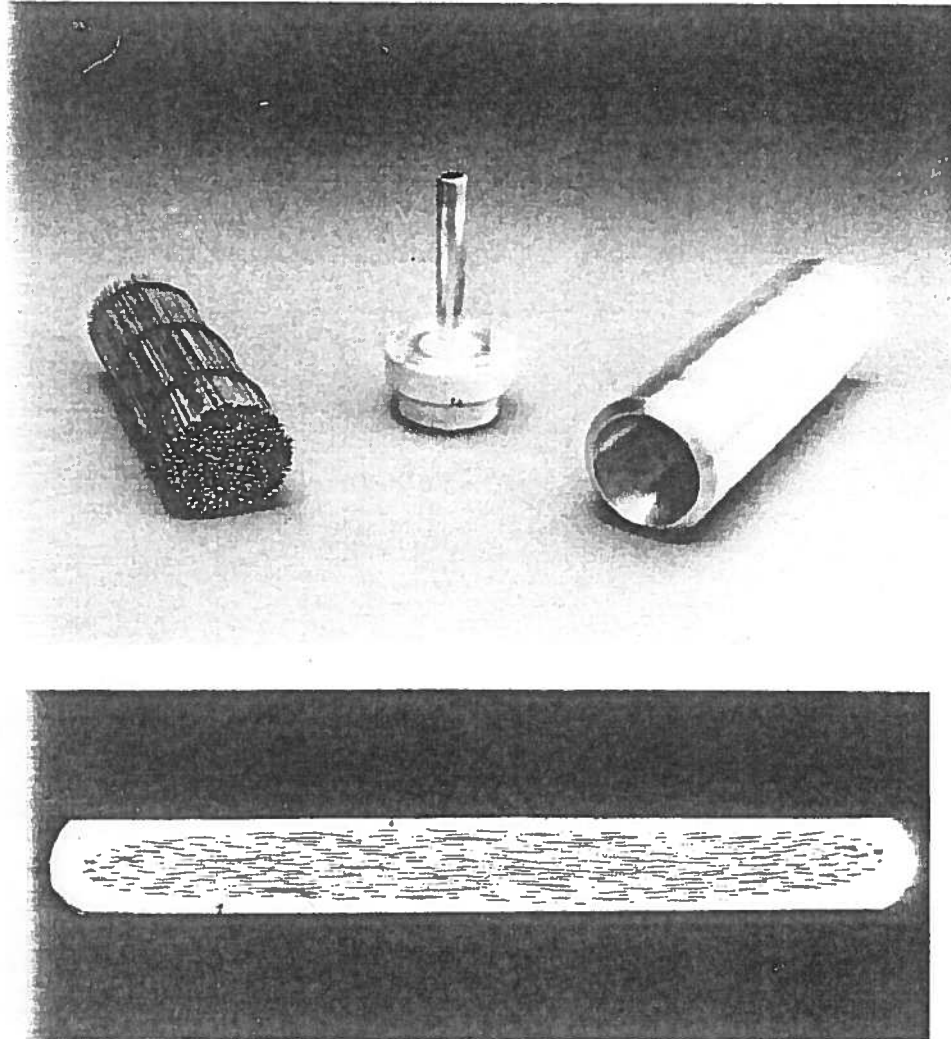


FIG. 1 - Nastro a 350 filamenti : foto del materiale di assemblaggio delle billette (sopra): tubi di argento puro per contenere la polvere di Bi-2223 e tubo grande di contenimento per l'estrusione a caldo.
Foto della sezione del nastro finale (sotto).

Senza venir rimossi dal supporto di reazione sui quali erano stati avvolti, i nastri sono stati caratterizzati elettricamente effettuando misure di corrente critica, in bagno di azoto liquido, disponendo numerosi prelievi di tensione posizionati sia a distanza $l=20$ mm che su tratti della lunghezza di alcuni metri per verificarne l'omogeneità.

La misura delle proprietà di trasporto subito dopo i trattamenti termici è estremamente importante per due motivi:

1. controllo dell'efficacia di ciascun trattamento termico, e quindi permetterne l'ottimizzazione in tempo, temperatura e tipo di atmosfera;

2. controllo dell'effettiva corrente critica in stato "vergine", prima di qualsiasi manipolazione; questa procedura soprattutto permette di valutare (comparando le misure di I_c su campioni corti prelevati agli estremi e le misure di I_c globale su tutta la pezzatura) l'omogeneità intrinseca della pezzatura di nastro.

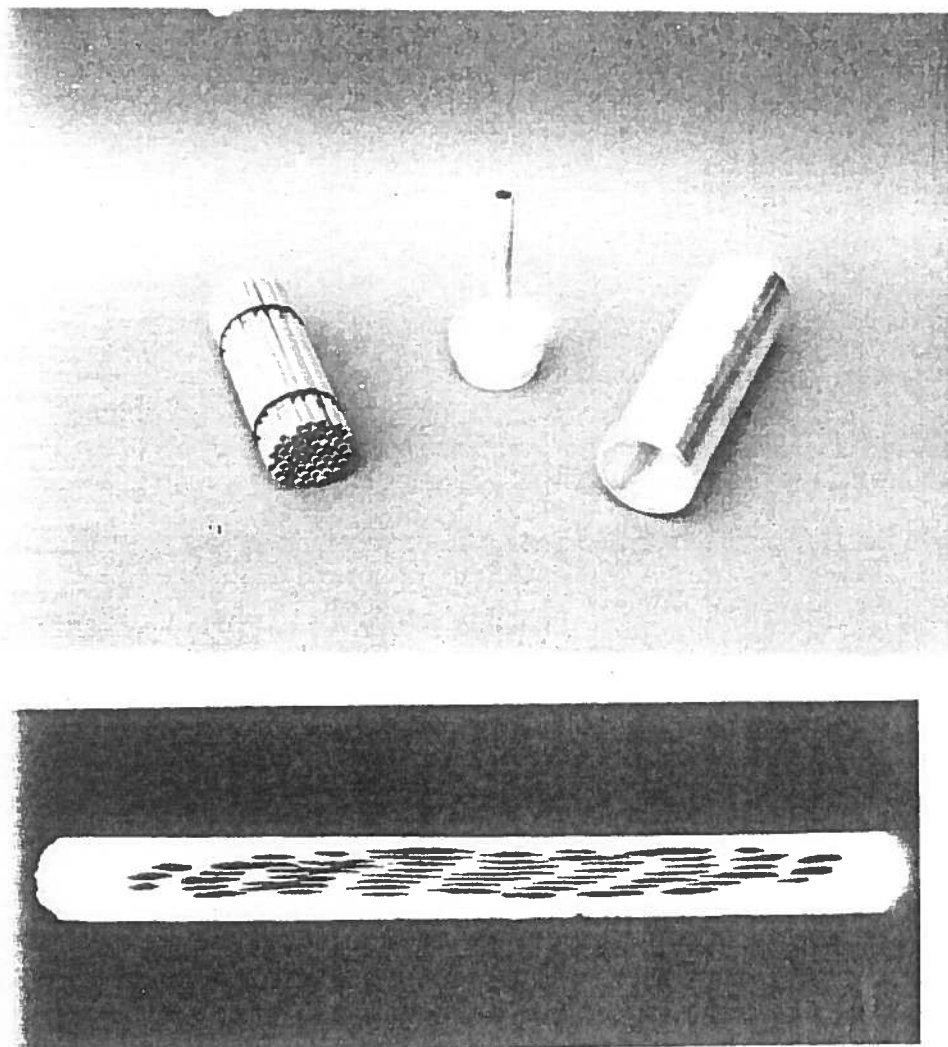


FIG. 2 - Nastro a 55 filamenti : foto del materiale di assemblaggio delle billette (sopra): tubi di argento puro per contenere la polvere di Bi-2223 e tubo grande di contenimento per l'estrusione a caldo.

Foto della sezione del nastro finale (sotto).

I nastri sono stati svolti dal supporto e quindi sottoposti ad un successivo trattamento termomeccanico:

- laminazione per ridurre lo spessore del nastro composito a 0,26 mm, effettuato tramite una sola passata;

- riavvolgimento su supporto di stumatite;

- trattamento termico di sinterizzazione nelle stesse condizioni sperimentali del precedente.

I nastri Bi-2223/Ag ancora avvolti sono stati nuovamente caratterizzati elettricamente a 77 K mostrando una buona distribuzione dei valori di corrente critica I_c .

I risultati delle misure di corrente critica sui nastri dopo il primo ed il secondo trattamento sono riportati in Tabella 1 da cui si deduce che i migliori risultati per i due tipi di campioni sono:

- $I_c=5,4$ A su tutta la lunghezza del campione, corrispondenti a $J_c=4470$ A/cm² per il nastro #CEI 96-2 a 350-filamenti.

- $I_c=13,2$ A su tutta la lunghezza del campione, corrispondenti a $J_c=3970$ A/cm² per il nastro #CEI 96-5 a 55-filamenti.

Nonostante i valori simili di J_c esibiti, la densità di corrente critica ingegneristica $J_{c\ eng}$, calcolata sulla sezione totale del nastro, risulta essere $J_{c\ eng}=670$ A/cm² per il nastro a 350-filamenti rispetto a $J_{c\ eng}=1430$ A/cm² per il campione a 55-filamenti a causa del diverso fill factor dei due nastri (f.f.=0,15 contro f.f.=0,36).

TAB. 1 - Tabella riassuntiva dei risultati delle misure elettriche eseguite sui nastri trattati ed i relativi avvolgimenti fabbricati. I valori di I_c riportati si riferiscono all'intera lunghezza del nastro.

	I_c 1°t.t.	I_c 2°t.t.	I_c 1°avv	I_c 2°avv	degrado
CEI962 (350-fil.)	2,06 A	5,4 A	3,32 A	3,46 A	36%
CEI963 (350-fil.)	1,64 A	3,46 A	2,2 A	2,24 A	35%
CEI964 (350-fil.)	1,25 A	4,64 A	3 A	3 A	35%
CEI965 (55-fil.)	7,1 A	13,2 A	5,6 A	7,32 A	45% 65%

In Fig. 3 è riportata una foto del nastro avvolto sul supporto di stumatite, dopo i trattamenti termici; il rocchetto è equipaggiato con fili di adduzione di corrente e di prelievo tensione per i test criogenici all'azoto liquido.

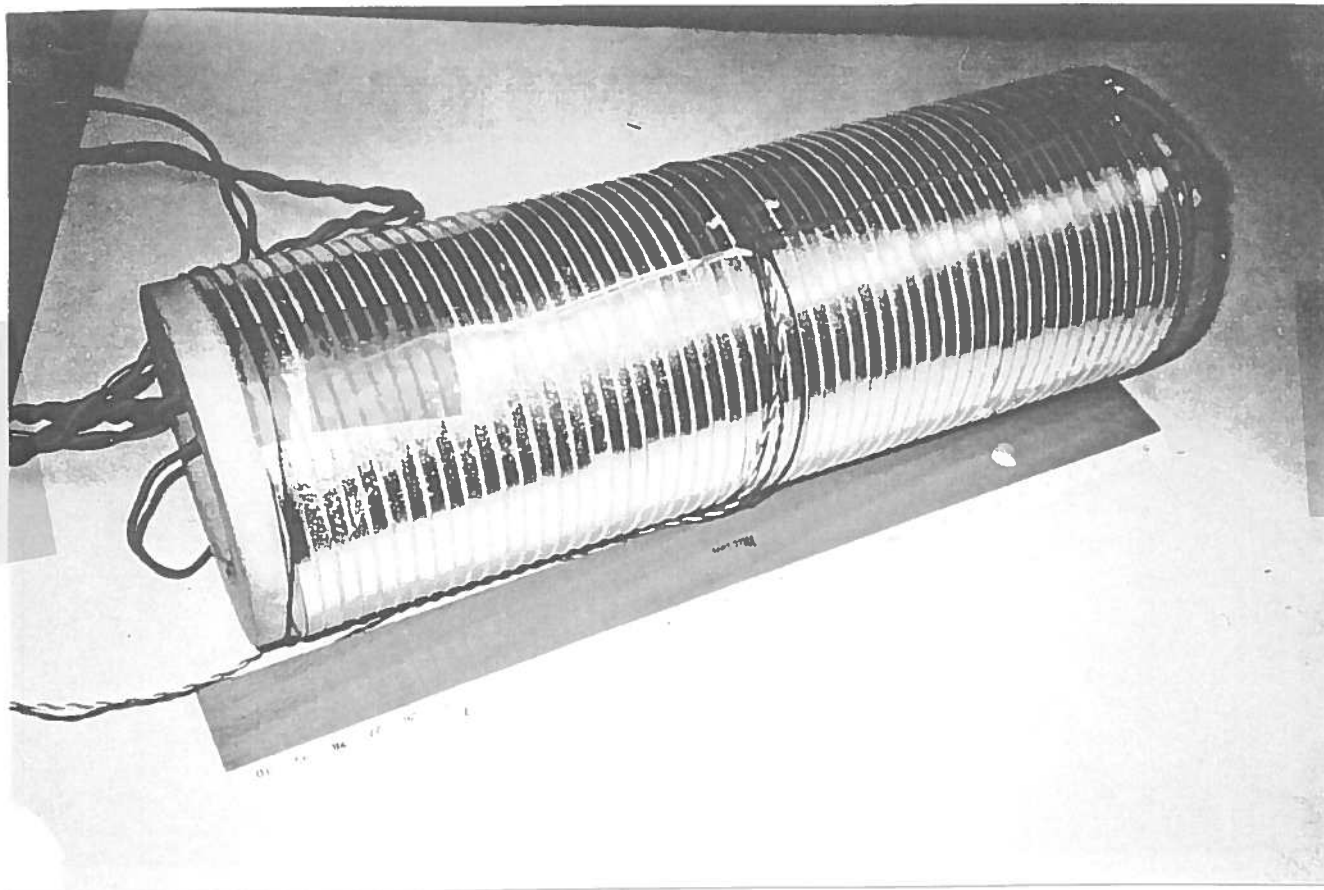


FIG. 3 - Nastro in Ag/Bi-2223 avvolto sul campione di ceramica lavorabile (stumatite), dopo trattamenti termomeccanici, pronto per i test criogenici.

3. - REALIZZAZIONE DI UN AVVOLGIMENTO SUPERCONDUTTIVO

Per la realizzazione di un avvolgimento che consenta una valutazione del nastro prodotto è stata scelta la struttura a "doppio pancake", largamente usata nella prima generazione dei magneti superconduttori a bassa temperatura critica in quanto consente il superamento di critici problemi di piegatura osservati nei nastri avvolti a solenoide. Nella struttura a "doppio pancake" vengono realizzati due avvolgimenti con un'unica pezzatura in cui il nastro viene avvolto sovrappo-

varie spire ed il raccordo tra i due avvolgimenti viene effettuato piegando il nastro nella zona interna.

In realtà, per evitare anche la piegatura nella parte interna del doppio pancake, la struttura realizzata è composta da due avvolgimenti a pancake connessi elettricamente con una sottile lamina di argento saldata con una lega basso fondente sulle estremità interne dei due pancakes su una lunghezza di circa 30 mm. Il singolo pancake è realizzato avvolgendo 30 spire (circa 7.5 m) del nastro dopo il secondo trattamento su un supporto con un diametro interno di circa 70 mm. L'isolamento tra le spire è stato ottenuto avvolgendo solidalmente al nastro superconduttore un nastro isolante. Per limitare il contributo dell'isolante sulla densità di corrente critica ingegneristica vengono utilizzati dei nastri di Kapton di spessore $t=12,5 \mu\text{m}$ $t=25 \mu\text{m}$ per le eccellenti proprietà meccaniche e dielettriche. L'isolamento rispetto al supporto dell'avvolgimento è assicurato con un rivestimento a caldo in Teflon di spessore circa 50 μm . Dalle prove effettuate anche all'azoto liquido questo rivestimento risulta resistente ai graffi.

Il particolare disegno dei supporti consente un facile assemblaggio di più doppi pancakes. La connessione elettrica tra doppi pancakes adiacenti viene realizzata, analogamente a quanto descritto per la connessione tra i due avvolgimenti del singolo doppio pancake, con una lamina di argento saldata con una lega basso fondente sulle estremità esterne dei due pancakes su una lunghezza di circa 30 mm. La procedura per l'avvolgimento dei pancakes secondo la tecnica react&wind risulta essere una delle fasi maggiormente critiche dell'intero processo in quanto, durante tale operazione, i nastri compositi non devono essere sottoposti a sforzi che ne possono degradare le proprietà di trasporto. E' stata a questo proposito ottimizzata una procedura di avvolgimento al fine di ridurre gli sforzi sul nastro e di renderla più controllabile e riproducibile. Alcuni sforzi e deformazioni sono inevitabili quali ad esempio la trazione esercitata sul nastro per realizzare il tiro necessario a garantire la compattezza dell'avvolgimento oltre che la piegatura nel corso delle fasi di raddrizzatura dal supporto di reazione e successivo riavvolgimento.

In Fig. 4 è riportata una foto del magnete prototipo completo, realizzato assemblando e connettendo in serie I quattro doppi pancakes.

4. - CARATTERIZZAZIONE DELL'AVVOLGIMENTO SUPERCONDUTTIVO

I pancakes ottenuti sono stati caratterizzati elettricamente a 77 K e 4,2 K. In Tab. 1 sono riassunti i risultati delle misure elettriche a 77 K, ovvero i valori di corrente critica relativa a tutta la lunghezza del nastro, eseguite sui nastri dopo il primo ed il secondo trattamento e sui singoli avvolgimenti dopo la realizzazione dei doppi pancakes. In tabella sono inoltre indicati i degrading di I_c osservati dopo l'avvolgimento a pancake; da questi dati si può osservare che il tipico degrado di I_c è contenuto entro il 35%; per il nastro #CEI965 il degrado sensibilmente maggiore è dovuto alla

presenza di rigonfiamenti che sono centri di intensificazione degli sforzi in fase di svolgimento del nastro.



FIG. 4 - Foto del magnete assemblato (quattro doppi pancakes). Si noti la “robustezza” delle calze in rame per l’adduzione di corrente rispetto al sottile nastro da 3.5 mm x 0.28 mm di sezione.

In Tabella 2 sono riportati i valori delle correnti critiche misurate a 77 K e 4.2 K sui singoli avvolgimenti che compongono il prototipo di magnete realizzato sovrapponendo i quattro doppi pancakes; per gli avvolgimenti più esterni sono riportati anche i valori delle misure effettuate separatamente. La corrente critica dell’intera struttura è limitata in linea di principio essenzialmente dal campo magnetico generato ed in particolare, data l’anisotropia del Bi-2223 evidenziata dall’analisi del comportamento $J_c(B, \theta)$, dalla componente parallela B_{\parallel} che influisce principalmente sulle spire interne del conduttore e dalla componente radiale B_{\perp} che influenza notevolmente le proprietà elettriche del nastro degli avvolgimenti posti esternamente alla intera struttura.

Come ci si aspettava, i dati riportati in Tabella 2 su misure effettuate a 4.2 K evidenziano quanto sia forte il contributo della componente radiale B_{\perp} sulle proprietà elettriche degli avvolgimenti più esterni, ovvero del 1° avvolgimento del #cei 96-2 in alto e del 2° avvolgimento del #cei 96-5 in basso. A causa dell’aumento di B_{\perp} per il primo la corrente critica misurata sul doppio pancake separato e dopo la sovrapposizione degli altri doppi pancakes passa da 27.2 A a 20.2 A mentre per il secondo passa da 55 A a 43 A.

TAB. 2 - Correnti critiche misurate a 77 K e 4.2 K sui singoli avvolgimenti che compongono il prototipo di magnete realizzato sovrapponendo i quattro doppi pancakes; per gli avvolgimenti più esterni sono riportati anche i valori delle misure effettuate separatamente.

Doppio pancake	77 K		4.2 K		
	I _c 1°avv.(A)	I _c 2°avv.(A)	I _c 1°avv.(A)	I _c 2°avv.(A)	I _c doppio pancake(A)
CEI96-2 separato	3,3	3,5	27,2	26,4	26,6
CEI96-2	3,4	3,2	20,2	25,8	21,5
CEI96-3	2,2	2,2	20,2	19,8	20
CEI96-4	3	3	22	22,6	21,5
CEI96-5 separato	5,6	6,8	44	55	48
CEI96-5	4,1	3,8	38	43	39,7

In Fig. 5 è riportata la caratteristica E-I effettuata a 4.2 K su tutta la lunghezza del nastro (circa 60 m) utilizzato per la realizzazione dei quattro doppi pancakes dopo l'assemblaggio e le saldature. La corrente critica determinata col criterio del campo elettrico di 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ risulta essere di 21.8 A a cui corrisponde un campo magnetico centrale di circa 80 mT. Il corrispondente campo massimo sull'avvolgimento è risultato circa 112 mT, ben superiore allo scopo che ci siamo prefissi (100 mT).

Descrizione tecniche più dettagliate, sia del materiale che della costruzione del magnete come dei risultati sono riportate nei lavori citati nelle referenze.

5. - PROSPETTIVE

Il lavoro compiuto ha permesso ai tre laboratori coinvolti, Centro Ricerche EM, CISE e LASA dell'INFN, di acquisire notevole esperienza e la messa a punto delle tecnologie critiche nel settore dei nastri Bi-2223/Ag per avvolgimenti superconduttivi.

L'esperienza maturata nella prima fase ha comunque indicato quanto notevole sia l'impegno, sia in termini di costi che di risorse umane, necessario nello sviluppo e nell'ottimizzazione del conduttore necessario per l'ottenimento degli obiettivi previsti nella fase successiva.

I partecipanti ritengono concordemente che per un proficuo prosiegua dell'attività che giustifichi una collaborazione formale, sia necessario un incremento notevole delle risorse umane ed economiche. Si ritiene opportuno quindi non rinnovare questa collaborazione iniziale, riservandosi di riprenderla sulla base di un impegno molto maggiore dei tre Enti.

**Caratteristica campo-corrente
e criterio di transizione**

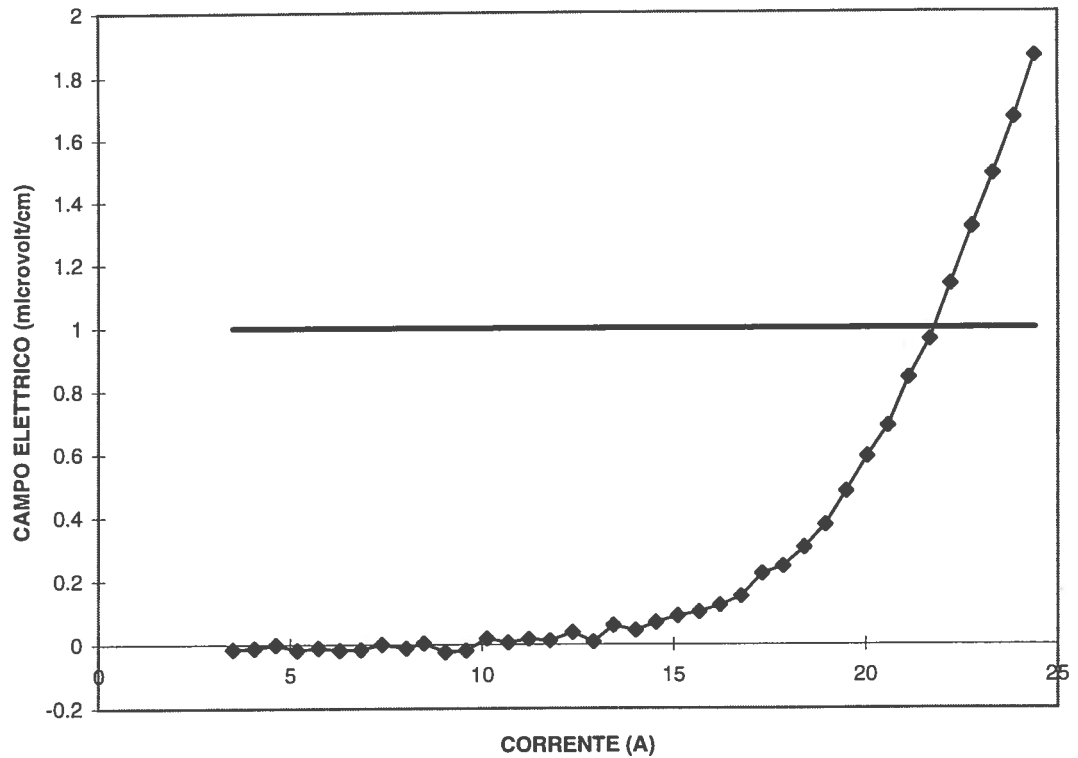


FIG. 5 - Caratteristica campo elettrico - corrente dell'intero magnete misurata a 4.2 K. La corrente critica valutata al criterio standard di $E_c = 1 \mu\text{V/cm}$ risulta di 21.8 A.

BIBLIOGRAFIA

- (1) D. De Tommaso, "Studio, realizzazione e caratterizzazione di avvolgimenti con superconduttori ceramici Bi-2223", tesi presso il Dip. di Fisica dell'Università di Milano.
- (2) L. Bigoni et al., "Stacked Double Pancake Coils using Bi-2223/Ag tapes" Proceedings of SATT8, Nuovo cimento Vol.19 D, N.8-9, pag. 1457-1462.
- (3) L. Bigoni et al. "Development of Bi-2223/Ag tapes and coils", IEEE trans. on appl. supercond. vol.7 (1997) pag. 1825-1828.