

ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE

Sezione di Milano

INFN/TC-92/25
7 Ottobre 1992

G. Baccaglioni, M. Canali, G.C. Cartegni, C. Fumagalli, M. Fusetti, L. Gini, L. Grilli,
A. Leone:

**COSTRUZIONE DI SOLENOIDI SUPERCONDUTTORI CON CAMPO DI
10 TESLA, PRESSO IL LABORATORIO L.A.S.A, PER STUDI DI
TRANSIZIONE DALLO STATO SUPERCONDUTTIVO A QUELLO
RESISTIVO**

Servizio Documentazione
dei Laboratori Nazionali di Frascati

INFN - Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Sezione di Milano

**COSTRUZIONE DI SOLENOIDI SUPERCONDUTTORI CON CAMPO DI
10 TESLA, PRESSO IL LABORATORIO L.A.S.A, PER STUDI DI TRAN-
SIZIONE DALLO STATO SUPERCONDUTTIVO A QUELLO RESISTIVO**

G.Baccaglioni, M.Canali, G.C.Cartegni, C.Fumagalli, M.Fusetti, L.Gini, L.Grilli, A.Leone

**Dipartimento di Fisica dell'Universita' di Milano e INFN - Sezione di Milano, Laboratorio
LASA, Via Fratelli Cervi 201, 20090 Segrate**

ABSTRACT

An investigation on quench propagation velocity in small adiabatic coupled coils and on magnet stability has been carried out at L.A.S.A laboratory of INFN (Milan). The techniques used to construct some windings both in NbTi and in Nb₃Sn aimed at this purpose, are described in the present paper. In particular the heat treatment and the problems related to the electrical insulation in Nb₃Sn magnets will be discussed. The apparatus for the practical realization of the coils and the devices used in the experiments are described as well.

1 Introduzione

Nell'ambito delle attività di Superconduttività Applicata, inserite come "Progetto Speciale" nel presente piano quinquennale dell' I.N.F.N. (1988-92), sono previste ricerche sulle proprietà dei cavi superconduttori e dei materiali; in particolare uno studio rivolto alla determinazione della velocità di propagazione della transizione di fase superconduttiva-resistiva, comunemente detta *quench*, ed alla stabilità di piccoli solenoidi superconduttori. Questa ricerca si rivolge soprattutto a magneti ad alto campo ($B \geq 12$ T) nei quali si utilizzano, quali superconduttori, leghe intermetalliche di tipo A 15 e per le quali le teorie ed i dati sperimentali sono al momento insufficienti. La scelta di realizzare presso il laboratorio L.A.S.A. questi solenoidi, alimentarli e farli transire in modo controllato dallo stato superconduttivo a quello normale studiando l'evoluzione temporale del fenomeno, è basata sull'esperienza acquisita in passato nel laboratorio stesso mediante la costruzione di magneti convenzionali e superconduttori, nella loro energizzazione, protezione, acquisizione ed analisi dei dati di prova. Allo scopo di far meglio comprendere le problematiche relative alla costruzione di avvolgimenti superconduttivi vogliamo brevemente richiamare alcuni fondamentali concetti che, pur se sufficientemente noti, debbono essere tenuti in considerazione nella fase di progettazione e costruzione degli stessi.

Le proprietà di un materiale superconduttore, ai fini del trasporto di corrente, sono ben descritte da una superficie critica in uno spazio a tre dimensioni (B, J, T) induzione magnetica, densità di corrente e temperatura, i cui punti rappresentano i valori critici ai quali avviene la transizione dallo stato superconduttivo a quello normale.

In fig.1 è rappresentato il diagramma di fase per una lega di NbTi: se il punto rappresentativo dello stato del sistema giace al di sotto della superficie critica il materiale è nella fase superconduttiva, in caso contrario sarà resistivo.

È stata necessaria una lunga evoluzione tecnica, tuttora in corso, perché si riuscisse a trovare ed a realizzare leghe metalliche e conseguentemente cavi, che potessero sopportare alti campi magnetici trasportando correnti ragguardevoli senza transire e con lunghezze tali da poter essere usati nella costruzione di magneti. Nella pratica, materiali disponibili in commercio che presentano tali caratteristiche, sono leghe metalliche come il NbTi e composti intermetallici A 15 quale il Nb_3Sn , $(NbTi)_3Sn$, $(NbTa)_3Sn$. Gli A15 pur soffrendo di notevole fragilità meccanica consentono di raggiungere campi magnetici assai più elevati.

Nella scelta di un conduttore per avvolgimenti superconduttivi è consueto utilizzare grafici a due dimensioni (B, J) in cui la dipendenza campo-corrente è data ad una fissata temperatura. Il valore tipico di tale temperatura è di 4.2 K che corrisponde alla temperatura di ebollizione dell'elio liquido a pressione ordinaria, utilizzato come liquido criogenico per il raffreddamento dei magneti. Nella figura 2 sono riportati e comparati due diagrammi (B, J) relativi a cavi in NbTi e Nb_3Sn .

Note le proprietà dei conduttori con cui realizzare i solenoidi potrebbe apparire semplice la loro progettazione e realizzazione allo scopo di ottenere le prestazioni desiderate in termini di dimensioni fisiche, campo generato e corrente. L'esperienza ha invece dimostrato che ben difficilmente, una volta costruito, il magnete potrà raggiungere il valore di corrente previsto teoricamente, a causa di un fenomeno di degradazione delle caratteristiche di trasporto del conduttore. Le possibili cause di tale fenomeno si devono ricercare in indesiderati ed imprevisti rilasci di energia all'interno dell'avvolgimento, dovuti a movimenti meccanici delle spire, causati da sforzi di origine elettromagnetica ed a fratture, con rilasci di energia, delle resine. A causa di ciò, alla prima energizzazione un magnete può subire una transizione

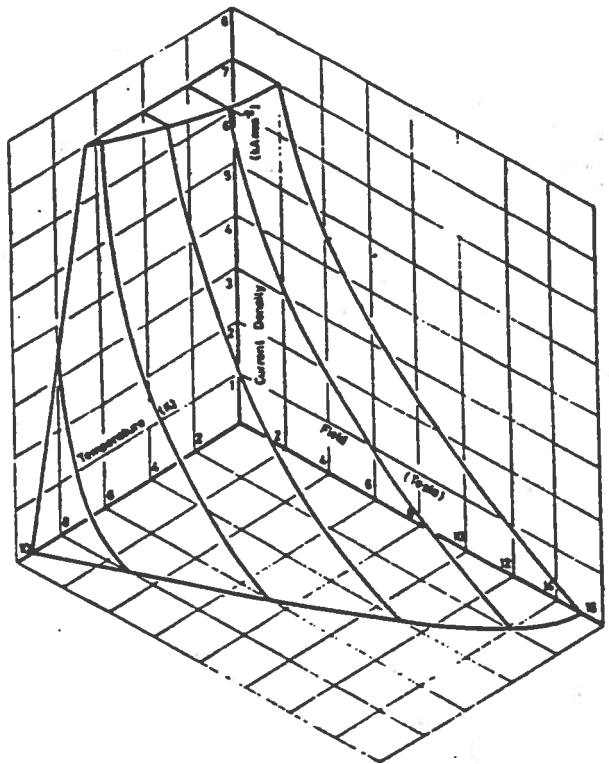


Figura 1:Diagramma di fase per una lega di NbTi

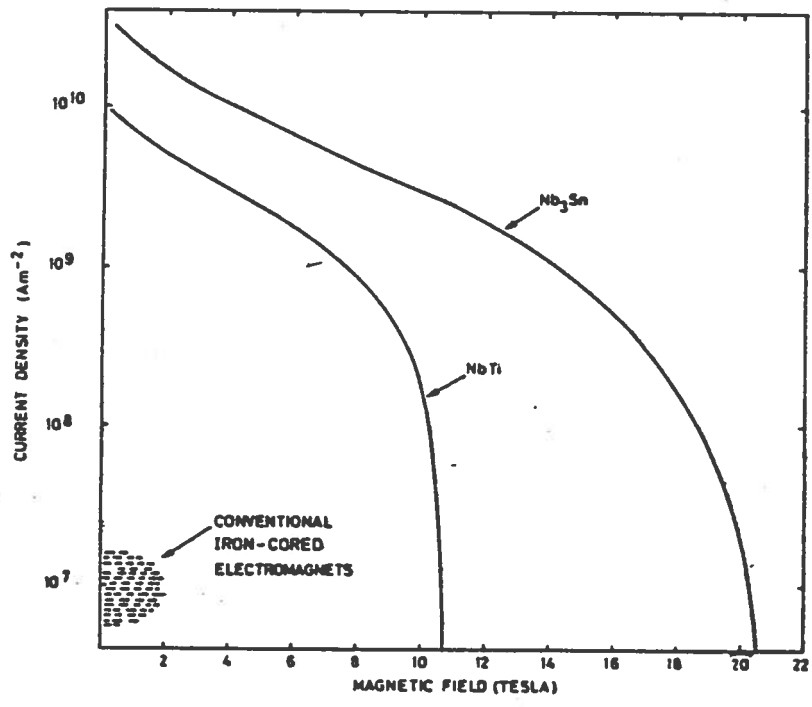


Figura 2:Diagramma B,J per conduttori di NbTi e Nb₃Sn

resistiva a corrente piú bassa del valore previsto. Ripetendo l'energizzazione piú volte si noterá un progressivo miglioramento delle prestazioni (training) fino a giungere ad un valore di corrente oltre il quale il processo di miglioramento "satura".

Il ripristino delle condizioni operative per un magnete superconduttivo dopo la transizione, puó richiedere pochi minuti, per piccoli avvolgimenti, ma puó durare ore o giorni per sistemi di grandi dimensioni. Durante un evento di quench, inoltre, si perde una gran quantità di elio liquido (molto costoso) e, se il magnete non é adeguatamente protetto, puó danneggiarsi. Risulta quindi evidente come sia fondamentale, in fase di progettazione di un sistema poter prevedere il suo comportamento in caso di quench per poterlo adeguatamente dotare di protezione e dunque, per far ciò, comprendere la fisica della transizione di fase e della sua propagazione.

Per realizzare gli avvolgimenti, il laboratorio si é dotato di apparecchiature specifiche quali un forno per trattamenti sotto vuoto ad alta temperatura e di un impianto per impregnazione sotto vuoto-pressione (Fig. 3 e 4).

Le piccole dimensioni dei conduttori fino ad ora utilizzati hanno consentito di servirsi di una bobinatrice già disponibile in laboratorio (Fig.5).

Il forno, realizzato su nostre specifiche, consente di avere un volume cilindrico utile $\phi = 80$ mm ed $H=100$ mm con temperature massime di 1000 °C, una omogeneità di ± 2.5 gradi ed una pressione finale di circa 10^{-6} mbar. La strumentazione di cui é dotato consente di eseguire i cicli termici desiderati anche per lunghi periodi, come richiesto nel trattamento delle leghe Nb_3Sn e registrare sino a 6 grandezze utili (Temperature, vuoto, ecc.). L'impianto di impregnazione, pure realizzato su nostre specifiche, ha un volume utile di $440 \times 440 \times 500$ mm³; esso consente l'iniezione della resina nell'avvolgimento sotto vuoto e l'eventuale trattamento termico con cicli automatici sotto vuoto-pressione (1-1500 mbar). Un piano vibrante a frequenza variabile per carichi fino a 50 Kg consente di migliorare ulteriormente la penetrazione e le prestazioni delle resine impregnanti.

Gli avvolgimenti realizzati e funzionanti presso il L.A.S.A. di dimensioni e caratteristiche via via crescenti sono ad oggi 5: tre con un conduttore in NbTi e due con un conduttore in Nb_3Sn . Le loro caratteristiche fisiche e le tecniche costruttive saranno in seguito descritte. Tratteremo separatamente gli avvolgimenti in NbTi e quelli in Nb_3Sn a causa delle tecniche sostanzialmente diverse di realizzazione.

2 Avvolgimenti in NbTi

2.1 Lasa-1

É stato il primo avvolgimento prototipo realizzato al laboratorio L.A.S.A. nel 1988. É servito particolarmente ad acquisire confidenza con questi tipi di conduttori, selezionare le resine piú idonee all'impregnazione, mettere a punto la tecnica di costruzione degli stampi di impregnazione, dei supporti di avvolgimento e dei riscaldatori per l'induzione forzata del quench.

Il cavo utilizzato per la realizzazione dell'avvolgimento é prodotto dalla Vacuumschmelze Hanau R.F.G ed é un filo rotondo ($\phi=0.542$ mm con isolamento in vernice) costituito da 54 filamenti in NbTi racchiusi in una matrice in rame ad elevata conducibilità.

In figura 6 sono illustrate le caratteristiche geometriche ed elettriche principali dell'avvolgimento in questione.

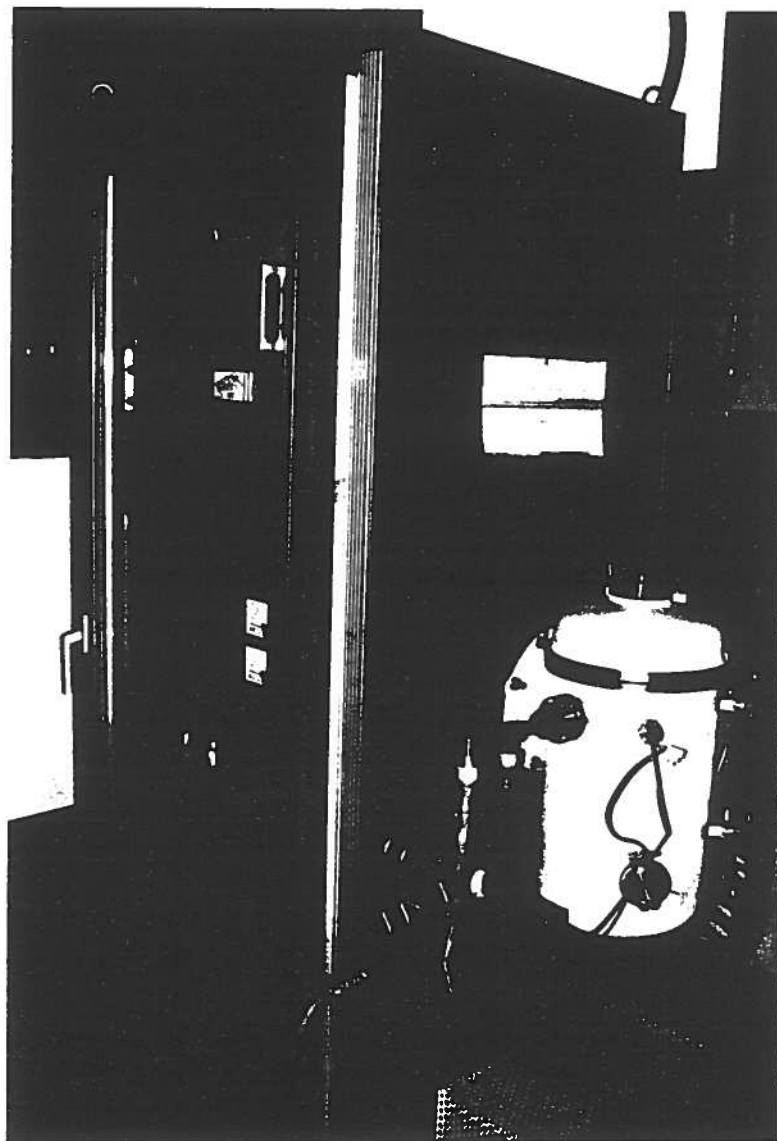


Figura 3: Forno per trattamenti termici

4 21 1000 1000
1000 1000

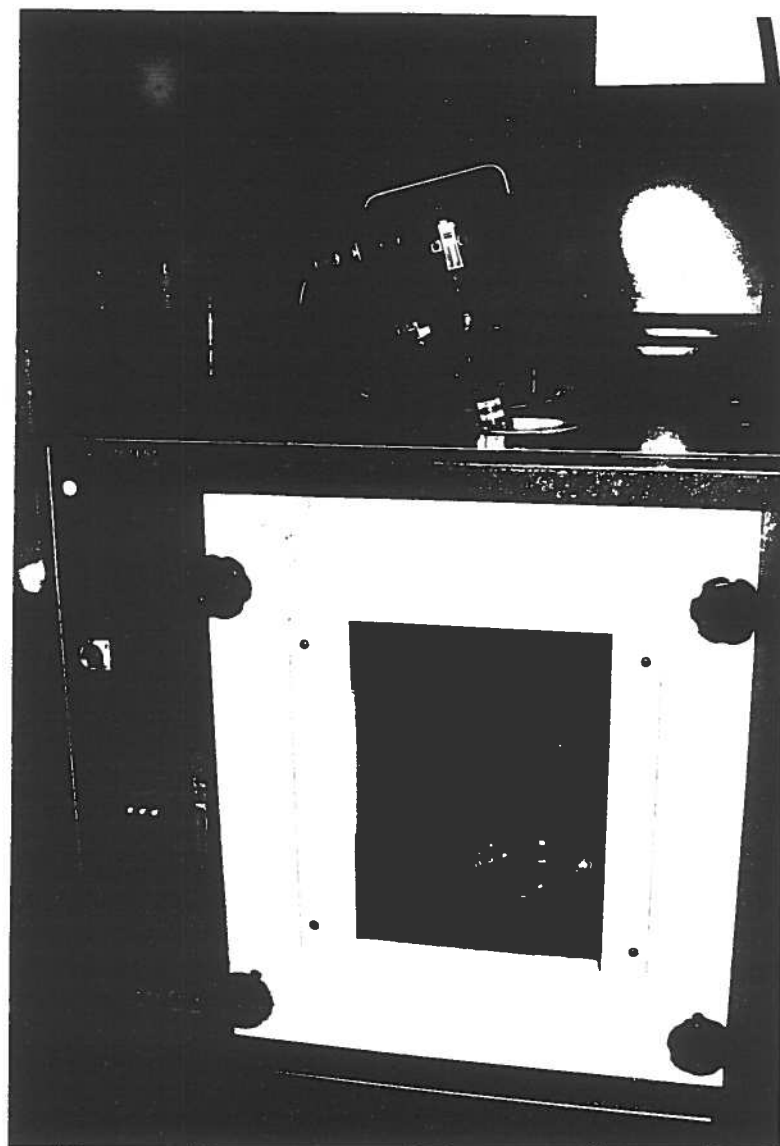


Figura 4: Impianto di impregnazione

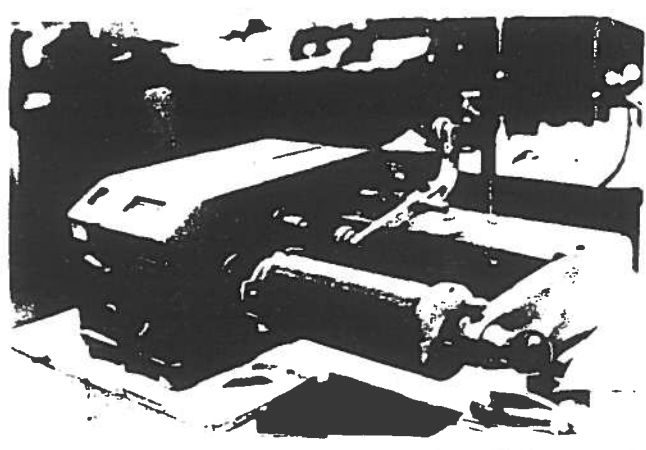
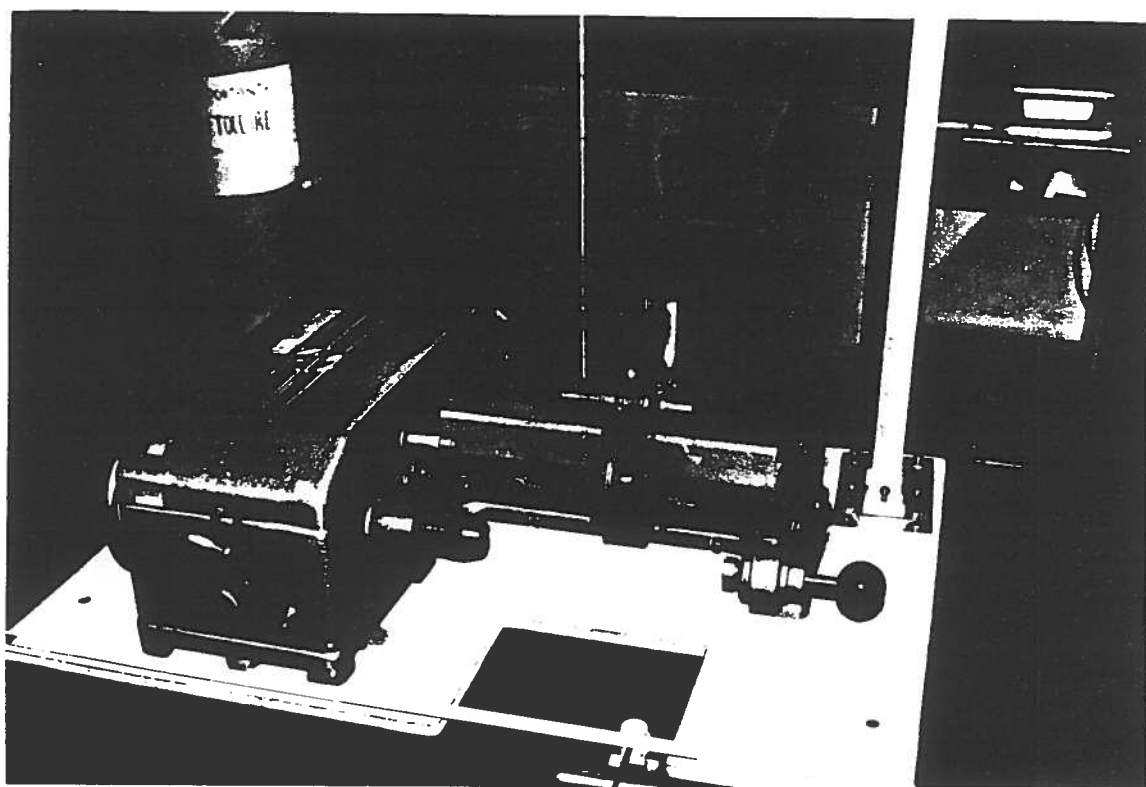


Figura 5: Bobinatrice ed avvolgimento del magnete Lasa-4

Diametro esterno	$\phi_{\text{est}} = 35 \text{ mm}$
Diametro interno	$\phi_{\text{int}} = 20 \text{ mm}$
Altezza	$h = 50 \text{ mm}$
Numero spire totali	668
Numero strati	8
Resistenza totale avvolgimento	8.084 Ω
Linea di carico	$B_0 = 1.5 \times 10^{-2} \text{ l}$
Corrente critica	$I_c = 270 \text{ A}$
Campo massimo al centro	$B_0 = 4.05 \text{ T}$
Induttanza	$3.52 \times 10^{-3} \text{ Henry}$

Figura 6: Lasa-1

L'avvolgimento é stato eseguito su un cilindro di ottone, l'isolamento del conduttore rispetto alla forma e rispetto ai riscaldatori é stato ottenuto con nastro di vetro dello spessore di 0.12 mm. All'interno dell'avvolgimento sono stati posti 6 riscaldatori, tre costituiti da strain gauges con resistenza di 350Ω , per simulare disturbi quasi puntuali e tre costituiti da filo in CuNi disposti in modo da costituire riscaldatori con resistenza di decine di ohm e superfici riscaldanti di circa 1 cm^2 atti quindi a simulare disturbi distribuiti. I riscaldatori sono stati disposti a metà altezza diametralmente opposti al raggio interno, intermedio ed esterno. Dell'impregnazione di questo come di tutti gli avvolgimenti di cui tratteremo in seguito sará data descrizione in uno specifico capitolo.

2.2 Lasa-2

I buoni risultati ottenuti in termini di corrente critica e l'esperienza acquisita con il prototipo LASA-1 é stata utilizzata per realizzare un secondo avvolgimento, LASA-2, con lo stesso tipo di conduttore. Le dimensioni di questo che é pur sempre in scala da laboratorio sono tali da consentire: misure di stabilitá , studi di propagazione del quench e l'inserimento al suo interno un ulteriore avvolgimento (LASA-3) in Nb_3Sn per produrre campi magnetici piú elevati.

Il volume del solenoide LASA-2, circa 13 volte superiore a quello di LASA-1 ed il costo del cavo, hanno consigliato l'esecuzione di un prototipo con un conduttore in rame di dimensioni identiche a LASA-2, onde verificare, oltre alle tecniche di avvolgimento quelle molto piú critiche di impregnazione. Tale prototipo é stato poi sezionato allo scopo di verificare la validitá delle tecniche adottate.

Una fondamentale differenza tra LASA-1 e LASA-2 (ed in seguito LASA-4) é costituita dal fatto che quest'ultimo é stato avvolto su di una forma che é stata rimossa dopo l'impregnazione del solenoide. Ció consente di poter disporre di un diametro interno utile superiore e di eliminare una delle possibili cause di perturbazione dovute alle interazioni tra forma ed avvolgimento. Le caratteristiche principali di questo magnete sono riassunte in fig.7.

Diametro esterno	$\phi_{est} = 74 \text{ mm}$
Diametro interno	$\phi_{int} = 45 \text{ mm}$
Altezza	$h = 100 \text{ mm}$
Numero spire totali	4630
Numero strati	26
Resistenza totale avvolgimento	133 Ω
Linea di carico	$B_0 = 5.1 \times 10^{-2} \text{ l}$
Corrente critica	$I_0 = 137.47 \text{ A}$
Campo massimo al centro	$B_0 = 7.0 \text{ T}$
Induttanza	0.49 Henry

Prelievi di tensione	1	2	3	4	5
Strato	1	8	14	20	26
Spira ⁿ	1	1441	2515	3586	4630

Figura 7: Lasa-2

L'esecuzione dell'avvolgimento é avvenuta secondo la seguente procedura:

- Preparazione della forma di avvolgimento e delle flange di testa, delle derivazioni di uscita e dei contatti di prelievo tensione.
- Preparazione dello stampo di impregnazione.
- Teflonatura dei particolari da rimuovere dopo l'impregnazione (mandrino di avvolgimento e stampo).
- Ricopertura della forma interna con un foglio di G 11.
- Esecuzione dell'avvolgimento curando in modo particolare la forza di trazione sul conduttore e la distribuzione delle spire e degli strati. La validitá della tecnica utilizzata é stata confermata dal buon coefficiente di riempimento ottenuto.
- Saldatura dei terminali e prelievi di tensione.
- Impregnazione.
- Estrazione del mandrino di avvolgimento.
- Applicazione dei riscaldatori (sulle pareti interne e su quella esterna).

La buona riuscita dell'avvolgimento é stata provata dalla quasi totale assenza di training fin dalle prime energizzazioni e dal valore di corrente critica raggiunto (137 A contro 135-140 A teorici).

2.3 Lasa-4 e Lasa-4-bis

Nel corso delle prove eseguite sui magneti LASA-2 e LASA-3 alimentati separatamente o accoppiati sono emersi alcuni problemi che, uniti all'esigenza di poter disporre di un foro

interno utile maggiore, hanno richiesto la progettazione di una nuova coppia di solenoidi, l'esterno in NbTi e l'interno in Nb₃Sn . Il primo di questi é stato chiamato LASA-4 ed alla sua realizzazione si riferisce questo capitolo. Le buone prestazioni di LASA-2 hanno costituito una validissima guida sia nella determinazione delle tecniche che degli accessori. Le caratteristiche principali del solenoide sono riassunte in fig.8 mentre figura 9 ne riportata la scheda costruttiva.

Diametro esterno	$\phi_{est} = 92.7 \text{ mm}$		
Diametro interno	$\phi_{int} = 67.8 \text{ mm}$		
Altezza	$h = 201 \text{ mm}$		
Numero spire totali	9500		
Numero strati	26		
Resistenza totale avvolgimento	373 Ω		
Linea di carico	$B_0 = 5.5 \times 10^{-2} \text{ T}$		
Corrente critica	$I_c = 120 \text{ A}$		
Campo massimo al centro	$B_0 = 6.5 \text{ Tesla}$		
Induttanza	2.16 Henry		

Prelievi di tensione	1	2	3	4
Strato	1	10	18	26
Spira n °	1	3662	6591	9500

Figura 8: Lasa-4

Le fasi costruttive hanno seguito la stessa sequenza di quelle utilizzate per LASA-2 con la sola differenza che in questo caso sono stati inseriti dei riscaldatori internamente alla bobina stessa tra strato e strato di avvolgimento. La figura 10 mostra alcune fasi della realizzazione di questo magnete: il supporto per l'avvolgimento e lo stampo per l'impregnazione, quindi Lasa-4 completato e connesso agli adduttori.

Nella realizzazione di LASA-4 si sono incontrati alcuni problemi imprevisi: si sono avute notevoli difficoltà , dopo l'impregnazione, ad estrarre la forma interna e, ad estrazione avvenuta, si é rilevata una cattiva penetrazione della resina nella parte interna dell'avvolgimento. Si é quindi dovuto avviare all'inconveniente con modifiche alla forma interna e con una nuova fase di impregnazione. La bobinatrice utilizzata si é inoltre rivelata non adeguata per l'avvolgimento di un magnete di dimensioni decisamente superiori a quelle delle bobine precedentemente realizzate, il che non ha permesso un controllo sufficientemente accurato della posizione del conduttore.

Probabilmente a causa di questa serie di fattori la corrente critica della bobina é risultata essere solo il 54% del valore previsto, ragione per cui é stato avvolto un secondo solenoide di dimensioni simili a quelle di Lasa-4, denominato Lasa-4-bis le cui caratteristiche sono riportate il figura 11 mentre fig.12 ne riporta la scheda costruttiva.

Durante l'esecuzione di LASA-4-bis si sono però riproposti i problemi di controllo del conduttore e di una corretta procedura di impregnazione. Per quanto si riferisce al primo punto il problema sará in futuro risolto avendo acquistato nel 1991 una bobinatrice di dimensioni piú elevate; per la seconda parte riteniamo di aver compreso che, a causa dell'altezza dell'avvolgimento, le tecniche fino a questo punto da noi adottate non sono piú valide e si dovrá studiare una forma d'avvolgimento di tipo sostanzialmente diverso. Quantunque

Strato n.	Spire n.	Diametro esterno
1	367	$\Phi_{est} = 68.8$ mm
2	732	$\Phi_{est} = 69.8$ mm
3	1097	$\Phi_{est} = 70.8$ mm
4	1464	$\Phi_{est} = 71.7$ mm
5	1831	$\Phi_{est} = 72.8$ mm
6	2197	$\Phi_{est} = 73.7$ mm
7	2563	$\Phi_{est} = 74.6$ mm
8	2932	$\Phi_{est} = 75.5$ mm
9	3300	$\Phi_{est} = 76.4$ mm
10	3662	$\Phi_{est} = 77.4$ mm
11	4030	$\Phi_{est} = 78.4$ mm
12	4394	$\Phi_{est} = 79.4$ mm
13	4759	$\Phi_{est} = 80.2$ mm
14	5132	$\Phi_{est} = 81.3$ mm
15	5494	$\Phi_{est} = 82.4$ mm
16	5860	$\Phi_{est} = 83.0$ mm
17	6228	$\Phi_{est} = 84.0$ mm
18	6591	$\Phi_{est} = 85.2$ mm
19	6958	$\Phi_{est} = 86.1$ mm
20	7320	$\Phi_{est} = 87.1$ mm
21	7680	$\Phi_{est} = 88.0$ mm
22	8040	$\Phi_{est} = 89.1$ mm
23	8400	$\Phi_{est} = 90.0$ mm
24	8765	$\Phi_{est} = 90.7$ mm
25	9138	$\Phi_{est} = 91.9$ mm
26	9500	$\Phi_{est} = 92.7$ mm

Figura 9: Scheda costruttiva del magnete Lasa-4

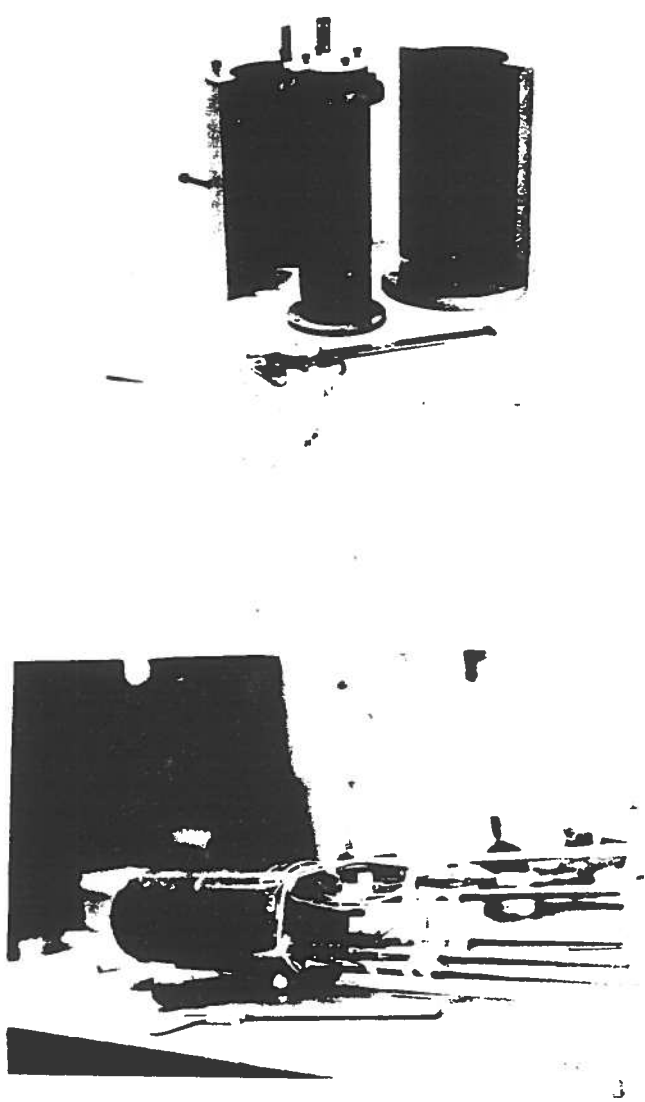


Figura 10: Lasa-4:rocchetto di avvolgimento e stampo per l'impregnazione, bobina completata e connessioni elettriche

Diametro esterno	$\phi_{est} = 94.0 \text{ mm}$				
Diametro interno	$\phi_{int} = 67.5 \text{ mm}$				
Altezza	$h = 181 \text{ mm}$				
Numero spire totali	8275				
Numero strati	26				
Resistenza totale avvolgimento	332.9 Ω				
Linea di carico	$B_o = 5.2 \times 10^{-2} \text{ l}$				
Corrente critica	$I_c = 127 \text{ A}$				
Campo massimo al centro	$B_o = 6.7 \text{ T}$				
Induttanza	1.79 Henry				

Prelievi di tensione	1	2	3	4	5
Strato	1	6	12	18	26
Spira°n	1	1920	3841	5760	8275

Figura 11: Lasa-4-bis

i risultati in termini di corrente critica per LASA-4-bis siano stati di gran lunga migliori rispetto a quelli di LASA-4 si é rilevata in questo caso la presenza di training: si sono infatti verificati eventi di quench dapprima a 101 A, quindi a 111 A ed infine si sono raggiunti i 113 A senza che il magnete transisse.

3 Avvolgimenti in Nb₃Sn

3.1 Lasa-3

L'avvolgimento LASA-3, come accennato in precedenza, é stato progettato con dimensioni tali da poter essere accoppiato a LASA-2 realizzando in scala un modello che riproduce la facility SOLEMI, in corso di realizzazione presso il laboratorio L.A.S.A. ; al tempo stesso ha permesso di acquisire conoscenze riguardo all'uso di superconduttori intermetallici del tipo A 15 ad alte prestazioni. Trattandosi di tecniche piuttosto sofisticate richiamiamo alcuni concetti di base riguardo alla struttura dei cavi in (NbTa)₃Sn , alle modalitá con cui vengono termicamente trattati per essere resi superconduttori e alle possibili tecniche di avvolgimento dei magneti.

I cavi in Nb₃Sn sono composti multifilamentari e, tra le diverse tecniche costruttive possibili per realizzarli, una delle piú usate é la cosiddetta "via del bronzo". I filamenti di Nb sono racchiusi in una matrice di bronzo con procedimento analogo a quello in cui i filamenti di NbTi vengono racchiusi nella matrice di rame per i cavi di NbTi, il conduttore viene quindi sottoposto a processi di estrusione e trafilatura fino a raggiungere le dimensioni finali richieste. Il cavo deve quindi essere sottoposto ad un trattamento termico ad alta temperatura (circa 700 °C) durante il quale gli atomi di stagno diffondono dalla matrice di bronzo ai filamenti di Nb formando il composto superconduttore Nb₃Sn .

Il valore piú o meno elevato della corrente critica dipende dalla temperatura e dalla durata del trattamento termico che sono legate alla struttura del conduttore ed alle prestazioni richieste dal medesimo. Nella scelta del ciclo termico ottimale bisogna tenere in considerazione gli effetti di piú processi in competizione tra loro che determinano la qualità del

Strato n.	Spire n.	Diametro esterno
1	320	$\Phi_{est} = 68.6 \text{ mm}$
2	640	$\Phi_{est} = 70.0 \text{ mm}$
3	960	$\Phi_{est} = 70.5 \text{ mm}$
4	1278	$\Phi_{est} = 71.5 \text{ mm}$
5	1600	$\Phi_{est} = 72.2 \text{ mm}$
6	1920	$\Phi_{est} = 73.5 \text{ mm}$
7	2240	$\Phi_{est} = 74.4 \text{ mm}$
8	2558	$\Phi_{est} = 75.4 \text{ mm}$
9	2880	$\Phi_{est} = 76.3 \text{ mm}$
10	3206	$\Phi_{est} = 77.3 \text{ mm}$
11	3523	$\Phi_{est} = 78.4 \text{ mm}$
12	3841	$\Phi_{est} = 79.4 \text{ mm}$
13	4165	$\Phi_{est} = 80.8 \text{ mm}$
14	4482	$\Phi_{est} = 81.6 \text{ mm}$
15	4806	$\Phi_{est} = 82.4 \text{ mm}$
16	5123	$\Phi_{est} = 83.4 \text{ mm}$
17	5440	$\Phi_{est} = 84.3 \text{ mm}$
18	5760	$\Phi_{est} = 85.3 \text{ mm}$
19	6080	$\Phi_{est} = 86.6 \text{ mm}$
20	6396	$\Phi_{est} = 87.6 \text{ mm}$
21	6710	$\Phi_{est} = 88.6 \text{ mm}$
22	7018	$\Phi_{est} = 89.8 \text{ mm}$
23	7333	$\Phi_{est} = 90.8 \text{ mm}$
24	7650	$\Phi_{est} = 91.6 \text{ mm}$
25	7964	$\Phi_{est} = 92.6 \text{ mm}$
26	8275	$\Phi_{est} = 94.0 \text{ mm}$

Fig.12 Scheda costruttiva del magnete Lasa-4-bis.

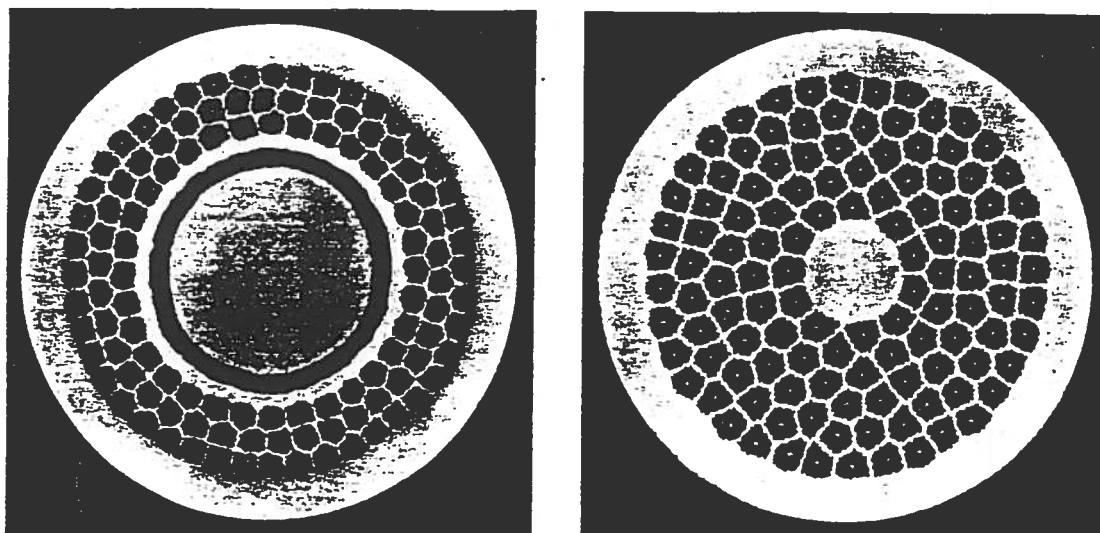


Figura 13: Sezioni di conduttori in Nb_3Sn con e senza nucleo stabilizzante

superconduttore: per esempio all'aumentare del tempo di trattamento cresce lo spessore degli strati di Nb_3Sn , che tende ad aumentare il valore della corrente critica; al tempo stesso però la crescita dei grani tende a ridurre la densità di corrente di trasporto.

Il campo critico sopportato dai conduttori di questo tipo può essere aumentato introducendo nei filamenti o nelle matrici, del tantalio o del titanio che, aumentando la velocità di diffusione dello stagno, favorisce la formazione dei cristalli di Nb_3Sn . La stabilità di temperatura è critica entro qualche grado e devono essere evitate oscillazioni al di sopra del valore massimo previsto anche per breve durata. Sono attualmente prodotti conduttori di questo tipo sia con nucleo stabilizzante in rame che senza, con filamenti del diametro di alcuni micron in numero variabile da alcune migliaia a centinaia di migliaia.

In fig.13 sono mostrate due sezioni di conduttore in Nb_3Sn con e senza nucleo stabilizzante; è evidente il numero estremamente elevato di filamenti.

In linea di principio il superconduttore A 15 può essere fatto reagire prima o dopo l'esecuzione dell'avvolgimento seguendo una delle due tecniche note rispettivamente come: React and Wind (R&W) o Wind and React (W&R). Nel primo caso il conduttore viene fatto reagire prima di avvolgerlo ed a causa della sua fragilità dopo il trattamento termico, è necessario avere delle cure particolari affinché sforzi di tipo meccanico non lo danneggino; per lo stesso motivo non è possibile curvare il cavo al di sotto di un certo raggio. D'altra parte è però possibile usare alluminio come stabilizzante in sostituzione del rame e non esistono problemi particolari per quanto si riferisce agli isolanti da utilizzare per il conduttore e per le impregnazioni.

La tecnica W&R consiste nell'avvolgere il magnete prima del trattamento termico. In questo caso sono evidenti i vantaggi che derivano dal poter eseguire l'avvolgimento con un materiale di notevole robustezza meccanica e sufficiente flessibilità quindi idoneo qualunque siano le dimensioni con cui si desidera realizzare l'avvolgimento. Le difficoltà sorgono invece riguardo agli isolanti da utilizzare in quanto è piuttosto difficile trovare materiali che possano sopportare le temperature previste dal trattamento termico senza distruggersi od infragilirsi. Inoltre, gli agenti organici che ricoprono quasi sempre gli isolanti inorganici per renderli lavorabili, si decompongono in composti carboniosi conduttivi che degradano inevitabilmente

le caratteristiche d'isolamento della bobina.

Nella realizzazione del solenoide LASA-3, le sue piccole dimensioni hanno costretto all'utilizzo della tecnica W&R, che peraltro é la piú usata per magneti da laboratorio, superando via via tutte le difficoltà sopra esposte.

Trattandosi di una prima realizzazione si é ritenuto utile eseguire una serie di prove sui possibili materiali da utilizzare sia come supporti che come accessori di costruzione per verificarne il comportamento ad alta temperatura. Ciò ha permesso di selezionare tali materiali e di mettere a punto la preparazione del supporto di avvolgimento e le tecniche di costruzione delle terminazioni. A tale scopo é stata estremamente utile la realizzazione di un prototipo in scala 1:1 che ha evidenziato alcuni punti deboli della tecnica costruttiva adottata originariamente.

Il prototipo, avvolto su un supporto di acciaio AISI 316, ricoperto da un nastro di vetro e trattato quindi sotto vuoto, ha evidenziato alla fine del trattamento un notevole calo della resistenza di isolamento. Successive prove sui componenti isolanti hanno evidenziato la presenza di composti organici nel nastro di vetro utilizzato e la conseguente forte produzione di carbonio durante la combustione ad alta temperatura che danneggiano irreparabilmente l'isolamento. Un secondo inconveniente legato al non ottimale fissaggio delle terminazioni interne dell'avvolgimento ha provocato la rottura del conduttore durante la prima energizzazione a correnti notevolmente inferiori a quella critica.

Il primo solenoide in Nb₃Sn realizzato e funzionante presso il laboratorio é stato chiamato LASA-3; le sue caratteristiche costruttive sono riportate in figura 14.

Diametro esterno	$\phi_{est} = 39.5 \text{ mm}$
Diametro interno	$\phi_{int} = 15.5 \text{ mm}$
Altezza	$h = 59.5 \text{ mm}$
Numero spire totali	1056
Numero strati	16
Resistenza totale avvolgimento	10.2 Ω
Linea di carico	$B_o = 2.04 \times 10^{-2} \text{ T}$
Corrente critica	$I_c = 320 \text{ A}$
Campo massimo al centro	$B_o = 6.52 \text{ Tesla}$
Induttanza	$8.57 \times 10^{-3} \text{ Henry}$

Figura 14: Lasa-3

Per la sua realizzazione si é utilizzato del conduttore di produzione Vacuumschmelze contenente 6156 filamenti superconduttivi disposti attorno ad un nucleo stabilizzante in rame protetto da una barriera di tantalio (figura 13). Il cavo, del diametro di 0.7 mm, é fornito rivestito con calza di vetro di spessore 0.13 mm. Le fasi costruttive sono state le seguenti:

- preparazione del rocchetto di acciaio (AISI 310 S) su cui avvolgere il cavo.
- Sabbiatura, rivestimento con gel di silice e trattamento termico.

Strato n.	Spire n.	Diametro esterno
1	69	$\Phi_{out} = 17.2 \text{ mm}$
2	136	$\Phi_{out} = 18.5 \text{ mm}$
3	202	$\Phi_{out} = 20.4 \text{ mm}$
4	270	$\Phi_{out} = 21.9 \text{ mm}$
5	337	$\Phi_{out} = 23.6 \text{ mm}$
6	404	$\Phi_{out} = 24.5 \text{ mm}$
7	472	$\Phi_{out} = 26.3 \text{ mm}$
8	537	$\Phi_{out} = 27.5 \text{ mm}$
9	601	$\Phi_{out} = 29.1 \text{ mm}$
10	666	$\Phi_{out} = 30.4 \text{ mm}$
11	729	$\Phi_{out} = 32.1 \text{ mm}$
12	794	$\Phi_{out} = 33.7 \text{ mm}$
13	859	$\Phi_{out} = 35.0 \text{ mm}$
14	922	$\Phi_{out} = 36.6 \text{ mm}$
15	992	$\Phi_{out} = 38.2 \text{ mm}$
16	1056	$\Phi_{out} = 39.5 \text{ mm}$
	Pick-up	
1	110	$\Phi_{int} = 41.0 \text{ mm}$
2	220	$\Phi_{out} = 41.4 \text{ mm}$

Figura 15: Scheda costruttiva del magnete Lasa-3

- Preparazione di tutti gli accessori di avvolgimento (dischi in mica, particolari di Macor, G 11).
- Rivestimento in mica del rocchetto per migliorare l'isolamento verso massa e garantire l'assenza di interazioni fra rocchetto ed avvolgimento.
- Avvolgimento della bobina con rivestimento ogni 4 o 5 strati con gel di silice per ottenere un parziale isolamento fra spira e spira e fra gli strati ottenendo un parziale bloccaggio delle spire che tenderebbero a muoversi durante il trattamento termico a causa della perdita di pre-stressing o durante l'impregnazione. Particolare cura é stata posta alle uscite dei conduttori per i collegamenti terminali e per i prelievi di tensione che debbono essere preventivamente piegati e fissati nella posizione pressoché definitiva.
- Verifiche elettriche di continuità ed isolamento.
- Trattamento termico (ciclo: 0-350 gradi centigradi in 2 ore; mantenimento a 350 gradi per 2 ore; 350-700 in due ore; mantenimento a 700 gradi per 85 ore a pressione uguale o inferiore a 10⁻⁴ mbar.)
- Saldatura terminali, verifiche elettriche e di isolamento.
- Impregnazione seguendo la tecnica sperimentata positivamente con LASA-2.
- Esecuzione di un pick up coil.
- Impregnazione del pick up e fissaggio riscaldatori.

Una particolare scheda costruttiva come già visto per LASA-4 é stata per la prima volta redatta per LASA-3; essa é riportata in fig.15

3.2 Lasa-5

La coppia di magneti LASA-2-3 ha funzionato in modo piú che soddisfacente in termini di corrente critica dei due avvolgimenti separati, ha però una limitazione dovuta a un non corretto adattamento delle rette di carico dei due magneti. Questo significa che, avendo Lasa-2 una corrente di transizione di circa 140 A, limita le prestazioni di LASA-3 che avrebbe agevolmente potuto raggiungere 160 A con un aumento del campo al centro di piú di un Tesla.

L'avvolgimento LASA-5 é stato perciò progettato ed eseguito allo scopo di essere accoppiato con LASA-4 sfruttando al meglio le caratteristiche dei conduttori e con rette di carico tali da ottimizzare le potenzialità dei due singoli magneti una volta accoppiati.

Pur seguendo in modo sostanziale le tecniche esecutive di LASA-3 sono state apportate alcune piccole modifiche migliorative quali:

- finestre delle pareti del rocchetto di supporto per poter applicare dei riscaldatori interni a contatto dell'avvolgimento;
- esecuzione di due prelievi di tensione intermedi che permettano lo studio della propagazione del quench secondo le modalità che verranno piú avanti discusse.

Diametro esterno	$\phi_{est} = 62.3$ mm
Diametro interno	$\phi_{int} = 20.3$ mm
Altezza	$h = 121$ mm
Numero spire totali	3847
Numero strati	28
Resistenza totale avvolgimento	20.6 Ω
Linea di carico	$B = 3.77 \times 10^{-2}$ l
Corrente critica	$I_c = 220$ A
Campo massimo al centro	$B = 8.3$ Tesla
Induttanza	0.127 Henry

Prelievi di tensione	1	2	3	4
.Strato	1	12	20	28
Spira°n	1	1664	2762	3847

Figura 16: Caratteristiche costruttive di Lasa-5

Le caratteristiche di LASA-5 sono riportate in fig.16 ed in fig.17 é riprodotta la scheda costruttiva

Il magnete é stato realizzato seguendo la stessa procedura utilizzata per LASA-3 tuttavia, pur avendo un ottimo isolamento verso massa a fine avvolgimento (500 M Ω), il valore di questo é diminuito in modo considerevole durante il trattamento termico risultando alla fine di 3.2 K Ω . Questo fatto evidenzia che con l'aumento delle dimensioni dell'avvolgimento é indispensabile introdurre una fase di bruciatura degli appretti in atmosfera ossidante che consenta di asportare la maggior quantità possibile di carbonio.

I risultati ottenuti in termini di stabilità e funzionamento sono stati comunque molto soddisfacenti avendo raggiunto senza alcun problema il valore di corrente critica previsto. Figura 18 mostra l'avvolgimento alla fine del trattamento prima della sua impregnazione.

Le rette di carico dei magneti LASA-4-5 mostrano in fig.19 come si prevede di raggiungere, alimentando in serie i due solenoidi, un valore di campo magnetico pari ad 11 tesla con una corrente di 120 A in un foro utile di 20 mm.

4 Impregnazione

Durante la realizzazione di avvolgimenti superconduttori di tipo adiabatico, molto piú che in quelli convenzionali, é importante eseguire una corretta impregnazione degli stessi. Alla resina impregnante si richiede di conservare buone caratteristiche elettriche e meccaniche in condizioni estremamente severe di esercizio a causa degli elevati shock termici a cui sono sottoposte. Selezionate sulla base delle caratteristiche di viscosità, un certo numero di resine commerciali sono state sottoposte ad un test di resistenza allo shock termico avvolgendo intorno ad un esagono di AISI 316 del nastro vetro, impregnandolo con le varie resine in prova dentro uno stampo cilindrico ed eseguendo diversi cicli di trattamento termico (vedasi fig.20 con l'apparato di prova).

I provini ottenuti sono stati quindi sottoposti a ripetuti shock termici in azoto liquido. Ciò ha permesso di determinare quale fosse, tra le resine provate, la piú idonea alle nostre necessità in termini di viscosità, ciclo termico e rapporto di miscelazione con fibra di

Strato n.	Spire n.	Diametro esterno
1	139	$\Phi_{est} = 22.0 \text{ mm}$
2	275	$\Phi_{est} = 23.4 \text{ mm}$
3	415	$\Phi_{est} = 25.1 \text{ mm}$
4	552	$\Phi_{est} = 26.4 \text{ mm}$
5	691	$\Phi_{est} = 28.0 \text{ mm}$
6	830	$\Phi_{est} = 29.7 \text{ mm}$
7	967	$\Phi_{est} = 31.1 \text{ mm}$
8	1107	$\Phi_{est} = 32.6 \text{ mm}$
9	1247	$\Phi_{est} = 34.0 \text{ mm}$
10	1386	$\Phi_{est} = 35.2 \text{ mm}$
11	1528	$\Phi_{est} = 37.0 \text{ mm}$
12	1664	$\Phi_{est} = 38.2 \text{ mm}$
13	1799	$\Phi_{est} = 40.0 \text{ mm}$
14	1936	$\Phi_{est} = 41.7 \text{ mm}$
15	2071	$\Phi_{est} = 42.9 \text{ mm}$
16	2212	$\Phi_{est} = 44.5 \text{ mm}$
17	2347	$\Phi_{est} = 46.1 \text{ mm}$
18	2486	$\Phi_{est} = 47.4 \text{ mm}$
19	2623	$\Phi_{est} = 49.0 \text{ mm}$
20	2762	$\Phi_{est} = 50.3 \text{ mm}$
21	2896	$\Phi_{est} = 52.1 \text{ mm}$
22	3034	$\Phi_{est} = 53.4 \text{ mm}$
23	3168	$\Phi_{est} = 55.2 \text{ mm}$
24	3304	$\Phi_{est} = 56.5 \text{ mm}$
25	3440	$\Phi_{est} = 58.2 \text{ mm}$
26	3574	$\Phi_{est} = 59.6 \text{ mm}$
27	3710	$\Phi_{est} = 60.5 \text{ mm}$
28	3847	$\Phi_{est} = 62.3 \text{ mm}$

Figura 17: Scheda costruttiva del magnete Lasa-5

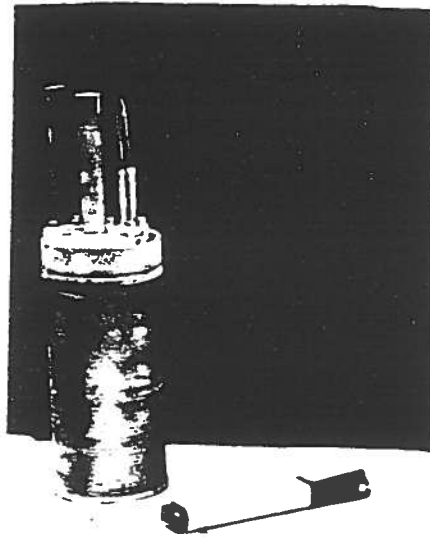


Figura 18: Il magnete lasa-5 prima dell'impregnazione.

vetro per evitare fessurazioni dovute ai diversi coefficienti di contrazione termica. Un buon compromesso in tal senso é lo si é riscontrato nella resina tipo 3M SCOTCHCAST 280 bicomponente. La tecnica generalmente usata per l'impregnazione dei nostri magneti é la seguente:

- preparazione dell'avvolgimento nello stampo, sigillatura e riscaldamento sotto vuoto a 60 gradi centigradi;
- riscaldamento dei due componenti della resina e loro miscelazione in recipienti separati onde favorire il ritorno in sospensione dei precipitati;
- pesatura accurata e miscelazione dei due componenti;
- iniezione della resina a bassissima velocità nell'avvolgimento, dal basso verso l'alto e dall'interno verso l'esterno. La fase di iniezione può durare alcune ore o anche giorni.
- Cicli di vuoto-pressione-vibrazione durante le varie fasi di iniezione.
- Raggiungimento della temperatura di trattamento di circa 70 gradi centigradi in alcune ore;
- ciclo termico a 70 gradi per 24 ore più 24 ore a 110 gradi.

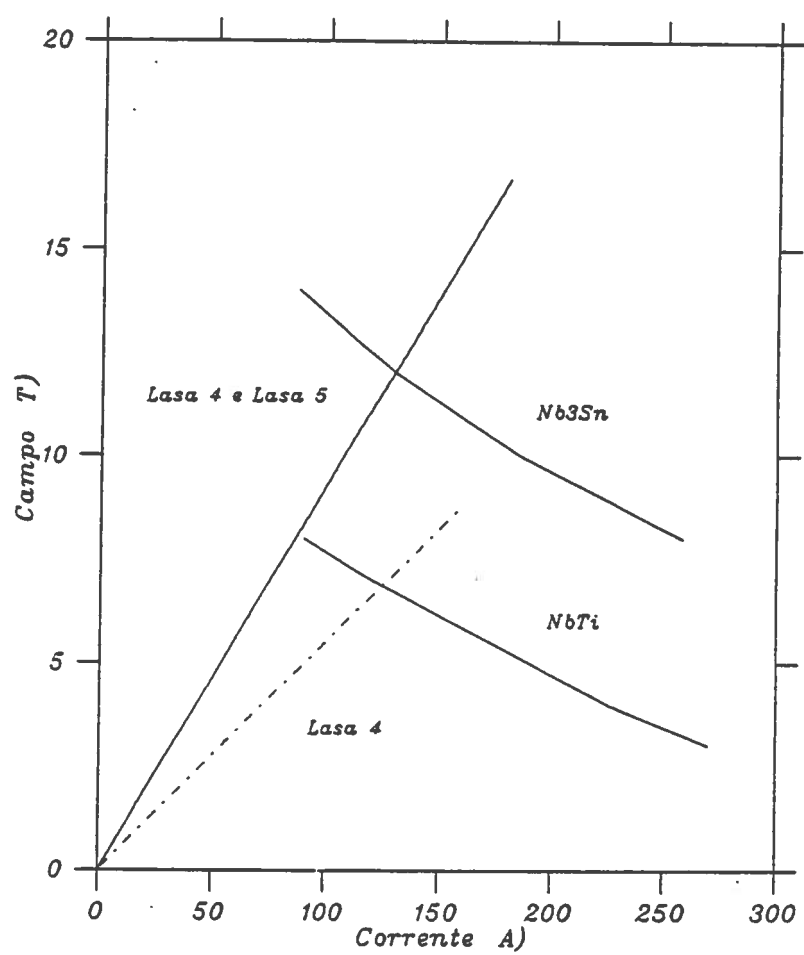


Figura 19: Rette di carico per il sistema Lasa4-Lasa5

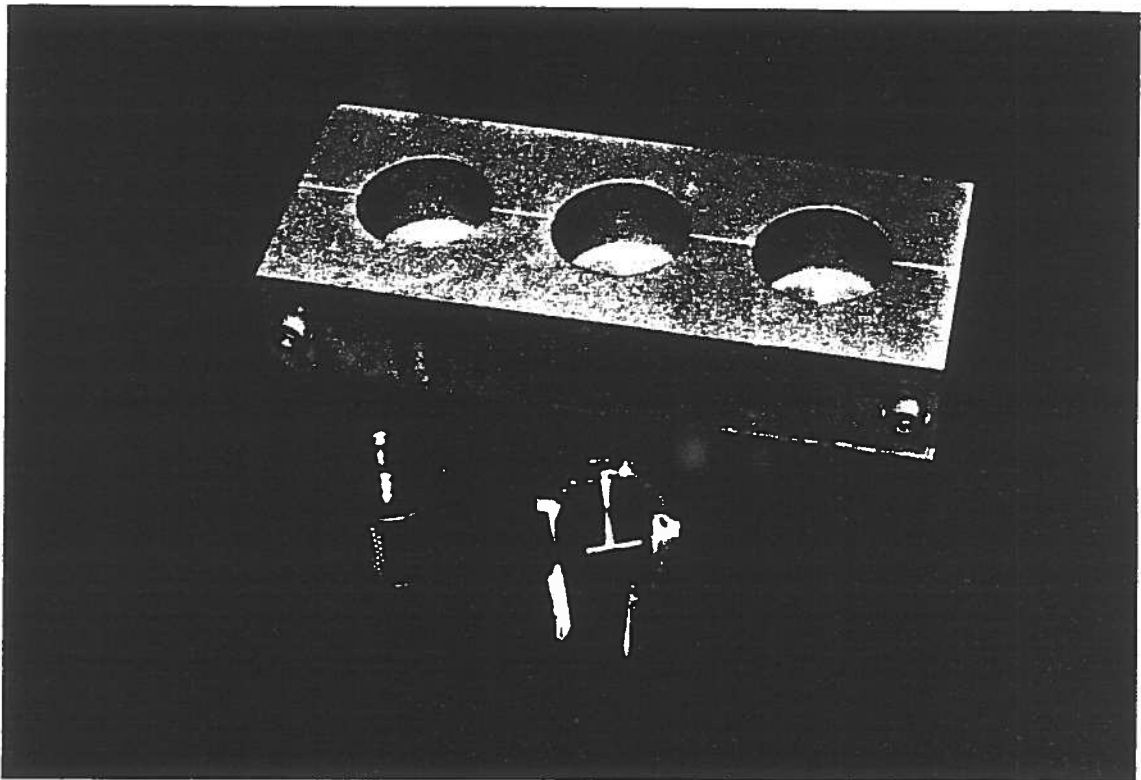


Figura 20: Apparato di prova per resine

Come é noto le resine a caldo, pur essendo il loro utilizzo piú complesso, possiedono migliori caratteristiche elettromeccaniche ed offrono il grande vantaggio di un tempo di gelificazione estremamente piú lungo delle resine a freddo, consentendo quindi una migliore penetrazione negli interstizi di avvolgimento. Se ciò é sempre auspicabile lo é in maggior misura nel nostro caso in cui le dimensioni dei conduttori e degli avvolgimenti sono estremamente ridotte. Riteniamo comunque che nel nostro campo di applicazione i problemi principali siano risolti anche se come abbiamo potuto verificare nella realizzazione di LASA-4 e 4bis dovranno essere studiate tecniche piú idonee per l'iniezione della resina nella parte interna dell'avvolgimento.

5 Criogenia ed adduttori di corrente

Gli avvolgimenti precedentemente descritti per poter funzionare in modo adeguato richiedono di essere portati alla temperatura di 4.2 K immergendoli in elio liquido. Per tale motivo sono stati utilizzati due dewars, atti a contenere le coppie LASA-2-3 e LASA-4-5 e dotati di finestre ottiche che consentono di verificare i livelli dell'azoto nello schermo e dell'elio liquido nella camera interna in cui si introducono i magneti. Questi ultimi sono fissati alla flangia superiore mediante tiranti. Sulla stessa flangia sono ricavati i fori per l'introduzione dell'elio liquido, per gli adduttori di corrente, per il passaggio dei fili dei riscaldatori e dei prelievi di

tensione delle bobine.

Per l'alimentazione dei solenoidi sono stati progettati e costruiti vari modelli di adduttori di corrente utilizzando calze di rame inserite prima in tubi di vetroresina e poi in tubi di acciaio inox. Le calze di rame sono fissate agli estremi con contatti di rame idonei al collegamento all'avvolgimento da un lato ed all'alimentatore e resistore di dumping nella parte esterna.

Gli adduttori pur essendo ottimizzati per circa 150 A hanno dato buoni risultati anche a correnti superiori ai 200 A. I gas freddi penetrando nella parte inferiore attraverso appositi fori raffreddano gli adduttori e fuoriescono dalla parte centrale del collegamento esterno; favoriscono inoltre la fuoriuscita dei gas dal criostato in caso di quench.

6 Risultati sperimentali

La realizzazione dei magneti in NbTi e Nb₃Sn descritti, é stata finalizzata ed ha permesso lo studio ed il confronto sperimentale con le teorie riguardanti le modalità di propagazione del quench e la determinazione dell'energia minima necessaria che bisogna fornire ad un magnete per farlo transire, indice della stabilità dello stesso rispetto ad eventuali disturbi a cui può essere soggetto.

6.1 Velocità di propagazione del quench

Se un zona dell'avvolgimento transisce allo stato resistivo, il calore ivi prodotto per dissipazione ohmica viene condotto nelle zone adiacenti causandone l'aumento di temperatura e la relativa trasizione di fase.

É quindi possibile pensare, in caso di quench, ad una zona resistiva che propaga all'interno del magnete con velocità diversa nelle direzioni azimutale o longitudinale, radiale ed assiale. Il diverso valore delle tre velocità é dovuta in primo luogo alla natura fortemente anisotropa dell'avvolgimento, che produce una sensibile dipendenza della conducibilità termica dalla direzione considerata. É inoltre prodotta dalla disomogeneità del campo magnetico all'interno della bobina ed alla conseguente variazione dei valori critici di temperatura e densità di corrente da cui dipende il valore della velocità di propagazione del quench.

Mentre esiste una formula teorica riguardante la velocità longitudinale di propagazione del quench ormai accettata, la cui validità é stata sperimentalmente verificata anche dai nostri risultati, non esiste una teoria esatta a riguardo della propagazione trasversale né si possiedono dati sperimentali sufficienti per confermarla o smentirla. Proprio alla determinazione delle velocità di propagazione in direzione assiale e radiale del quench, ossia le velocità in direzione trasversale al cavo, sono state mirate le nostre misure.

Nelle campagne di misura condotte utilizzando i diversi magneti realizzati, il quench é stato indotto termicamente utilizzando i riscaldatori opportunamente predisposti sulle bobine; venivano quindi registrati i valori della corrente e delle tensioni a tutti i prelievi intermedi di cui gli avvolgimenti sono dotati.

I grafici riguardanti l'evoluzione temporale di queste grandezze sono stati quindi confrontati con quelli ottenuti da simulazioni eseguite con un codice numerico appositamente messo a punto al *L.A.S.A* che permette di variare in input i valori delle velocità. Mediante confronto tra le simulazioni ed i dati sperimentali, ne sono stati dedotti i valori corretti.

É importante sottolineare che ciò che ha permesso questo tipo di misura indiretto delle velocità di propagazione del quench é stato l'aver predisposto dei riscaldatori che inducessero

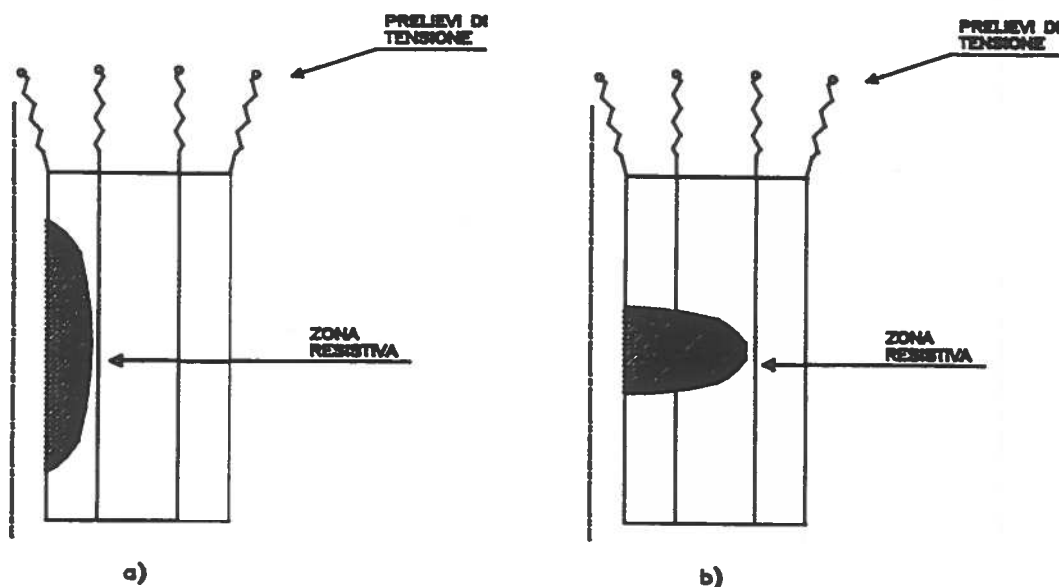


Figura 21

la transizione in un punto noto del magnete e l'aver dotato gli avvolgimenti con prelievi di tensione intermedi. Si rimanda al prossimo paragrafo una descrizione dettagliata delle caratteristiche tecniche del sistema utilizzato per indurre il quench forzato. Per comprendere invece l'importanza della presenza di prelievi di tensione intermedi, si deve ricordare che l'andamento della corrente e la tensione totale ai capi della bobina dipendono unicamente dai valori dell'induttanza e dalla resistenza totale dell'avvolgimento che varia nel tempo ed è funzione del volume e della temperatura della zona transita. Di conseguenza, non sarebbe possibile discernere, con questi due soli dati, una situazione in cui il quench propaga più velocemente in direzione radiale e meno in quella assiale o viceversa. Le due situazioni mostrate in fig.21: le due zone normali sono di forma assai diversa ma di ugual volume, producono quindi una decrescita della corrente ed un andamento della tensione identici.

La presenza di prelievi intermedi, invece, permette chiaramente di discernere la situazione a) dalla b) e di determinare quindi in modo preciso le due velocità radiale ed assiale. È chiaro a questo punto che, tanto maggiore è il numero dei prelievi di tensione quanto più precisa può essere la misura della velocità .

Dal punto di vista costruttivo, la realizzazione dei diversi prelievi di tensione richiede una progettazione tale da ottimizzare l'utilizzo degli spazi per le connessioni elettriche sulla flangia di testa del magnete, spazio che è tanto minore quanto più piccolo è l'avvolgimento. Inoltre le connessioni devono essere robuste e non permettere movimenti che potrebbero provocare fratture del cavo, specie nel fragilissimo Nb_3Sn .

Per quanto riguarda invece la disposizione dei riscaldatori, la scelta più significativa è sul diametro interno a metà altezza dell'avvolgimento. Questo è infatti il punto in cui è massimo il valore del campo magnetico e di conseguenza sono massimi gli sforzi di origine elettromagnetica a cui è sottoposto il cavo; contemporaneamente essendo massimo il campo saranno minimi i valori critici di densità di corrente e temperatura. Il concorrere di questi

MAGNETE	POSIZIONE RISCALDATORE	NUMERO RISCALDATORI
LASA 2	A	1
LASA 3	A	1
LASA 4	A B	2 2
LASA 4 BIS	A B C D	1 1 1 1
LASA 5	A B	1 1

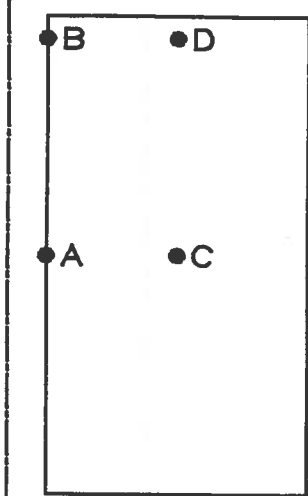


Figura 22: Numero e posizione dei riscaldatori nei magneti Lasa

due fattori rende tale punto il piú probabile da cui possa avere inizio un quench spontaneo durante l'utilizzo di un magnete. Per questo motivo, tutti gli avvolgimenti, tranne LASA-3 sono stati forniti di riscaldatori in tale posizione, oltre che di altri in posizioni diverse ritenute comunque interessanti per gli studi di propagazione. La tabella di fig.22 riporta il numero di riscaldatori e la loro posizione per ciascun magnete.

Il supporto di LASA-3, come già accennato, non é stato fornito di finestre che permettesero, una volta trattato termicamente l'avvolgimento, di apporre i riscaldatori direttamente a contatto con l'avvolgimento. Si é tentato quindi di farlo transire riscaldandolo con una CLTS incollata sul supporto di acciaio. Le energie necessarie per riuscire a far transire il superconduttore attraverso l'acciaio bagnato dall'elio, sono state pero' tali da bruciare la resistenza del riscaldatore e non permettere altre misure.

In fig.23 sono riportati tutti i quench fatti, indicando i magneti e le correnti utilizzate. La lettera accanto al valore della corrente indica, in riferimento alla fig.22, il riscaldatore selezionato (A,B,C,D) o se il quench é avvenuto spontaneamente (Q.S). In alcuni casi é stato utilizzato un Quench Detection System (QDS) che, non appena rivelato l'insorgere del quench interrompeva l'alimentazione; altre volte il QDS non é stato utilizzato e l'alimentazione veniva interrotta manualmente permettendo una crescita maggiore della resistenza e delle tensioni.

Dall'analisi delle misure fatte sino ad oggi si può concludere che:

- Utilizzando il magnete LASA-2 sono stati eseguiti un numero esauriente di quench a diversi valori di corrente, anche vicini al valore critico, sia utilizzando il magnete singolarmente sia alimentandolo in serie con LASA-3
- Il magnete LASA-3 non é stato invece utile per gli studi di propagazione per l'impossibilitá di farlo transire in modo controllato. La sua realizzazione ha, per con-

Lasa-2 alimentato singolarmente	Lasa-3 alimentato in serie con Lasa-2	Lasa-4 alimentato singolarmente	Lasa-4-bis alimentato singolarmente	Lasa-5 alimentato singolarmente
60.06 (A) A 70.01 (A) A 80.61 (A) A 90.75 (A) A 100.74 (A) A 110.55 (A) A 120.40 (A) A 130.00 (A) A 132.00 (A) Q.S	120 (A) A		60.29 (A) A 60.29 (A) C 70.42 (A) A 70.42 (A) C 80.10 (A) A 80.80 (A) C 90.46 (A) A 91.70 (A) C 98.30 (A) C 100.0 (A) A 111.0 (A) Q.S 113.0 (A) Q.S	249.7 (A) A
Lasa-2 alimentato in serie con Lasa-3	Lasa-3	Lasa-4 alimentato in serie con Lasa-5	Lasa-4-bis alimentato in serie con Lasa-5	Lasa-5 alimentato in serie con Lasa-4
60.0 (A) A 70.0 (A) A 80.0 (A) A 90.0 (A) A 100.0 (A) A 100.0 (A) A 110.0 (A) A 120.0 (A) A 125.6 (A) A 139.0 (A) Q.S		40.0 (A) A 60.0 (A) A 70.0 (A) Q.S	80.0 (A) A 90.0 (A) A 90.0 (A) C 101.0 (A) Q.S	40.0 (A) A 50.0 (A) A 60.0 (A) A in serie con Lasa-4-bis 75.0 (A) A 85.5 (A) A 95.4 (A) A

Figura 23: Quench effettuati e condizioni operative

tro, permesso di acquisire esperienza riguardo alle tecniche costruttive di avvolgimenti in Nb_3Sn , messe poi a frutto con la realizzazione di LASA-5.

- Con LASA-4 si sono potute fare solo poche misure a causa del suo ridotto valore di corrente critica, di molto inferiore al valore atteso. Questo ha limitato anche i valori di corrente a cui sono state fatte le misure di propagazione di quench nel Nb_3Sn utilizzando LASA-5, che al primo era connesso in serie.
- Una quantità esauriente di dati sono stati invece raccolti utilizzando LASA4-bis singolarmente ed alcune misure sono state fatte utilizzando questo avvolgimento in coppia con LASA-5 sia facendo transire il NbTi sia il Nb_3Sn .
- Il magnete LASA-5 è stato alimentato una sola volta singolarmente ed è stato fatto transire alla corrente $I=250$ A. In questa occasione si è prodotta una scarica di tensione ai terminali che ha bruciato il connettore, probabilmente mal isolato, ed ha danneggiato l'avvolgimento. Gli unici dati riguardo al Nb_3Sn acquisiti sono quindi quelli ottenuti precedentemente facendo transire LASA-5 connesso in serie all'avvolgimento in NbTi che lo conteneva e quindi a valori di campo e corrente distanti da quelli critici.

In conclusione quindi, risulta esauriente la quantità di dati raccolti con i magneti a disposizione in NbTi mentre sono ancora insufficienti i dati relativi a quelli in Nb_3Sn . In particolare per questi ultimi tutte le misure sono state fatte a valori di corrente di molto inferiori a quello critico.

Si pensa quindi, per avere dati riguardo le velocità di propagazione del quench nel Nb_3Sn a valori di campo e corrente più alti, di rendere LASA-3 utilizzabile tornendo il supporto in AISI 310 e creando le allocazioni per i riscaldatori; di avvolgere inoltre un nuovo magnete delle stesse dimensioni di LASA-5 ed utilizzarlo per altre campagne di misura sia usandolo singolarmente, sia inserendolo in LASA-4-bis. In questo secondo caso però si pensa di alimentare i due magneti indipendentemente, in modo tale che LASA-4-bis non limiti, visto il suo valore di corrente critica comunque inferiore rispetto a quello atteso, le potenzialità di LASA-5.

6.2 Misure di stabilità

Tra i diversi tipi di disturbi che possono causare l'insorgere di un quench, i meno controllabili e per questo più pericolosi, sono disturbi transienti e puntuali, quali per esempio i rilasci di energia dovuti a microfratture delle resine. La teoria prevede un valore minimo E_0 di energia che deve essere rilasciata istantaneamente in un punto affinché la zona normale propaghi. Se l'energia fornita è minore di E_0 il calore condotto verso le zone adiacenti è maggiore di quello generato per dissipazione ohmica all'interno della zona transita e questa di conseguenza si raffredda e non propaga.

Per poter misurare il valore di E_0 si è quindi pensato di indurre il quench scaricando su di un riscaldatore un condensatore di capacità nota, in modo da conoscere l'energia ceduta al superconduttore. Si utilizzano dapprima energie tali da non riuscire a provocare il quench aumentandoli gradualmente fino a far transire la bobina: l'energia utilizzata in quest'ultimo caso fornirà il valore di E_0 richiesto.

È stato dapprima utilizzato, a tal fine, un condensatore da $1000 \mu F$ 63-V elettrolitico. La carica di tale condensatore è controllata da un circuito temporizzato che provvede, al

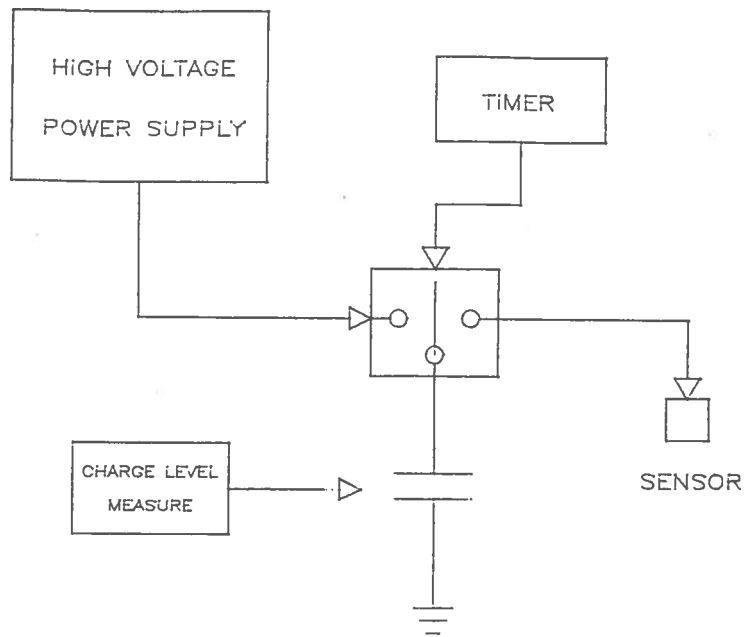


Figura 24

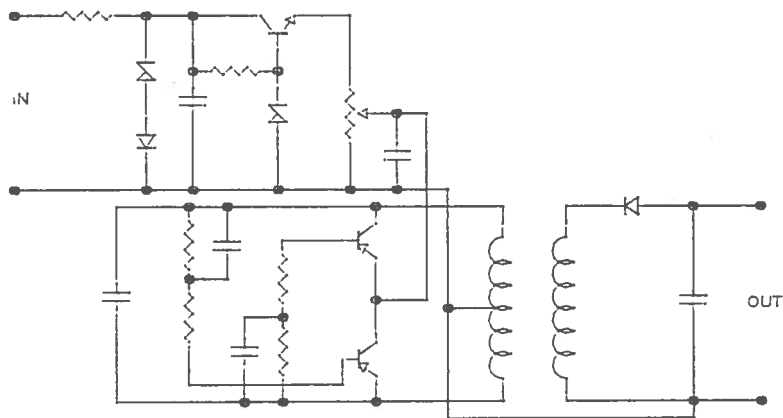


Figura 25

momento opportuno, a scaricare l'energia immagazzinata sull'estensimetro selezionato come riscaldatore. Il sistema é pensato per scaricare il 100% dell'energia in un secondo. Le tensioni in gioco raggiungono un massimo di 48V corrispondenti ad un'energia di 1J.

Con questo sistema sono state eseguite delle misure nelle condizioni operative e con i risultati sotto riportati:

- LASA-1: i riscaldatori sono inseriti tra strato e strato dell'avvolgimento. I valori dell'energia trovati sono maggiori di quelli teorici e ciò é stato imputato al fatto che i riscaldatori non sono a diretto contatto con l'avvolgimento ma isolati da alcuni strati di nastro di vetro. Di conseguenza l'energia misurata risulta essere la somma di quella propria per indurre il quench e di quella necessaria per riscaldare l'isolamento
- LASA-2: Il riscaldatore é incollato esternamente alla bobina. I valori dell'energia misurati sono di diversi ordini di grandezza superiori rispetto a quelli attesi. Senza dubbio, in questo caso, la maggior parte del calore prodotto dal riscaldatore viene ceduto all'elio anziché alla bobina. L'aver ricoperto il riscaldatore di diversi strati di isolante ha ridotto i valori dell'energia misurati che rimangono comunque non confrontabili con quelli previsti.
- LASA-4: Per evitare i problemi rilevati nei due casi precedenti in questo magnete i riscaldatori sono stati posti tra strato e strato senza isolamento. I valori misurati continuano però ad essere di molto superiori a quelli teorici.
- LASA-4-bis: La posizione dei riscaldatori é identica al caso precedente. La variante che é stata fatta nelle misure condotte con questo magnete riguarda il condensatore utilizzato che é stato sostituito con uno di minor capacità in modo tale da ridurre il suo tempo di scarica ed avvicinarsi maggiormente alla situazione di "disturbo transiente".

Si é utilizzato a tal fine un condensatore di capacità di $1\mu\text{F}$ 1000V in poliestere riducendo il tempo di scarica ad 1 ms. Il circuito per l'induzione forzata del quench é basato su di un timer 555 che svolge le funzioni di mantenimento a massa del condensatore ed al comando di start provvede alla sua carica fino al valore da noi prefissato. Un display (barra a led) consente di visualizzare la percentuale di energia immagazzinata. La tensione ai capi del condensatore é letta con DVM a 4 cifre. In figura 24 e 25 rispettivamente, sono riportati lo schema a blocchi del sistema utilizzato per l'alimentazione e scarica del condensatore ed il circuito elettrico dell'alimentatore.

Questa modifica ha portato una riduzione di un ordine di grandezza delle energie misurate, che rimangono tuttavia tre ordini di grandezza superiori ai valori teorici attesi.

É probabile che la discrepanza che ancora in queste ultime misure é emersa, sia dovuta al fatto che un riscaldatore, per quanto piccolo non produce comunque un riscaldamento puntuale e causa la transizione contemporanea di piú fili adiacenti di superconduttore. I dati fin'ora raccolti andrebbero quindi analizzati utilizzando una teoria delle perturbazioni che consideri l'inizio distribuito su di una zona di volume piú grande dell'M.P.Z.

Il dato emerso con certezza é comunque l'impossibilità di ottenere misure attendibili dell'energia minima di quench utilizzando riscaldatori che siano solo incollati esternamente all'avvolgimento e quindi soggetti all'asporto di calore da parte dell'elio. Questo ha impedito

fin'ora misure di stabilità per magneti in Nb_3Sn in quanto, dovendo essere trattati termicamente a 700° dopo essere stati avvolti, non é possibile inserire al loro interno dei riscaldatori, quanto meno del tipo fin'ora da noi utilizzato.

REFERENZE

- M.N. Wilson, *Superconducting Magnets*, Oxford University Press (N.Y. 1983)
- G. Varieschi, *Studi e misure sulla stabilità del quench in magneti superconduttori ad alto campo.*, Tesi di laurea, Università degli studi di Milano.
- M. Canali, *Propagazione della transizione di fase superconduttiva-resistiva, termicamente indotta, in solenoidi multipli ad alti campi: studi e misure.* , Tesi di laurea, Università degli studi di Milano.
- S. Piuri, *Studio della propagazione del quench e misure su avvolgimenti superconduttivi in NbTi e Nb₃Sn* , Tesi di laurea, Università degli studi di Milano.
- E.Acerbi, G.Baccaglioni, M.Canali, L.Rossi, *Experimental Study of the Quench Properties of Epoxy Impregnated Coupled Coils wound with NbTi and NbSn*, IEEE Trans. on Magnetics vol.28, N.1, January 1992, p.731
- E.Acerbi, G.Baccaglioni, P.Jarvis, J.Mellors, L.Rossi, M.Thoner, G.Volpini, *The 18 Tesla-100 mm 4.2 K Free Bore Solenoid for LASA - Milan* , IEEE Trans. on Magnetics vol.28, N.1, January 1992, p.428