POLITECNICO DI TORINO

I Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in Ingegneria Nucleare

TESI DI LAUREA

CERN-THESIS-2002-017
17/12/2001

ANALISI ELETTROMAGNETICA TRIDIMENSIONALE DELLE TESTE DELLE BOBINE NEL DIPOLO PRINCIPALE DI LHC

Relatore
Prof. Ing. Giovanni Del Tin

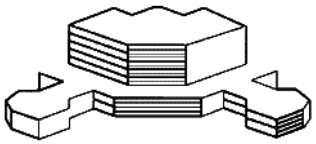
Relatori esterni
Ing. Paolo Fessia (C.E.R.N.)

Ing. Diego Perini (C.E.R.N.)

Candidato
Alberto Schiappapietra

Dicembre 2001

Questo lavoro è stato reso possibile grazie al sostegno finanziario e logistico di:



ASP, Associazione per lo Sviluppo scientifico e tecnologico del Piemonte

CERN, European Organization for Nuclear Research

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato reso possibile solo grazie all'immenso aiuto ed alla grande dedizione di una persona, Paolo Fessia, che ha fatto ben più di quel che ci si possa aspettare da un supervisore e di Diego Perini, per la sua supervisione.

Un ringraziamento particolare va al prof. Del Tin per avermi dato la possibilità di affrontare questa esperienza.

Vorrei inoltre ringraziare, per la loro collaborazione e disponibilità, Cristiano Lanza, Michele Modena, Stephan Russenschuck, Stephane Sanfilippo ed Ezio Todesco, rigorosamente in ordine alfabetico.

Un grazie colletivo inoltre va ai miei genitori, per la dignità, la semplicità e la generosità, ai miei "quattro fratelli", per avermi riempito di nipoti, alla mia famiglia *turineisa* o come diavolo si scrive, ai compagni di corso, agli amici della caffetteria del building 30, agli "angeli di via Vanchiglia", al Saint Denis ed alla Bolivia.

A Veronica, Virginia, Martina, Leonardo....

rigorosamente in ordine di apparizione.

Indice

Introduzione 1

Capitolo 1. Large Hadron Collider (LHC) 3
1.1 Il CERN 4
1.2 Il progetto LHC 6
1.2.1 Layout di LHC 6
1.3 Magneti per acceleratori 9
1.4 Design dei magneti 10
1.4.1 Distribuzione ideale di corrente 10
1.4.2 Geometria reale 11
1.5 Il dipolo principale di LHC 12
1.5.1 Principali caratteristiche e parametri del dipolo 12
1.5.2 Struttura meccanica 13
1.5.3 Bobina superconduttrice 14
1.5.4 Cavi superconduttori 15
1.5.5 Criostato 16
1.6 Superconduttività 18

Capitolo 2. Le estremità del magnete: caratteristiche principali 21
2.1 Il problema elettromagnetico delle teste 22
2.1.1 Forze elettromagnetiche 22
2.1.2 Qualità di campo 22
2.2 Il design delle teste 24
2.2.1 La bobina 24
2.2.2 Il collare 26
2.2.3 Il giogo 27
2.3 Gli spaziatori 30
2.3.1 Geometria degli spaziatori 31
2.4 Processi di produzione delle bobine 34
2.4.1 Bobinaggio 34
2.4.2 Pressatura e polimerizzazione 35
2.4.3 Impregnazione 36

Capitolo 3. Produzione industriale degli spaziatori 37
3.1 Caratteristiche tecnologiche degli spaziatori 38
3.1.1 Caratteristiche meccaniche ed elettriche del G 11 39
3.1.2 Preparazione dei tubi in G 11 42
3.2 Produzione industriale degli spaziatori 43
3.2.1 Tolleranze geometriche 43
3.2.2 Lavorazione meccanica degli spaziatori 45
3.2.3 Controllo della produzione 49

Capitolo 4. Modello elettromagnetico delle teste 51
4.0.1 Scopo del modello elettromagnetico 52

4.1 Programma per il design degli spaziatori . . . 53
4.2 ROXIE . . . 54
4.2.1 Calcolo del campo magnetico in ROXIE . . . 54
4.3 Modello singola apertura . . . 56
4.3.1 Implementazione della geometria delle teste . . . 56
4.3.2 Output del programma . . . 57

Capitolo 5. Modello elettromagnetico a doppia apertura . . . 59
5.1 Modello doppia apertura lato non connessione . . . 60
5.1.1 Calcolo dei multipoli . . . 61
5.1.2 Misura sperimentale dei multipoli . . . 62
5.1.2.1 Misure a caldo . . . 62
5.1.2.2 Misure a freddo . . . 63
5.1.3 Analisi delle misure . . . 64
5.1.4 Elaborazione dell'output del modello . . . 64
5.1.5 Confronto fra il modello e le misure . . . 68
5.2 Modello doppia apertura lato connessione . . . 70
5.2.1 Approssimazione del layer jump . . . 70
5.2.2 Elaborazione dell'output del modello . . . 72
5.2.3 Confronto fra il modello e le misure . . . 75
5.3 Modello 3D del Layer Jump . . . 77
5.3.1 Output del modello . . . 79
5.3.2 Confronto fra i modelli . . . 82
5.4 Commenti al modello . . . 83

Capitolo 6. Analisi di sensibilità . . . 85
6.1 Scopo dell'analisi di sensibilità . . . 86
6.2 Peak Field . . . 89
6.2.1 Analisi del peak field in ROXIE . . . 89
6.2.2 Variazione di Beta . . . 91
6.2.2.1 Mappa di sensibilità per Beta . . . 98
6.2.3 Variazione di Z0 . . . 99
6.2.3.1 Mappa di sensibilità per Z0 . . . 103
6.2.4 Variazione della forma degli avvolgimenti . . . 104
6.2.4.1 Mappa di sensibilità per la forma degli avvolgimenti 108
6.2.5 Osservazioni . . . 109
6.3 Qualità di campo . . . 110
6.3.1 Analisi della qualità di campo lato non connessione . . . 110
6.3.2 Variazione di Beta . . . 111
6.3.3 Variazione di Z0 . . . 114
6.3.4 Variazione della forma degli avvolgimenti . . . 118
6.3.5 Analisi della qualità di campo lato connessione . . . 121
6.3.6 Variazione di Beta . . . 122
6.3.7 Variazione di Z0 . . . 123
6.3.8 Variazione della forma degli avvolgimenti . . . 126
6.3.9 Osservazioni . . . 127

Capitolo 7. Applicazioni pratiche del modello . . . 129
7.1 Proposta di variazione dello strato esterno della bobina nelle teste . . . 130
7.2 Studio della compattazione dei cavi nelle teste della bobina . . . 134
7.2.1 Teste della bobina dopo il bobinaggio . . . 134
7.2.2 Teste della bobina dopo la polimerizzazione . . . 138
7.2.3 Osservazioni . . . 142

Conclusioni . . . 143

Appendice A. Analisi delle misure di qualità di campo 145
Q.a Misure a caldo della qualità di campo 146
Q.a.a Misure sui prototipi 146
Q.a.b Misure sui magneti della preserie 148
Q.b Misure a freddo della qualità di campo 150
Q.b.a Misure SERIE 1 151
Q.b.b Misure SERIE 2 151
Q.b.c Misure SERIE 3 152

Appendice B. Articolo presentato alla conferenza "Magnet Technology 17" . 153

Bibliografia 159

Introduzione

Il presente lavoro rappresenta la sintesi dell'attività di ricerca condotta al CERN di Ginevra presso il gruppo LHC-MMS (Large Hadron Collider - Main Magnets and Superconductors).

L'acceleratore di particelle LHC sta entrando in una delle fasi più delicate della sua costruzione, la produzione in serie dei magneti superconduttori che generano il campo magnetico indispensabile a mantenere le particelle su un orbita circolare, i dipoli principali.

Risulta estremamente importante in questo momento individuare degli strumenti in grado di consentire modifiche del layout dei magneti senza che la produzione ne risulti eccessivamente rallentata.

In quest'ottica è stato creato un modello elettromagnetico tridimensionale delle estremità delle bobine del dipolo al fine di valutare l'influenza della topologia, in queste zone particolarmente complessa, dei cavi superconduttori su alcuni parametri fisici fondamentali per il funzionamento della macchina.

I risultati ottenuti da tali simulazione hanno permesso di compilare una matrice di sensibilità in grado di descrivere il comportamento del campo magnetico a seguito di una qualsiasi modifica del progetto delle teste delle bobine. Ciò rende possibile apportare modifiche al progetto del magnete anche durante la produzione di serie poiché minimizza i tempi di intervento riducendo la fase delle simulazioni al calcolatore

Il primo capitolo introduce brevemente il CERN, il progetto LHC e descrive il principio di funzionamento e le componenti fondamentali del dipolo principale.

Nel secondo capitolo si focalizza l'attenzione sulle teste delle bobine, la loro complessa geometria e i loro costituenti, con particolare attenzione per gli spaziatori. Questi sono forme in materiale plastico attorno ai quali vengono avvolti i conduttori determinandone in questa maniera la posizione.

Nel capitolo 3, viene descritta la produzione industriale degli spaziatori in modo da inquadrare nel suo contesto il lavoro svolto nel proseguio della tesi.

Nel quarto capitolo si pongono le basi per la costruzione del modello elettromagnetico che viene poi completato nel capitolo 5. Qui sono riportate alcune simulazioni dedicate allo studio della qualità del campo magnetico al fine di poter comparare i risultati ottenuti con le misure effettuate sui primi magneti giunti al CERN e validare il modello.

Il sesto capitolo è dedicato all'analisi di sensibilità delle teste per determinare l'effetto della variazione dei paramentri geometrici che descrivono gli spaziatori, sul campo magnetico.

Alcune applicazioni vengono presentate nel capitolo 7 per mostrare le potenzialità del modello.

Capitolo 1

Large Hadron Collider (LHC)

Il CERN di Ginevra ha avviato la costruzione di una nuova macchina acceleratrice che permetterà di far raggiungere alle particelle energie ancora più elevate. Questa nuova realizzazione costituisce una nuova frontiera della tecnologia e mette a frutto tutti i piú recenti studi fatti nel campo della criogenia e della superconduttività. Si vogliono qui di seguito illustrare le principali caratteristiche di LHC ed i suoi componenti, con particolare riferimento al dipolo principale.

1.1 Il CERN. 4
1.2 Il progetto LHC 6
1.2.1 Layout di LHC. 6
1.3 Magneti per acceleratori 9
1.4 Design dei magneti 10
1.4.1 Distribuzione ideale di corrente 10
1.4.2 Geometria reale 11
1.5 Il dipolo principale di LHC 12
1.5.1 Principali caratteristiche e parametri del dipolo. . . 12
1.5.2 Struttura meccanica 13
1.5.3 Bobina superconduttrice 14
1.5.4 Cavi superconduttori 15
1.5.5 Criostato 16
1.6 Superconduttività 18

1.1 Il CERN

Il CERN (European Laboratory for Particle Physics) dispone oggi di 10 acceleratori di particelle.

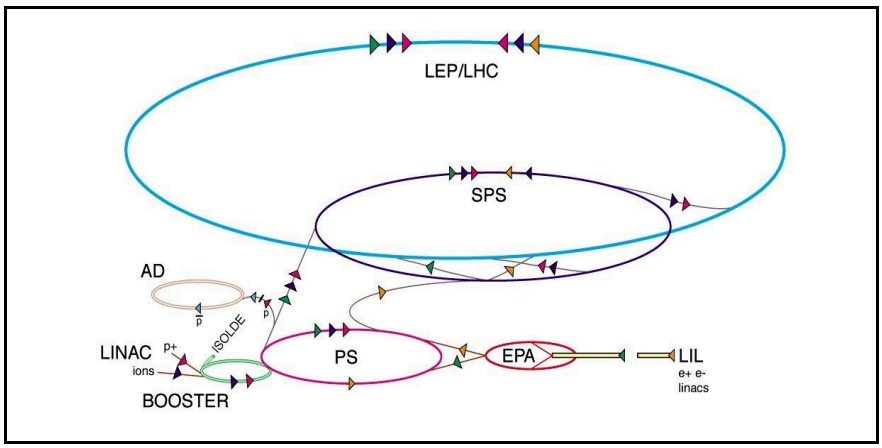


Figura 1.1 Complesso degli acceleratori del CERN

La prima macchina installata fu il *Proton Synchroton* (PS) tuttora funzionante. E' l'acceleratore piú versatile del CERN essendo è in grado di accelerare parimenti elettroni, protoni, ioni, positroni e antiprotoni. Con i suoi 200 m di diametro puó raggiungere energie di 28 GeV. Il PS è inserito in un sistema di macchine sperimentali denominato PS COMPLEX (Figura 1.2) e viene oggi utilizzato sia come primo stadio di accelerazione per i fasci che andranno successivamente immessi negli anelli più grandi (SPS, LEP o prossimanente in LHC), sia per fornire fasci di protoni ad alcuni esperimenti (ISOLDE, East Hall) e recentemente anche per la produzione di antiprotoni per AD (deceleratore di antiprotoni).

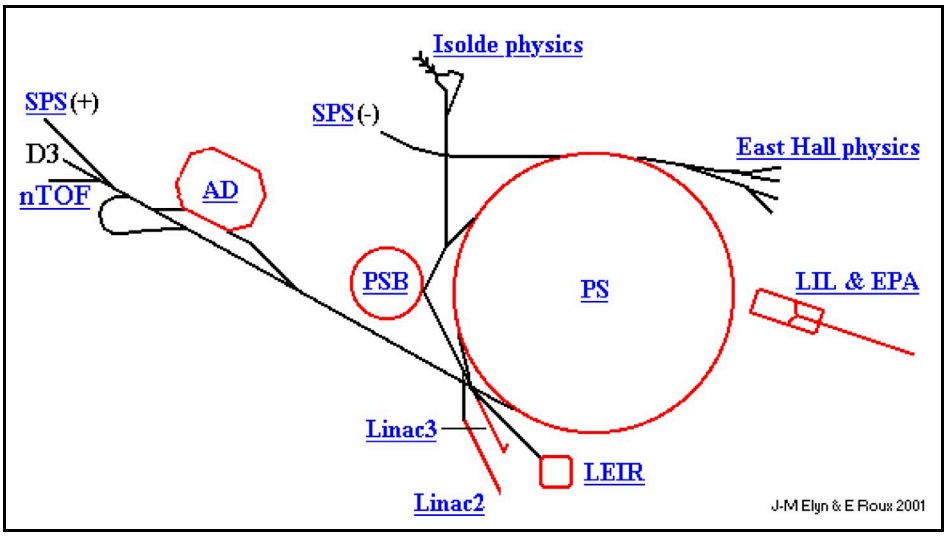


Figura 1.2 PS - COMPLEX

In seguito fu realizzato il *Super Proton Synchrotron* (SPS), un acceleratore di 6 km posizionato nel sottosuolo. Inizialmente fu adibito alla collisione di protoni-antiprotoni, modalitá nella quale ha permesso agli inizi degli anni '80 di osservare per la prima volta le particelle W e Z, vettori della forza debole. In seguito

alla costruzione del LEP, ha assunto il ruolo di iniettore di elettroni e positroni ed in futuro inietterà anche adroni per LHC. SPS conserva tuttoggi un suo specifico programma di ricerca accelerando ioni di piombo ad energie di 170 GeV per lo studio del quark-gluon plasma al fine di ricostruire i primissimi istanti successivi al big bang.

Il *Large Electron Positron collider* (LEP), entrato in funzione nel 1989, era il piú grande collisore di particelle mai costruito con i suoi 27 km di circonferenza situati a circa 100 m sotto il livello del suolo. Il LEP utilizzava elettromagneti convenzionali ed aveva una configurazione ad una sola apertura ove venivano accelerate particelle di differente carica (elettroni e positroni) in direzione opposta. Nel 1995 raggiunse il livello energetico necessario a produrre la particella Zo, vettore neutro della forza debole. Inoltre l'enorme quantitá di particelle rilevate nei quattro grandi esperimenti ha consentito di effettuare test di estrema precisione sul Modello Standard. Il LEP è stato fermato definitivamente nel novembre 2000 poichè il suo funzionamento era incompatibile con i lavori avviati per la costruzione delle infrastrutture necessarie per l'alloggiamento del futuro acceleratore, LHC, e dei suoi esperimenti. [7]

1.2 Il progetto LHC

Le nuove frontiere della fisica delle particelle impongono la costruzione di macchine capaci di arrivare ad energie sempre piú elevate; fino ad oggi la massima energia ottenuta accelerando protoni è stata dell'ordine dei 450 GeV in SPS. La comunità scientifica mondiale ha riscontrato la necessitá di una nuova macchina capace di arrivare ad ordini di grandezza differenti, 7 TeV per fascio (14 TeV all'urto). Per poter raggiungere tali prestazioni si è dovuto ricorrere a nuove tecnologie in grado di minimizzare i costi di costruzione e mantenimento, permettendo l'utilizzo delle infrastrutture sotterranee dell'anello del LEP. Sono stati quindi scelti dei magneti superconduttori capaci di raggiungere intensitá di campo superiori a paritá di raggio dell'anello ed aventi un costo T*m inferiore.

Si puó vedere dalla formula seguente come il campo magnetico dipenda in maniera inversamente proporzionale dal raggio dell'anello e direttamente dall'energia del fascio di particelle E:

$$B = \frac{E}{qRc} \tag{1}$$

dove q rappresenta la carica, R il raggio dell'anello e c la velocitá della luce.

Avendo bisogno di una energia di 7 TeV per fascio ed avendo il tunnel del LEP di circa 27 km di circonferenza, si necessita un campo magnetico dipolare pari a 8.33 T per curvare le particelle.

Per poter far collidere fasci di particelle aventi stessa carica è stato necessario adottare una configurazione a doppia apertura, ossia due camere a vuoto ciascuna dotata di proprie bobine superconduttrici alimentate in modo da creare campi di segno opposto, il tutto sorretto da un'unica struttura meccanica e criogenica per ridurre l'ingombro ed i costi (vedi pag. 12).

LHC avrá la possibilitá di far collidere sia protoni, a 7 TeV per fascio, sia nuclei pesanti (Pb-Pb) con un'energia totale nel centro di massa fino a valori di 1150 TeV (si veda tabella 1.2).

Nella figura 1.1 è riportato il sistema di iniezione del fascio di protoni. Questo viene prodotto nel LINAC (acceleratore lineare) a 50 MeV ed è poi accelerato nel BOOSTER di PS fino a 1.4 GeV. In PS i protoni vengono raggruppati in pacchetti di 10^{11} particelle aventi energia di 25 GeV e distanziati di 25 ns. Tre treni di 81 pacchetti cadauno vengono quindi inviati ad SPS in tre cicli e qui accelerati fino a 450 GeV per poi passare a LHC. I due fasci di protoni finali saranno costituiti in LHC da 2835 pacchetti ciascuno e verranno accelerati fino all'energia nominale di 7 TeV.

1.2.1 Layout di LHC

LHC è composto da 8 archi di 2456.16 m separati da 8 inserzioni; ogni singolo arco è a sua volta suddiviso in 23 celle. In quattro delle otto inserzioni i fasci di particelle vengono fatti incrociare, sono questi i siti dei grandi esperimenti di LHC, due ad alta luminositá[1] (ATLAS, punto 1, CMS, punto 5) e due a luminositá inferiore (ALICE, punto 2, LHC-b, punto 8).

Negli archi 2 e 8 avviene l'iniezione dei fasci da SPS, gli archi 3 e 7 sono preposti a collimare il fascio e garantirne la stabilità mentre nell'arco 6 avviene il "beam dumping". Qui, nel caso in cui il fascio divenga incontrollabile, le particelle vengono deviate in una galleria tangente alla circonferenza di LHC e fatte collidere contro un "dump block", un bersaglio in grafite e metalli pesanti ove il fascio si esaurisce. Nell'arco 4 è infine posizionato il sistema RF (radio frequenza) che provvede ad accelerare il fascio; un sistema RF è presente per ogni tubo di fascio (Figura 1.3).[11]

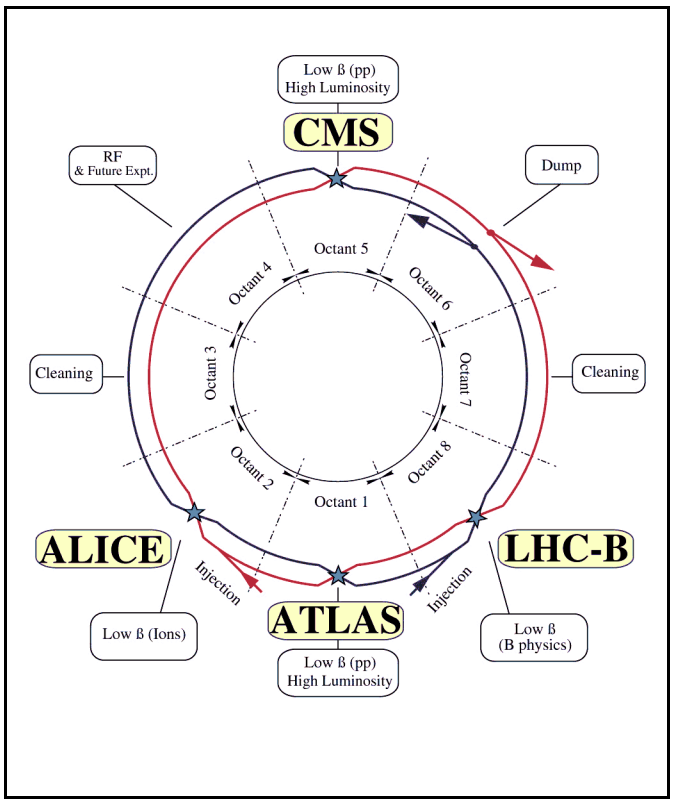


Figura 1.3 Layout di LHC

Ognuna delle 23 celle è a sua volta divisa in due semi-celle, ciascuna costituita da tre dipoli principali (MB) da 15 m aventi il compito di curvare la traiettoria delle particelle e da un quadrupolo (MQ) di 3.1 m per focalizzare il fascio; ai lati dei dipoli sono situati un sestupolo ed un decapolo mentre il quadrupolo vede alla sua sinistra un BPM (beam position monitor) ed un ottupolo (MO) ed alla sua destra un dipolo correttore ed un sestupolo. Questa struttura si ripete per 22 celle ogni arco tranne che per quella centrale dove il sestupolo è sostituito da apparati criogenici.(Figura 1.4)

1 La luminositá fornisce una misura del numero di eventi per secondo ed unitá di area ottenibili in una collisione fra fasci

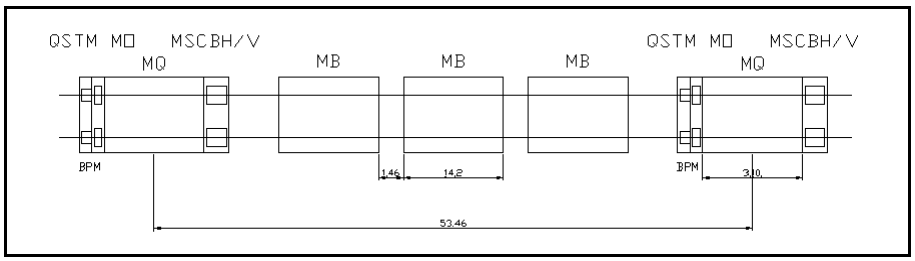


Figura 1.4 Semi-cella di LHC

Alla fine di ogni arco sono presenti delle celle di soppressione della dispersione il cui compito è di impedire l'allargamento del raggio di curvatura del fascio a seguito dell'aumento dell'energia prima delle zone di collisione, in corrispondenza degli esperimenti.[1]

Tabella 1.1 Parametri principali di LHC.

Caratteristica	**valore**	**unitá**
Energia del fascio	7	TeV
Energia all'immissione	0.45	TeV
Campo nominale del dipolo	8.33	T
Temperatura di funzionamento	1.9	K
Energia accumulata nel fascio	334	MJ
Luminositá	10^{34}	$cm^{-2}s^{-1}$
Intervallo tra pacchetti	25	ns
Particelle per pacchetto	10^{11}	
Emittanza trasversale normalizzata	3.75	µm.rad
Angolo d'incrocio	200	µrad
Vita del fascio	22	h
Vita di luminositá	10	h
Energia persa per giro	6.7	KeV
Potenza totale radiata per fascio	3.6	kW

1.3 Magneti per acceleratori

Le energie oggi necessarie per compiere nuovi esperimenti nel settore della fisica delle particelle sono tali da imporre importanti decisioni nella definizione delle infra strutture.

L'utilizzo di elettromagneti resistivi con correnti elettriche cosí elevate è limitato dall'imponente produzione di calore per effetto Joule, il cui smaltimento è gravoso sia in termini tecnici che economici, sia per l'elevato costo di alimentazione. Per questi motivi oggi si ricorre, per la costruzione dei magneti degli acceleratori ad elevate energie, alla tecnologia della superconduttività. Esempi di grandi acceleratori che utilizzino magneti superconduttori sono il TEVATRON, un sincrotrone a protoni costruito al Fermi National Accelerator Laboratory in Chicago (Illinois, USA), l'HERA (Hadron Elektron Ring Anlage), un collisore di elettroni e protoni costruito al DESY vicino ad Amburgo (Germania), il RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) al Brookhaven National Laboratory situato a Long Island (New York, USA) ed appunto il futuro grande acceleratore del CERN di Ginevra, LHC (Large Hadron Collider).

Esistono differenze fondamentali fra i magneti superconduttori utilizzati negli acceleratori e gli altri tipi di magneti superconduttori (solenoidi per rivelatori di particelle, magneti toroidali delle macchine per la fusione nucleare, ecc.) che fanno sì che il design e la costruzione costituiscano una branca della tecnologia a sé stante:

1. necessità di operare a densità di corrente molto elevate per poter produrre economicamente il richiesto campo magnetico di curvatura o di focalizzazione;
2. le forze elettromagnetiche sono caratterizzate da una distribuzione complessa e non-uniforme;
3. estrema precisione nella distribuzione del campo magnetico nelle piccole aperture;
4. elevato grado di riproducibilità ed affidabilità.

Queste caratteristiche fanno sì che la costruzione dell'acceleratore sia particolarmente complessa, in particolare:

- il punto 1 preclude la stabilizzazione criogenica;
- il punto 2 conduce a elaborate strutture meccaniche;
- il punto 3 richiede una estreme precisione dimensionale nella fabbricazione;
- il punto 4 impone di adattare i metodi di fabbricazione alle esigenze della produzione industriale in larga scala.[2]

1.4 Design dei magneti

Si vuole in questo paragrafo porre l'attenzione in particolare sui magneti responsabili della guida del fascio cioè i dipoli. Nei magneti superconduttori la distribuzione del campo è dominata dalla configurazione della bobina al contrario dei magneti convenzionali dove la forma del giogo in ferro è il parametro determinante nell'ottimizzazione del campo magnetico.

Il problema è essenzialmente bidimensionale poiché, fatto salvo per la zona delle teste, la distribuzione del campo deve essere la stessa in tutti i piani perpendicolari alla direzione dl fascio. Generalmente lo studio della geometria del magnete parte con un metodo analitico, integrando la legge di Biot-Savart che descrive il campo indotto da una corrente circolante in un cavo sottile:

$$\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} I \int_c dl \times \frac{\bar{r}}{r^3} \tag{2}$$

Quando la geometria delle bobine non è semplice, le si divide in piccole sezioni regolari in cui è possibile calcolare il campo analiticamente e successivamente si sommano i contributi con l'ausilio di software.[2]

1.4.1 Distribuzione ideale di corrente

Una linea di corrente distribuita su una superficie cilindrica circolare in funzione dell'angolo azimutale θ avente la seguente espressione:

$$I(\theta) = I_O \cos(n\theta) \tag{3}$$

genera un campo 2n-polo puro all'interno dell'apertura circolare (Figura 1.5).

Campi 2n-polo puri possono essere ottenuti inoltre attraverso correnti distribuite uniformemente in conduttori di forma particolare. La piú semplice di queste configurazioni ideali che produce un campo dipolare è formata dall'intersezione di due cilindri con i centri opportunamente spaziati ciascuno conducente corrente con densità uniforme e direzione opposta (Figura 1.5).

In generale i campi di multipoli puri possono essere ottenuti in aperture formate da regioni sovrapposte di conduttori, di sezione retta ellittica, con densitá di corrente uniforme e segno opportuno. In questa maniera il campo interno di un conduttore ellittico con semi-assi a e b, nelle direzioni x e y rispettivamente, e densitá di corrente uniforme Jè:

$$\bar{B} = \bar{B}_x + \bar{B}_y \tag{4}$$

$$B_x = -\frac{\mu_O J}{a+b} ay$$

$$By = \frac{\mu_O J}{a+b} bx$$

Esempi sono riportati nella (Figura 1.5). [2]

1.4.2 Geometria reale

In generale, la geometria reale della sezione retta dei conduttori di corrente non rispecchia perfettamente quella di un settore circolare poiché i conduttori hanno sezione rettangolare e sono circondati da materiale isolante. Per poter ovviare a ciò si suddivide ogni blocco di cavi in un certo numero di settori circolari tutti con densitá di corrente uniforme, si calcola il campo generato da ogni singolo settore e tramite software si sommano i contributi (Figura 1.6); nel caso specifico è stato utilizzato il software ROXIE, sviluppato al CERN.

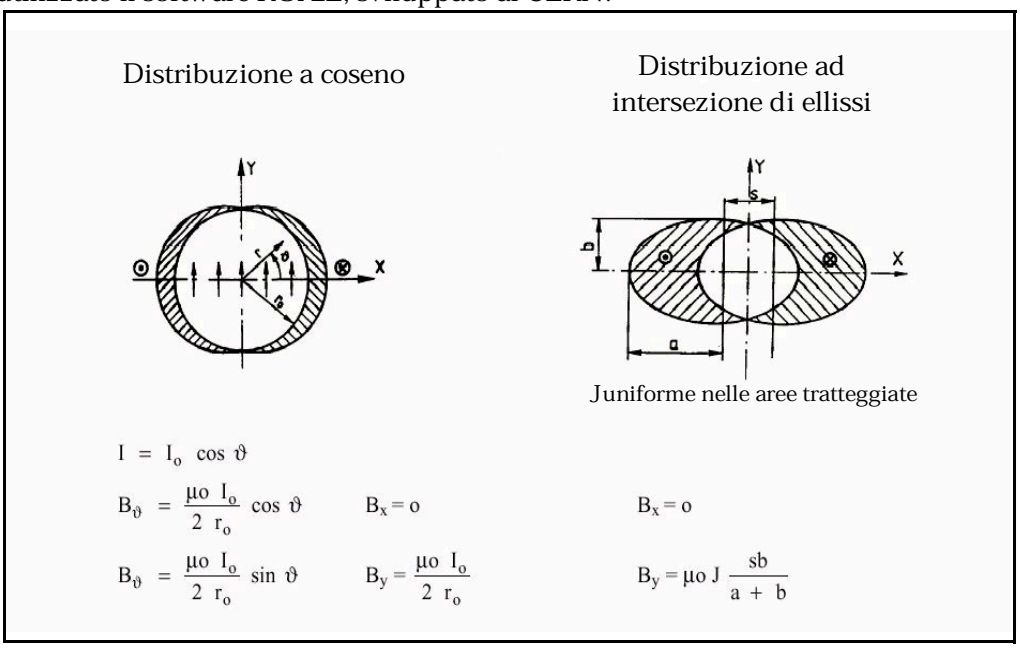


Figura 1.5 Distribuzione ideale di corrente [2]

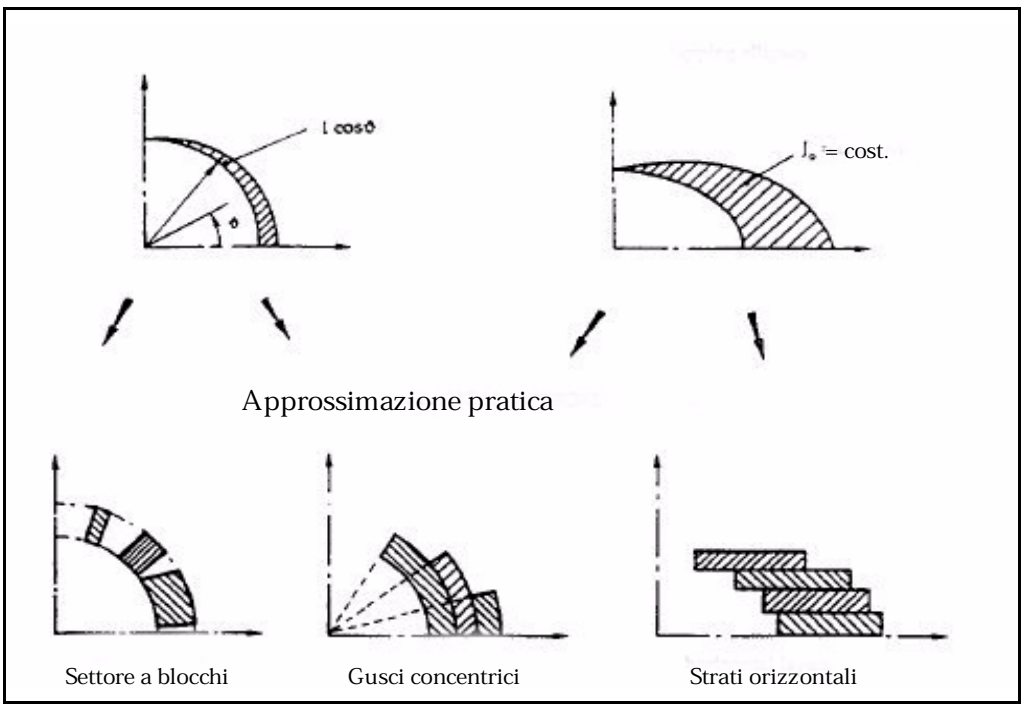


Figura 1.6 Configurazione ideale del dipolo ed approssimazione pratica [2]

1.5 Il dipolo principale di LHC

In un acceleratore circolare, al fine di mantenere il fascio in un'orbita prestabilita, si utilizza un campo dipolare puro. In LHC questo campo é fornito da 1232 dipoli superconduttori di 15 m di lunghezza cadauno, operanti in un bagno di elio superfluido a 1.9K.

1.5.1 Principali caratteristiche e parametri del dipolo

I parametri principali di LHC sono i seguenti[1]:

- campo magnetico di progetto: 8.33 T;
- doppia apertura in una comune struttura meccanica di ritenzione delle forze, un unico giogo in ferro per il circuito di chiusura delle linee del campo magnetico ed un unico criostato;
- distanza a freddo fra gli assi delle aperture: 194 mm;
- utilizzo di superconduttori NbTi operanti in elio superfluido a 1.9K
- raggio interno delle bobine: 56 mm
- raggio di curvatura del fascio: 2800 m
- bobine costituite da due strati sovrapposti di cavi superconduttori, contornate da collari in acciaio, e giogo in ferro e compresse da un cilindro di serraggio in acciaio austenitico

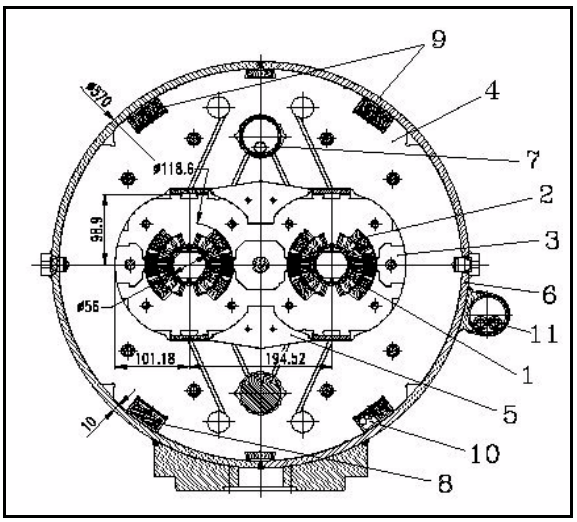


Figura 1.7 Il design del dipolo principale di LHC a doppia apertura. La struttura di contenimento delle forze é costituita dai collari in acciaio austenitico(3) che circondano le bobine(2), dal gioco di ferro(4), dall'inserto in ferro(5) e dal cilindro di serraggio(6); tutte queste componenti contribuiscono a mantenere le bobine nella loro posizione nominale e producono la pre-compressione azimutale che previene gli stress a cui sarebbe sottoposta la bobina a causa dell'azione delle forze elettromagnetiche. Il cilindro di serraggio funge inoltre da contenitore per l'elio superfluido utilizzato per il raffreddamento e costituisce la parete interna della camera a vuoto del criostato. Tutte le componenti finora citate costituiscono la "cold mass" cosí detta poiché opera a 1.9 K. Nella figura si possono inoltre notare i tubi per il fascio(1), i tubi che consentono

l'asportazione del calore(7), i bus-bars che alimentano il dipolo(8), i bus-bars per i quadripoli(9), i collegamenti per i sistemi di protezione del dipolo e la strumentazione(10) ed i bus-bars per i magneti ausiliari.[5]

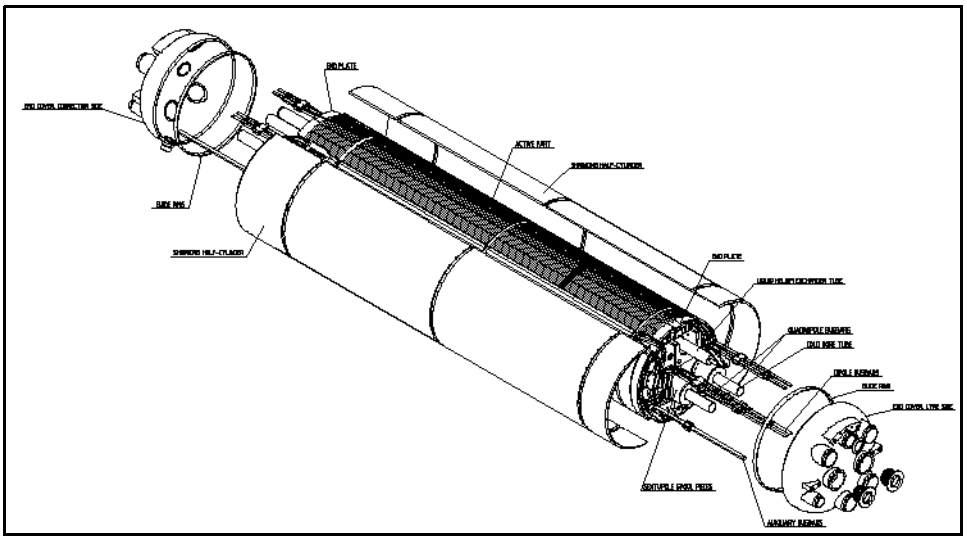


Figura 1.8 Veduta 3D della cold-mass

1.5.2 Struttura meccanica

La struttura meccanica del dipolo è costituita da:

- Collari
- Inserti ferromagnetici
- Giogo
- Cilindro di serraggio

I *collari* in acciaio austenitico, comuni ad entrambe le aperture, vengono prodotti mediante processo di tranciatura fine, sono spessi 3 mm e sono di due tipi: fisso (maschio) e libero (femmina). Il maschio deve reggere le forze di reazione delle bobine ed é per questo l'elemento strutturale di base. I collari vengono assemblati con interferenza attorno alla bobina a temperatura ambiente alternando maschi e femmine. Grazie all'utilizzo di presse i fori passanti presenti nei maschi vengono allineati e vi vengono inserite delle spine in modo da bloccarli e applicare la necessaria precompressione sulla bobina (Figura 1.9).

Gli *inserti* ferromagnetici sono simmetrici rispetto al piano orizzontale della *cold mass*, completano il giogo magnetico consentendo di ottenere la corretta distribuzione di campo ed oltre a questo fungono anche da elemento di trasmissione delle forze verticali fra collari e giogo.

Il *giogo* in ferro a basso tenore di carbonio è costituito da laminazioni di 5.8 mm di spessore ed è diviso in due parti lungo il piano di simmetria verticale; un gap é presente fra il gioco ed il collare in modo da compensare la differente contrazione termica dell'insieme bobine-collari rispetto al giogo stesso durante la fase di raffreddamento da temperatura ambiente a 1.9 K. Il giogo, oltre a chiudere il flusso magnetico, dona rigiditá a tutta la struttura.

Il *cilindro di serraggio* in acciaio austenitico, spessore 10 mm, è costituito da due semicilindri saldati longitudinalmente con interferenza. Esso dona alla cold-mass assemblata la rigiditá necessaria a contenere le forze elettromagnetiche e funge altresí da serbatoio stagno per l'elio. Durante la fase di saldatura del cilindro viene anche impressa la curvatura al magnete. [5]

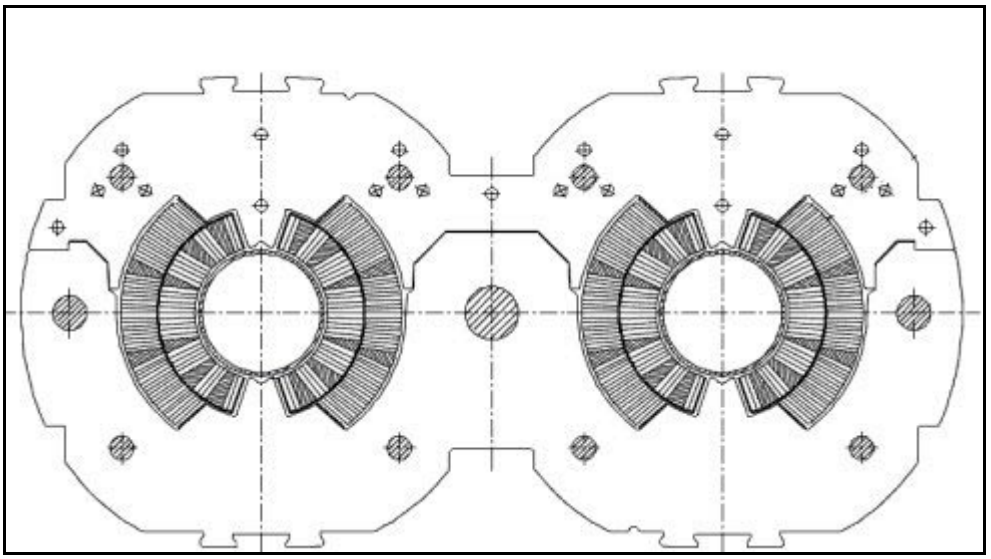


Figura 1.9 Bobine collarate nella parte dritta del dipolo

1.5.3 Bobina superconduttrice

La bobina superconduttrice del dipolo è formata da due strati concentici di cavi a sezione trapezoidale aventi la stessa lunghezza ma differente spessore in modo da ottenere la desiderata distribuzione di densitá di corrente. Al fine di ottenere una bobina con sezione retta circolare, i cavi vengono bobinati a blocchi frapponendo degli spaziatori di rame (tre nello strato interno ed uno in quello esterno) in grado di fornire la desiderata inclinazione ai conduttori.(Figura 1.10)

Il design a sei blocchi è stato scelto per approssimare una distribuzione di corrente cosinusoidale necessaria per la creazione di un dipolo puro; i quattro blocchi dello strato interno sono costituiti rispettivamente da 5, 5, 3 e 2 conduttori mentre lo strato esterno è formato da due blocchi di 9 e 16 conduttori.

Appositi spessori vengono posti fra il collare e la bobina in modo da produrre un prestress mentre uno strato di materiale poroso, ULTEM™ 2300 prodotto dalla General Electric, è inserito fra i due strati di conduttori in modo da consentire il passaggio dell'elio liquido per il raffreddamento.[1]

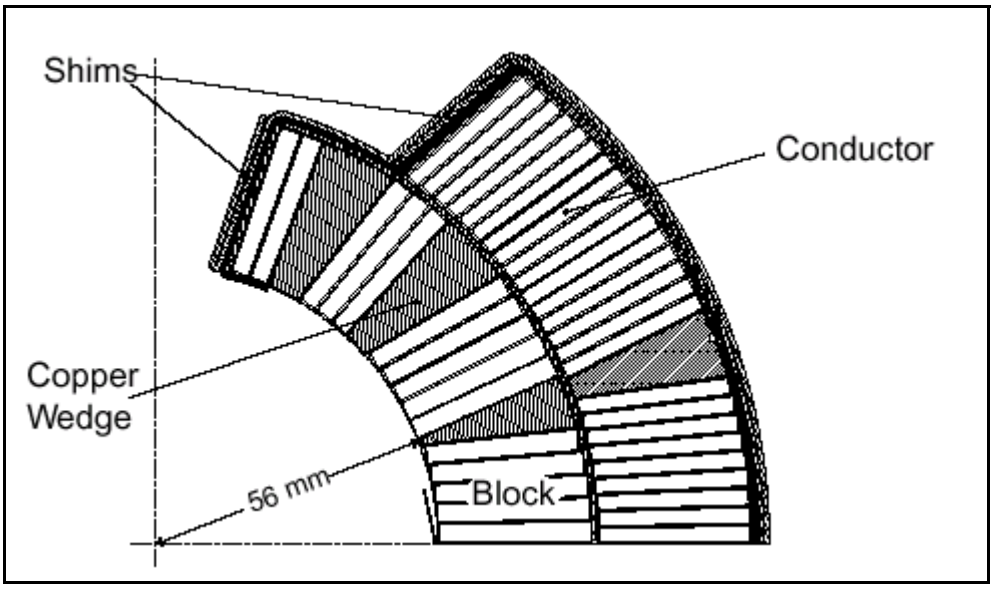


Figura 1.10 Strato interno ed esterno della bobina (quadrante sezione retta)

1.5.4 Cavi superconduttori

Per LHC è stato utilizzato un cavo di tipo Rutherford (Figura 1.11) con filamenti avvolti su se stessi seguendo delle immaginarie spirali; questa particolare geometria consente di ottenere una densità pari al 90% della densitá teorica conferendo una buona stabilità dimensionale.

Ogni cavo é costituito da 28 strand di circa 1 mm di diametro l'una per lo strato interno e 36 per quello esterno, compresse in modo da formare una sezione retta trapezoidale di 15 mm di larghezza.

Ogni strand é composta da filamenti di Nb-Ti immersi in una matrice di rame che funge da supporto meccanico, da pozzo di calore e da by-pass elettrico.

Prima di essere bobinato ogni cavo viene isolato mediante un rivestimento di due strati sovrapposti al 50% di pellicola di poliimide; un terzo strato è avvolto a spirale con una spaziatura di 2 mm per permettere all'elio di penetrare fino al conduttore (Figura 1.11).

Un ulteriore strato di materiale isolante presenta, sulla sua superficie esterna, un collante non polimerizzato. Il lato così trattato è posto in contatto con la superficie del cavo adiacente. La colla reagisce e polimerizza sottoponendo la bobina ad una cottura sotto pressione a circa 185°C. [1]

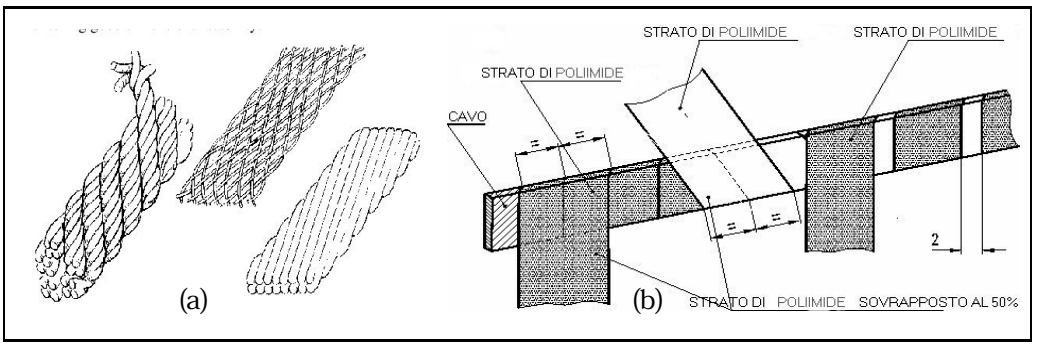


Figura 1.11 (a)Cavi superconduttori: Litz, Braid e Rutherford (b) isolamento cavo

1.5.5 Criostato

Tutta la *cold-mass* opera alla temperatura di 1.9K e se posta direttamente a contatto con la temperatura ambiente richiederebbe una grossa spesa energetica ed economica per il mantenimento delle condizioni crigeniche di esercizio.

La cold-mass viene quindi inserita all'interno del *criostato*, un cilindro di 914mm di diametro esterno che costituisce la parete esterna della camera a vuoto che ha il compito di limitare la conduzione del calore; le dimensioni del cilindro sono dettate dalla grandezza del dipolo e le sue possibili espansioni o contrazioni a seguito di cicli termici e dallo spazio disponibile nel preesistente tunnel del LEP.

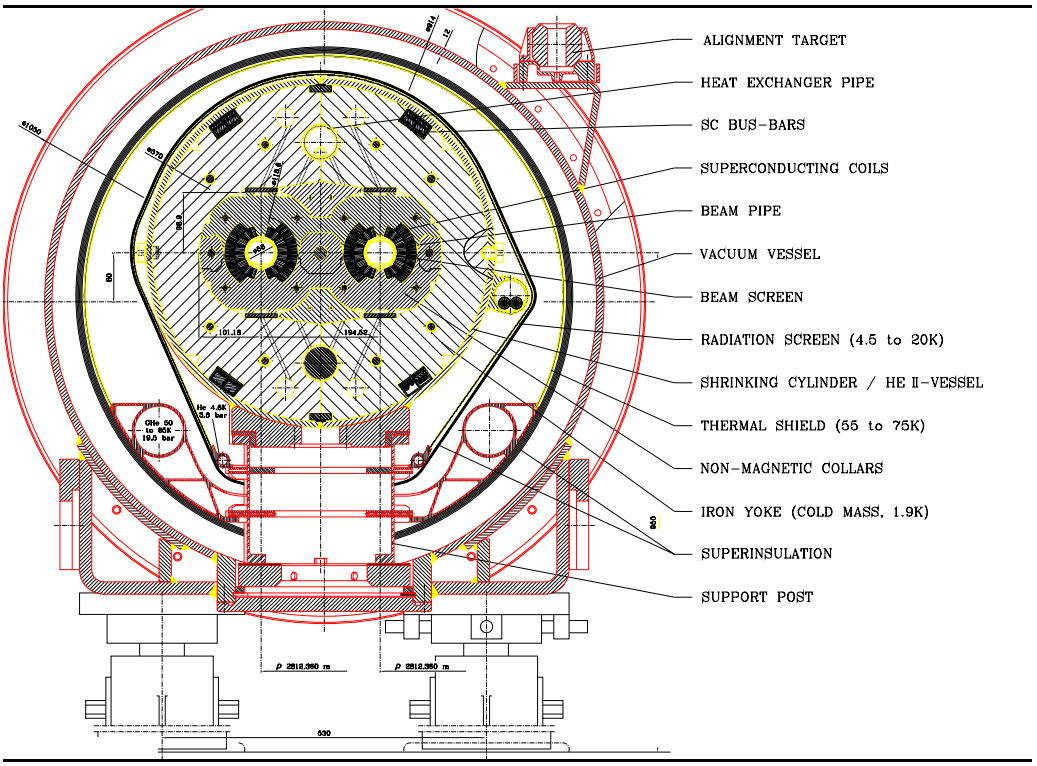


Figura 1.12 Sezione retta del *crio-magnete*

Il criostato fornisce un supporto meccanico stabile per la cold-mass mediante tre piedi pneumatici. Ognuno di questi sostegni contiene uno schermo termico per impedire la conduzione del calore; il piede centrale viene fissato alla parete della camera a vuoto mentre gli altri due vengono lasciati liberi di muoversi assecondando le deformazioni termiche del dipolo.

All'interno della camera a vuoto sono presenti inoltre uno *schermo per radiazioni* che avvolge la cold mass ed opera a temperature di 5-10 K e uno *schermo termico* operante a 50-70K. (Figura 1.12) [1]

Tabella 1.2 Principali parametri geometrici del dipolo

Geometria del dipolo	
Massa della cold mass	23.8 t
Lunghezza cold mass (a 300 K)	15180 mm
Raggio di curvatura	2803.93 m
Diametro esterno cilindro di serraggio	570 mm
Spessore nominale cilindro di serraggio	10 mm
Lunghezza cilindro di serraggio	15160 mm
Lunghezza giogo	14497 mm
Diametro esterno giogo	550 mm
Spessore laminazioni giogo	5.8 mm
Altezza collare	192 mm
Larghezza collare	396 mm
Spessore laminazioni collari	3 mm
Distanza fra assi delle aperture (1.9 K)	194 mm
Lunghezza magnetica[a]	14.3 m
Corrente all'iniezione (E=0.45 TeV)	739 A
Campo magnetico all'iniezione	0.535 T
Corrente nominale (E=7 TeV)	11796 A
Campo magnetico nominale	8.33 T
Campo di picco nella bobina (peak field)	8.76 T
Corrente massima	13000 A
Densitá di corrente a 7 TeV (Nb-Ti) - strato interno	1200 A/mm^2
Densitá di corrente a 7 TeV (Nb-Ti) - strato esterno	1732 A/mm^2

a.

$$L_m = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} Bds}{Bcentr}$$

1.6 Superconduttività

La superconduttività è un fenomeno di natura quantistica che si manifesta in alcuni materiali quando, raffreddati a bassa temperatura, diventano conduttori perfetti.

Lo stato superconduttivo appare quando si raggiunge la temperatura critica T_c caratteristica di ogni materiale; a questa temperatura si ha una riorganizzazione della struttura elettronica che permetta al materiale stesso di trasportare cariche senza che all'interno vi siano fenomeni dissipativi legati agli urti degli elettroni.

I superconduttori di tipo II, cioè quelli utilizzati nelle bobine dei magneti di LHC, sono nello stato superconduttivo se i valori dei parametri temperatura, campo magnetico e densità di corrente sono minori dei rispettivi valori critici individuati dalla cosiddetta *superficie critica*. La figura 1.13mostra un esempio di tale superficie.

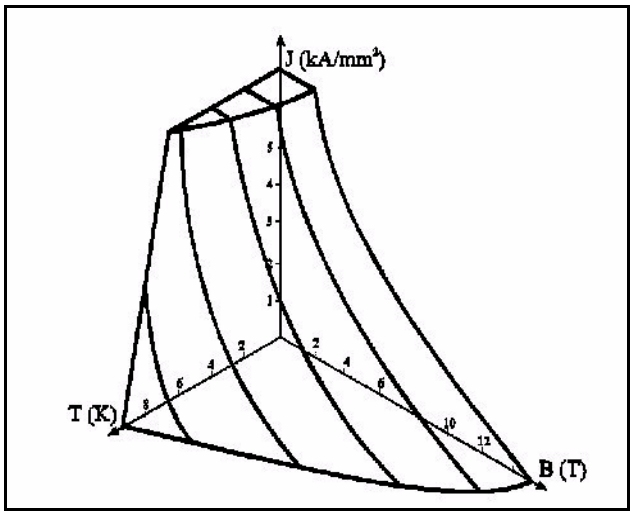


Figura 1.13 Superficie critica

Per il Niobio-Titanio i valori limite di temperatura e campo magnetico che definiscono lo stato superconduttivo valgono:

$$B_c(0) = 14.5\,T \qquad T_c(0) = 9.2\,K$$

dove i valori riportati si intendono misurati a corrente nulla e sono caratteristici del NbTi solamente. Quando uno solo dei parametri si trova al di fuori del campo di valori individuato dalla superficie critica, il conduttore diventa normale. La transizione resistiva è generalmete chiamata *quench* anche se tale termine è preferibilmente riferito alla transizione indotta ad alta temperatura.

La transizione allo stato resistivo dei cavi superconduttori usati nei magneti è dovuta a cause dirette e indirette. Sono cause dirette i fenomeni che fanno oltrepassare i valori critici di temperatura, campo magnetico o densità di corrente. Sono cause indirette i fenomeni di tipo elettrodinamico o termoidraulico che indirettamente causano la transizione normale: correnti parassite, onde di compressione nell'elio.

Nel caso di magneti per acceleratori è da escludersi l'insorgere di quench a causa dell'alto campo magnetico in quanto il valore del campo nei cavi è sempre inferiore

al valore critico: in LHC si mantiene un rapporto fra il campo operativo e quello critico pari al 85%.

Risulta altrettanto improbabile una transizione dovuta al superamento della densità di corrente critica, sebbene ciò possa accadere in alcuni filamenti in seguito a ridistribuzioni della corrente.

La causa più comune è da ricercarsi nel rilascio di energia dovuto al movimento dei cavi in quanto tale oppure alla variazione del campo concatenato con un filo a causa del movimento di quest'ultimo. Tale energia provoca in genere l'innalzarsi della temperatura del conduttore.

Nel caso di LHC il conduttore è raffreddato a 1.9 K, temperatura al di sotto del punto λ dell'elio (2.17 K), stato in cui il refrigerante diventa superfluido, ovvero la sua viscosità si annulla e la conduzione termica diventa elevata, condizioni queste che consentono di minimizzare la portata di elio necessaria.[11]

Capitolo 2

Le estremità del magnete: caratteristiche principali

Le estremità di tutti i magneti superconduttori, in gergo chiamate "Teste", costituiscono la zona più complessa sia per la topologia sia per il comportamento meccanico e magnetico. In questo capitolo si vogliono illustrare le caratteristiche peculiari delle teste e le principali poblematiche ad esse legate.

2.1 Il problema elettromagnetico delle teste 22
2.1.1 Forze elettromagnetiche 22
2.1.2 Qualità di campo 22
2.2 Il design delle teste 24
2.2.1 La bobina. 24
2.2.2 Il collare 26
2.2.3 Il giogo 27
2.3 Gli spaziatori 30
2.3.1 Geometria degli spaziatori 31
2.4 Processi di produzione delle bobine 34
2.4.1 Bobinaggio 34
2.4.2 Pressatura e polimerizzazione 35
2.4.3 Impregnazione 36

2.1 Il problema elettromagnetico delle teste

In un acceleratore ideale, il campo magnetico di curvatura dovrebbe essere generato da un'unica spira di forma circolare avente le dimensioni dell'anello. Nella realtà lo si realizza mediante una successione di bobine superconduttrici collegate in serie che permettano di deviare il fascio lungo tutta la circonferenza del tunnel. Tale configurazione consente di introdurre dei magneti correttori e focalizzatori oltre alle zone dritte sperimentali.

Le estremità degli avvolgimenti di ogni dipolo, dette in gergo *teste*, sono le zone in cui il cavo viene curvato attorno al canale di fascio rompendo così la simmetria bidimensionale della parte dritta, ed introducendo una dipendenza del campo magnetico dalla coordinata longitudinale.

Essendo la testa del magnete la zona più complessa in termini di topologia e di comportamento meccanico e magnetico si vuole qui di seguito porre in evidenza le grandezze fisiche che le caratterizzano e che maggiormente influenzano il funzionamento del magnete.

2.1.1 Forze elettromagnetiche

Nei magneti superconduttori, una delle cause principali di quench può essere rappresentata dal rilascio di energia a seguito dello spostamento dei cavi superconduttori della bobina sottoposti a forze generate dal campo magnetico secondo la seconda formula di Laplace:

$$dF = i \cdot (dl \wedge B_0) \tag{2.1}$$

dove i rappresenta la corrente, dl il vettore tangente ad un tratto infinitesimo di conduttore e B_0 il vettore di induzione magnetica mentre dF è il contributo del tratto di cavo considerato alla forza totale esercitata su tutta la bobina.[24]

Le teste del magnete sono particolarmente sensibili all'azione delle forze elettromagnetiche poiché non sono presenti solo le componenti radiali che nella parte dritta tendono ad aprire la bobina e che vengono contrastate dalla struttura meccanica, ma è anche presente una componente longitudinale che causa l'allungamento della zona di curvatura.

Risulta quindi di notevole importanza avere in questa zona un margine di sicurezza ampio rispetto al quench a causa delle elevate sollecitazioni. In modo particolare si vuole tenere sotto controllo il campo massimo all'interno dei conduttori per minimizzare le forze in gioco e restare il più possibile all'interno della superficie critica in modo da non limitare le prestazioni di tutto il magnete.

2.1.2 Qualità di campo

Il campo magnetico di un acceleratore di particelle può essere descritto mediante una serie complessa di potenze sviluppata sulla sezione retta del magnete. Trascurando la variazione lungo la direzione longitudinale:

$$B(x,y) = B_y + i \cdot (B_x) = 10^{-4} B_1 \sum_{n=1}^{\infty} (b_n + i \cdot a_n) \cdot \left[\frac{x+iy}{Rref}\right]^{(n-1)} \tag{2.2}$$

dove B_1 è la componente di dipolo lungo la componente verticale y, R_{ref} è il raggio di riferimento (17 mm), b_n e a_n sono i coefficienti dellle componenti normali ed oblique dei 2n-poli; i coefficienti delle armoniche sono adimensionati e vengono espressi in "unità" mentre la componente di dipolo può essere normalizzata come segue:

$$b_1 = 10^4 \cdot \frac{B_1 - B_1^{nom}}{B_1^{nom}} \tag{2.3}$$

dove B_1^{nom} è il campo di dipolo nominale.[9]

Se si avesse un magnete dipolare ideale si otterrebbe un campo di dipolo puro in cui tutte le componenti b_n e a_n sarebbero nulle. Nella realtà delle cose esistono numerose sorgenti di errori:

a. errore di posizionamento dei cavi: va tenuta in conto la possibilità di un disallineamento di un blocco di cavi o di una intera bobina, specie in fase di bobinaggio e collaraggio;

b. saturazione del ferro: gli errori di campo originati dall'induzione residua e dalla permeabilità magnetica variabile dipendono dal livello di eccitazione e dalla distanza del giogo in ferro;

c. correnti persistenti nei superconduttori: sono correnti generate nei filamenti superconduttivi dalla variazione di campo magnetico che circolano indefinitamente fino a quando si perde lo stato di superconduttività, in tal caso la resistenza elettrica dissipa energia per effetto Joule e la corrente si estingue. Queste correnti sono proporzionale al diametro dei filamenti che devono quindi essere il più sottili possibile compatibilmente con l'economicità e la qualità della produzione;

d. correnti di Foucault: la presenza di campi magnetici variabili induce una forza elettromotrice lungo i conduttori che a sua volta genera delle correnti parassite che distorcono il campo;

e. deformazione della bobina a causa delle forze elettromagnetiche;

f. torsione: un oggetto lungo e sottile come un magnete superconduttore ha una torsione lungo il suo asse longitudinale che produce errori di orientazione del campo non trascurabili.

Non sempre è possibile trovare un legame preciso tra la geometria della bobina e l'insorgere di componenti di multipolo. Nel caso dei multipoli normali b_n pari risulta abbastanza semplice individuare una dipendenza dal tipo di simmeria dei cavi. Il b_2 dimostra una spiccata sensibilità alla variazione della simmetria destra-sinistra ed è quindi la componente che maggiormente risente della presenza delle due aperture, non invisibili l'una all'altra, all'interno di un'unica struttura meccanica. Similmente b_4 è sensibile alla simmetria a quattro quadranti. Per quel che riguarda i multipoli normali dispari b_3 e b_5 si può evidenziare una forte dipendenza dalla posizione del blocco di cavi più esterno sia del primo sia del secondo strato della bobina. Inoltre tali multipoli sono particolarmente sensibili a scostamenti nella posizione dei cavi rispetto a quella teorica.

Per quel che riguarda le componenti oblique a_n, si può notare che esse compaiono solamente nelle estremità delle bobine nel lato connessione ove la simmetria destra-sinistra viene rotta dalla presenza del layer-jump, dei cavi di alimentazione oltre che dai conduttori che abbandonano il blocco di provenienza per dare origine al successivo.

2.2 Il design delle teste

A fronte delle problematiche esposte precedentemente, è necessario progettare le teste dei dipoli in modo da non costituire un limite alle prestazioni del resto del magnete.

L'ottimizzazione della forma delle teste delle bobine deve tenere in conto vari aspetti quali la semplicità di fabbricazione degli spaziatori[1] e di bobinaggio, massimizzando ad esempio i raggi di curvatura all'interno di ogni blocco di conduttori. E' inoltre necessario verificare la stabilità meccanica dei cavi al fine di evitare spostamenti e conseguenti rilasci di energia. In fine occorre limitare il campo di picco nella bobina al di sotto del campo magnetico massimo della parte dritta onde evitare di inficiare le prestazioni del magnete. Inoltre va tenuta in conto la qualità di campo: i valori integrati sulle teste dei multipoli dovono essere contenuti. Un altro parametro fondamentale da verificare è il contributo delle teste alla lunghezza magnetica definita come:

$$l_m = \frac{\int (B \cdot dl)}{B_{centrale}} \tag{2.4}$$

ove con $B_{centrale}$ si intende il campo magnetico costante presente nella parte dritta del magnete.

Si vuole qui di seguito fare una carrellata sui principali componenti, ponendo particolare attenzione alle soluzioni tecnologiche utilizzate ed alle motivazioni che hanno portato al layout definivo.

2.2.1 La bobina

In generale, nelle teste, la bobina è distribuita in blocchi di conduttori in numero, forma e dimensioni determinate dalla distribuzione di corrente che si vuole realizzare, dagli sforzi meccanici applicati e dalla configurazione dei cavi nella sezione retta, in modo da non creare salti o discontinuità nella forma degli avvolgimenti. La topologia più semplice prevede di bobinare il cavo attorno ad un unico spaziatore centrale. Tale configurazione non permette però di controllare l'angolo di inclinazione del conduttore né di ottimizzare la posizione di ogni singolo avvolgimento.

Si è quindi optato per una distribuzione a blocchi grazie alla quale è possibile ottimizzare la geometria ed i parametri fisici che da essa dipendono.

Le estremità del magnete non sono uguali ma si differenziano in teste lato non connesione, o lato "lira" per la particolare conformazione dei cavi che puó ricordare la forma dello strumento musicale, e teste lato connessione.

Il lato non connessione è caratterizzato da una totale simmetria destra-sinistra, sono presenti tre blocchi di conduttori (5, 5 e 3 cavi) più due cavi singoli nel primo strato e tre blocchi nel secondo strato (9, 14 e 2 cavi).

1 Si veda pag. 30

Il lato connessione presenta numerose asimmetrie: l'avvolgimento dei cavi dello strato interno comincia nella zona adiacente la testa, detta zona di congiunzione, e l'ultimo avvolgimento di ogni blocco va a formare il primo cavo del blocco successivo, dovendo essere continuo l'avvolgimento, creando una forte asimmetria destra-sinistra. Nello strato esterno della bobina, il primo avvolgimento viene saldato con il cavo più interno dello strato inferiore. Le due bobine vengono così collegate in serie formando un polo. La zona dove avviene tale connessione è chiamata *layer jump*. L'ultimo avvolgimento di ambo gli strati proveniente dalla parte dritta prosegue senza curvare, esce dal magnete e costituisce il cavo di alimentazione di ogni bobina (figura 2.1).

Per quel che riguarda la topologia delle superfici che definiscono la posizione nello spazio dei cavi è stata scelta la configurazione a superfici quasi-isoperimetriche che approssima il comportamento naturale di un nastro sottile nelle medesime condizioni: i conduttori sono piegati a sella attorno alla apertura cilindrica in cui passa il fascio. In particolare per i dipoli tutto ciò è particolarmente complesso poiché l'ultimo giro dell'avvolgimento deve essere piegato sulla superficie esterna del tubo con una torsione di 180°(figura 2.2).

Con questo accorgimento vengono minimizzate le deformazioni a cui il cavo è sottoposto ma il conduttore perde la sua perpendicolaritá rispetto alla superficie esterna del *beam-pipe*: per ristabilire la superficie cilindrica, indispensabile per scaricare le forze elettromagnetiche sulla struttura meccanica di supporto, gli spazi venutisi a creare a causa dell'inclinazione dei conduttori devono essere colmati (figura 2.13).

La geometria qui descritta si appoggia su degli elementi di materiale isolante detti spaziatori che fungono da sostegno meccanico e mantengono i blocchi in posizione, donando la desiderata configurazione spaziale ai conduttori . [2][12]

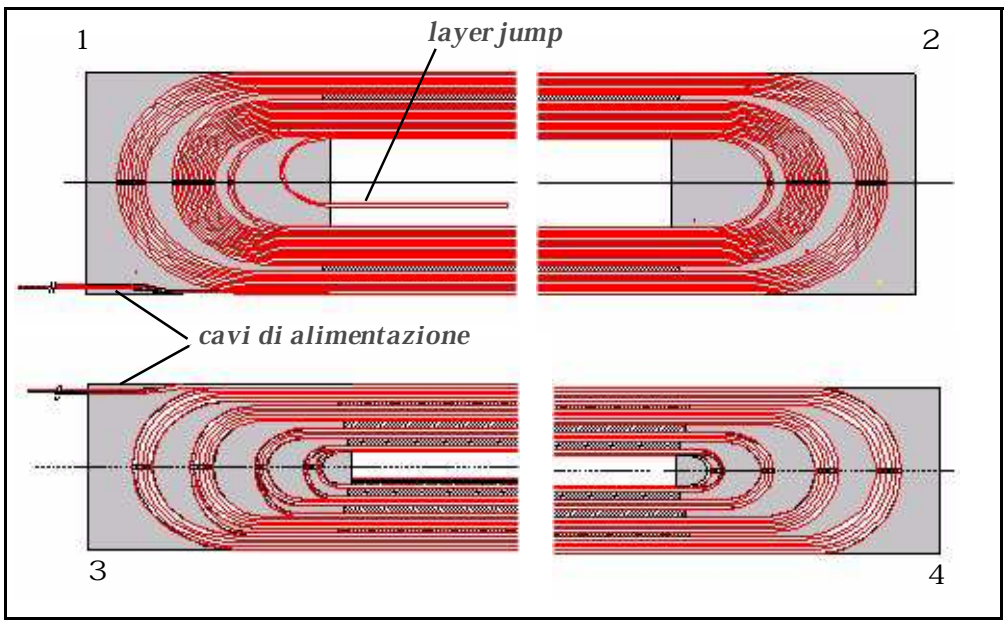


Figura 2.1 (1) avvolgimenti strato esterno lato connessione, (2) avvolgimenti strato esterno lato non connessione, (3) avvolgimenti strato interno lato connessione, (4) avvolgimenti strato interno lato non connessione.

.

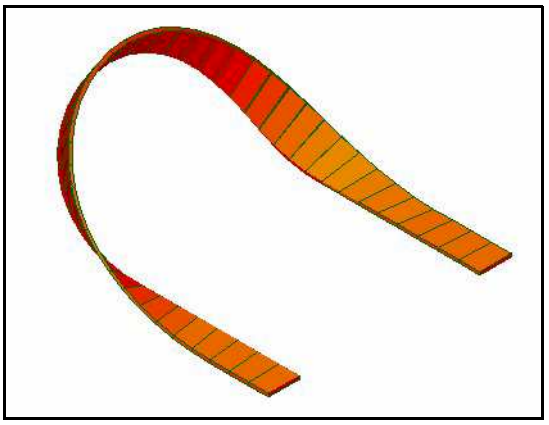


Figura 2.2 Avvolgimento in configurazione quasi-isoperimetrica con torsione del cavo di 180°

2.2.2 Il collare

I *collari* variano la loro geometria interna per adeguarsi alla forma degli avvolgimenti: nella parte terminale del magnete il collare è sagomato in modo da aderire perfettamente alla superficie esterna degli spaziatori e dei cavi, che è prossima a quella di un cilindro. Dal lato connessione, nella zona che precede la testa vera e propria, il collare deve lasciare lo spazio al *layer jump* per cui assumerà una forma peculiare in modo tale che le forze elettromagnetiche si scarichino tutte sulla struttura meccanica ed i cavi non abbiano la possibilità di muoversi (figura 2.3).

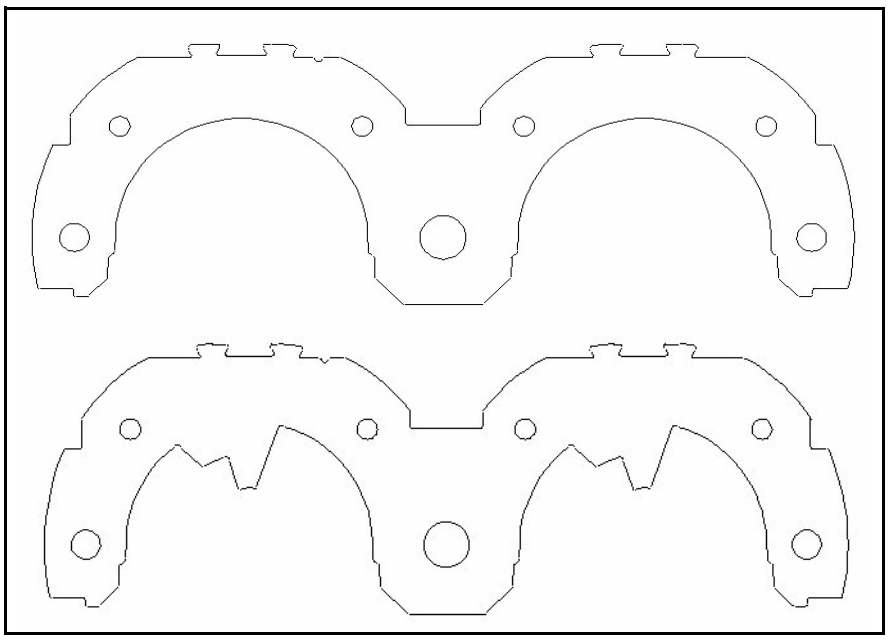


Figura 2.3 In alto collare maschio della zona teste. In basso collare maschio della zona di congiunzione.

2.2.3 Il giogo

Il giogo costituisce la principale componente ferromagnetica della struttura meccanica del dipolo. Il suo ruolo fondamentale è quello di chiudere le linee di campo magnetico evitando che si disperdano e contribuendo in questo modo ad aumentare il campo magnetico nelle aperture dei canali di fascio così come mostrato in figura 2.4. Qui si è ipotizzato di calcolare il campo di un dipolo, nella zona della testa, con un solo tubo di fascio e di variare il raggio interno dell'anello di ferro che circonda i conduttori. Risulta evidente come con l'approssimarsi del ferro alla bobina sia abbia un addensamento di linee di campo e conseguentemente un aumento del campo magnetico da esse generato.

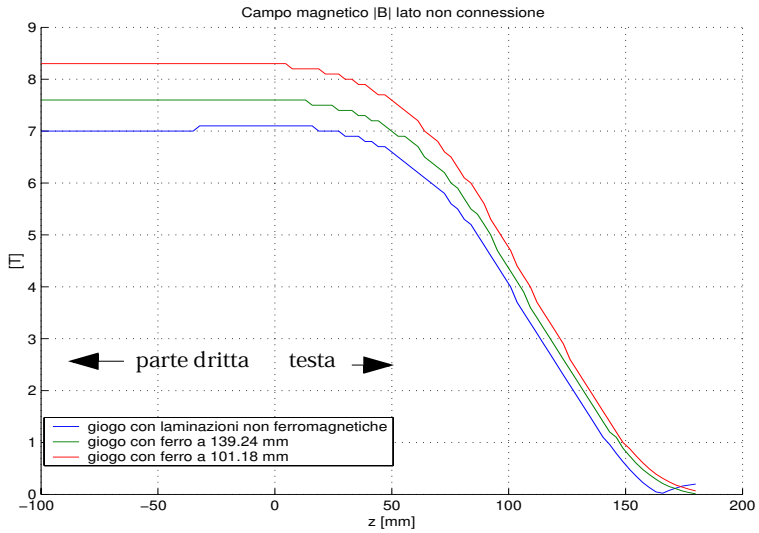


Figura 2.4 Andamento del campo magnetico al centro dell'apertura nella zona finale della bobina, lato non connessione, nella configurazione della cold mass ad un solo canale di fascio, per differenti valori della distanza della zona ferromagnetica dal centro dell'apertura stessa.

Per adempiere alla loro funzione, le teste del magnete si sviluppano in maniera tridimensionale. Per la legge di Biot-Savart che descrive il campo magnetico generato da una spira, si avrebbe naturalmente il campo massimo di tutto il magnete poiché oltre al contributo delle zone dei cavi parallele al fascio si aggiungerebbe quello delle zone perpendicolari, là dove si chiudono gli avvolgimenti.

Un campo elevato nelle teste non è desiderabile poiché genererebbe elevate forze magnetiche che qui hanno sia una componente radiale che una assiale. Inoltre la testa della bobina è una regione in cui viene meno la distribuzione cosinusoidale della corrente nei poli e di conseguenza si ha una degradazione della qualità di campo. Riuscendo a mantenere basso il campo magnetico si ridurrebbe il contributo all'instabilità del campo di tutto il magnete dovuto ai multipoli, di ordine superiore a quello dipolare, generati nella testa. D'altro canto in questo modo diminuisce la lunghezza magnetica efficace.

Per ridurre tutti questi effetti si è deciso di modificare in questa zona le laminazioni in ferro del *giogo*.

La prima soluzione prevedeva laminazioni completamente non ferromagnetiche, ossia fatte solo di acciaio austenitico.

Questa soluzione, sebbene riduca il campo magnetico, come mostrato in figura 2.4 dalla linea blu, non riesce a far fronte ad un ulteriore problema: la presenza contemporanea di due aperture, ciascuna dotata di una propria bobina ed all'interno della stessa struttura meccanica, fa sì che si verifichi un effetto di *cross-talk*, ossia che le due bobine si "vedano" influenzandosi l'un l'altra. In questa maniera i lati delle due bobine affacciati genereranno un campo differente rispetto ai lati opposti producendo una asimmetria magnetica destra-sinistra all'origine di un alto valore di coefficiente di quadrupolo b_2. Questo effetto è normalmente limitato nella parte dritta dalla presenza del ferro che contribuisce ad omogeneizzare la distribuzione delle linee di campo. Il cross talk risulta particolarmente marcato nel lato connessione ove sono presenti il layer jump ed i cavi di alimentazione elettrica a causa dei quali si raggiungono valori di b_2 di 38.06 unità di multipolo contro le 11.92 unità del lato non connessione.

Per annullare questa asimmetria nei valori del coefficiente di quadrupolo si è deciso di modificare la lunghezza della zona delle laminazioni non ferromagnetiche del lato non connessioni portando in questa maniera il b_2 a circa 38 unità di multipolo da ambo le estremità del magnete. In questo modo si è sì riusciti a uniformare il campo quadrupolare nelle due teste, tuttavia lo si è fatto livellandolo al valore più elevato.

La soluzione definitiva adottata è rappresentata dalle *nested laminations*, un inserto non ferromagnetico posto attorno al collare circondato esternamente da un anello di ferro (figura 2.5) grazie alle quali è possibile ottenere un campo magnetico inferiore rispetto al caso delle laminazioni completamnente ferromagnetiche come mostrato dalla linea verde di figura 2.4.

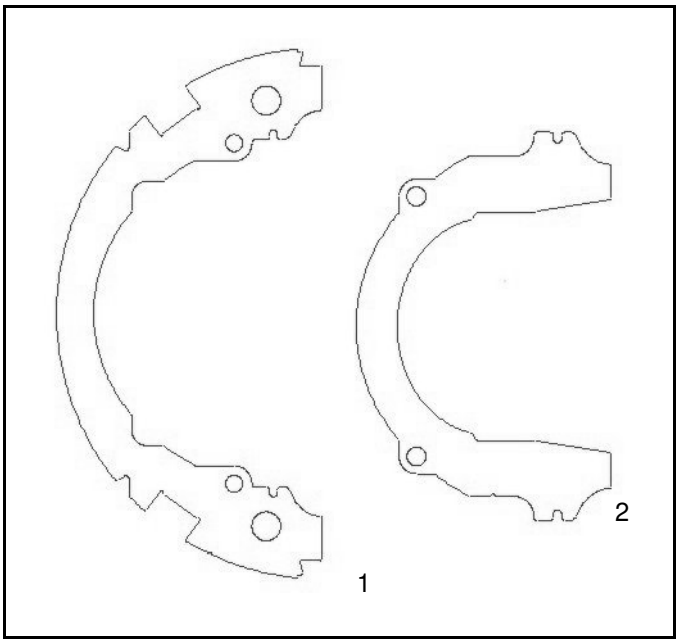


Figura 2.5 (1) Giogo ferromagnetico della zona delle teste (2) Innesto in acciaio austenitico.

Grazie a questo accorgimento si è riusciti a ridurre il b_2 da 38 a 11 unità di multipolo a fronte di un aumento di b_3 di 4 unità così come mostrato in tabella 2.1.

Tabella 2.1 Evoluzione dei multipoli misurati sui prototipi dei magneti al variare della configurazione del giogo.

	LATO NON CONNESSIONE		LATO CONNESSIONE	
	b2	b3	b2	b3
LAMINAZIONI NON FERRO-MAGNETICHE SIMMETRICHE	11.92	-0.55	38.06	19.74
LAMINAZIONI NON FERRO-MAGNETICHE ASIMMETRICHE	38.13	3.28	38.31	21.27
NESTED LAMINATIONS	11.26	9.13	11.58	25.58

La dipendenza del b_2 dalla distanza del ferro dal centro dell'apertura è mostrata in figura 2.6 ove viene rappresentato l'andamento del coefficiente lungo tutta la zona della testa lato non connessione per tre differenti configurazioni del giogo, una prima con laminazioni completamente non ferromagnetiche, la seconda con le nested lamiantions e per terzo si considera il caso in cui si utilizzassero le laminationi ferromagnetiche utilizzate nella parte dritta.

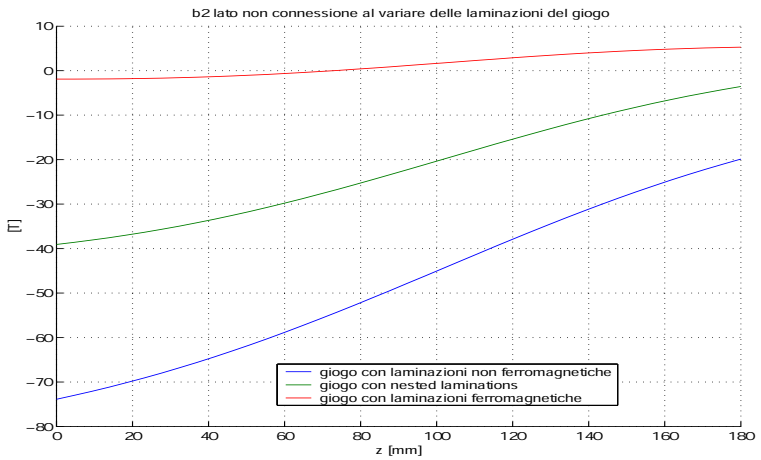


Figura 2.6 Andamento di b2 nella testa della bobina, lato non connessione per differenti configurazioni del giogo.

Il disegno dell'interfaccia fra il giogo in ferro e l'innesto in acciaio è stato curato con particolare cura poiché esiste fra i due materiali una notevole differenza di permeabilità magnetica e quindi le linee di campo giungono perpendicolari a tale interfaccia. Ciò si può dedurre dalla formula:

$$\frac{\tan\theta_{ferro}}{\tan\theta_{acciaio}} = \frac{\mu_{ferro}}{\mu_{acciaio}} \approx \mu_{ferro} \qquad (2.5)$$

dove μ_{ferro} è dell'ordine del migliaio e quindi $\tan\theta_{ferro}$ molto grande, ossia θ_{ferro} prossimo a 90°.[24]

2.3 Gli spaziatori

Nelle teste di ogni polo sono presenti 19 differenti spaziatori di materiale composito a base di fibra di vedro, 10 nello strato interno (diametro interno 56 mm) e 9 nello strato esterno (diametro interno 87.8 mm), piú 5 chip isolanti in ULTEM™ 2300, mentre nella parte dritta i blocchi di cavi vengono divisi mediante spaziatori di rame (figura 2.7).

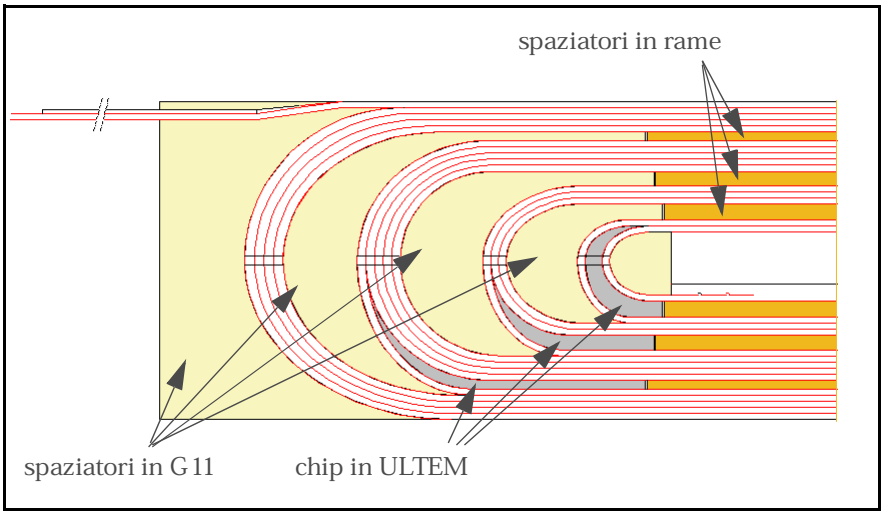


Figura 2.7 Vista sugli spaziatori presenti nello strato interno della bobina dal lato connessione.

L'utilizzo di tre differenti materiali è giustificato dal diverso ruolo svolto dagli spaziatori e dalla differenti sollecitazioni a cui sono sottoposti, non che a ragioni di carattere economico. Tutti i materiali devono comunque garantire una temperatura di rammollimento o fusione superiore ai 190°C poiché la testa bobinata deve essere sottoposta ad un processo di polimerizzazione.

Gli spaziatori in rame della parte dritta hanno il compito di dare alla sezione retta della bobina una forma cosinusoidale, indispensabile per ottenere un campo dipolare il più puro possibile; essi assumono un ruolo determinante sul valore dei coefficienti di multipolo, con particolare riguardo per il b_3. Il materiale scelto per questo tipo di spaziatori è il rame per la sua non ferromagneticità ed il suo coefficiente di espansione termica simile a quello dei cavi superconduttori. Il rame utilizzato è ad alto livello di impurezze per aumentare la resistenza elettrica, in modo da impedire il passaggio delle correnti parassite, e per ottenere una maggior durezza.

I chip sono degli spaziatori di dimensioni ridotte e sono introdotti per accompagnare il cavo, nella testa lato connessione, quando lascia un blocco per andare a costituire il primo avvolgimento del blocco successivo. La principale proprietà richiesta al chip è di essere un buon isolante per evitare che a seguito di spostamenti dei cavi si possano verificare dei cortocircuiti. Per la realizzazione di questi spaziatori si è preferito utilizzare dei materiali iniettabili poiché la lavorazione meccanica di pezzi così sottili risulta estremamente difficoltosa ed economicamente dispendiosa: è stato scelto l'ULTEM™, un materiale composito

contenente fibre di vetro di dimensioni microscopiche in grado di essere iniettato senza otturare gli ugelli.

Gli spaziatori principali sono invece i pezzi più delicati poiché svolgono differenti funzioni, dettano la geometria degli avvolgimenti e quindi influenzano la qualità di campo nelle teste, infine impediscono ai cavi di muoversi.

A causa di questo ruolo fondamentale, le tolleranze imposte su questi pezzi devono essere molto stringenti e di conseguenza la lavorazione meccanica risulta costosa. Per ovviare a questo inconveniente, si è cercato di realizzare questi spaziatori per iniezione utilizzando dell'ULTEM™, come per i chip isolanti. La soluzione è risultata impraticabile poiché realizzare pezzi di forme così massicce come quelle richieste, senza che fossero presenti bolle d'aria al loro interno avrebbe richiesto una strumentazione estremamente precisa ed una lavorazione lunga. Si è inoltre verificato che il modulo elastico, 9000 MPa circa a 20°C , differisce notevolmente dai valori dei materiali utilizzati nella parte dritta ed in particolare appare troppo basso. I pezzi risultano troppo deformabili a seguito di pressioni quali quelle dovute alle forze elettromagnetiche, non garantendo il mantenimento della forma degli avvolgimenti e la necessaria rigidità.

La scelta è caduta allora sul G11, un materiale composito formato da fibra di vetro impregnata con resina epossidica. Le buone caretteristiche meccaniche dell'epoxy, modulo elastico 25000 MPa circa a 20°C, fanno sì che gli spaziatori così realizzati abbiano una elevata resistenza a compressione, maggiore di 300 MPa di carico massimo come richiesto da specifica tecnica, ed una elevata resistenza alle radiazioni oltre al fatto di essere dei buoni isolanti. Questo materiale non può essere iniettato ma viene preparato sotto forma di tubo partendo da un tessuto in fibra di vetro bobinato esercitando una tensione attorno ad un mandrino ed impregnandolo di resina e quindi lavorato meccanicamente per ottenere le forme desiderate.

2.3.1 Geometria degli spaziatori

Si vuol ora porre particolare attenzione sugli spaziatori in materiale G11 poiché sono quelli attorno ai quali vengono bobinati i cavi e sono quindi i responsabili della distribuzione spaziale di corrente nelle teste dei magneti.

Come già accennato precedentemente, gli spaziatori sono definiti da una topologia quasi-isoperimetrica delle superfici, ossia a parità di distanza rispetto al centro del canale di fascio è sempre possibile individuare superfici dello spaziatore aventi tutte lo stesso perimetro; questa configurazione consente di minimizzare le deformazioni meccaniche applicate sui cavi ed inoltre rappresenta una delle condizioni indispensabili per poter lavorare le superfici mediante macchine a cinque assi con frese a candela, lavorazione questa che consente una riduzione dei tempi ed un abbattimento dei costi di produzione.

La matematica che descrive gli spaziatori si ricava mediante un'applicazione del software MATHEMATICA™ realizzata al CERN nel gruppo MMS (Main Magnets and Superconductors) e tiene in conto della realizzabilità pratica di tali pezzi mediante una fresa a cinque assi, come descritto nel Capitolo 3: inserendo in input le caratteristiche geometriche dei cavi, la loro distribuzione in blocchi, la loro deformabilità e specificando le dimensioni di massima degli spaziatori, spessore e

raggio interno, il programma è in grado di descrivere in tre dimensioni le superfici e la posizione dei vari cavi nelle teste delle bobine.

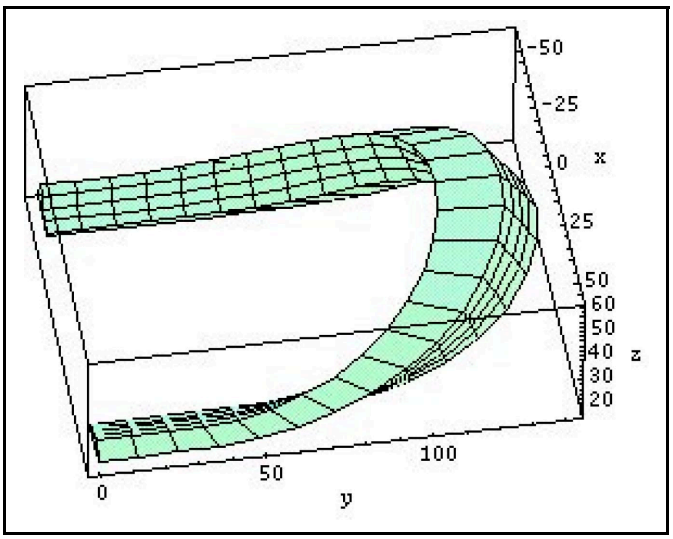


Figura 2.8 Superfici di uno spaziatore elaborate mediante MATHEMATICA™

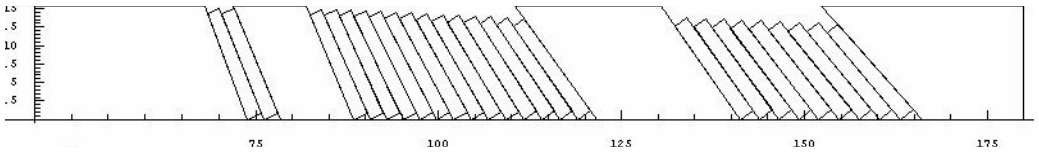


Figura 2.9 Posizione dei cavi dello strato esterno lato non connessione lungo l'asse longitudinale calcolata da MATHEMATICA™.

La posizione nominale dei cavi ottenuta come output dal programma rappresenta la configurazione della bobina dopo la polimerizzazione. Risulta tuttavia difficile tenere in conto la deformazione dei conduttori sottoposti alle forze elettromagnetiche durante il funzionamento.

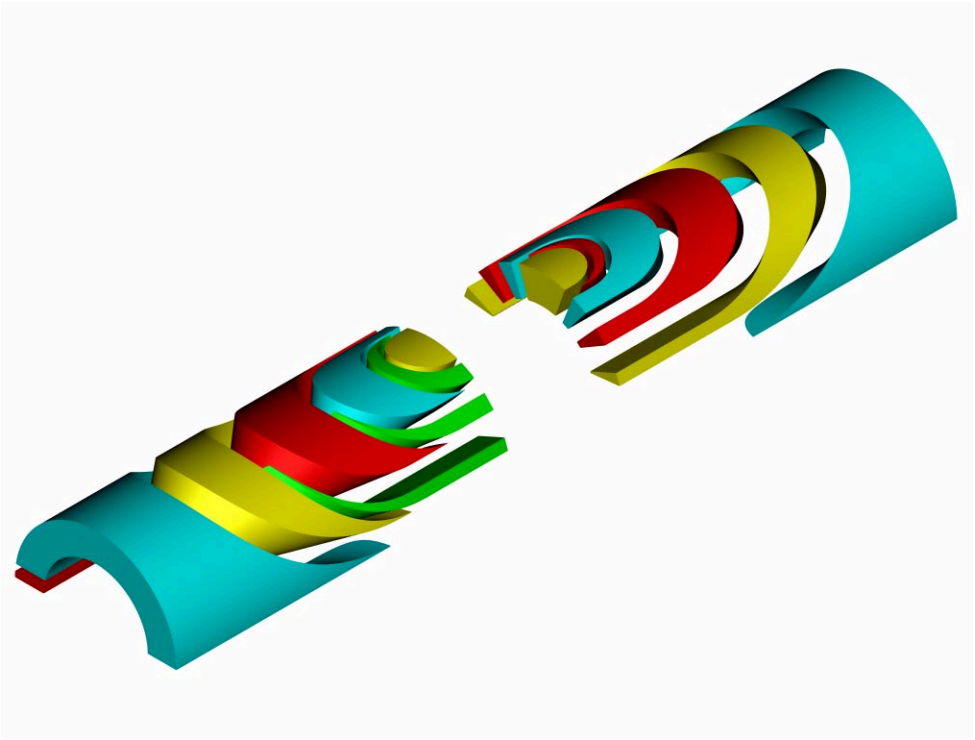


Figura 2.10 Immagine 3D degli spaziatori dello strato interno

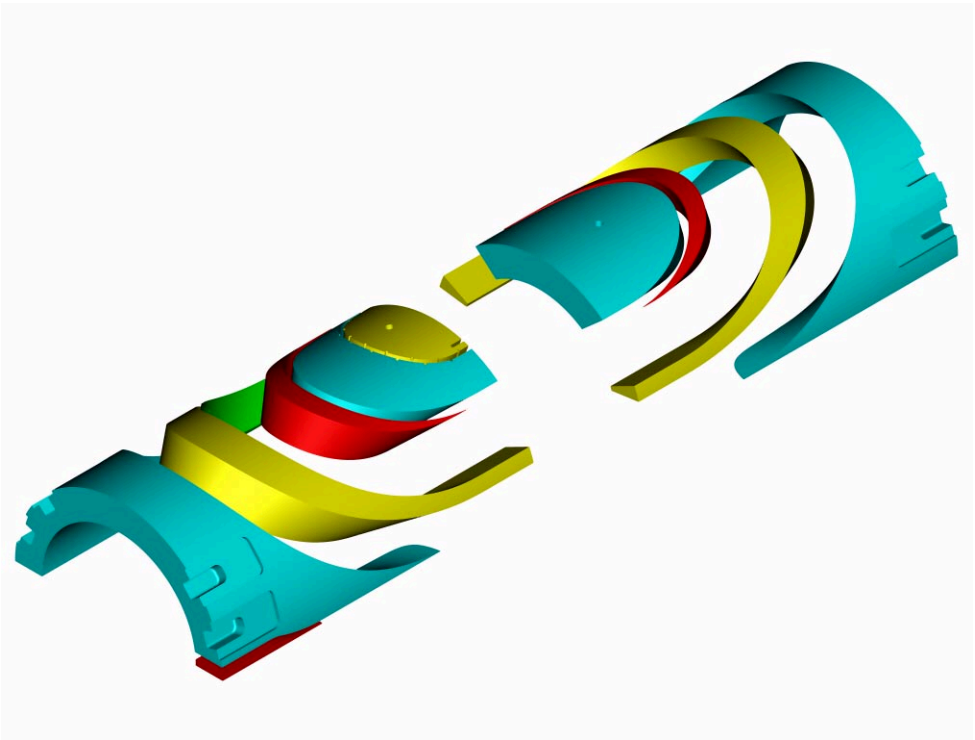


Figura 2.11 Immagine 3D degli spaziatori dello strato esterno

2.4 Processi di produzione delle bobine

Per comprendere le problematiche legate alle teste delle bobine è importante tenere in conto tutti i processi produttivi implicati nella realizzazione del magnete.

2.4.1 Bobinaggio

Tre ditte Europee, ALSTOM-JEUMONT (Francia), ANSALDO (Italia) e NOELL (Germania) sono impegnate col CERN nell'industrializzazione della costruzione del dipolo di LHC. Queste si sono dotate di un'area chiamata "clean-area" che deve soddisfare alcuni requisiti per garantire la bontà del processo: deve trattarsi di una zona non fumatori, in cui non sia svolto alcun tipo di lavorazione di metalli onde evitare che trucioli possano intaccare le pellicole isolanti dei cavi, deve essere climatizzata e con umidità controllata.

L'attrezzatura necessaria per il bobinaggio consiste in:

- un tavolo da lavoro che supporti il mandrino di bobinaggio, il quale deve essere in grado di ruotare lungo il suo asse longitudinale per consentire l'avvolgimento del cavo nelle teste;
- un supporto rotante attorno al tavolo da lavoro contenente le bobine di superconduttore, preventivamente isolato, e provvisto di un freno che controlli la tensione del cavo.

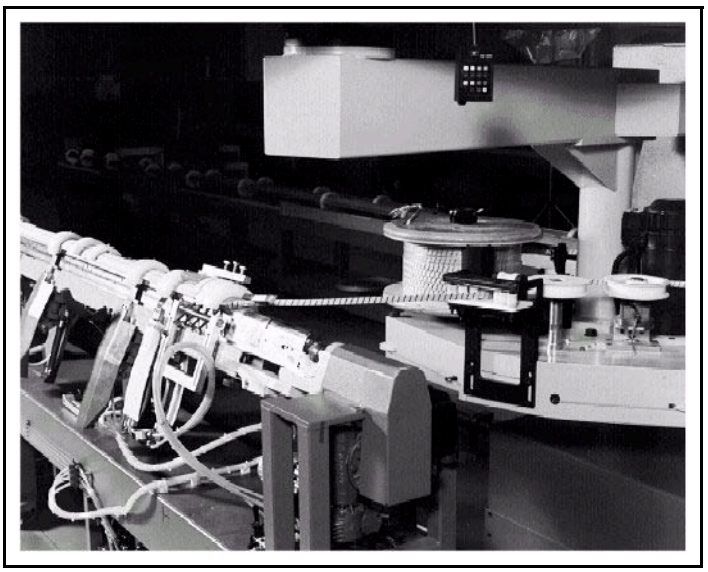


Figura 2.12 Prototipo di bobinatrice per dipoli da 15 m realizzato per ANSALDO[19]

Prima di iniziare a bobinare ogni componente che possa venire a contatto con l'isolante del cavo deve essere smussato in modo da eliminare bordi taglienti, quindi si procede a sistemare sul mandrino dei fogli protettivi per non danneggiare i cavi e si fissano gli spaziatori più interni delle teste.

Quando si bobina lo strato interno, si incomincia fissando la zona del cavo che costituisce il *layer-jump* al mandrino con un apposita attrezzatura. Si inizia quindi ad effettuare l'avvolgimenti nella parte dritta ed una volta bloccati i cavi mediante appositi sostegni si prosegue con le teste, operazione per la quale si necessita di muovere anche il mandrino (vedi figura 2.12) in modo da assecondare il posizionamento del superconduttore.

A mano a mano che un singolo blocco di conduttori viene bobinato, vengono inseriti gli spaziatori delle teste, preventivamente rivestiti di resina epossidica, e gli spaziatori in rame per la parte dritta, isolati con lo stesso sistema utilizzato per i cavi.

Durante i primi bobinaggi tutte le operazioni vengono svolte manualmente, mentre nelle lavorazioni successive tutti questi processi sono automatizzati, utilizzando i dati ricavati dalle prime esperienze, per garantire una uniformità di processo ed una maggior velocità. [12]

2.4.2 Pressatura e polimerizzazione

Terminato il bobinaggio, due barre di dimensionamento sono poste ai due lati del mandrino e spinte contro l'ultimo avvolgimento, gli spaziatori piú esterni delle teste vengo inseriti e pressati opportunamente in modo da completare la forma semicilindrica della bobina che viene quindi inserita insieme al mandrino all'interno della pressa sagomata, parzialmente chiusa a temperatura ambiente. Si procede quindi ad aumentare gradualmente la temperatura facendo circolare olio riscaldato attraverso il mandrino e la forma di polimerizzazione, quindi si incrementa la pressione da 10 a 80/100 MPa completando in questa maniera il condizionamento alle misure nominali della bobina.

In queste condizioni di pressione e temperatura, la resina epossidica presente sugli spaziatori e sulle pellicole esterne dell'isolante dei cavi e del rame reagisce chimicamente polimerizzando, garantendo in questa maniera la coesione fra i vari avvolgimenti e gli spaziatori, conferendo rigidità alla struttura.

La pressa deve essere in grado di fornire una forza di almeno 3300 kN per metro lineare mentre un sistema di riscaldamento deve garantire una temperatura di 210°C uniformemente distribuita lungo i 15 m del mandrino con uno scarto al più di ±5°C.

Durante queste fasi deve essere garantita una differenza massima di temperatura fra la parte destra e quella sinistra della bobina di ±3°C ed una variazione di pressione di ±5 MPa. [12]

Tabella 2.2 Ciclo di pressione e polimerizzazione della bobina

	Temperatura di inizio	Temperatura finale	Rateo di variazione temperatura	Durata	Pressione
Riscaldamento 1	Ambiente	100/135°C	<3°C/min	60 min	10 MPa
Messa a misura	100/135°C	100/135°C	0	30 min	70÷100 MPa
Riscaldamento 2	135°C	190°C	<3°C/min	30 min	10÷20 MPa
Polimerizzazione	190°C	190°C	0	30 min	<80 MPa
Raffreddamento 1	190°C	140°C	<3°C/min	30 min	<80 MPa
Raffreddamento 2	140°C	Ambiente	<3°C/min	50 min	<80 MPa

2.4.3 Impregnazione

Quando termina la fase di polimerizzazione, l'avvolgimento viene estratto dalla pressa, vengono rimosse le coperture applicate a protezione delle parti terminali e viene testato elettricamente l'isolamento dei conduttori.

Nelle teste della bobina il raggio esterno dei cavi è inferiore rispetto alla parte dritta a causa dell'inclinazione dei conduttori, il che comporta una discontinuità geometrica ed una disomogenea ripartizione delle forze elettromagnetiche. Per ovviare a questo inconveniente lo spazio fra i conduttori ed il raggio esterno teorico viene riempito con della resina epossidica in modo da ricostruire la superficie cilindrica in grado di scaricare le tensioni sulla struttura meccanica.[12]

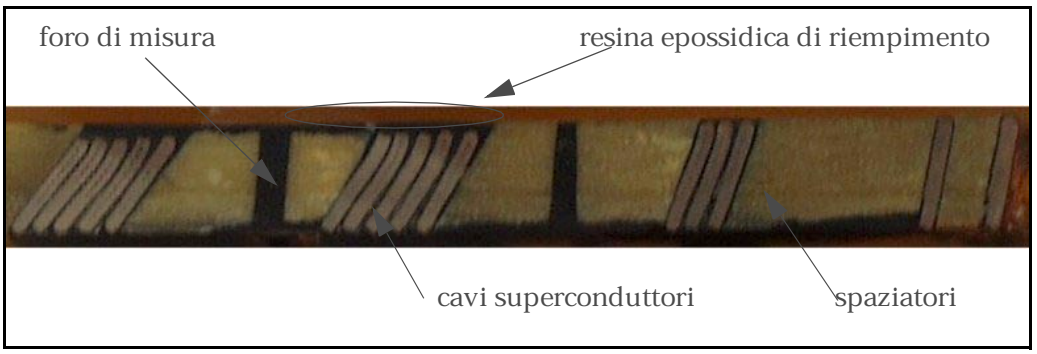


Figura 2.13 Sezione di prototipo di bobina impregnata, testa lato non connessione strato interno

Capitolo 3

Produzione industriale degli spaziatori

Al fine di completare il quadro sulle estremità delle bobine, si vogliono qui di seguito illustrare i processi impiegati nella la produzione industriale degli spaziatori, ponendo in evidenza le caratteristiche dei materiali e le problematiche tecnologiche fino ad ora incontrate nella lavorazione meccanica.

3.1 Caratteristiche tecnologiche degli spaziatori 38
3.1.1 Caratteristiche meccaniche ed elettriche del G11 . . 39
3.1.2 Preparazione dei tubi in G11 42
3.2 Produzione industriale degli spaziatori 43
3.2.1 Tolleranze geometriche 43
3.2.2 Lavorazione meccanica degli spaziatori 45
3.2.3 Controllo della produzione 49

3.1 Caratteristiche tecnologiche degli spaziatori

Gli spaziatori delle teste, chiamati in gergo *end-spacers*, devono operare a temperature di 1.9 K e sotto l'effetto di radiazioni, 2 MGy in 25 anni, condizioni che influenzano notevolmente le caratteristiche meccaniche ed elettromagnetiche dei materiali.[28]

Tabella 3.1 Rateo di dose per i componenti del dipolo principale di LHC

Posizione radiale rispetto al centro dell'apertura [cm]	Dose all'interconnessione fra magneti [Gy/y]	Dose attorno al magnete [Gy/y]
10	700	66
50	15	1.3
70	12	1.0
100	9	0.7

Gli spaziatori devono sopportare vari tipi di sollecitazioni, durante l'arco della loro vita, come quelle provocate dalla polimerizzazione della bobina a 180°C, inoltre devono reggere i carichi azimutali di pre-stress applicati in fase di assemblaggio del dipolo. Devono inoltre garantire la stabilità geometrica dei cavi, evitandone gli spostamenti causati dalle forze elettromagnetiche durante il funzionamento del magnete.

Il CERN ha avviato una campagna di test per la scelta del materiale idoneo principalmente vagliando due differenti processi di lavorazione legati a due diverse scelte di materiali:

1. *materiali termoplastici ad alte prestazioni ingegneristiche* (pezzi prodotti per iniezione del materiale in apposite forme)
2. *materiali basati su resine epossidiche termoindurenti* (pezzi prodotti per lavorazione meccanica di un tubo di materiale grezzo)

I risultati ottenuti hanno fatto propendere, per la produzione degli spaziatori principali, verso la seconda opzione poiché l'iniezione di materiale plastico per la realizzazione di forme di grosse dimensioni è risultata particolarmente complessa e dispendiosa, mentre per i piccoli chip si è deciso di seguire la prima strada utilizzando dell'ULTEM™ 2300 e riuscendo in questa maniera a minimizzare i costi di fabbricazione.

Il materiale prescelto per la lavorazione meccanica è il G11, resina epossidica mista a fibra di vetro, in grado di soddisfare i requisiti indicati da specifica tecnica.[12]

Tabella 3.2 Requisiti tecnici del materiale da usarsi per gli spaziatori principali

Proprietà del Materiale	Intervallo di accettabilità
Compressione assiale	>300 MPa
Coesione fra gli strati	>45 0 MPa
Coesione fra gli strati dopo 1 ora a 155°C	>300 MPa

3.1.1 Caratteristiche meccaniche ed elettriche del G11

Il G11 è un materiale composito formato da fibra di vetro impregnata di resina epossidica o Epoxy secondo la norma europea EN 61212-1 che lo definisce come materiale per applicazioni meccaniche, elettriche ed elettroniche, di resistenza meccanica estremamente elevata a basse temperature e buona stabilità delle proprietà elettriche anche in condizioni di elevata umidità relativa.[13]

Le resine epossidiche sono caratterizzate dalla presenza di un gruppo funzionale costituito da due atomi di carbonio ed uno di ossigeno legati fra loro a formare un anello coeso e reattivo. La propensione a reagire è legata alla posizione del gruppo nella molecola od al fattore sterico.

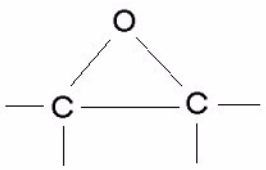


Figura 3.1 Gruppo epossidico

La resina epossidica più comune è basata sul *bisfenolo A*, ma esistono altre varietà quali l'*epoxy novolac*, solido a temperatura ambiente, ed il *diepoxide cicloalifatico*, particolarmente resistenti al calore, agli attacchi chimici e con proprietà meccaniche più marcate.

La lavorazione dell'epoxy necessita l'utilizzo di un materiale strutturale (fibra di vetro) e possibilmente di un catalizzatore: i vari costituenti vanno riscaldati e miscelati nelle giuste proporzioni per un'ora circa, a una temperatura di 120°C, per rendere gelatinosa la resina. Per cento parti in peso di resina, da 10 a 80 parti possono essere di indurente e 2 o 3 di catalizzatore. Per completare il trattamento termico occorre riscaldare per un periodo di due ore ad una temperatura superiore ai 180°C.[15]

La scelta dei materiali plastici utilizzati in un acceleratore deve tener conto dei danni provocati dalle radiazioni e degli effetti che questi possono avere sulle proprietà dei pezzi. Diversi test sono stati svolti al CERN su vari materiali polimerici ed il risultato fondamentale ottenuto è che le caratteristiche meccaniche, quali la plasticità e l'infragilimento, sono fortemente dipendenti dalla temperatura in cui si opera ma non dalla temperaratura a cui vengono irraggiati i provini.

In figura 3.2 viene presentato un grafico qualitativo, entità del danno in funzione della radiazione, del comportamento di varie resine e materiali compositi presi in considerazione per differenti applicazioni in LHC. Spicca la particolare resistenza dell'epoxy rispetto agli altri anche ad alti livelli di irraggiamento.[14] Tale risultato è valido a meno di importanti effetti di degasaggio del materiale stesso.

In tabella 3.3 vengono riassunte le proprietà fisiche, meccaniche, termiche ed elettriche mediate dell'epoxy standard, ricavate dai database di vari costruttori.

La figura 3.3 riporta il grafico della distribuzione di dose annua lungo la sezione retta del magnete nelle zone di testa così come sono state stimate mediante simulazioni.

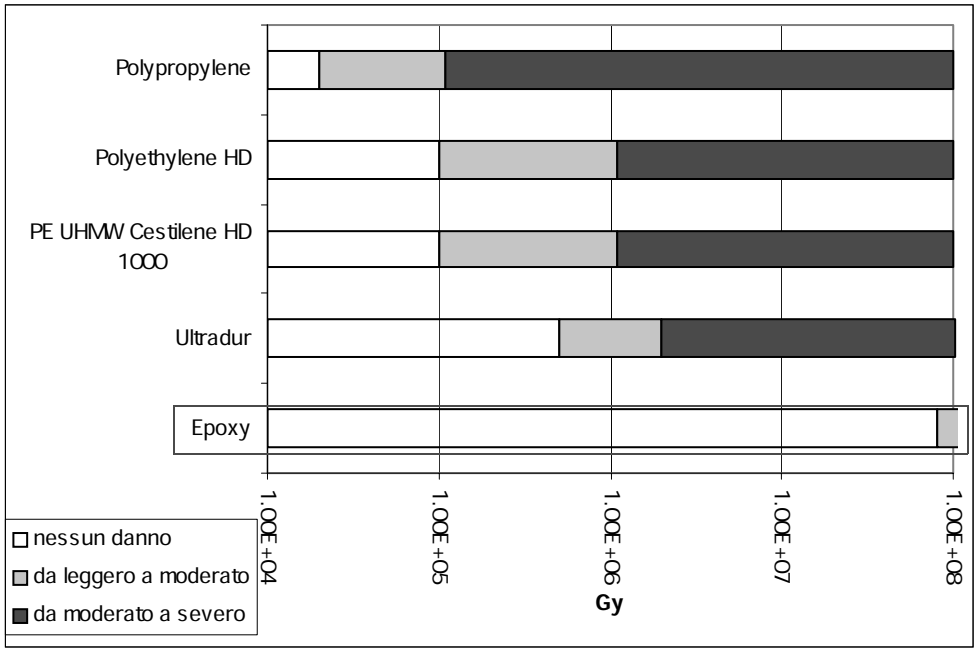


Figura 3.2 Danno da radiazione in materiali termoplastici

Tabella 3.3 Proprietà dell'epoxy[16]

Proprietà fisiche	**Valore**	**Proprietà fisiche**	**Valore**
Densità, g/cc	1.92	Assorbimento acqua, %	0.2
Durezza, Rockwell M	110	Durezza, Barcol	71
Proprietà meccaniche	**Valore**	**Proprietà meccaniche**	**Valore**
Carico di snervamento, MPa	100	Carico di rottura, MPa	110
Elongazione %, rottura	1.5	Modulo elastico, GPa	22.5
Modulo di flessione, GPa	17.5	Carico massimo di flessione, MPa	160
Carico massimo di compressione, MPa	210		
Proprietà termiche	**Valore**	**Proprietà termiche**	**Valore**
Coeff.contrazione termica lineare 20°C, µm/m/°C	36	Temperatura di flessione a 1.8MPa, °C	250
Capacità termica, J/g/°C	0.9	Conducibilità termica, W/m/K	0.63
Proprietà elettriche	**Valore**	**Proprietà elettriche**	**Valore**
Resistività, Ohm*cm	7.8E+14	Resistenza di superficie, Ohm	1E+15
Costante dielettrica	4.1	Rigidità dielettrica, KV/mm	12.6
Fattore di dissipazione	0.016	Resistenza all'arco, sec	180

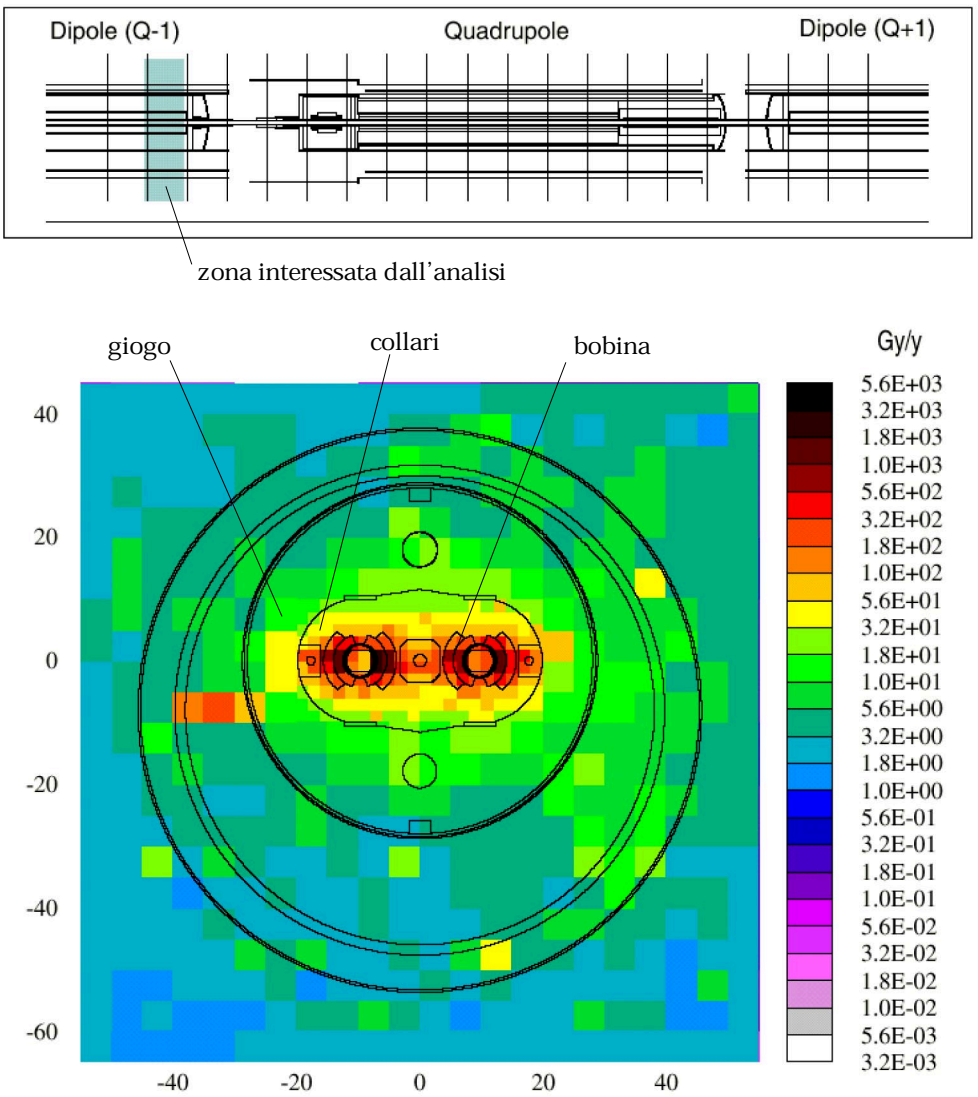


Figura 3.3 Distribuzione della dose annua di radiazioni (Gy/y) impartita ai componenti della zona finale del dipolo principale di LHC, normalizzata per una perdita di protoni di 1.65E11/(m·y).

3.1.2 Preparazione dei tubi in G11

La lavorazione meccanica degli spaziatori richiede che il materiale grezzo sia fornito sotto forma di tubi.

L'avvolgimento costituisce la tecnica base per la fabbricazione di elementi aventi una forma a sezione circolare, composti da una matrice polimerica ed una base fibrosa.

I nastri di materiale grezzo, intrisi di resina, vengono avvolti attorno ad un mandrino in strati sovrapposti con una tensione predeterminata N_o. Il mandrino può compiere, uno o due movimenti di rotazione (attorno all'asse longitudinale, avvolgimento circonferenziale, ed attorno ad un punto dato, avvolgimento polare) mentre la bobinatrice può traslare lungo una guida. Ciò consente la realizzazione di diversi schemi di rinforzo delle fibre ed il controllo dello spessore del pezzo variando l'angolazione dei filamenti o la posizione del nastro.

Durante l'avvolgimento, grazie al tensionamento delle fibre, si viene a creare una pressione q fra i vari strati, necessaria per attribuire una monoliticità al pezzo; se la pressione di contatto $q = N_0/R$ diventa insufficiente per la compattazione, è necessario fornire dall'esterno un' ulteriore pressione mediante un rullo mentre il mandrino contribuisce a mantenere la voluta configurazione.

Il pezzo così lavorato viene detto *semi-fabbricato* e deve quindi essere sottoposto ad un trattamento termico che consenta una ridistribuzione degli stress interni ed una compattazione dell'articolo; al termine di questo processo si procede all'estrazione del mandrino.[25]

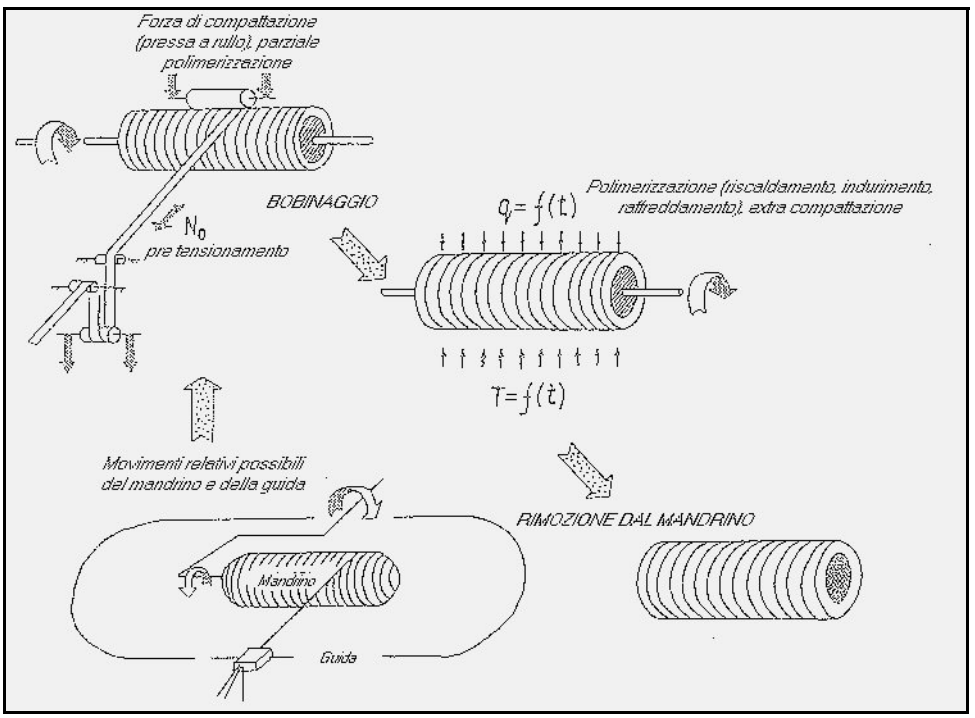


Figura 3.4 Processi di avvolgimento dei filamenti di materiale composito

3.2 Produzione industriale degli spaziatori

La necessità di fornire due set di spaziatori, ognuno composto da 19 pezzi, per ciascuno dei 1248 dipoli principali di LHC che verranno costruiti, ha fatto si che si ottimizzassero tutte le fasi produttive al fine di minimizzare i tempi di lavorazione e di conseguenza i costi: nulla è stato trascurato, a partire dal disegno delle superfici, modificato per semplificarne la lavorazione, alla scelta degli utensili e degli strumenti per mantenere in posizione gli spaziatori durante la fresatura in modo da ridurre i tempi morti fra due pezzi successivi.

3.2.1 Tolleranze geometriche

La topologia degli spaziatori è critica per il corretto assemblaggio della cold mass e per le prestazioni del magnete. Tutti i requisiti geometrici si traducono in tolleranze da raggiungere e mantenere durante tutto l'arco produttivo.

Il principale vincolo imposto agli spaziatori è che la superficie finale delle loro code combaci con la sezione retta *copper wedge*, gli spaziatori della parte dritta del magnete, al fine di garantire una continuità geometrica; per ottenere ciò, è necessario imporre due tipi di tolleranze per garantire una precisione spaziale ed una precisione nella forma della sezione delle code.

Il primo tipo di tolleranze imposte riguarda la forma di tutto lo spaziatore nel suo complesso ed in particolare la lunghezza delle code e la loro distanza reciproca. Al fine di non richiedere, e quindi pagare, un livello di precisione non necessario, le tolleranze riguardanti le superfici ellittiche sono state assegnate in modo da consentire un relativamente ampio intervallo (±0.25 mm) poiché il materiale, G 11, risulta flessibile ed è inoltre sottoposto a carichi in fase di assemblaggio che ne agevolano il posizionamento.

Per quel che riguarda la forma della sezione delle estremità delle code, si hanno tolleranze ben più severe (±0.06 mm). Questo in quanto una differenza di spessore significativa rispetto alla sezione retta dei copper wedge determinerebbe una discontinuità geometrica negli avvolgimenti che potrebbe causare una variazione locale della densità di corrente, non che la creazione di stress e deformazioni in grado di minare le prestazioni del magnete.

Tutte le tolleranze espresse sono riferite a specifiche superfici di riferimento, in particolare rispetto alla superficie interna ed all'asse del foro praticato appositamente al centro dello spaziatore stesso. Per le estremità delle code, vista la tolleranza di deformazione ammessa, esiste un ulteriore sistema di riferimento costituito dalla superficie inferiore della coda stessa (Figura 3.5).

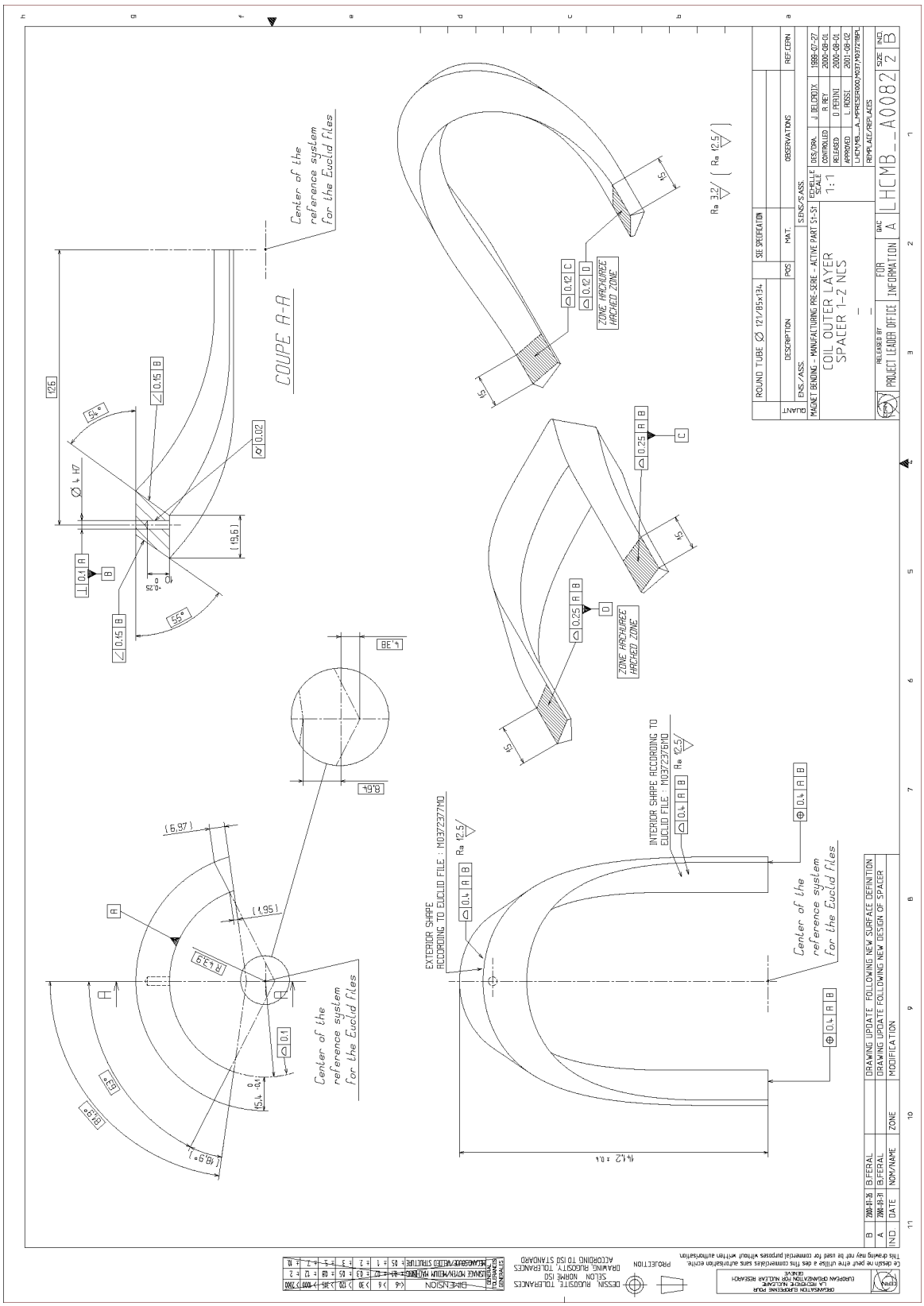


Figura 3.5 Quotatura di uno spaziatore ed indicazione delle tolleranze

3.2.2 Lavorazione meccanica degli spaziatori

La matematica che descrive le superfici degli spaziatori è ottenuta grazie ad un programma sviluppato al CERN con il software Mathematica™ e viene utilizzata come input per l'interfaccia CAM delle macchine utensili al fine di minimizzare i tempi di macchina e di studiare la maniera più efficace per lavorare i pezzi.

La lavorazione delle superfici può essere effettuata con macchine a 3 e 5 assi:

- una macchina a 3 assi consente al piano di lavoro di muoversi rispetto allo strumento mediante semplici traslazioni, per questo motivo il tipo di fresa utilizzata è del tipo a sfera attraverso la quale si ha un contatto puntiforme con la superficie da modellare. I vantaggi di questo tipo di lavorazione sono la semplicitá di utilizzo della macchina e la possibilità di produrre qualsiasi tipo di superficie;
- in una macchina a 5 assi il piano di lavoro è libero oltre che di traslare anche di ruotare aggiungendo altri 2 gradi di libertà al sistema e consentendo in questa maniera l'utilizzo di frese a candela che lavorano con tutta la superficie laterale dell'utensile riducendo il numero di passate e garantendo una maggior precisione.

Al fine di minimizzare i tempi ed i costi di produzione, per la serie si è optato per una lavorazione a cinque assi che tuttavia impone alcuni vincoli sulla topologia delle superfici che devono essere di tipo *isoperimetrico*, ossia il perimetro della superficie ellittica superiore deve essere uguale a quello della superficie inferiore.

Un parametro caratteristico di una superficie è il suo *raggio di curvatura gaussiana*. E' il prodotto del raggio di curvatura massimo (R) per il raggio di curvatura minimo (r) della superficie in ciascun punto. Si possono verificare quattro casi:

- $0 < R < \infty$ ed $r > 0$ superficie ellittica (oppure $R < 0$ ed $r < 0$)
- $0 < R < \infty$ ed $r < 0$ superficie iperbolica
- $R = \infty$ ed $r < \infty$ superficie cilindrica
- $R = \infty$ ed $r = \infty$ superficie piana

Affinchè si possa lavorare a cinque assi mediante una sola passata d'utensile, il pezzo dovrà presentare superfici ellittiche o, meglio ancora, cilindriche. In pratica si ha la necessità di avere entrambi i raggi positivi in modo da non dover realizzare delle superfici sottosquadra che richiederebbero diverse passate della fresa.

Un altro requisito da soddisfare al fine di ottimizzare la lavorazione consiste nel minimizzare il gradiente spaziale del raggio, possibilmente rendendolo nullo. In figura 3.6 sono riportate due superfici appartenenti a due differenti spaziatori elaborate al CAM in modo da visualizzare l'andamento del raggio di curvatura gaussiano: l'immagine di sinistra mostra zone di elevato gradiente di raggio (zone di passaggio dal rosso al blu) che rendono difficoltosa la lavorazione mentre nella figura di destra la superficie è stata realizzata con una topologia modificata ad hoc per la lavorazione meccanica mediante una fresa a candela.

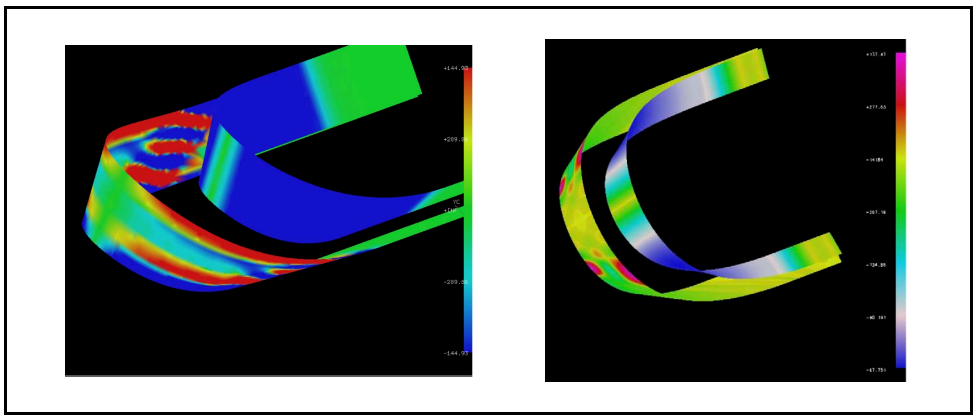


Figura 3.6 Superfici di spaziatori elaborate al CAM: analisi dell'andamento del raggio di curvatura gaussiana

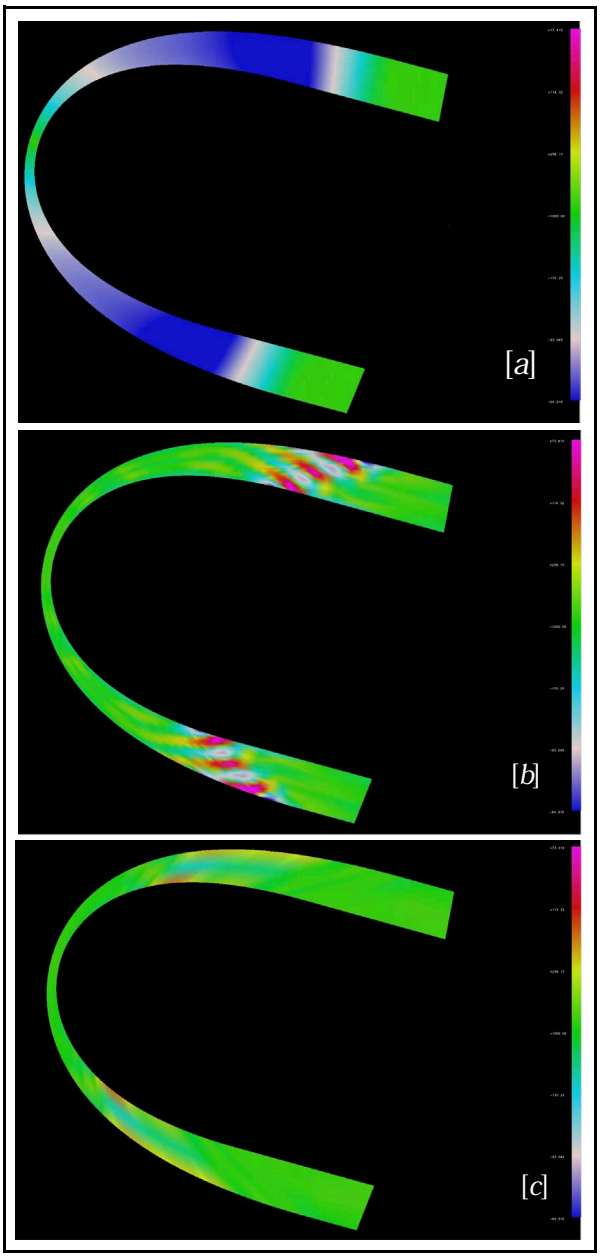


Figura 3.7 Elaborazione CAM del raggio di curvatura gaussiana della superficie esterna di uno spaziatore dello strato esterno sviluppata secondo le tre modalità descritte nel testo. Nella figura a è rappresentata una superficie del primo tipo ove il colore verde rappresenta un raggio di curvatura infinito mentre quello blu un raggio negativo (superficie ellittica). La superficie b è di tipo due si possono vedere chiaramente delle zone a forte discontinuità di gradiente di raggio che rendono difficile la lavorazione meccanica a cinque assi. L'immagine c rappresenta invece una superficie di terza specie grazie alla quale si riesce ad ottenere una certa omogeneità di raggio di curvatura

Al fine di ottimizzare tutte le superfici presenti in un intero set di spaziatori, si sono seguiti tre diversi approcci ciascuno dei quali contempla una maniera differente per congiungere il perimetro della superficie superiore a quello della inferiore, ferma restando la necessità di avere delle superfici lavorabili a cinque assi.

Nel primo approccio la curve che delineano il perimetro delle superfici inferiore e superiore sono divise in segmenti aventi tutti la stessa lunghezza ed i punti aventi la stessa distanza lungo le curve sono semplicemente congiunti mediante segmenti retti. (figura 3.7.a)

Nel secondo tipo di superfici lo spessore dello spaziatore (15.4 mm) è diviso in intervalli equidistanti e per ognuno di questi livelli viene disegnata un'ellisse isoperimetrica a quella superiore ed inferiore. (figura 3.7.b)

Nel terzo caso la discretizzazione parte dal punto in cui l'ellisse è tangente alla parte dritta, le due curve vengono divise in un ugual numero di segmenti ed i punti sono collegati da linee. (figura 3.7.c)

Il primo tipo viene tipicamente utilizzato per la superficie interna degli spaziatori, il secondo per quella esterna anche se oramai è stato quasi del tutto rimpiazzato dal tipo tre che presenta minor gradiente di raggio di curvatura.

L'interfaccia CAM, in questo caso costituita dal programma UNIGRAFICS™, prepara tutte le istruzioni da fornire alla fresa a controllo numerico, fornendo la corretta matematica che descrive le superfici, la sequenza degli utensili via via necessari ed i movimenti che il mandrino su cui è posto il pezzo grezzo deve compiere.

Le fasi principali della lavorazione sono tre:

1. *sgrossatura:* il tubo di materiale G11 viene lavorato con un utensile con profilo ad elica (scaricato) a quattro taglienti del diametro di 10 mm capace di asportare il grosso del materiale in eccesso descrivendo le superfici degli spaziatori in maniera approssimativa;
2. *semifinitura:* il pezzo sgrossato viene successivamente lavorato con un utensile in materiale K10 zigrinato, di 10 mm di diametro, e preparato per l'ultima fase; ove possibile si può utilizzare una punta da 20 mm di diametro che riduce notevolmente i problemi di flessione dell'utensile molto frequenti per diametri inferiori;
3. *finitura:* durante quest'ultima lavorazione lo spaziatore assume la sua forma definitiva grazie ad un mola diamantata fine con un tagliente lungo 40mm ed un diametro che può variare dai 6 ai 10 mm.

Esiste un ultima lavorazione chiamata *testatura* in cui una fresa diamantata di 60 mm di diametro usata di testa riduce le code degli spaziatori alla lunghezza desiderata (Figura 3.9).[17][29]

Figura 3.8 Utensileria della macchina a 5 assi utilizzata per la lavorazione degli spaziatori: (1) fresa diamantata da 20 mm utilizzata per la semifinitura dei pezzi grossi, (2) utensile utilizzato per la sgrossatura, (3) mola diamantata fine utilizzata per la finitura, (4) fresa zigrinata da 10 mm per la semifinitura di pezzi di piccole dimensioni.

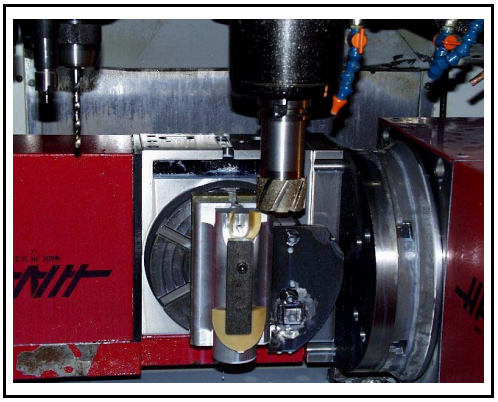


Figura 3.9 Operazione di testatura di uno spaziatore per ridurre la lunghezza delle code

Le principali difficoltà riscontrate nella lavorazione riguardano principalmente gli spaziatori dello strato interno di piccole dimensioni poiché richiedono utensili dal diametro limitato e dal tagliente molto lungo dato che le superfici devono essere lavorate con l'utensile molto inclinato. L'utilizzo di punte sottili crea inoltre problemi dovuti alla flessione della stessa fresa. Un ulteriore punto critico è rappresentato dalle code degli spaziatori del lato connessione che per esigenze di progetto devono morire a zero. Tali code, a causa dello spessore ridotto, non sono in grado di opporre resistenza alla macchina e si flettono impedendo all'utensile di lavorarle.

In figura 3.10 è possibile vedere un set di spaziatori per lo strato esterno della bobina così come appare dopo la lavorazione meccanica. Gli spaziatori sono stati

disposti all'incirca nello stesso modo in cui verranno posizionati nelle teste delle bobine dei dipoli.

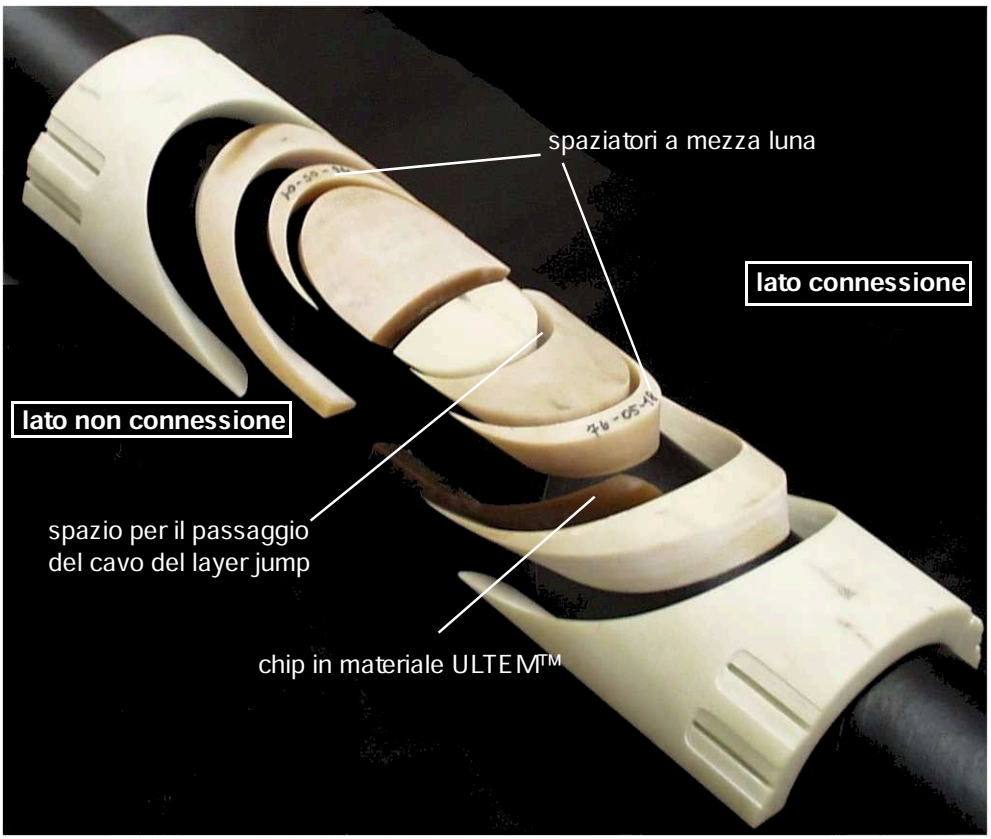


Figura 3.10 Foto di un set di spaziatori per lo strato superiore della bobina.

3.2.3 Controllo della produzione

La complessità della forma degli spaziatori ha richiesto lo sviluppo di un sistema ad-hoc per controllare le dimensioni dei pezzi.(Figura 3.11)

Questo strumento utilizza un laser per acquisire informazioni sul componente fissato su un supporto appositamente disegnato in grado di ruotare nello spazio esponendo in questa maniera tutta la superficie dell'oggetto al raggio di misura.

Il sistema può lavorare su due differenti livelli, in modalità di semplice ispezione ed in modalità di analisi approfondita. Nel primo caso si controlla la conformità di un numero selezionato di punti chiave mentre nel secondo viene analizzato un grosso ammontare di punti (oltre 100) consentendo di creare una mappa completa delle differenze fra il pezzo lavorato e quello nominale.

Un altro vantaggio di questo tipo di approccio è la possibilità di disporre di una banca dati informatica ampia che consenta di tracciare l'andamento nel tempo della qualità della produzione utile per l'ottimizzazione dei processi.

Figura 3.11 Macchina laser per la misura degli spaziatori

Dal punto di vista della pianificazione delle ispezioni è stato deciso di controllare tutti i pezzi prodotti fino a quando non si vedrà un assestamento della qualità, dopo di chè l'ispezione procederà in maniera statistica.

Capitolo 4

Modello elettromagnetico delle teste

A causa della topologia estremamente complessa, la testa di un magnete superconduttore non può essere analizzata con gli stessi modelli bidimensionali utilizzati per la parte dritta. In questo capitolo si vuole illustrare il modello tridimensionale sviluppato mediante il software ROXIE per simulare il comportamento del campo magnetico in questa zona terminale della bobina. Il modello è volto allo studio delle problematiche correlate con la qualità di campo e con l'entità del campo di picco in ogni spira dell'avvolgimento.

4.0.1 Scopo del modello elettromagnetico 52
4.1 Programma per il design degli spaziatori 53
4.2 ROXIE 54
4.2.1 Calcolo del campo magnetico in ROXIE 54
4.3 Modello singola apertura 56
4.3.1 Implementazione della geometria delle teste 56

4.0.1 Scopo del modello elettromagnetico

La progettazione delle teste del magnete risulta particolarmente difficile per la complicata geometria. A causa di tale complessità, alle forze elettromagnetiche radiali ed azimutali, che dominano la meccanica della parte dritta del magnete, si aggiungono le componenti assiali.

Si vuole quindi costruire un modello che possa essere utile anche nel valutare gli effetti delledeviazioni costruttive rispetto ai parametri di progetto.

Dai test effettuati sui primi prototipi di dipolo si è riscontrato che i primi avvolgimenti delle teste del lato non connessione costituiscono una zona critica per l'insorgere dei quench. Per analizzare questi problemi si è proceduto ad effettuare una serie di simulazioni volte a modificare la geometria della zona critica e si è intervenuto inserendo uno *spaziatore a mezza luna* che allontanasse i primi due avvolgimenti dello strato esterno da quelli adiacenti. Si riusce così a ridurre sensibilmente il campo di picco nei conduttori ed a scongiurare il fenomeno del quench.

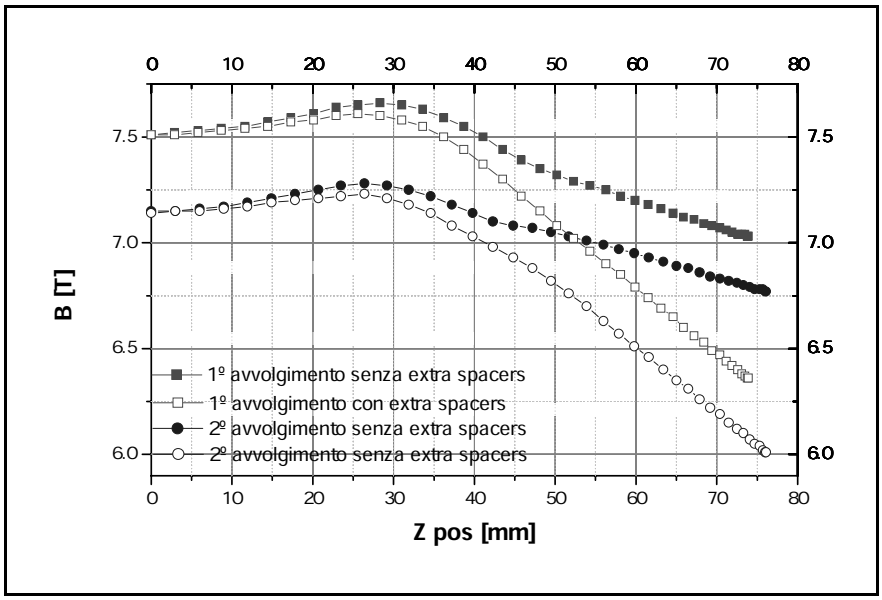


Figura 4.1 Comparazione del campo di picco nei primi due avvolgimenti dello strato esterno, lato non connessione, prima e dopo l'inserimento dell'extra spacer, in funzione della coordinata longitudinale

A seguito di questa modifica al layout delle teste si è deciso di affrontare una analisi di sensibilità sistematica in grado di individuare i parametri più sensibili od i cavi più critici e nello stesso tempo verificare la stabilità delle prestazioni del magnete a seguito di variazioni geometriche indotte dalle lavorazioni industriali. A tale scopo è stato creato il modello che verrà successivamente descritto e che rappresenta un utile strumento di feedback per l'ottimizzazione della progettazione.

Si vuole innanzi tutto descrivere i software utilizzati per questa analisi, in particolare un programma sviluppato al CERN in MATHEMATICA™ per il design degli spaziatori di testa e ROXIE per lo studio elettromagnetico.

4.1 Programma per il design degli spaziatori

Il design delle superfici che caratterizzano gli spaziatori viene realizzato mediante un algoritmo sviluppato al CERN nel gruppo MMS utilizzando il software MATHEMATICA™. Questo programma è in grado di generare uno spaziatore partendo dalla posizione dei superconduttori nella parte dritta del magnete a da alcuni parametri geometrici basilari quali lo spessore dello spaziatore e l'angolo di inclinazione del cavo durante l'avvolgimento. Con questi dati è possibile determinare tutti gli altri parametri necessari a descrivere la superficie superiore e quella inferiore degli spaziatori in modo tale che siano isoperimetriche e che ogni curva sia composta da un'ellisse più una parte dritta.

La scelta di MATHEMATICA™ è stata dettata dalla elevata precisione con cui il programma è in grado di risolvere integrali ellittici grazie ai quali si riesce a definire la forma dei pezzi. Per una accurata descrizione dei tipi di superfici utilizzate per vari spaziatori si veda pag. 45.

Il file di output fornisce inoltre la posizione dei cavi lungo l'asse longitudinale della bobina tenendo in conto la sezione retta trapezoidale dei conduttori e la compressione a cui essi sono sottoposti durante l'assemblaggio del magnete.

Prima di trasferire la geometria ottenuta al programma per le simulazioni elettromagnetiche, vengono inseriti degli spaziatori virtuali fra i vari avvolgimenti in modo da ottenere il desiderato angolo di inclinazione ed impedire la compenetrazione fra cavi adiacenti (Figura 4.2). Va considerato infatti che nel programma per la progettazione degli spaziatori vengono presi in considerazione i cavi già deformati mentre in ROXIE vanno inseriti i "cavi teorici".

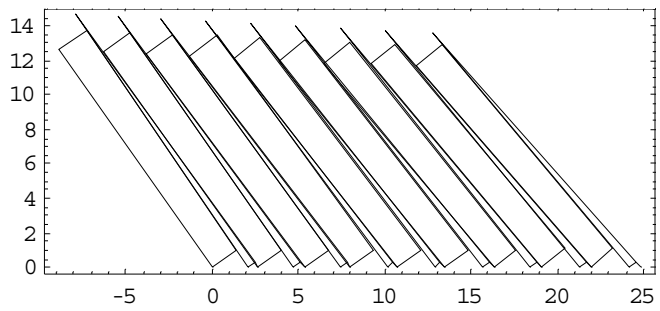


Figura 4.2 Posizione dei cavi di un blocco di conduttori nella sezione longitudinale della bobina calcolata dal programma sviluppato in MATHEMATICA™.

Una volta ottenuto il layout delle bobine si vuole simulare il comportamento elettromagnetico delle teste: per fare ciò si procede a trasferire le coordinate dei cavi nella parte dritta e nella sezione longitudinale ad un altro software dedicato ai calcoli elettromagnetici, ROXIE.

4.2 ROXIE

Il software ROXIE (Routine for the Optimization of magnet X-sections, Inverse field calculation and coil End design) è stato sviluppato al CERN per l'ottimizzazione della geometria della bobina e del giogo dei magneti superconduttori per il Large Hadron Collider. Il programma consente di descrivere la forma, le dimensioni, la posizione e le tolleranze dei vari componenti del magnete, nonché le caratteristiche dei materiali e le loro proprietà.

ROXIE include alcune routines per la definizione geometrica della sezione retta costituita da cavi superconduttori di tipo Rutherford a forma trapezoidale. La posizione dei blocchi di cavi è calcolata partendo da dati di ingresso quali il numero di conduttori per blocco, il tipo (specificato in un apposito database sui cavi), il raggio del mandrino attorno a cui si posizionano gli avvolgimenti, il posizionamento e l'angolo di inclinazione dei blocchi.

La descrizione della testa del magnete richiede, per la definizione della geometria 3D, i seguenti parametri in input: la posizione lungo l'asse longitudinale z del primo cavo di ogni blocco, il suo angolo di inclinazione, la sua sezione retta e le dimensioni dello spaziatore attorno al quale avvengono gli avvolgimenti. Si assume che i cavi vengano allineati e bobinati rimanendo in appoggio sul mandrino interno e i bordi superiori dei conduttori abbiamo una forma ellittica su un piano sviluppato a partire della posizione dei cavi stessi nella sezione dritta della bobina.

Una volta definita la geometria della bobina è possibile applicare delle trasformazioni quali traslazioni, rotazioni al fine di studiare la stabilità del sistema. Le perturbazioni sono limitate in modo da impedire la compenetrazione dei blocchi o la creazione di situazioni fisicamente senza senso.

4.2.1 Calcolo del campo magnetico in ROXIE

Il campo di un magnete superconduttore quale il dipolo di LHC deve essere calcolato con estrema precisione, per questo motivo è desiderabile che la parte del campo dovuta ai conduttori sia ricavata per via analitica utilizzando la legge di Biot-Savart

$$\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} I \int_c dl \times \frac{\bar{r}}{r^3} \qquad (4.1)$$

ROXIE provvede a suddividere la spira in segmenti aventi stessa dimensione lungo l'asse longitudinale z e calcola il contributo di ognuno di essi al campo generato al centro dell'apertura (Figura 4.3).

Per quel che riguarda il contributo dovuto alla presenza di una struttura meccanica ferromagnetica è necessario ricorrere a soluzioni numeriche. Il metodo numerico più versatile è sicuramente quello agli elementi finiti (FEM) poiché si può basare sui valori assunti in ciascun elemento sui nodi o sui bordi a seconda della formulazione del potenziale adottata. Un potenziale scalare viene meglio approssimato mediante elementi nodali ed è sufficiente per problemi di tipo bidimensionale. Per problemi 3D, quali il calcolo del campo magnetico nella zona delle teste, si fa uso di un potenziale vettore basato su elementi ai bordi, tuttavia

sorge il problema di calibrare le due metodologie e far combaciare le differenti mesh.

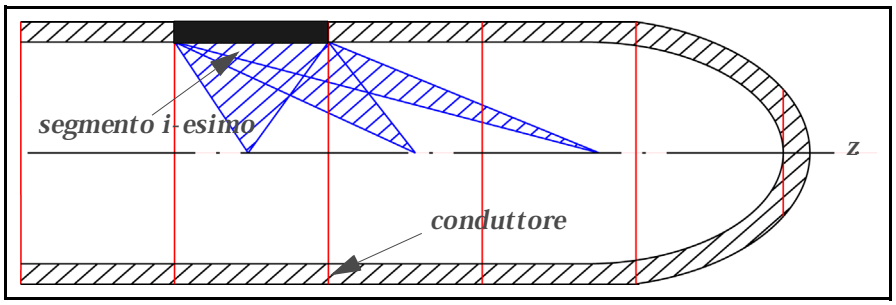


Figura 4.3 Schema del contributo fornito al campo nel centro dell'apertura in tre differenti punti da parte di un segmento del conduttore

Nel caso specifico questo problema non si è presentato poiché, avendo scelto di calcolare il contributo della bobina per via analitica, non si ha la necessità di modellare la forma della bobina con una mesh agli elementi finiti ed il contributo del ferro può essere tenuto in conto con un modello 2D tramite un potenziale vettore ridotto $\mathbf{A}_r$

$$B = \mu_0 H_s + \nabla \times A_r \qquad (4.2)$$

dove H_s è il campo calcolato con Biot-Savart, $\mu_0 H_s$ è il campo magnetico generato da una bobina in uno spazio aperto mentre rot$\bullet A_r$ è il risultato della presenza del ferro.[20]

Per la zona delle teste, ove il modello 2D non è applicabile, il contributo dell'anello di ferro (μ infinita) al campo magnetico viene tenuto in conto mediante il metodo delle correnti immaginarie:

$$J' = J\left(\frac{R}{r'_c}\right)^4 \qquad (4.3)$$

dove R è il raggio interno dell'anello di ferro, r_c la distanza del conduttore dal centro dell'apertura e $r'_c = \frac{R^2}{r_c}$.

La sola limitazione introdotta da questa semplificazione risiede nel non poter fare un'analisi su tutto il magnete al completo ma solo su zone in cui la geometria del giogo sia costante e facilmente rappresentabile

Nel modello sviluppato che verrà qui di seguito presentato, trattandosi di uno studio mirato sulle estremità delle bobine, si prende in considerazione solo la zona delle laminazioni con innesto.

4.3 Modello singola apertura

A causa della complessità del problema, si è deciso di procedere nella costruzione del modello elettromagnetico per gradi, rispecchiando l'iter seguito nello sviluppo del dipolo per LHC.

Il primo passo è stata la realizzazione della testa della bobina lato non connessione in una configurazione a singola apertura, ossia con un solo canale di fascio ed una struttura meccanica simmetrica attorno alla singola bobina. In questa prima fase non si è considerata la presenza del giogo in ferro.

4.3.1 Implementazione della geometria delle teste

Come già accennato in precedenza, la descrizione della geometria della bobina avviene trasferendo le coordinate calcolate in MATHEMATICA™ in un file di input di ROXIE.

Per prima cosa va inserita la posizione dei cavi superconduttori nella sezione dritta: le coordinate da fornire sono il raggio del mandrino attorno a cui si avvolgono i cavi che costituisce il raggio interno della bobina, l'angolo ϕ rispetto all'asse X che indica la posizione del cavo lungo la circonferenza del canale di flusso e l'angolo α che definisce l'inclinazione del conduttore rispetto al piano orizzontale, come indicato in figura 4.4.

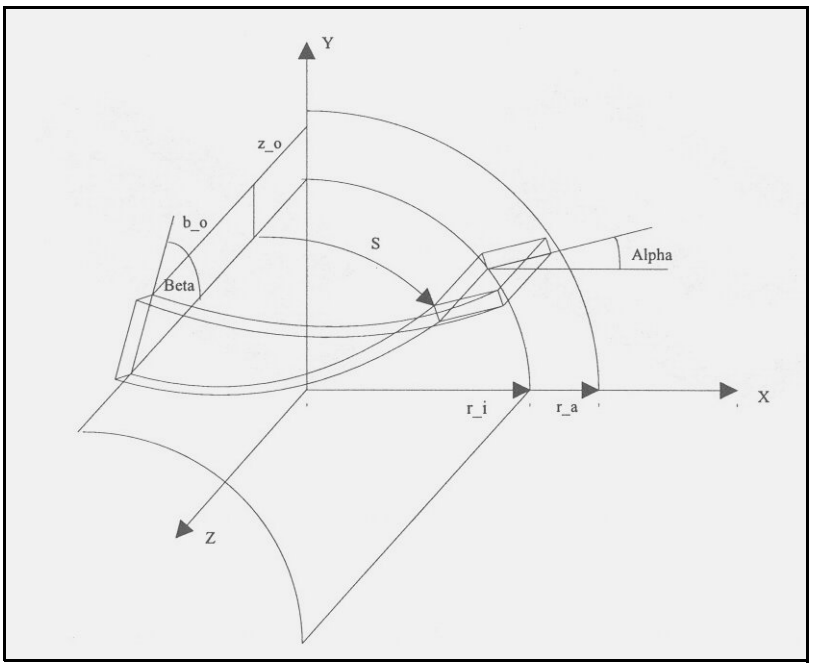


Figura 4.4 Sistema di coordinate utilizzate in ROXIE per descrivere la posizione di un cavo nella testa.

Questa operazione viene svolta per il primo cavo di ogni blocco mentre il programma procede automaticamente a determinare la posizione dei cavi adiacenti una volta definito il tipo di cavo e le sue dimensioni fra le varie possibilità

contenute in un database in cui vengono inoltre specificate le caratteristiche elettriche dei materiali. Vista la simmetria destra-sinistra della testa lato connessione è sufficiente definire solamente un quadrante della sezione retta.

Figura 4.5 Descrizione della cross section della bobina in ROXIE

Un analogo procedimento viene seguito per definire la posizione dei cavi lungo l'asse longitudinale della bobina. In questo caso vengono assegnati l'angolo di inclinazione β del primo conduttore di ogni blocco e due parametri lungo l'asse longitudinale Z: B_0 che rappresenta il valore del semiasse maggiore dell'ellisse e Z_0 che rappresenta la lunghezza della parte diritta. La somma di queste due variabili restituisce la lunghezza totale della testa per ogni cavo. Per completare la definizione della geometria va ancora inserito lo spessore dello spaziatore virtuale posto fra i vari avvolgimenti per compensare la forma trapezoidale dei cavi ed aggiustare il loro posizionamento. Giunti a questo punto ROXIE è in grado di tracciare l'andamento dei conduttori in modo tale che la superficie superiore e quella inferiore siano isoperimetriche e descrivano un'ellisse, come se poggiassero contro lo spaziatore. Restano solo da definire le correnti elettriche e la discretizzazione geometrica della sezione dei cavi che servirà per le analisi successive.

4.3.2 Output del programma

La creazione di questo modello semplificato costituisce solamente un primo passo verso la costruzione di un programma in grado di simulare il reale comportamento di un dipolo. A questo stadio dello sviluppo non è possibile ricavare informazioni sul campo magnetico poiché si trascurano completamente gli effetti di *cross-talk*, ossia si ignora l'influenza della presenza di due campi dipolari in un'unica struttura meccanica. Ciò risulta evidente dalla figura 4.8 ove il coefficiente di quadrupolo b_2, sensibile alle asimmetrie destra-sinistra, è costantemente nullo, cosa assolutamente impossibile se al fianco della bobina sotto analisi fosse presente un'altra bobina. Il modello può essere quindi utilizzato per verificare la correttezza dei dati in output come ad esempio quelli riguardanti la distribuzione di corrente (figura 4.6) o l'azione delle forze di Lorentz (figura 4.7).

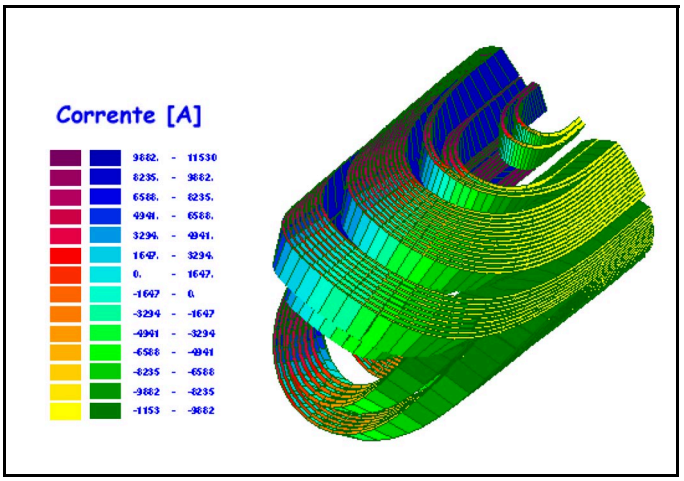


Figura 4.6 Distribuzione di corrente nei cavi superconduttori della testa

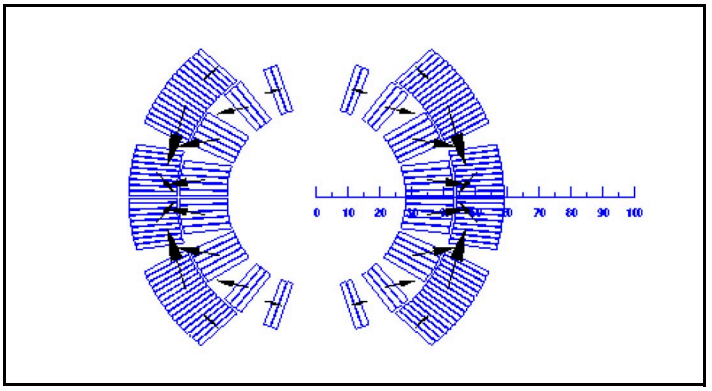


Figura 4.7 Forze di Lorentz agenti sulla bobina nella sezione retta

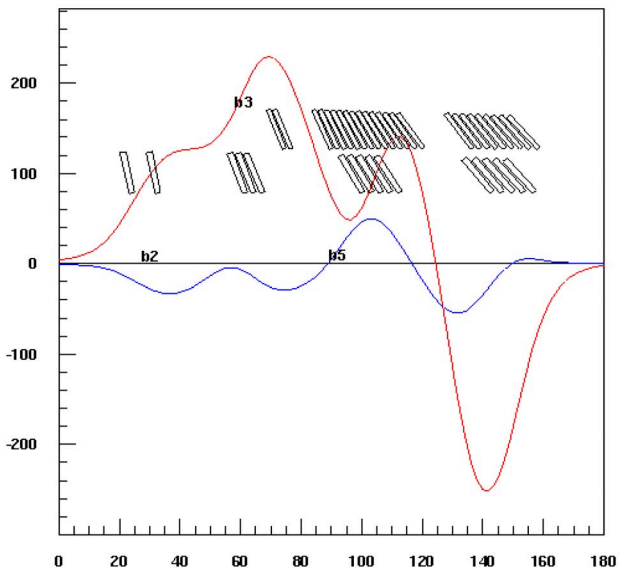


Figura 4.8 Multipoli nella zona delle teste in modello singola apertura

Capitolo 5

Modello elettromagnetico a doppia apertura

Lo scopo di questo capitolo è di illustrare le caratteristiche principali dei modelli tridimensionali sviluppati per lo studio del comportamento del campo elettromagnetico nelle estremità del dipolo principale di LHC. In particolare si vuole porre l'attenzione sulla qualità di campo, utilizzando i valori dei multipoli calcolati dal programma come chiave di verifica del modello confrontandoli con le misure effettuate sui magneti.

5.1 Modello doppia apertura lato non connessione . . . 60
5.1.1 Calcolo dei multipoli 61
5.1.2 Misura sperimentale dei multipoli 62
5.1.3 Analisi delle misure. 64
5.1.4 Elaborazione dell'output del modello 64
5.1.5 Confronto fra il modello e le misure 68
5.2 Modello doppia apertura lato connessione 70
5.2.1 Approssimazione del layer jump 70
5.2.2 Elaborazione dell'output del modello 72
5.2.3 Confronto fra il modello e le misure 75
5.3 Modello 3D del Layer Jump 77
5.3.1 Output del modello. 79
5.3.2 Confronto fra i modelli 82
5.4 Commenti al modello. 83

5.1 Modello doppia apertura lato non connessione

A causa della rilevanza degli effetti derivati dalla mutua influenza delle due aperture (cross talk) si deve quindi introdurre nel modello il secondo canale di fascio, al fine di ricreare le condizioni operazionali del magnete.

Questa modifica si traduce in ROXIE traslando l'origine degli assi dal centro dell'apertura ad un punto posto a 97 mm lungo il piano mediano, quindi creando per simmetria la seconda apertura. Si deve tuttavia tenere in conto che la corrente scorre nelle due aperture in verso opposto poiché il campo deve flettere particelle provenienti da direzioni opposte.

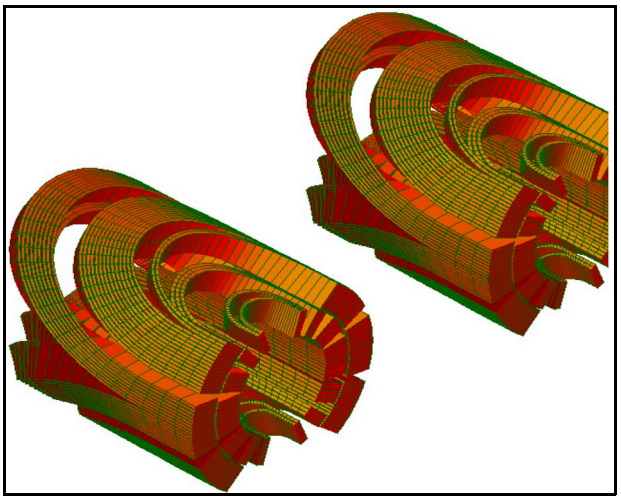


Figura 5.1 Modello 3D lato non connesioni sviluppato in ROXIE

Inoltre si introduce nel modello il ferro il cui scopo è quello di chiudere le linee di flusso del campo magnetico impedendo che si propaghino all'esterno della cold mass. Come già descritto in precedenza, nella zona delle teste il ferro è stato ridotto in quantità ed allontanato dalle bobine mediante l'inserimento di laminazioni non ferromagnetiche, *nested laminations*, al fine di ridurre il campo magnetico nelle aperture e limitare così il peso dei multipoli dovuti alle singolarità geometriche presenti in queste zone di estremità. Poiché il modello prende in considerazione solo quelle zone del magnete in cui siano presenti le nested laminations, è possibile considerare l'effetto della presenza del giogo rappresentandolo come un cilindro posto attorno ai due canali di flusso e avente un raggio interno di 236.5 mm, esattamente la stessa distanza che intercorre nel disegno fra il centro di simmetria della cold mass ed il giogo ferromagnetico lungo l'asse orizzontale.

5.1.1 Calcolo dei multipoli

Come già descritto nel capitolo 2, il campo magnetico può essere descritto mediante una serie complessa di potenze (equazione 2.2).

Lo studio dei vari multipoli assume un duplice significato: in primis si ha la necessità di ottenere la qualità di campo richiesta dalla fisica dell'accelaratore al fine di garantire il corretto funzionamento della macchina; in seconda battuta questa analisi fornisce una metodologia non distruttiva per verificare il corretto assemblaggio del magnete grazie ad alcune correlazioni empiriche.

Nel caso specifico del modello, il confronto fra i multipoli calcolati da ROXIE e quelli misurati sui prototipi e sui magneti della preserie rappresenta il test per la validazione del programma.

Poiché il confronto con i dati sperimentali non è immediato né di semplice lettura, si è proceduto innanzi tutto a operare delle comparazioni fra i valori dei coefficienti di multipolo calcolati nel centro dell'apertura ad una distanza di 300 mm dalle teste, con altri modelli bidimensionali utilizzati per la parte dritta, sviluppati anch'essi mediante il software ROXIE.

Si sono affrontati in particolare quattro casi al fine di verificare la sensibilità del modello alla presenza del ferro ed agli effetti di cross-talk fra le due aperture:

SEZIONE RETTA DEL DIPOLO

	MODELLO 2D				MODELLO 3D			
	giogo non ferromagnetico		giogo ferromagnetico (nasted lamination)		giogo non ferromagnetico		giogo ferromagnetico (nasted lamination)	
	1 apertura	2 aperture	1 apertura	2 aperture	1 apertura	2 aperture	1 apertura	2 aperture
b1	10000.00	10000.00	10000.00	10000.00	10000.09	10000.01	9999.88	9999.94
b2	0.00	-89.82	35.85	-40.25	0.00	-89.81	35.83	-40.39
b3	3.91	15.55	5.66	16.59	3.91	15.55	5.66	16.58
b4	0.00	-1.38	0.09	-1.24	0.00	-1.38	0.09	-1.24
b5	-1.01	-0.81	-0.95	-0.78	-1.01	-0.81	-0.96	-0.78
b6	0.00	-0.02	0.00	-0.02	0.00	-0.02	0.00	-0.02
b7	0.74	0.70	0.70	0.69	0.74	0.70	0.70	0.69
b8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
b9	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
b10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
b11	0.72	0.69	0.69	0.67	0.72	0.69	0.69	0.67
main field	6.90	7.27	7.26	7.45	6.90	7.27	7.26	7.45

Tabella 5.1 Confronto fra i multipoli calcolati nella sezione retta del dipolo mediante un modello 2D di semplice implementazione ed i valori calcolati mediante il modello 3D in esame

In Table 5.1 sono presentati i risultati ottenuti da prima alimentando una sola apertura, ossia ponendo uguale a zero la corrente in una delle due bobine, ed inseguito introducendo il ferro nel giogo grazie alle nested lamination di cui si é parlato a pag. 29.

L'effetto di cross-talk risulta evidente se si osserva la variazione del valore di b_2 e di b_3 nei casi senza il ferro ove la presenza di due bobine alimentate crea una asimmetria nelle linee di flusso di campo magnetico.

Al fine di ridurre questa distorsione del campo si è mantenuta la presenza del ferro anche nelle estremità del magnete, seppur allontanando le laminazioni mediante innesti non ferromagnetici per diminuire il campo nel centro delle aperture, come è possibile notare nell'ultima riga della tabella. La presenza dell'anello in ferro contribuisce a ridistribuire le linee di flusso e ad omogeneizzare il campo riducendo notevolmente le asimmetrie.

5.1.2 Misura sperimentale dei multipoli

Prima di affrontare il confronto fra i risultati del modello e quelli dei test è necessario illustrare le modalità con cui sono svolte le misure per poter comprendere come debbano essere elaborati gli output delle simulazioni.

Esistono due tipi di misure che si differenziano sostanzialmente per le condizioni in cui vengono effettuate e per il momento, all'interno del ciclo produttivo, in cui esse vengono realizzate.

5.1.2.1 Misure a caldo

Le *misure a caldo* vengono effettuate a temperatura ambiente e per questo motivo il dipolo non può essere alimentato con corrente nominale, poiché i superconduttori sono in fase resistiva, ma viene utilizzata una corrente di 20 A.

Inoltre in questa fase della produzione le bobine delle due aperture non sono ancora collegate fra loro per cui viene alimentata una sola bobina per volta.

Il principale vantaggio di questo tipo di misura risiede nel fatto che le bobine possano essere testate immediatamente dopo la fine del collaraggio, direttamente nel sito di produzione, senza dover attendere la fine dell'assemblaggio e la messa in temperatura della cold mass.

Questa caratteristica può diventare determinante in fase di produzione di serie poiché grazie a questo genere di analisi è possibile risalire ad eventuali difetti di bobinaggio sistematici e correggere le procedure di produzione in tempo reale evitando che l'errore si propaghi a numerosi magneti.

Essendo le condizioni al contorno del problema così distanti da quelle operative si evince subito come non sia possibile una lettura immediata dei dati misurati ma siano necessarie diverse elaborazioni. In particolare si devono utilizzare delle correlazioni empiriche che leghino i valori a caldo a quelli misurati a freddo.

Il sistema di misura è composto di due lance lunghe 16 m, una per ogni apertura, ciascuna composta da 20 moduli di 0.75 m. Il materiale di supporto prescelto è Al_2O_3 per la sua elevata rigidità e stabilità geometrica oltre al fatto che essendo un materiale ceramico non è ferromagnetico e non conduce l'elettricità ed è in grado di ruotare all'interno di un campo magnetico senza perturbarlo. Il mantice in titanio consente invece di seguire la curvatura del magnete (Figura 5.2).

Le due lance vengono inserite nei canali e vengono fatte ruotare da un sistema esterno chiamato TRU (Twin Rotating Unit) dotato di motore in grado di imprimere una velocità di rotazione di 1 Hz.

Le bobine di misura si vengono così a trovare all'interno di un campo magnetico le cui linee di campo si muovono, in un sistema solidale con la lancia, generando una corrente. Il segnale in Volt viene preamplificato ed analizzato da una batteria di 52 integratori digitali in grado di decomporre e decifrare il segnale.

Per rendere più accurate le misure, è pratica comune sopprimere il contributo dato dal campo dipolare al segnale della bobina di misura e ciò viene fatto analogicamente sottraendo i segnali prodotti dalla bobina centrale da quella tangenziale.

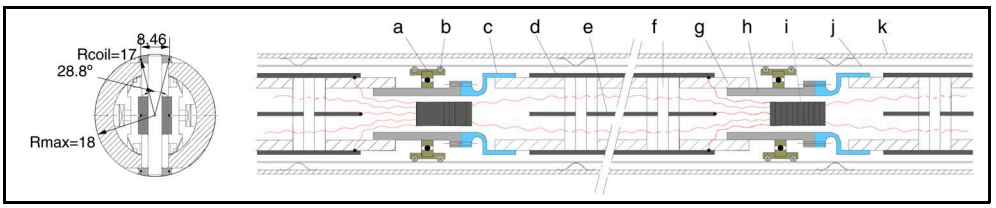


Figura 5.2 Sezione retta e longitudinale della bobina di misura: (a) carrello di sostegno della bobina, (b) ruote in berilio e rame, (c) mantice in Ti, (d) bobina tangenziale, (e) bobina centrale, dipolo di compensazione, (f) perno cilindrico, (g) supporto ceramico (Al2O3), (h) flangia in SiN, (i) cavo connettore, (j) anticriostato, (k) canale del fascio.

La sensibilità della bobina tangenziale per armoniche di ordine *n* dipende fortemente dall'angolo di apertura α della bobina di misura, in questo caso, essendo il raggio limitato a 17 mm dall'anticriostato, è stato scelto un angolo di apertura di 28.8°, corrispondente a sensibilità zero per armoniche di ordine 12. [30]

5.1.2.2 Misure a freddo

Le *misure a freddo*, come il nome può suggerire, vengono effettuate nelle stesse condizioni di temperatura e corrente elettrica nominali in cui dovrà operare il magnete. I dati ricavati sono di immediata lettura e permettono di verificare la qualità di campo in condizioni operative. Questo tipo di test viene realizzato sui magneti ultimati e posti nel criostato, richiede tempi abbastanza lunghi per portare in temperatura la cold mass.

In pratica il sistema di misura rispecchia quello utilizzato per le misure a freddo con la sola differenza che, nelle prove effettuate sui dipoli della preserie, la lancia è una sola ed è suddivisa in 13 moduli di 1.2 m ciascuno.

5.1.3 Analisi delle misure

Le misure di interesse per il confronto con il modello delle teste dei dipoli principali di LHC sono quelle ricavate dalle bobine di misura poste alle due estremità delle lance, poiché sono quelle che effettivamente rilevano i valori dei multipoli nelle zone terminali.

Per ogni singolo magnete si procede a riscalare il valore integrato dei coefficienti per normalizzare il coefficiente di dipolo b_1 al valore di 10000 in modo da garantire una chiave unica di lettura per tutte le misure, il che equivale a riscalare tutti i multipoli usando come campo magnetico di riferimento quello integrato sulla lunghezza della bobina di misura.

Una volta standardizzata la procedura di acquisizione si procederà ad inserire tutti i valori in un database, suddividendo i magneti a seconda del produttore. Si procederà quindi all'individuazione dei dati che deviano in maniera sensibile dalla media a causa di errori di misura o per effettivi difetti del magnete.

Si passa ora a confrontare i valori medi misurati, sui prototipi e sui magneti della preserie, con i coefficienti calcolati dal modello elettromagnetico. (Si veda Appendice A)

5.1.4 Elaborazione dell'output del modello

Per poter comparare i valori dei multipoli calcolati con quelli misurati è necessario porsi nelle medesime condizioni. In particolare è indispensabile riscalare gli output del modello in funzione della lunghezza delle bobine di misura e del campo di dipolo a cui sono riferiti.

Per fare ciò si suddivide la bobina in zone ove il campo magnetico sia costante o quanto meno monotono, quindi in ogni singola sezione si calcola il valore del campo di ordine *n*-esimo

$$B_{ni} = b_{ni} \cdot L_i \cdot B_i \tag{5.1}$$

dove n rappresenta l'ordine dell'armonica considerata, i la sezione ove si sta valutando il campo, L_i la lunghezza della sezione e B_i il valore del campo di dipolo locale.

Una volta sommati i contributi di tutte le sezioni bisogna procedere a riscalare i risultati. Il campo di ordine n va diviso per il valore del campo locale, ossia il campo mediato lungo la lunghezza della bobina di misura, moltiplicato per la lunghezza effettiva della bobina di misura che nel caso delle misure a caldo è di 750 mm mentre per quelle a freddo è di 1150 mm

$$b_n = \frac{B_n}{B_l \cdot L_c} \tag{5.2}$$

dove B_l rappresenta il campo dipolare locale mentre $L_c = \sum_i L_i$.

Nel caso delle misure a caldo le sezioni sono tre, la prima rappresenta la parte di bobina di misura rimasta all'esterno del magnete in cui il campo è nullo, la seconda la zona delle teste e la terza la parte dritta contigua alle teste ove sono presenti le *nested laminations*. Per le misure a freddo, poiché la bobina è più lunga, vi è una

quarta zona che è quella della parte dritta in cui sono presenti le laminazioni del giogo *full iron* e dove quindi il campo magnetico è maggiore (Figura 5.3).

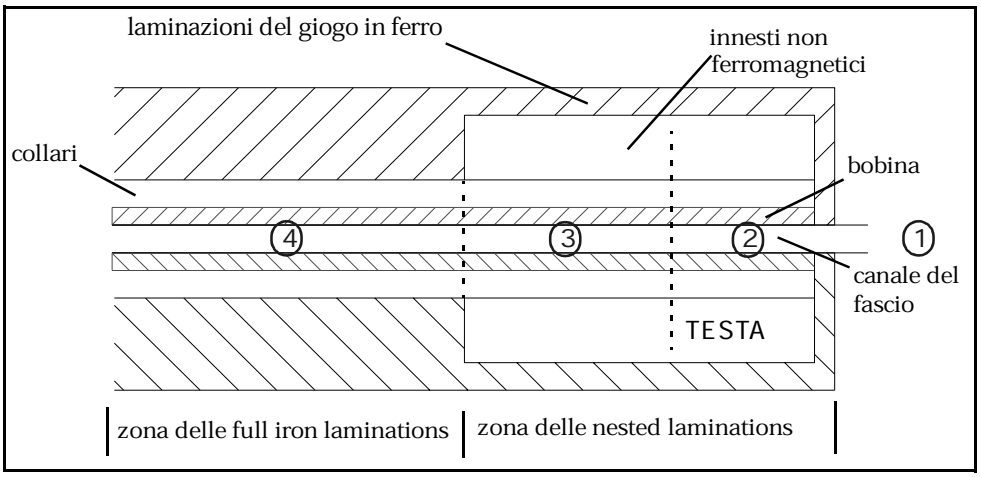


Figura 5.3 Visione schematica delle laminazioni del giogo del dipolo. In blu sono indicate le sezioni considerate nell'analisi dei risultati del modello.

I dati di output di ROXIE che vanno processati sono quelli ottenuti dal modello nel caso di una apertura alimentata, senza ferro, per il confronto con i test a caldo, e due aperture alimentate, con il ferro, per le misure a freddo (si veda tabella 5.2).

	LATO NON CONNESSIONE					
	BOBINA COLLARATA			COLD MASS ASSEMBLATA		
	1 apertura --- senza ferro			2 aperture --- con nested laminations		
	testa	nested	outside	testa	nested	full iron
b1	5738.72	10000.00	0.00	5818.54	9999.94	#
b2	0.00	0.00	0.00	22.20	40.39	3.00
b3	39.85	3.91	0.00	44.42	16.58	6.00
b4	0.00	0.00	0.00	0.68	1.24	#
b5	-8.63	-1.01	0.00	-8.08	-0.78	-0.60
b6	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	#
b7	-0.29	0.74	0.00	-0.28	0.69	#
b8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	#
b9	0.10	0.12	0.00	0.10	0.12	#
b10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	#
b11	0.19	0.72	0.00	0.18	0.67	#
main field	7.11	6.90	0.00	7.52	7.45	8.30

Tabella 5.2 Risultati delle simulazioni del modello 3D nelle varie zone componenti l'estremità del dipolo

poiché lo scopo di questa analisi è la verifica del modello, si è deciso di focalizzare l'attenzione solo sui coefficienti che si sono ritenuti più significativi a tal fine, b_2, b_3 e b_5.

Qui di seguito vengono presentati i risultati dell'elaborazione dei dati di output del modello al fine di renderli comparabili con i risultati dei test.

La prima colonna di dati delle tabelle 5.3, 5.4 e 5.5 contiene i valori dei multipoli così come sono stati calcolati dal modello nelle varie sezioni prese in considerazione.

Nella seconda colonna sono indicate le lunghezze di ciascuna zona, dato questo molto importante per il calcolo del campo locale medio e per pesare il contributo di ciascuna sezione sul valore finale del coefficiente.

Va notato che per stabilire con esattezza la lunghezza L_i di ogni singolo tratto è indispensabile conoscere con precisione la posizione della bobina di misura rispetto al magnete.

La terza colonna riporta il valore del campo magnetico principale, non sviluppato in serie, a cui vanno riferiti i multipoli di ciascuna sezione mentre nell'ultima colonna viene riportato il peso percentuale di ciascun contributo al valore del coefficiente di multipolo.

MISURE A CALDO --- LATO NON CONNESSIONE

	b2i	Li	Bi	%
testa	0.00	180.00	7.11	0.00
nested lamination	0.00	355.00	6.90	0.00
zona esterna	0.00	215.00	0.00	0.00
campo medio locale			4.97	[T]
lunghezza bobina			750.00	[mm]
multipolo a caldo		b2	0.00	unità

MISURE A FREDDO --- LATO NON CONNESSIONE

	b2i	Li	Bi	%
testa	22.20	180.00	7.52	21.02
nested lamination	40.25	355.00	7.45	74.45
full iron lamination	3.00	260.00	8.30	4.53
zona esterna	0.00	355.00	0.00	0.00
campo medio locale			5.35	[T]
lunghezza bobina			1150.00	[mm]
multipolo a freddo		b2	23.22	unità

Tabella 5.3 Elaborazione dei dati di output del modello per il coefficiente b_2

MISURE A CALDO --- LATO NON CONNESSIONE

	b3i	Li	Bi	%
testa	39.85	180.00	7.11	84.19
nested lamination	3.91	355.00	6.90	15.81
zona esterna	0.00	215.00	0.00	0.00
campo medio locale			4.97	[T]
lunghezza bobina			750.00	[mm]
multipolo a caldo		b3	16.24	unità

MISURE A FREDDO --- LATO NON CONNESSIONE

	b3i	Li	Bi	%
testa	44.42	180.00	7.52	51.41
nested lamination	16.59	355.00	7.45	37.52
full iron lamination	6.00	260.00	8.30	11.07
zona esterna	0.00	355.00	0.00	0.00
campo medio locale			5.35	[T]
lunghezza bobina			1150.00	[mm]
multipolo a freddo		b3	19.00	unità

Tabella 5.4 Elaborazione dei dati di output del modello per il coefficiente b_3

MISURE A CALDO --- LATO NON CONNESSIONE

	b5i	Li	Bi	%
testa	-8.63	180.00	7.11	81.70
nested lamination	-1.01	355.00	6.90	18.30
zona esterna	0.00	215.00	0.00	0.00
campo medio locale			4.97	[T]
lunghezza bobina			750.00	[mm]
multipolo a caldo		b5	-3.62	unità

MISURE A FREDDO --- LATO NON CONNESSIONE

	b5i	Li	Bi	%
testa	-8.08	180.00	7.52	76.51
nested lamination	-0.78	355.00	7.45	14.43
full iron lamination	-0.60	260.00	8.30	9.06
zona esterna	0.00	355.00	0.00	0.00
campo medio locale			5.35	[T]
lunghezza bobina			1150.00	[mm]
multipolo a freddo		b5	-2.32	unità

Tabella 5.5 Elaborazione dei dati di output del modello per il coefficiente b_5

5.1.5 Confronto fra il modello e le misure

Risulta ora possibile confrontare direttamente le previsioni del modello con i risultati delle misure.

In tabella 5.6 viene presentata la situazione concernente le misure a caldo.

Tabella 5.6 Confronto con misure a caldo su bobine collarate

LATO NON CONNESSIONE	**b2**	**b3**	**b5**
MODELLO	0.00	16.24	-3.62
MISURE	-0.40	-3.25	-3.10
2x σ	*[4.48]*	*[9.60]*	*[1.12]*

Nella prima riga è possibile leggere i valori calcolati mediante il modello 3D sviluppato in ROXIE mentre nella seconda i valori equivalenti risultanti dai test effettuati su varie bobine collarate. La terza riga riporta invece la deviazione standard, ossia una indicazione dell'incertezza delle misure. Per i test effettuati è stato indicato un intervallo di variazione di +/- 2σ.

Nel caso dei coefficienti b_2 e b_5 un buon accordo è stato raggiunto, i risultati dei calcoli rientrano ampiamente nella finestra di variazione dei valori misurati.

Il caso di b_3 presenta invece un netto disaccordo fra il modello e la realtà. Dai calcoli effettuati è risultato che il maggior contributo a b_3 proviene dalla zona della testa propriamente detta. In questa regione il coefficiente presenta un comportamento estremamente irregolare (si veda la linea rossa della figura 4.8) e, come sarà mostrato nel capitolo successivo, estremamente sensibile alla posizione dei cavi rispetto alla coordinata longitudinale z nella zona in cui questi vengono avvolti attorno agli spaziatori. Questa caratteristica rende estremamente arduo individuare un valore medio preciso di b_3, poiché risulta difficile prevedere l'effetto del bobinaggio e della polimerizzazione della bobina sulla posizione longitudinale degli avvolgimenti, da cui l'ampia forbice statistica di +/- 9.60 unità di sestupolo attorno ad un valore medio di -3.25 unità.

La tabella 5.7 riassume la situazione nel caso di misure a freddo sul magnete completamente assemblato ed in condizioni operative.

Tabella 5.7 Confronto con misure a freddo su cold mass assemblate

LATO NON CONNESSIONE	**b2**	**b3**	**b5**
MODELLO	23.22	19.00	-2.32
MODELLO saturazione	17.24	19.00	-2.32
MISURE A FREDDO	10.82	8.28	-1.52
2x σ	*[1.75]*	*[0.88]*	*[1.38]*

Si può notare come l'energizzazione di entrambe le bobine abbia provocato, come evidente effetto, il discostarsi di b_2 dal valore zero. Tuttavia il modello sovrastima gli effetti del cross-talk fra le due aperture poiché non tiene in conto correttamente della presenza del giogo ferromagnetico ed in particolare trascura il fenomeno della saturazione del ferro. Per questo motivo, nella seconda riga, i valori calcolati sono stati corretti tenendo in conto l'effetto della saturazione ed il valore di b_2 si è sensibilmente riavvicinato a quello reale. Gli altri coefficienti non sono influenzati da questa correzione.

Il coeffiente di sestupolo, b_3, risulta nuovamente in disaccordo con un gap di circa 10 unità di multipolo, una differenza comunque inferiore rispetto alle misure a caldo.

Il valore di b_5 non rientra completamente nella forbice di valori misurati ma vi si avvicina notevolmente discostandosi solamente di 0.06 unità.

5.2 Modello doppia apertura lato connessione

La creazione di un modello tridimensionale della testa della bobina dal lato connessione presenta maggiori difficoltà rispetto al lato non connessione a causa della geometria complicata degli avvolgimenti. In questa zona infatti gli ultimi cavi di ciascun blocco di conduttori si distaccano dagli altri andando a formare il blocco successivo. Sono inoltre presenti i cavi provenienti dall'esterno della cold mass che alimentano i poli delle due aperture. Inoltre va tenuto in conto il *layer jump*, il cavo collocato subito prima delle teste, che collega la bobina inferiore a quella superiore in ogni polo seguendo una forma ad "s". (Figura 5.4)

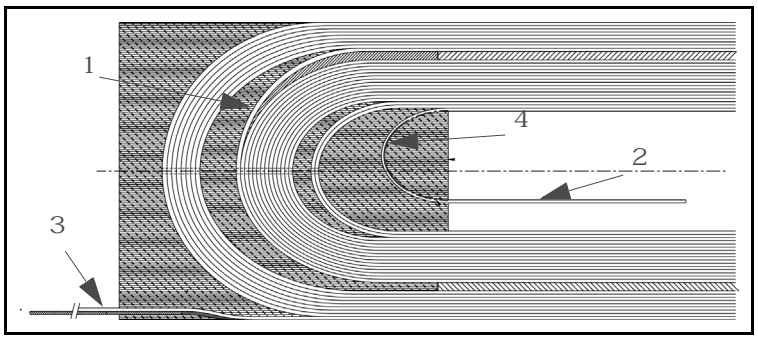


Figura 5.4 Veduta degli avvolgimenti dello strato esterno, lato connessione, con in evidenza i punti di che creano asimmetria nella geometria della testa: [1] cavo collegante due blocchi successivi di conduttori, [2] layer jump, cavo di collegamento fra i due strati della bobina, [3] cavo di alimentazione della bobina, [4] avvolgimento con centro di rotazione traslato rispetto all'asse di simmetria della testa.

Venendo a mancare una simmetria destra-sinistra nella sezione retta della testa, non è più possibile limitare la descrizione della geometria ad un solo quadrante che viene poi ripetuto ma va definita la bobina nel suo complesso.

Non è più sufficiente descrivere la posizione del primo conduttore per individuare la posizione di tutto il blocco poiché gli ultimi cavi seguono una curvatura differente che li porta a congiungersi con i blocchi successivi, va inoltre controllato che i suddetti cavi continuino a seguire superfici isoperimetriche come avviene nella realtà dove sono guidati dai chip di ULTEM™.

Un ulteriore problema è costituito dal fatto che l'avvolgimento più interno dello strato superiore ha un asse di simmetria traslato rispetto a quello generale per consentire al cavo di ritornare lungo la parte diritta in posizione più accentrata per poi proseguire nel layer jump.

5.2.1 Approssimazione del layer jump

La costruzione del layer jump costituisce l'ostacolo principale per la costruzione del modello poiché necessita una descrizione tridimensionale in una zona, la parte dritta, che fino ad ora è stata costruita semplicemente definendo la sezione trasversale in 2D.

Il software ROXIE prevede infatti che la testa venga definita partendo dalla sezione retta della parte dritta e dalla sezione longitudinale della testa.

Per ovviare a questo inconveniente si è pensato, in prima battuta, di schematizzare il layer jump come una serie di gradini. (Figura 5.5)

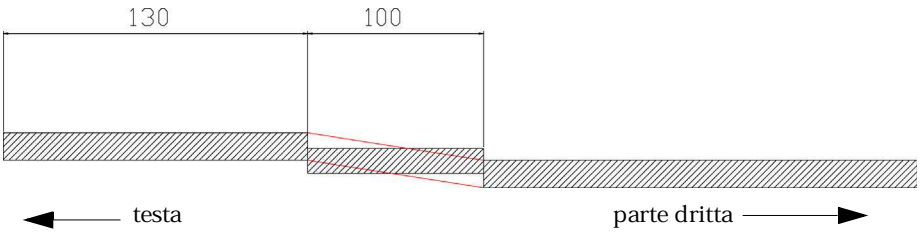


Figura 5.5 Schematizzazione del layer jump

Sono stati creati quattro differenti file:

- modello tridimensionale della testa analogo a quello realizzato per il lato non connessione ma contenente le particolarità descritte in precedenza e riassunte in figura 5.6;

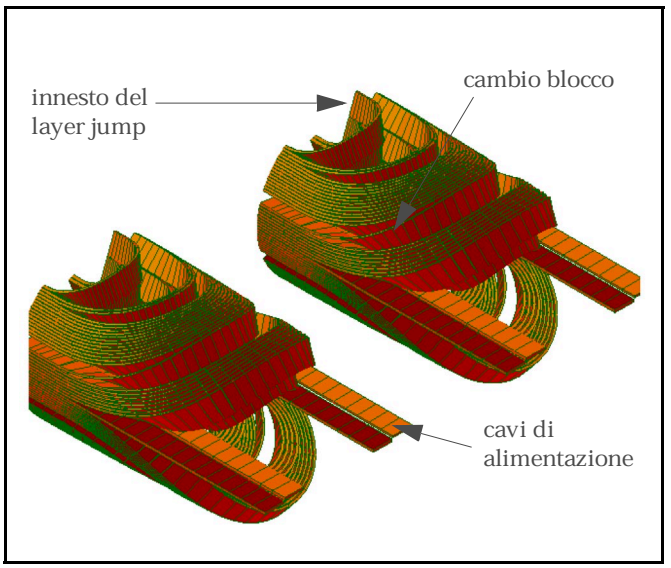


Figura 5.6 Modello 3D delle teste, lato connessione

- modello bidimensionale in cui viene descritta la parte dritta lunga circa 130 mm fra la testa e la zona in cui il cavo di layer jump cambia di strato. In questa zona il cavo che costituirà il layer jump e proseguirà nello strato interno viene saldato al conduttore più interno dello strato esterno (figura 5.7.b);
- modello bidimensionale in cui il cavo del layer jump viene rappresentato mediante un conduttore di lunghezza 100 mm posto ad un raggio, rispetto al centro dell'apertura, di 35.95 mm. Questa è la media fra il raggio interno dello strato interno e quello dello strato esterno che sono invece le quote di arrivo e partenza del cavo reale (figura 5.7.c);
- file bidimensionale descrivente la sezione retta della bobina nella sua parte centrale, la stessa che origina la testa dal lato non connessione.

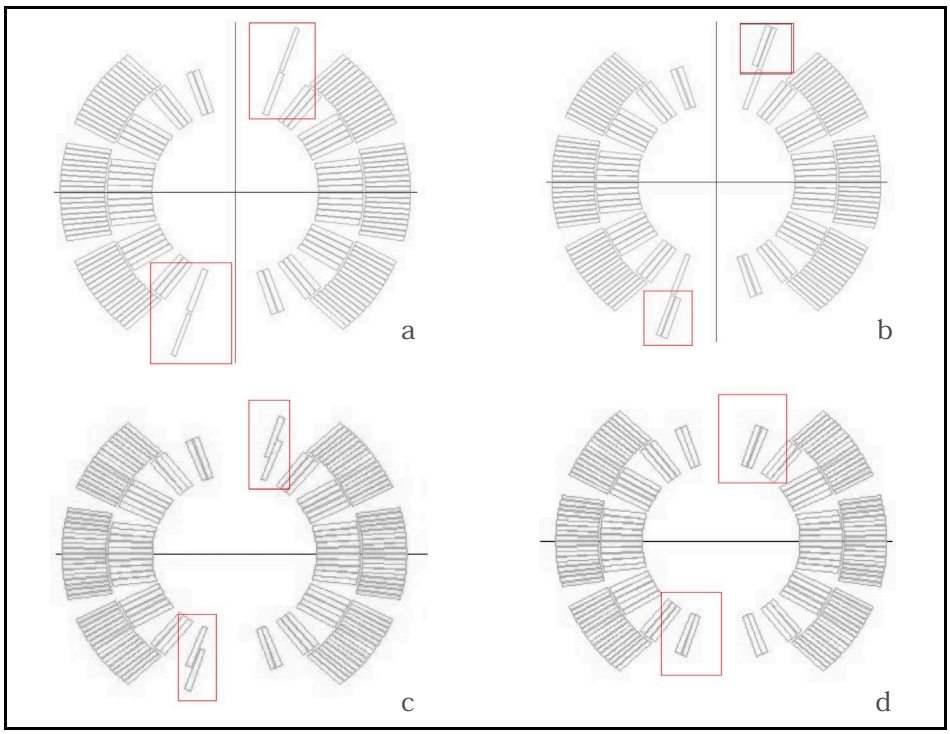


Figura 5.7 Sezioni rette delle bobine prese nelle quattro differenti zone in cui è stata divisa l'estremità della bobina dal lato connessione: [a] testa propriamente detta, notare la presenza, nel riquadro rosso, di un solo conduttore nello strato esterno poiché non compare ancora il cavo del layer jump; [b] regione in cui il cavo del layer jump viene saldato al conduttore più interno dello strato esterno; [c] layer jump schematizzato con un cavo posto ad una distanza di 35.95 mm dal centro dell'apertura: è la stessa sezione che si otterrebbe tagliando la bobina a metà della lunghezza della "s" del layer jump; [d] zona diritta successiva al layer jump che andrà poi a formare la testa del lato non connessione.

5.2.2 Elaborazione dell'output del modello

L'elaborazione degli output provenienti dai diversi file del modello segue esattamente la stessa procedura adottata per il lato non connessioni, variando solamente il numero di sezioni utilizzate.

I test a caldo sono effettuati con una lancia composta di 20 bobine di misura di 750 mm. Le bobine di testa, che misurano le estremità del dipolo, ricoprono una zona che parte dall'esterno del magnete, interessa la zona della testa propriamente detta, il layer jump e termina nella parte dritta ove sono ancora presenti le nested laminations.

Al fine di riprodurre le misure effettuate mediante il modello, si è quindi dovuto sommare il contributo di cinque differenti sezioni: la zona all'esterno del magnete, la testa della bobina, la parte dritta che precede il layer jump e che qui è stata ribattezzata *layer-jump 1*, la zona in cui è presente il cavo posto a metà fra i due strati di conduttori per simulare la presenza del layer jump indicata con *layer-jump2* ed infine la parte dritta della bobina in cui sono presenti le nested laminations (Figura 5.8).

Le misure a freddo, usufruendo di bobine di 1150mm, prendono in esame una zona più ampia della testa del dipolo arrivando ad interessare la zona del giogo con laminazioni completamente ferromagnetiche, richiedendo così l'inserimento di una sesta sezione, detta *full iron*, per poter comparare i calcoli con i valori misurati.

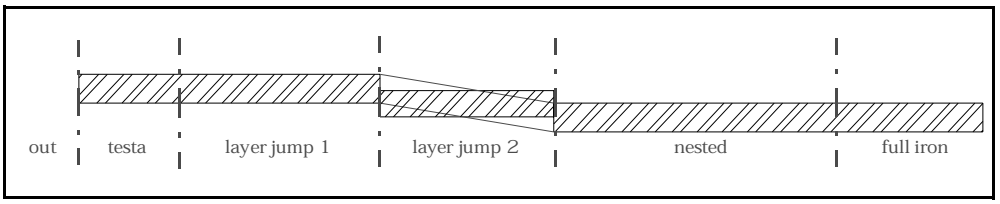


Figura 5.8 Sezioni della bobina che contribuiscono alla creazione del modello della testa del lato connessione

	LATO CONNESSIONE --- LAYER JUMP 2D									
	BOBINA COLLARATA					COLD MASS ASSEMBLATA				
	1 apertura --- senza ferro					2 aperture --- con nested laminations				
	testa	layer jump1	layer jump2	nested	outside	testa	layer jump1	layer jump2	nested	full iron
b1	5676.79	10000.00	10000.00	10000.00	0.00	5760.91	10000.00	10000.00	9999.94	#
b2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.57	40.30	40.29	40.39	3.00
b3	79.10	29.27	21.65	3.91	0.00	81.49	40.08	33.02	16.58	6.00
b4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.69	1.25	1.24	1.24	#
b5	-3.23	-10.85	-8.40	-1.01	0.00	-2.92	-9.89	-7.63	-0.78	-0.60
b6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	#
b7	1.59	3.85	3.41	0.74	0.00	1.53	3.57	3.16	0.69	#
b8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	#
b9	0.58	-0.02	0.02	0.12	0.00	0.54	-0.02	0.02	0.12	#
b10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	#
b11	0.31	0.70	0.70	0.72	0.00	0.30	0.65	0.65	0.67	#
main field	7.09	6.89	6.89	6.90	0.00	7.50	7.44	7.44	7.45	8.30
a1	-15.70	-53.31	-29.20	0.00	0.00	-15.68	-50.50	-27.68	0.00	0.00
a2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.35	0.61	0.34	0.00	0.00
a3	-6.11	23.17	16.39	0.00	0.00	-5.65	21.41	15.15	0.00	0.00
a4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a5	-0.40	-0.76	-0.57	0.00	0.00	-0.38	-0.71	-0.53	0.00	0.00
a6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a7	-0.51	-1.63	-1.35	0.00	0.00	-0.49	-1.50	-1.25	0.00	0.00
a8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a9	0.00	0.82	0.72	0.00	0.00	0.00	0.76	0.67	0.00	0.00
a10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a11	-0.07	-0.28	-0.26	0.00	0.00	-0.07	-0.26	-0.24	0.00	0.00

Tabella 5.8 Risultati delle simulazioni svolte nelle varie zone componenti l'estremità del dipolo

In tabella 5.8 sono riassunti tutti i valori dei coefficienti di multipolo calcolati con i diversi file utilizzati per descrivere la zona della testa della bobina dal lato connessione.

La principale differenza rispetto al lato non connessione risulta essere la presenza delle componenti oblique, a_n, dei multipoli generate dalla simmetria dispari che caratterizza ciascuna apertura a causa delle singolarità geometriche delle teste.

Si procede ora a sommare i contributi provenienti dalle varie zone, pesandoli sulla lunghezza di ogni sezione e riscalandoli al campo medio locale. (tabelle 5.9, 5.10e 5.11)

MISURE A CALDO --- LATO NON CONNESSIONE

	b2i	Li	Bi	%
testa	0.00	180.00	7.09	0.00
layer-jump 1	0.00	130.00	6.89	0.00
layer-jump 2	0.00	100.00	6.89	0.00
nested lamination	0.00	125.00	6.90	0.00
zona esterna	0.00	215.00	0.00	0.00
campo medio locale			4.96	[T]
lunghezza bobina			750.00	[mm]
multipolo a caldo		b2	0.00	unità

MISURE A FREDDO --- LATO NON CONNESSIONE

	b2i	Li	Bi	%
testa	22.57	180.00	7.50	20.80
layer-jump 1	40.30	130.00	7.44	26.61
layer-jump 2	40.29	100.00	7.44	20.46
nested lamination	40.25	125.00	7.45	25.59
full iron lamination	3.00	385.00	8.30	6.54
zona esterna	0.00	230.00	0	0.00
campo medio locale			6.25	[T]
lunghezza bobina			1150.00	[mm]
multipolo a freddo		b2	20.38	unità

Tabella 5.9 Elaborazione dei dati di output del modello per il coefficiente b_2

MISURE A CALDO --- LATO NON CONNESSIONE

	b3i	Li	Bi	%
testa	79.10	180.00	7.09	69.40
layer-jump 1	29.27	130.00	6.89	18.02
layer-jump 2	21.65	100.00	6.89	10.26
nested lamination	3.91	125.00	6.90	2.32
zona esterna	0.00	215.00	0.00	0.00
campo medio locale			4.96	[T]
lunghezza bobina			750.00	[mm]
multipolo a caldo		b3	39.06	unità

MISURE A FREDDO --- LATO NON CONNESSIONE

	b3i	Li	Bi	%
testa	81.49	180.00	7.50	20.80
layer-jump 1	40.08	130.00	7.44	26.61
layer-jump 2	33.02	100.00	7.44	20.46
nested lamination	16.59	125.00	7.45	25.59
full iron lamination	6.00	385.00	8.30	6.54
zona esterna	0.00	230.00	0	0.00
campo medio locale			6.25	[T]
lunghezza bobina			1150.00	[mm]
multipolo a freddo		b3	28.93	unità

Tabella 5.10 Elaborazione dei dati di output del modello per il coefficiente b_3

MISURE A CALDO --- LATO NON CONNESSIONE

	b5i	Li	Bi	%
testa	-3.23	180.00	7.09	20.09
layer-jump 1	-10.85	130.00	6.89	47.42
layer-jump 2	-8.40	100.00	6.89	28.24
nested lamination	-1.01	125.00	6.90	4.25
zona esterna	0.00	215.00	0.00	0.00
campo medio locale			4.96	[T]
lunghezza bobina			750.00	[mm]
multipolo a caldo		b5	-5.50	unità

MISURE A FREDDO --- LATO NON CONNESSIONE

	b5i	Li	Bi	%
testa	-2.92	180.00	7.50	20.80
layer-jump 1	-9.89	130.00	7.44	26.61
layer-jump 2	-7.63	100.00	7.44	20.46
nested lamination	-0.78	125.00	7.45	25.59
full iron lamination	-0.60	385.00	8.30	6.54
zona esterna	0.00	230.00	0.00	0.00
campo medio locale			6.25	[T]
lunghezza bobina			1150.00	[mm]
multipolo a freddo		b5	-3.04	unità

Tabella 5.11 Elaborazione dei dati di output del modello per il coefficiente b_5

5.2.3 Confronto fra il modello e le misure

La tabella 5.12 riassume il confronto fra i valori dei multipoli ottenuti mediante il modello nelle condizioni di una sola apertura alimentata elettricamente, senza la presenza del ferro, ed i coefficienti misurati nei test a caldo.

LATO CONNESSIONE	**b2**	**b3**	**b5**
MODELLO	0.00	39.06	-5.50
MISURE	1.50	33.54	-4.10
$2 \times \sigma$	*[6.07]*	*[14.71]*	*[3.94]*

Tabella 5.12 Confronto dei multipoli calcolati con quelli ricavati dalle misure a caldo su bobine collarate

Rispetto al caso precedente del lato non connessione l'accordo fra i valori è sicuramente maggiore, tutti e tre i coefficienti calcolati da ROXIE rientrano ampiamente all'interno della forchetta dettata dall'incertezza di misura di $+/- \sigma$ avvicinandosi inoltre al valore medio dell'intervallo.

Una possibile spiegazione a questo fenomeno potrebbe risiedere nel fatto che proprio il lato connessione costituisce il riferimento rispetto al quale vengono allineate le bobine e le altre componenti del magnete e non risente in questo modo di eventuali errori di posizionamento che dopo i quindici metri di lunghezza finiscono per manifestarsi, amplificati, dal lato non connessione.

Tuttavia risulta evidente dagli elevati valori della deviazione standard σ quanto sia complessa la geometria della bobina in questa zona del magnete e di difficile riproducibilità.

Entrando nel dettaglio dei singoli coefficienti, b_3 risulta il coefficiente che maggiormente varia il suo valore da un lato all'atro della bobina, passando dalle 16.24 unità calcolate per il lato non connessione alle 39.06 per il lato connessione. Le cause principali di questa differenza sono la presenza del layer jump che contribuisce per il 28.3% al valore complessivo del coefficiente e la differente distribuzione dei cavi lungo la sezione longitudinale della testa a cui va imputato il 69.4% del valore di b_3 (si veda la tabella 5.10).

Il b_5 rappresenta invece il coefficiente che percentualmente risulta più condizionato dalla presenza del layer jump che fornisce il 75.6% del valore complessivo nella zona della testa, il che spiega le due unità di decapolo in più, in valore assoluto, del lato connessioni (si veda la tabella 5.11).

In tabella 5.13 sono presentati i risultati delle misure a freddo ed i corrispettivi valori calcolati dal modello.

LATO CONNESSIONE	b2	b3	b5
MODELLO	20.38	28.93	-3.04
MODELLO saturazione	19.92	28.93	-3.04
MISURE A FREDDO	11.43	23.34	-1.84
2x σ	*[1.94]*	*[2.87]*	*[0.48]*

Tabella 5.13 Confronto dei multipoli calcolati con quelli ricavati dalle misure a freddo su cold mass assemblate

Come per i test a caldo anche in questo caso il valore di b_3 calcolato dal programma risulta maggiormente in accordo con le misure rispetto al lato non connessione, del resto questo coefficiente non è particolarmente influenzato dagli effetti di cross talk.

Per quel che riguarda b_2 non si è ancora riusciti a raggiungere un accordo con le misure ed anzi la differenza fra i valori è rimasta identica a quella riscontrata nel lato opposto.

5.3 Modello 3D del Layer Jump

Fino ad ora è stato possibile analizzare la testa del dipolo dal lato connessione solamente suddividendo la bobina in varie zone ed approssimando il layer jump mediante scalini.

In questa maniera ricostruire l'andamento delle varie armoniche che costituiscono il campo magnetico risulta laborioso e necessita tempi di calcolo maggiorati. In aggiunta va detto che il risultato rimane affetto da una sensibile imprecisione poiché ogni sezione non può tenere in conto degli effetti provocati dalla presenza di singolarità geometriche e magnetiche nelle zone limitrofe.

Il passo successivo nella creazione di un modello completo ed attendibile deve quindi prevedere la creazione di un programma unico in grado di rappresentare tridimensionalmente tutta l'estremità della bobina.

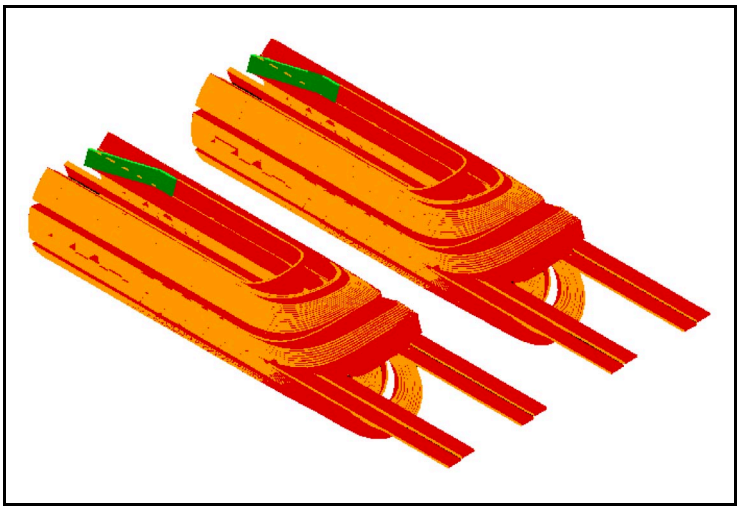


Figura 5.9 Modello 3D delle teste lato connessione (in verde il Layer Jump)

La realizzazione in ROXIE di questo progetto ha richiesto una stretta collaborazione con il gruppo di programmatori che si occupa dello sviluppo del software al fine di creare nuovi strumenti o adattare quelli già esistenti per rendere possibile la realizzazione del modello.

Per creare una struttura tridimensionale è necessario definire la posizione dei cavi lungo la coordinata longitudinale e la sezione retta della bobina nel punto in cui i cavi cominciano ad incurvarsi. Il problema principale è proprio il fatto che non si abbia una sezione retta costante ma vari a causa della presenza del cavo che collega i due strati di conduttori (si vedano le sezioni in figura 5.7).

La soluzione adottata prevede che si prenda la sezione retta che ha generato la testa della bobina nel modello semplificato e la si prolunghi all'indietro fino a coprire la lunghezza delle zone che prima venivano chiamate *layer jump 1* e *layer jump 2*. A questo punto si procede a modificare le dimensione del parametro Z_0 in modo da mantenere fissa la zona in cui i cavi si incurvano e la loro posizione sull'asse longitudinale.

Il secondo passo consiste nel traslare in avanti il conduttore interno dello strato esterno, quello a cui viene saldato il layer jump, in modo tale che abbia origine dove precedentemente cominciava la zona *layer jump 1*, compensando lo spostamento con una riduzione di Zo in modo da mantenere fissa la posizione della parte curva del cavo. In questa maniera si trascura il fatto che, in tutta la parte dritta precedente la testa, il cavo sia già saldato al layer jump ma si ipotizza che la giunzione sia puntiforme ed abbia luogo solamente nel punto di unione fra la zona *layer jump 1* e *layer jump 2*.

Per completare il modello è ora necessario definire il layer jump mediante la funzione *brick* che consente di definire la posizione di un cavo dando in input le coordinate dei quattro vertici che delimitano le varie sezioni rette del conduttore e congiungendo queste mediante dei segmenti retti. (Figura 5.10)

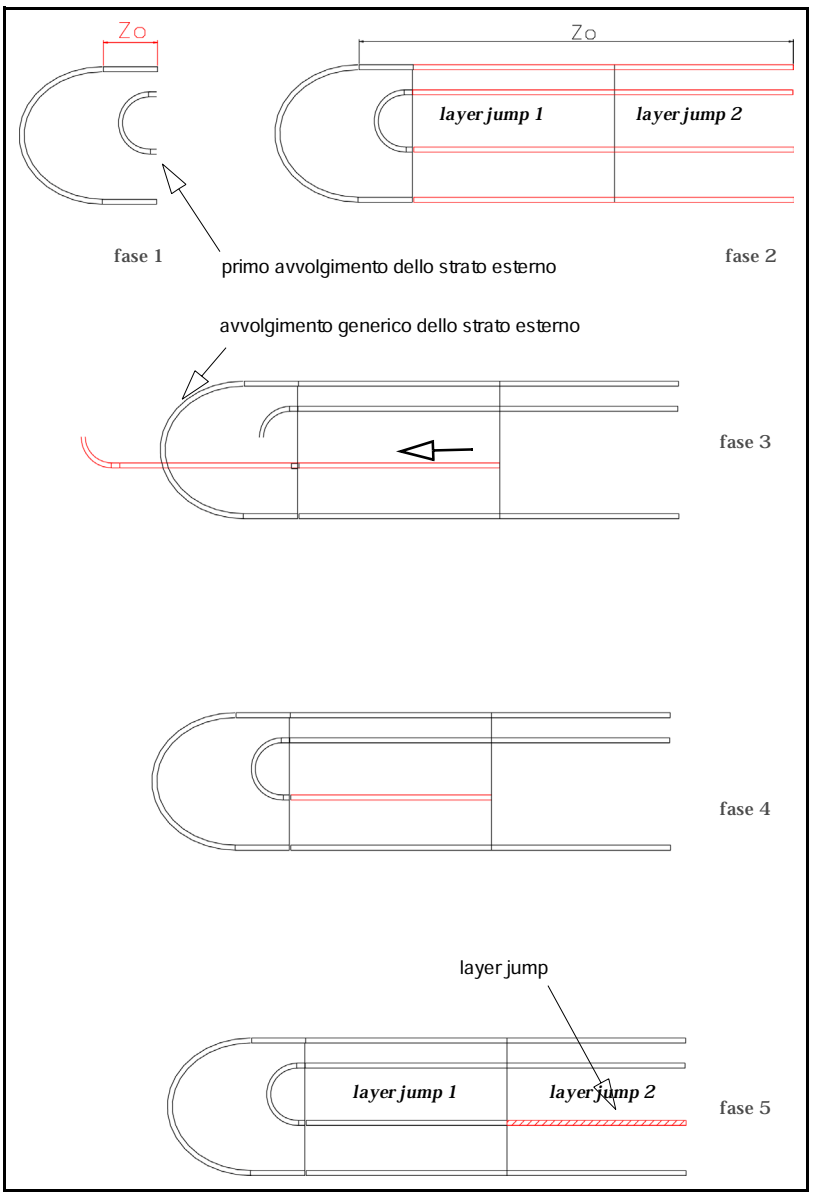


Figura 5.10 Testa della bobina lato connessione, strato esterno: descrizione delle fasi necessarie per la costruzione del modello tridimensionale del layer jump.

5.3.1 Output del modello

Una volta terminata la costruzione del modello si è passati al calcolo dei multipoli in tutta la zona presa in considerazione, ossia dall'inizio del layer jump nello strato inferiore fino alla testa.

In figura 5.10 viene presentato l'andamento dei coefficienti b_2, b_3 e b_5 in funzione della coordinata longitudinale z, nel caso di doppia apertura alimentata con presenza del giogo, grazie al quale è possibile individuare le dipendenze di ciascun multipolo dalla geometria dei conduttori.

Il coefficiente b_2 appare insensibile alla presenza dei due layer jump in ciascuna apertura poiché non modificano la simmetria destra-sinistra mentre si può notare come decresca in maniera quasi lineare nella zona della testa propriamente detta.

Risulta evidente la dipendenza di b_3 dal layer jump, in corrispondenza del trasferimento di strato da parte del cavo il coefficiente presenta una rampa passando da circa 15 unità a quasi 40 per poi attestarsi su questo valore fino all'inizio della testa. A questo punto l'andamento diventa irregolare poiché fortemente condizionato dalla posizione degli avvolgimenti ed in particolare dalla distanza che fra essi intercorre lungo l'asse della bobina e dalla posizione reciproca dei blocchi dei due strati sovrapposti. Si noti come il coefficiente non vada a zero alla fine della testa a causa della presenza dei cavi di alimentazione che proseguono dritti fuori dalla cold mass.

Il coefficiente b_5 ha un comportamento del tutto simile al b_3, semplicemente più attenuato.

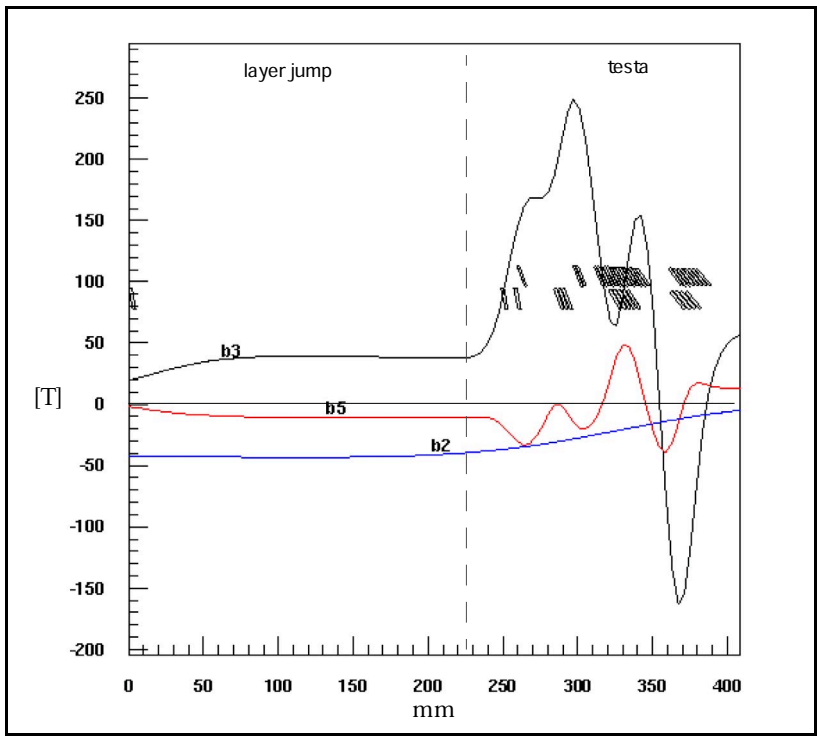


Figura 5.11 Andamento dei multipoli nella zona della testa lato connessione

In tabella 5.14 sono riassunti i valori di tutti i multipoli calcolati dal modello sia nel caso con singola apertura alimentata, sia in quello con doppia apertura con giogo.

	LATO CONNESSIONE --- LAYER JUMP 3D					
	BOBINA COLLARATA			COLD MASS ASSEMBLATA		
	1 apertura --- senza ferro			2 aperture --- con nested laminations		
	testa + layer jump	nested	outside	testa + layer jump	nested	full iron
b1	8171.11	10000.00	0.00	8137.89	9999.94	#
b2	0.05	0.00	0.00	33.85	40.39	3.00
b3	49.05	3.91	0.00	55.86	16.58	6.00
b4	0.00	0.00	0.00	0.99	1.24	#
b5	-7.32	-1.01	0.00	-6.69	-0.78	-0.60
b6	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	#
b7	2.34	0.74	0.00	2.18	0.69	#
b8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	#
b9	0.10	0.12	0.00	0.09	0.12	#
b10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	#
b11	0.51	0.72	0.00	0.47	0.67	#
main field	6.93	6.90	0.00	7.44	7.45	8.30
a1	-36.10	0.00	0.00	-33.30	0.00	0.00
a2	-0.22	0.00	0.00	-0.36	0.00	0.00
a3	6.59	0.00	0.00	6.13	0.00	0.00
a4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a5	-0.55	0.00	0.00	-0.51	0.00	0.00
a6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a7	-1.04	0.00	0.00	-0.97	0.00	0.00
a8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a9	0.44	0.00	0.00	0.41	0.00	0.00
a10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
a11	-0.17	0.00	0.00	-0.16	0.00	0.00

Tabella 5.14 Risultati delle simulazioni svolte con il modello tridimensionale del layer jump

Si procede ora a sommare e riscalare i contributi ai valori dei multipoli dovuti alle varie zone componenti le estremità della bobina.

MISURE A CALDO --- LATO CONNESSIONE

	b2i	Li	Bi	%
testa+layer jump	0.05	408.41	6.93	100.00
nested lamination	0.00	126.59	6.90	0.00
zona esterna	0.00	215.00	0.00	0.00
campo medio locale			4.94	[T]
lunghezza bobina			750.00	[mm]
multipolo a caldo		b2	0.04	unità

MISURE A FREDDO --- LATO NON CONNESSIONE

	b2i	Li	Bi	%
testa	33.85	408.41	7.44	68.21
nested lamination	40.66	126.59	7.45	25.43
full iron lamination	3.00	385.00	8.30	6.36
zona esterna	0.00	230.00	0.00	0.00
campo medio locale			6.24	[T]
lunghezza bobina			1150.00	[mm]
multipolo a freddo		b2	21.01	unità

Tabella 5.15 Elaborazione dei dati di output del modello per il coefficiente b_2

MISURE A CALDO --- LATO CONNESSIONE

	b3i	Li	Bi	%
testa+layer jump	49.05	408.41	6.93	97.60
nested lamination	3.91	126.59	6.90	2.40
zona esterna	0.00	215.00	0.00	0.00
campo medio locale			4.94	[T]
lunghezza bobina			750.00	[mm]
multipolo a caldo		b3	38.40	unità

MISURE A FREDDO --- LATO NON CONNESSIONE

	b3i	Li	Bi	%
testa	55.86	408.41	7.44	82.97
nested lamination	16.60	126.59	7.45	7.65
full iron lamination	6.00	385.00	8.30	9.37
zona esterna	0.00	230.00	0.00	0.00
campo medio locale			6.24	[T]
lunghezza bobina			1150.00	[mm]
multipolo a freddo		b3	28.50	unità

Tabella 5.16 Elaborazione dei dati di output del modello per il coefficiente b_3

MISURE A CALDO --- LATO CONNESSIONE

	b5i	Li	Bi	%
testa+layer jump	-7.32	408.41	6.93	95.92
nested lamination	-1.01	126.59	6.90	4.08
zona esterna	0.00	215.00	0.00	0.00
campo medio locale			4.94	[T]
lunghezza bobina			750.00	[mm]
multipolo a caldo		b5	-5.83	unità

MISURE A FREDDO --- LATO NON CONNESSIONE

	b5i	Li	Bi	%
testa	-6.69	408.41	7.44	88.35
nested lamination	-0.81	126.59	7.45	3.32
full iron lamination	-0.60	385.00	8.30	8.33
zona esterna	0.00	230.00	0.00	0.00
campo medio locale			6.24	[T]
lunghezza bobina			1150.00	[mm]
multipolo a freddo		b5	-3.21	unità

Tabella 5.17 Elaborazione dei dati di output del modello per il coefficiente b_5.

5.3.2 Confronto fra i modelli

A causa del lungo periodo di gestazione del modello tridimensionale, la maggior parte delle simulazioni sulle teste lato connessione sono state svolte mediante il modello approssimato descritto nel paragrafo 5.2.1.

L'esigenza di accelerare ed ottimizzare i calcoli elettromagnetici ha fatto sì che il modello venisse comunque sviluppato anche per poter validare le ipotesi semplificative adottate in precedenza quale la scomposizione del layer jump in scalini.

Nelle tabelle 5.18 e 5.19 sono presentati i valori dei multipoli elaborati attraverso i due differenti modelli ed i coefficienti misurati nei test sui dipoli principali di LHC.

Tabella 5.18 Confronto fra i modelli, singola apertura senza ferro, e misure a caldo

	b2	**b3**	**b5**
Modello approssimato	0.00	39.06	-5.50
Modello 3D	0.04	38.04	-5.83
Misure a caldo	-0.36	33.70	-4.07

Tabella 5.19 Confronto fra i modelli, doppia apertura con ferro, e le misure a freddo

	b2	**b3**	**b5**
Modello approssimato	20.38	28.93	-3.04
MODELLO con saturazione ferro	*15.18*	*28.93*	*-3.04*
Modello 3D	21.01	28.50	-3.21
MODELLO con saturazione ferro	*15.18*	*28.50*	*-3.21*
Misure a freddo	11.43	23.34	-2.42

Come era auspicabile, il modello tridimensionale completo ha di fatto confermato la bontà delle semplificazioni adottate in precedenza, restituendo dei valori prossimi a quelli ricavati dal modello approssimato.

5.4 Commenti al modello

Analizzando i risultati ottenuti dalle simulazioni e confrontandoli con le misure effettuate sui magneti è emerso un discreto accordo di base fra i valori dei multipoli. Tale concordanza risulta maggiormente evidente per il lato connessione ove quasi tutti i coefficienti calcolati rientrano nelle finestre di incertezza delle misure.

Il b_3 rappresenta il multipolo più problematico specialmente nel lato connessione ove, a fronte di un valore misurato a freddo di 8.28 unità, sono state calcolate 19 unità di multipolo. L'origine di questo disaccordo può essere rintracciata in fenomeni non schematizzati all'interno del modello.

Va sottolineato invece come il modello riesca a seguire la tendenza dei valori passando da condizioni a caldo a quelle a freddo, dimostrando in questa maniera la correttezza delle ipotesi adottate per schematizzare la presenza del ferro e degli effetti di cross talk.

In generale va detto che il modello deve essere migliorato per permettere una maggior aderenza alla realtà, tuttavia, allo stato di sviluppo attuale, risulta adatto allo svolgimento di calcoli di sensibilità in cui le perturbazioni si aggirino nell'intorno dei valori nominali dei parametri presi in considerazione.

Capitolo 6

Analisi di sensibilità

Il modello 3D della zona delle teste è essenziale al fine di investigare e comprendere al meglio le peculiarità di questa regione del magnete. La prima analisi che si vuole effettuare è rivolta ad identificare quali siano i blocchi più critici al fine del massimo campo raggiungibile dal magnete. In seguito si applicherà lo stesso approccio al fine di valutare la stabilità della qualità di campo. Da questo studio si vogliono arrivare a stilare due matrici di sensibilità utili sia al fine di agevolare eventuali prossimi interventi, sia per un'analisi a posteriori nella prospettiva di un controllo di qualità.

6.1 Scopo dell'analisi di sensibilità 86
6.2 Peak Field 89
6.2.1 Analisi del peak field in ROXIE 89
6.2.2 Variazione di Beta 91
6.2.3 Variazione di Z0 99
6.2.4 Variazione della forma degli avvolgimenti 104
6.2.5 Osservazioni 109
6.3 Qualità di campo 110
6.3.1 Analisi della qualità di campo lato non connessione 110
6.3.2 Variazione di Beta 111
6.3.3 Variazione di Z0 114
6.3.4 Variazione della forma degli avvolgimenti 118
6.3.5 Analisi della qualità di campo lato connessione . . 121
6.3.6 Variazione di Beta 122
6.3.7 Variazione di Z0 123
6.3.8 Variazione della forma degli avvolgimenti 126
6.3.9 Osservazioni 127

6.1 Scopo dell'analisi di sensibilità

La produzione in serie dei dipoli principali richiede un controllo on line della qualità dei magneti assemblati. Il CERN è interessato non solo al fatto che i parametri rientrino nei limiti di accettabilità imposti dal progetto ma anche a vuole verificare l'insorgere di derive nel valore medio di variabili fisiche critiche quali la qualità di campo. Proprio in riferimento a questo punto potrebbe insorgere, durante la produzione, la necessità di intervenire sulla geometria della parte dritta o delle teste della bobina. Tale processo di feed-back ha però un suo tempo di ritardo che è necessario ridurre al minimo.

Si supponga che un certo numero di bobine collarate siano soggette a misure a caldo del campo magnetico: se da un numero significativo di magneti dovesse emergere la presenza di valori dei multipoli non compresi nelle finestre di accettabilità previste dal progetto, nascererebbe la necessità di variare le caratteristiche della bobina. Questo cambiamento si ripercuoterebbe quindi sulle ditte incaricate dell'assemblaggio della cold mass che si vedrebbero costretta a modificare il ciclo di produzione.

Se si prende in particolare il caso degli spaziatori presenti nelle teste della bobina e si cerca di stimare il tempo necessario per definire una nuova geometria ed essere in grado di fornire i componenti modificati alle ditte, emerge quanto ciò possa incidere negativamente sul tempo di reazione.

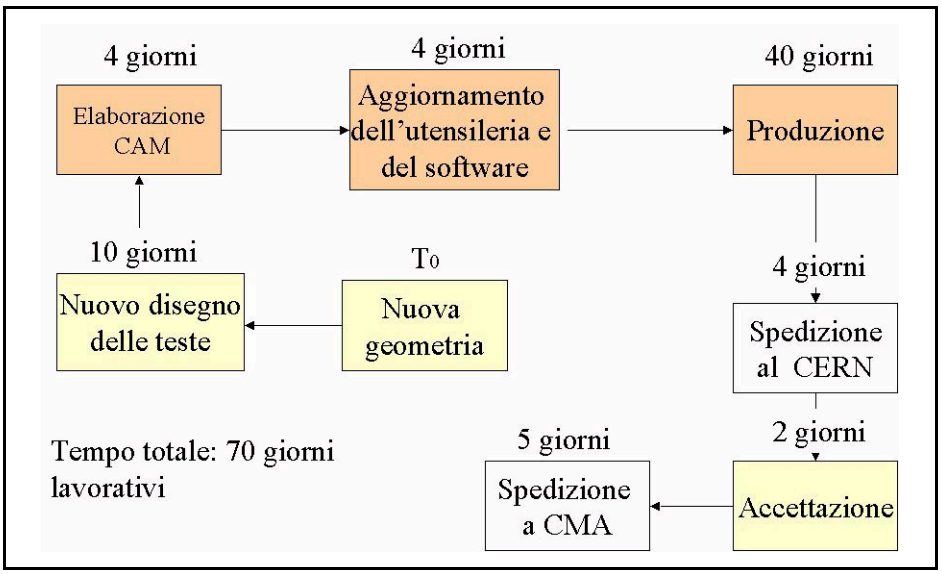


Figura 6.1 Stima dei tempi necessari per un cambio della geometria degli spaziatori delle teste delle bobine durante la produzione di serie dei dipoli principali.

In figura 6.1 viene presentato il ciclo delle operazioni necessarie per apportare una modifica alla geometria degli spaziatori delle teste delle bobine con una stima dei tempi necessari.

I soggetti coinvolti nel processo sono tre, il CERN, per quel che riguarda la progettazione dei pezzi, la definizione del layout delle teste delle bobine e l'accettazione del prodotto lavorato nella fase di prototipaggio (caselle in giallo),

il produttore degli spaziatori (caselle in ocra) e la ditta che si occupa dell'assemblaggio della cold mass (CMA).

Il tempo stimato per la messa in produzione di magneti con una configurazione modificata, in caso di interventi importanti, è di 70 giorni lavorativi di cui 10 necessari per la definizione del nuovo layout, 8 per l'elaborazione CAM della geometria e l'aggiornamento del software delle macchine a controllo numerico che svolgono la lavorazione dei pezzi, 40 per la produzione dei primi 20 set di spaziatori che equivalgono al quantitativo necessario per la realizzazione di 5 magneti, 2 giorni per l'accettazione dei pezzi e 9 giorni complessivi per le varie spedizioni.

Durante questo periodo di tempo la produzione dei magneti nelle CMA procede seguendo la vecchia configurazione.

Studi svolti sulla dinamica di funzionamento di LHC hanno consentito di stimare il numero di dipoli affetti da un determinato problema che possono essere ugualmente inseriti all'interno dell'anello senza che questi compromettano il funzionamento della macchina. Risulta quindi necessario intervenire sulla produzione in modo tale da evitare che vengano assemblati, durante la fase di correzione del progetto, un numero di magneti non modificati superiore a quello massimo tollerabile.

Se ora si va a stimare la quantità di magneti prodotti durante i 70 giorni ci si trova di fronte a differenti scenari che dipendono dal momento in cui la modifica viene introdotta nel ciclo produttivo. Nel peggiore dei casi, supponendo che la produzione di serie sia avviata e che le CMA siano riuscite ad ottimizzare tutti i tempi di lavorazione, il rateo di magneti prodotti dovrebbe ammontare ad un magnete per giorno. Vanno inoltre tenute in considerazione le scorte di bobine ancora da collarare di cui ogni CMA dispone.

In figura 6.2 vengono illustrati differenti scenari a seconda che ci si trovi ad inizio produzione, quando la tempistica non è ancora ottimizzata e si necessitano 10 giorni per l'assemblaggio di un singolo dipolo (scenario 5), oppure in pieno ciclo produttivo quando si dovrebbe raggiungere un rateo di un magnete al giorno.

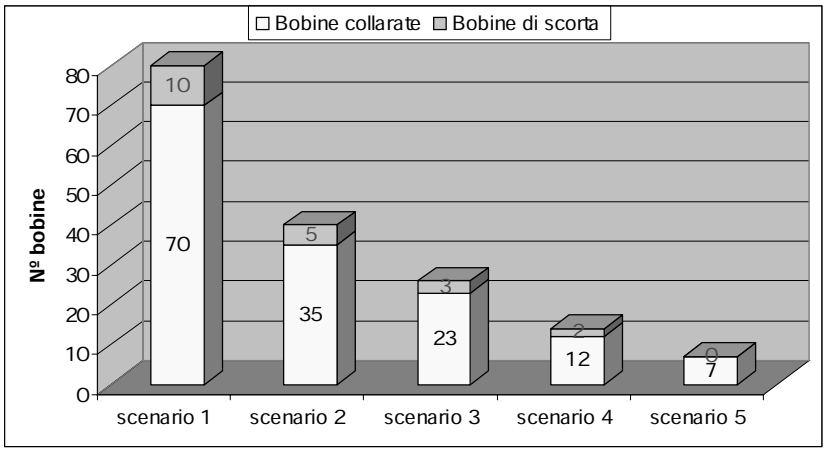


Figura 6.2 Ammontare delle bobine prodotte da ciascuna CMA durante il periodo necessario per la revisione della geometria degli spaziatori a seconda del rateo di produzione raggiunto al momento della modifica.

L'unica maniera per ridurre i costi supplementari, dovuti alla produzione di bobine aventi una configurazione geometrica non aggiornata, è di ridurre i tempi necessari affinché il cambio di layout sia operativo.

Si può quindi notare come la riduzione dei tempi di disegno, dell'ordine del 50%, possa permettere un accorciamento della procedura di circa 5 giorni lavorativi. In particolare l'esistenza di una mappa di sensibilità può consentire di indirizzare l'ottimizzazione, riducendone i tempi e verificandone il risultato tramite software adeguati come ROXIE.

6.2 Peak Field

Con il termine *peak field* si suole indicare il campo magnetico massimo presente all'interno dei cavi superconduttori durante il funzionamento del magnete.

Più il campo massimo è prossimo al campo critico B_c, più è ridotto il margine di sicurezza rispetto alla transizione allo stato resistivo detta quench. Per tale ragione è importante considerare e monitorare tale parametro durante il disegno delle teste.

La presenza di picchi di campo magnetico è fortemente influenzata dalla posizione dei conduttori nella bobina, in particolare nella zona delle teste ove i cavi, avvolti attorno agli spaziatori, dove potrebbero ridurre leggermente la propria sezione retta aumentantando in tal modo la densità di corrente e di conseguenza diminuendo B_c.

Nei primi test effettuati al CERN sui prototipi dei dipoli principali di LHC, è emerso che la quasi totalità dei quench ha avuto luogo nelle estremità della bobina ed in particolare, in quasi ogni magnete, i primi si sono sempre verificati dal lato non connessione, strato esterno.

Il perché questi fenomeni si siano verificati in maggioranza nel lato non connessione non è ancora del tutto chiaro da un punto di vista teorico, per questo motivo si è deciso di effettuare una approfondita analisi di sensibilità dei cavi appartenenti a questa zona per cercare di intuire le possibili cause dei picchi di campo o perlomeno cercare di ottenere un margine di sicurezza sufficiente a garantire il corretto funzionamento del magnete.

6.2.1 Analisi del peak field in ROXIE

La prima operazione da farsi sul file di input di ROXIE riguarda l'identificazione dei blocchi di conduttori da analizzare.

Per poter avere dei dati riguardanti il campo magnetico in un singolo cavo è necessario che questo sia definito in maniera indipendente altrimenti il dato in uscita riguarderebbe il valore del campo massimo in tutto il blocco e potrebbe non essere situato nel conduttore in esame.

Dai test effettuati sui primi dipoli giunti al CERN è emerso che i quench hanno avuto luogo nei primi avvolgimenti, quelli più interni. Si è proceduto quindi allo studio del del campo di picco presente in questi cavi.

Come è possibile vedere in figura 6.3, i blocchi più esterni di ogni strato non sono stati suddivisi in maniera dettagliata poiché non costituiscono l'oggetto della ricerca. Nello strato superiore, quello più critico prima dell'inserimento dello spaziatore a mezzaluna che divide i primi due avvolgimenti dal terzo (si veda figura 6.3), sono stati identificati i cavi 4 e 5, che costituiscono il primo blocco, ed il cavo 3, il primo conduttore del secondo blocco.

Seguendo la stessa logica, nello strato inferiore sono stati individuati il cavo 10 ed il cavo 11, che già normalmente costituiscono un blocco a parte, ed il cavo 9 che costituisce il primo avvolgimento di un blocco di tre cavi.

Su questi sei cavi verra focalizzata l'analisi di sensibilità grazie alla quale individuare le dipendenze del campo di picco dalla posizione dei conduttori.

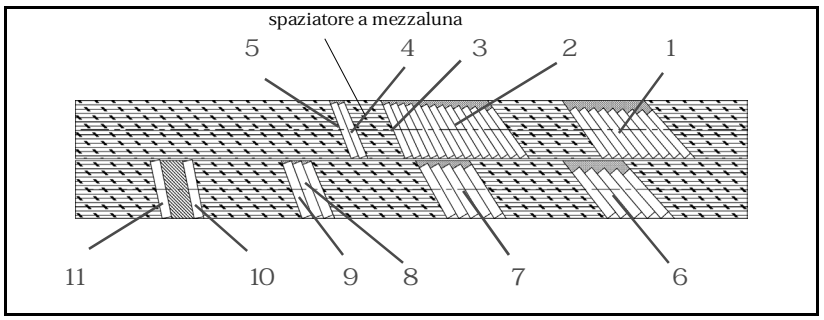


Figura 6.3 Numerazione dei blocchi utilizzata nel file di input di Roxie, lato non connessione.

Ogni variazione effettuata mediante il programma ha come fine quello di simulare un cambiamento nella geometria dello spaziatore che dona la forma e la posizione al blocco di conduttori adiacente.

Si è deciso di mantenere invariato lo schema attuale della distribuzione dei conduttori nelle teste per facilitare l'implementazione industriale di possibili risultati.

Rimangono ora da definire i parametri che verranno via via variati al fine di modificare la geometria delle teste. Essi riguardano in particolare il posizionamento dei cavi lungo l'asse longitudinale z che determina la geometria della parte tridimensionale del modello.

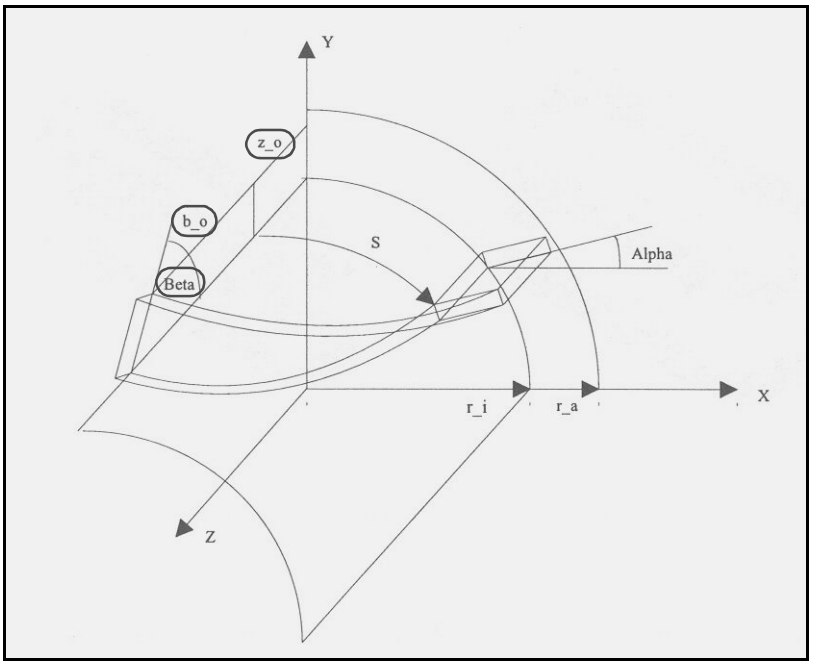


Figura 6.4 Parametri geometrici che definiscono la posizione longitudinale dei cavi nelle teste.

La prima variabile presa in considerazione è Beta, l'angolo di inclinazione del primo cavo di ogni blocco e conseguentemente l'angolo di inclinazione della superficie dello spaziatore su cui poggia.

Gli altri parametri in gioco sono B_0 e Z_0. Il primo rappresenta la lunghezza del semiasse maggiore dell'ellisse che descrive la superficie superiore dello spaziatore mentre il secondo riporta la lunghezza della parte dritta che precede la curvatura del cavo.

6.2.2 Variazione di Beta

La variazione dell'angolo di inclinazione dei cavi ha come effetto immediato il cambiamento della forma dello spaziatore poiché la superficie ellittica superiore e quella inferiore sono vincolate ad essere isoperimetriche. Tale vincolo è imposto al fine di ottenere superfici che comportino la minima deformazione del cavo e che permettano inoltre una facile lavorazione durante la produzione.

Agendo di volta in volta sul parametro Beta di ogni singolo blocco di cavi si vuole analizzare l'effetto che questa modifica apporta al campo magnetico presente nei conduttori.

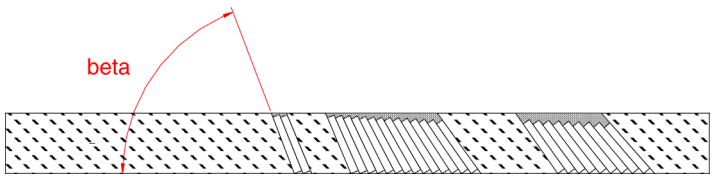


Figura 6.5 Parametro beta, angolo di inclinazione dei cavi lungo l'asse z

Nel caso dello strato esterno si è proceduto variando i blocchi 4 e 5 nello stesso istante poiché nella realtà essi costituiscono un unico gruppo di conduttori ed una loro trattazione separata all'interno del modello avrebbe provocato situazioni, quali la creazione di un interstizio o la compenetrazione dei cavi, fisicamente non accettabili.

L'angolo Beta dei conduttori 4 e 5 è stato variato per intervalli discretti di ± 2° fino ad un massimo di ± 8° rispetto alla posizione nominale e l'effetto prodotto è stato analizzato nei blocchi 4 e 5 medesimi e nel blocco 3 ad essi adiacente.

L'elaborazione dell'output è stata realizzata mediante un programma appositamente sviluppato in ambiente MATLAB® grazie al quale è stato possibile automatizzare e di conseguenza accelerare l'analisi dei dati e la realizzazione dei grafici.

In figura 6.6 è possibile osservare la posizione del campo magnetico massimo e del minimo all'interno del conduttore 5. Come è possibile constatare il peak field tende a seguire la forma della superficie inferiore del cavo, cioé quella più vicina al canale di flusso ed alla bobina sottostante.

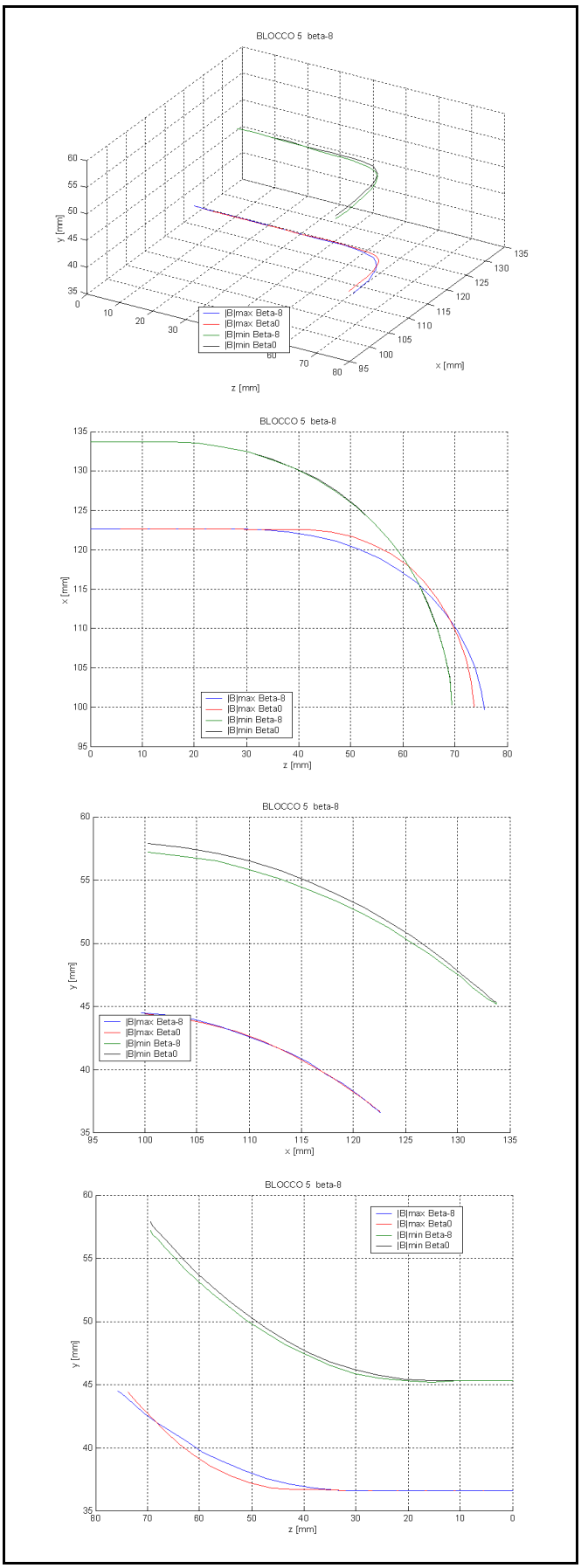


Figura 6.6 Posizione del campo massimo e minimo all'interno del conduttore 5 nel caso di geometria nominale e nel caso di Beta diminuito di 8º.

Per ogni singolo blocco di cavi preso in considerazione, viene analizzato l'andamento del peak field lungo la coordinata longitudinale z (si veda figura 4.3) in funzione della variazione di angolo di Beta al fine di individuare l'intervallo di valori entro cui il campo varia linearmente col parametro.

In figura 6.7 è riportato il caso del blocco 4, uno dei due interessati direttamente dalla variazione dell'angolo di inclinazione. Nella prima parte della testa, quella che comprende la parte dritta e la prima parte dell'ellisse, non é evidenziabile una particolare influenza del parametro sul campo come invece appare nella seconda metà. Qui si può riscontrare come a fronte di un aumento di Beta, ossia con il cavo in posizione tendente ad approssimarsi alla verticale, si osservi un aumento lineare del campo per valori dell'angolo variabili fra -8° e +6° rispetto alla posizione nominale. Se si oltrepassa questo limite superiore, viene meno la linearità e compaiono delle variazioni più importanti nell'andamento di |B|, come quello indicato nel grafico.

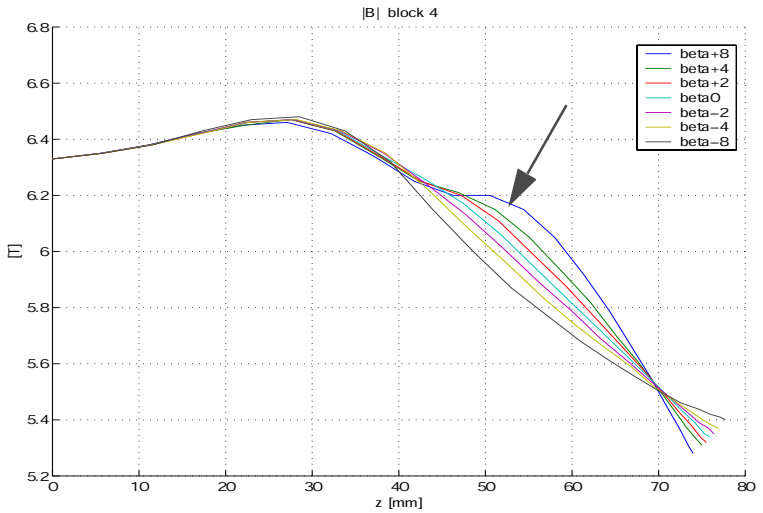


Figura 6.7 Andamento del peak field nel cavo 4 in funzione della variazione di beta nei cavi 4 e 5

Per meglio evidenziare la dipendenza del campo dalla variazione di BETA lungo tutta la lunghezza delle teste, in figura 6.8 viene rappresentata la differenza fra il campo massimo calcolato per i valori estremi dell'intervallo di variazione dell'angolo, ed il valore ottenuto con la geometria nominale.

I punti di maggior scostamento del campo |B| sono situati in corrispondenza delle zone in cui il cambiamento di Beta provoca la maggior variazione di forma del cavo. In queste zone infatti il campo massimo si sposta solidale alla parte inferiore conduttore, come è mostrato in figura 6.9.

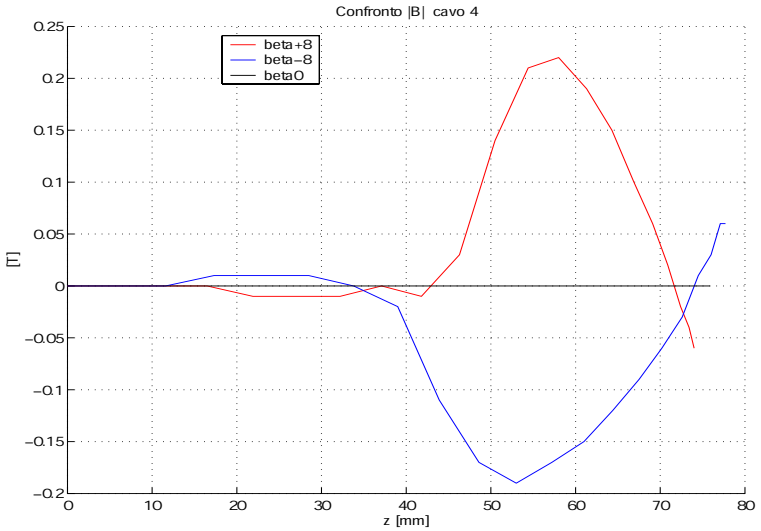


Figura 6.8 Scarto del peak field calcolato per Beta ±8º rispetto al campo in condizioni geometriche nominali.

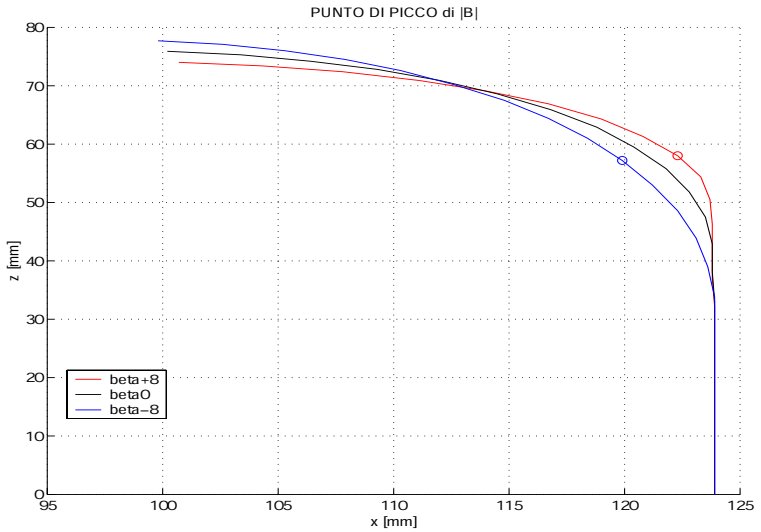


Figura 6.9 Rappresentazione della posizione dei punti in cui si ha la massima differenza di peak field tra i casi con Beta ±8º ed Beta nominale.

Nel cavo 5 si riscontra il medesimo andamento individuato in quello adiacente mentre il conduttore numero 3 presenta un comportamento differente.

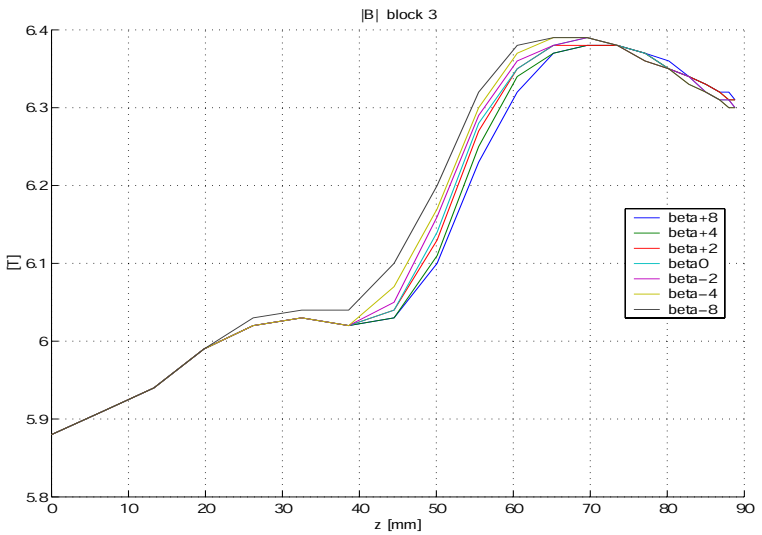


Figura 6.10 Andamento del peak field nel cavo 3 in funzione della variazione di beta nei cavi 4 e 5.

Il cavo 3 rappresenta il primo conduttore del secondo blocco dello strato esterno ed è diviso dai cavi cui è stato variato l'angolo di inclinazione dall'extra spacer.

A differenza del caso precedente, un incremento dell'angolo Beta nei blocchi 4 e 5 provoca un abbassamento del peak field sebbene comunque gli effetti siano assai più lievi in termini quantitativi.

Una possibile spiegazione a questo andamento può essere trovata andando ad analizzare il modo in cui il software ROXIE interpreta la variazione di Beta. Il programma infatti definisce la posizione dei blocchi a partire della superficie superiore. Variando l'angolo di inclinazione, la posizione lungo la coordinata longitudinale z del vertice in alto a sinistra viene mantenuta costante così come il vertice inferiore è vincolato a muoversi solo lungo z poiché fisicamente poggia sul canale di flusso. (Figura 6.11)

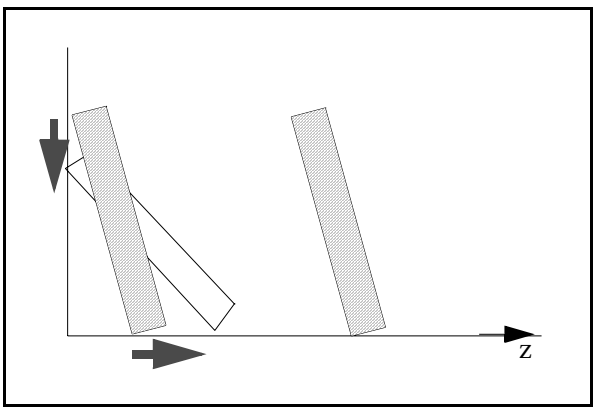


Figura 6.11 Modalità di variazione dell'angolo di inclinazione di un cavo nella sezione longitudinale della testa della bobina.

In questa maniera, diminuendo l'angolo Beta le estremità inferiori dei cavi vengono a trovarsi a distanza ravvicinata. Come è possibile constatare dalla figura 6.6, il peak field in ogni conduttore è localizzato esattamente in prossimità della superficie inferiore. L'avvicinamento del cavo 4 con conseguentemente combinazione delle linee di flusso del campo magnetico potrebbe così spiegare l'innalzamento del |B| calcolato in 3a seguito di una riduzione di Beta.

Un'identica analisi è stata effettuata per i cavi dello strato inferiore ed in particolare per i cavi 9, 10 e 11 che anche in questo caso costituiscono gli avvolgimenti più interni della bobina.

Prendendo in considerazione in particolare il blocco 10, è possibile notare come il peak field presente nei cavi del primo strato sia superiore in valore assoluto a quelli dello strato esterno a causa della maggior vicinanza al centro dell'apertura ove è situato il campo magnetico massimo. Confrontando infatti il grafico di figura 6.7 con quello di figura 6.12 si possono notare i differenti valori di campo magnetico in gioco che nel primo caso arrivano fino a circa 6.5 T mentre nel secondo fino a valori di poco inferiori 7.5 T.

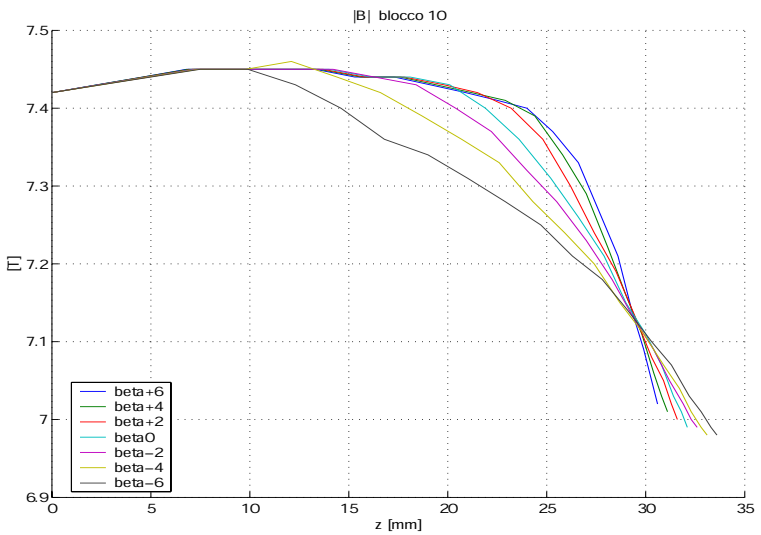


Figura 6.12 Andamento del peak field nel cavo 10 in funzione della variazione di beta nel cavo 10

L'andamento del peak field nel cavo 10 al variare dell'inclinazione del blocco medesimo rispecchia a grandi linee quello già riscontrato per i conduttori 4 e 5, ossia presenta una dipendenza quasi lineare fra l'aumento dell'angolo Beta e l'aumento del campo nella zona in cui il cavo si incurva giunto nella testa del dipolo. In questo caso specifivo si è potuto operare solamente in un intervallo di ±6° per evitare che i conduttori appartenenti a blocchi differenti venissero a contatto

In figura 6.13 viene mostrato l'effetto della variazione dell'angolo Beta del blocco 11 sul peak field del cavo 10. A conferma di quanto detto in precedenza, gli effetti della variazione geometrica di un blocco adiacente non influenzano in maniera consistente il campo del conduttore in esame. Se si va ad osservare gli effetti di questa modifica del cavo 11 sul conduttore 9, questi risultano addirittura inferiori al centesimo di Tesla.

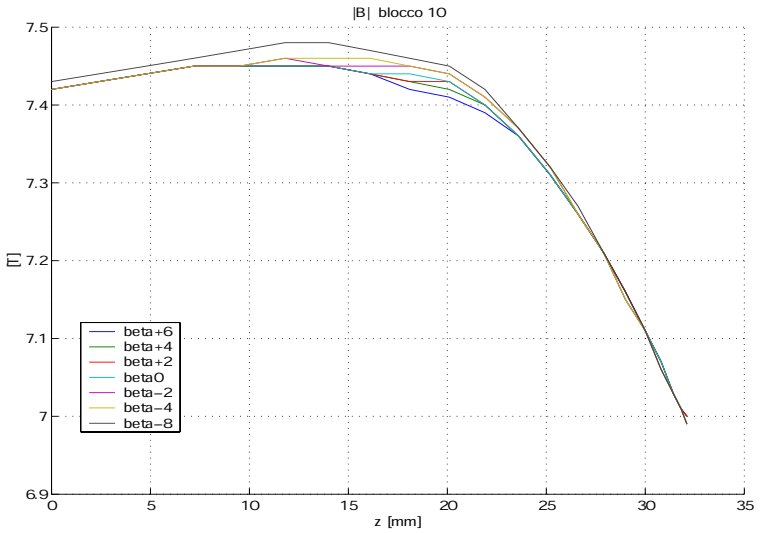


Figura 6.13 Andamento del peak field nel cavo 10 in funzione della variazione di beta nel cavo 11

Per ciò che riguarda il cavo 9, il primo di un blocco di tre conduttori, si ritrova grossomodo la medesima situazione illustrata in precedenza per il cavo 10 e per 11, ma con effetti più attenuati.

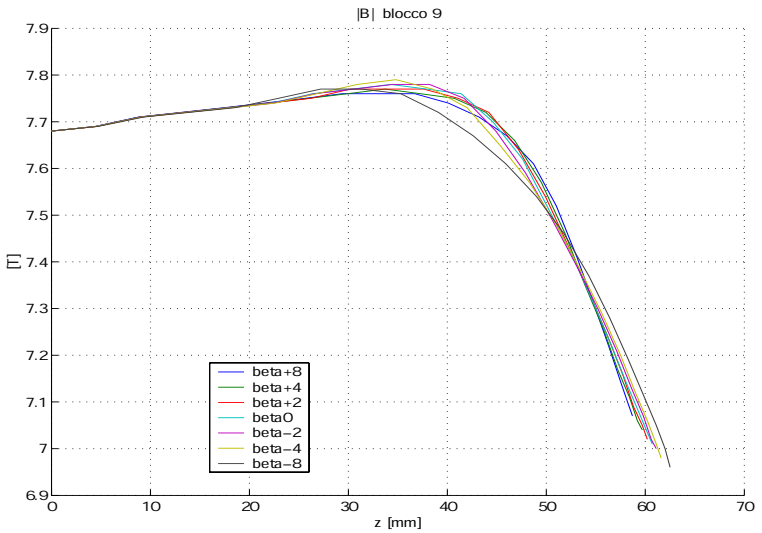


Figura 6.14 Andamento del peak field nel cavo 9 in funzione della variazione di beta nel cavo 9

Per completare l'analisi di sensibilità del lato non connessione si è proceduto a valutare l'effetto del cambiamento di angolo dei cavi dello strato interno sui cavi 4 e 5 dello strato esterno.

I risultati di queste simulazioni hanno mostrato una dipendenza praticamente trascurabile, inferiore al centesimo di tesla. A titolo indicativo, in figura 6.15 si

mostra l'andamento del peak field nel cavo 5 in funzione della variazione di Beta nel conduttore 9, il più vicino fra quelli considerati e quindi il più influente.

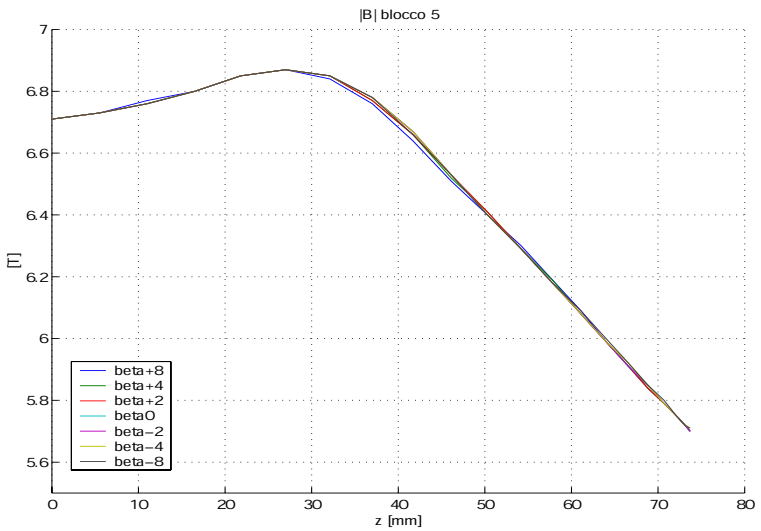


Figura 6.15 Andamento del peak field nel cavo 5 in funzione della variazione di beta nel cavo 9

6.2.2.1 Mappa di sensibilità per Beta

Lo studio sull'influenza del parametro Beta sull'andamento del peak field all'interno dei cavi superconduttori della bobina può essere sintetizzato mediante una mappa.

In tabella 6.1 vengono riportari i valori di scarto massimi fra il campo in condizioni nominali e quello calcolato per una determinata variazione di Beta indicata come $\Delta\beta$.

Nelle righe vengono indicati i conduttori cui viene variato l'angolo di inclinazione mentre nelle colonne quelli in cui viene calcolato il campo massimo.

In tabella sono state adottate le seguenti convenzioni riguardante i segni dei valori numerici: la presenza di un numero positivo indica la diretta proporzionalità fra l'incremento dell'angolo e quello del campo magnetico nel cavo mentre la presenza del segno "-" indica una inversa proporzionalità.

I numeri rossi indicano tutti i casi in cui sia presente una variazione di campo magnetico superiore a 0.1 T mentre i numeri blu indicano una situazione in cui il campo sia compreso fra i valori di 0.1 T e 0.01 T.

Tabella 6.1 Mappa di sensibilità del peak field [T] al parametro Beta

BETA		BLOCCHI IN CUI VIENE VALUTATO IL PEAK FIELD					
		strato esterno			strato interno		
BLOCCHI MODIFICATI		cavo3	cavo4	cavo5	cavo9	cavo10	cavo11
	cavo4e5 Δβ=8	*-0.06*	**0.22**	**0.17**	<0.01	<0.01	<0.01
	cavo9 Δβ=8	<0.01	<0.01	<0.01	**0.12**	<0.01	<0.01
	cavo 10 Δβ=6	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	**0.13**	*-0.02*
	cavo11 Δβ=6	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	*-0.02*	**0.17**

Analizzando i risultati riportati in tabella emerge come primo dato fondamentale il fatto che la variazione di Beta abbia degli effetti prettamente locali che interessano in maniera particolare solo i cavi direttamente interessati dal cambiamento di geometria.

In particolare non è stato possibile apprezzare alcuna interazione fra cavi appartenenti a strati differenti o fra conduttori appartenenti alla medesima bobina ma distanti fra loro più di un centimetro lungo l'asse longitudinale.

Si può osservare che i cavi soggetti alla variazione di Beta presentano un comportamento della variazione del peak field opposto rispetto a quello presente nei cavi a loro immediatamente vicini, ossia al crescere dell'angolo in un caso si riscontra un aumento del campo di picco mentre nel conduttore adiacente questo diminuisce.

6.2.3 Variazione di Z_0

La variazione del parametro Z_0 si traduce in una traslazione dei conduttori lungo l'asse longitudinale z senza però variare la forma ellittica dello spaziatore.

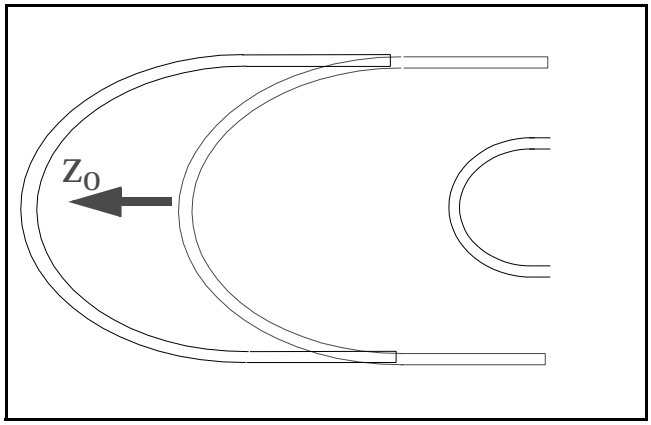


Figura 6.16 Parametro Zo: lunghezza della parte dritta del cavo nelle teste.

La logica utilizzata per effettuare le simulazioni segue esattamente quella utilizzata per il parametro Beta, si è cioé proceduto alla variazione di un singolo blocco di cavi alla volta andando a valutare la variazione del campo magnetico nei conduttori che costituiscono gli avvolgimenti più interni dei due strati della bobina.

Un incremento nel valore di Z_0 corrisponde ad uno spostamento del cavo verso l'estremità della testa che comporta un aumento di spessore dello spaziatore che supporta il conduttore ed un conseguente assottigliamento dello spaziatore che segue in modo da mantenere costante la lunghezza della testa.

Nelle figure 6.17 e 6.18 viene mostrato l'effetto della traslazione dei blocchi 4 e 5 sul campo magnetico dei cavi dello strato esterno.

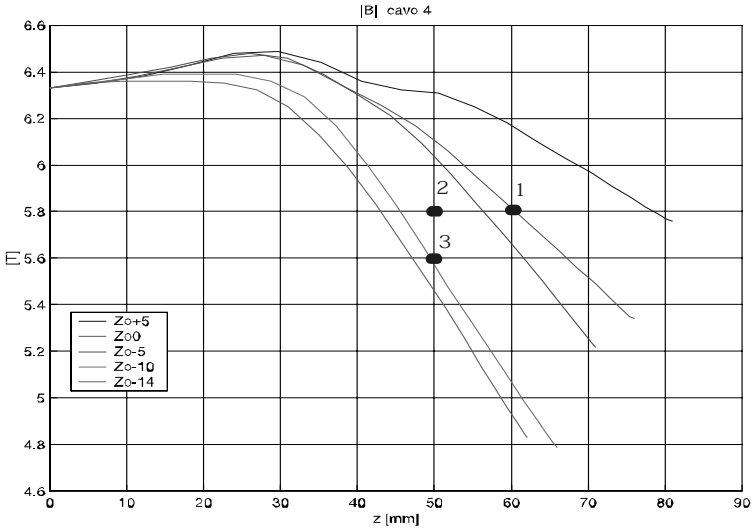


Figura 6.17 Andamento del peak field nel cavo 4 a seguito della traslazione dei cavi 4 e 5.

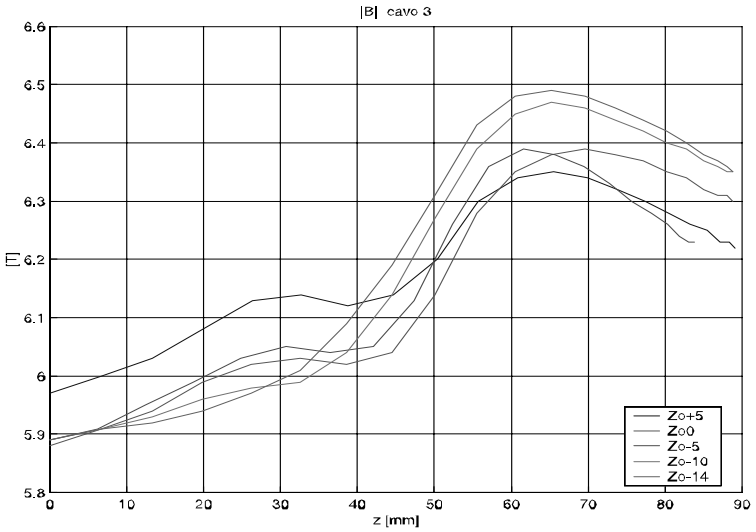


Figura 6.18 Andamento del peak field nel cavo 3 a seguito della traslazione dei cavi 4 e 5.

Analizzando il primo grafico, quello riguardante il blocco 4, è possibile notare come una riduzione del valore di Z_0, equivalente ad un inspessimento dello spaziatore posto fra i conduttori 4 e 3, provochi una riduzione sensibile del picco massimo di

campo situato nella zona intorno ai 30 mm della lunghezza del cavo. Tale effetto si estende a tutto il resto del conduttore.

Se si legge il grafico a parità di ordinate, si può notare come nella situazione nominale il campo nel punto 1 abbia un valore di 5.8 T. Se l'operazione non producesse effetti sul campo, a seguito della traslazione del cavo di 10 mm si dovrebbe ritrovare lo stesso peak field nel punto 2, posto ad una distanza da 1 equivalente allo spostamento del conduttore. In realtà il valore del campo relativo alla posizione di 2 si trova a 5.6 T, in corrispondenza del punto 3 poiché la presenza degli altri cavi ha fatto sì che si riducesse di 0.2 T.

Un'altra importante informazione reperibile dai grafici è che una diminuzione di spessore dello spaziatore posto a dividere i cavi 4 e 3 provoca un aumento non lineare del peak field riscontrabile sia nel blocco 4, in corrispondenza della lunghezza 50 mm, sia nel cavo 3 per quel che riguarda la prima parte del grafico, quella cioé che ricopre la zona in cui il cavo prosegue dritto all'interno della testa della bobina. Aumenta infatti la lunghezza del cavo 3 direttamente a contatto con il cavo 4 poiché lo spaziatore li divide solo nella parte in cui vengono curvati (si veda figura 2.1.2).

Passando ora in rassegna lo strato inferiore della bobina, si osserva in tutti i cavi in cui viene modificato Z_0 un comportamento analogo a quello riportato in figura 6.19 per il conduttore numero 9.

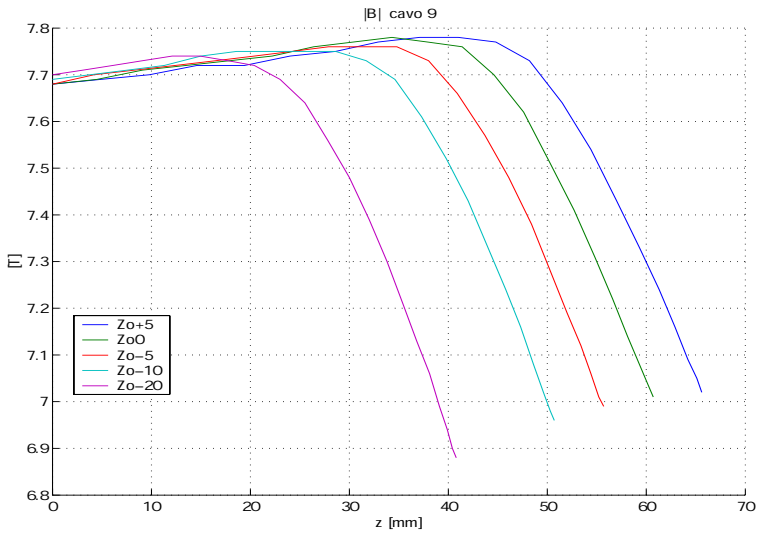


Figura 6.19 Andamento del peak field nel cavo 9 a seguito della traslazione del cavo 9.

Il campo massimo tende ad aumentare leggermente incrementando Z_0 tuttavia, a parità di ordinata, la distanza che intercorre fra una linea e l'altra corrisponde all'entità della traslazione del cavo per cui il peak field non varia in valore ma semplicemente si sposta, nel sistema di riferimento della testa, solidale col cavo. Nello strato inferiore non si osservano i fenomeni dovuta all'influenza dei blocchi adiacenti evidenziati in figura 6.17 poiché le distanze fra i cavi sono tali da rendere trascurabile l'effetto sul campo della traslazione di un cavo differente da quello in esame.

Si vuole ora ad analizzare l'influenza dello spostamento di un blocco sui cavi dello strato opposto.

A differenza della variazione di Beta, il cambio di Z_0 conduce ad una modifica della posizione reciproca dei cavi appartenenti ai due diversi strati e delle rispettive linee di flusso del campo magnetico.

In figura 6.20 viene presentato il caso più significativo riguardante l'effetto sul campo magnetico dei cavi dello strato inferiore causato dallo spostamento dei blocchi della bobina superiore. Traslando i conduttori 4 e 5 in modo da ridurre il valore di Z_0 si produce una riduzione dell'ordine dei centesimi di Tesla nel peak field del cavo 9 nonostante i cavi si avvicinino e questo a causa della interferenza distruttiva delle reciproche linee di flusso magnetico.

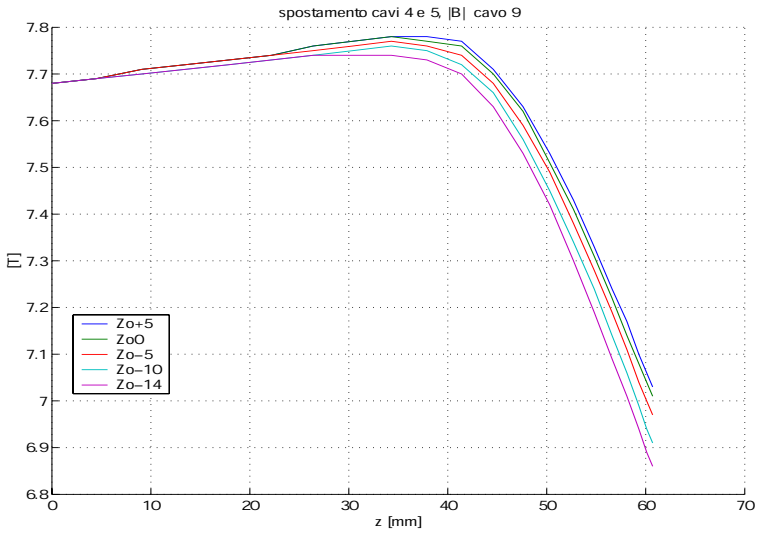


Figura 6.20 Andamento del peak field nel cavo 9 a seguito della traslazione dei cavi 9 4 e 5.

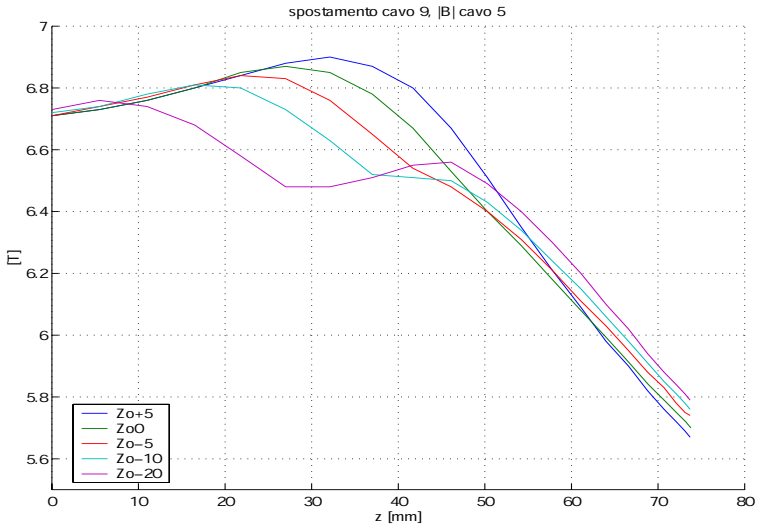


Figura 6.21 Andamento del peak field nel cavo 5 a seguito della traslazione del cavo 9

Se ora si invertono i ruoli, traslando il cavo 9 ed osservando gli effetti in 5, si osserva una maggior sensibilità del peak field specialmente nella prima parte del cavo ove in corrispondenza di Z_O= -20mm si ha una sensibile riduzione del campo massimo presente nel conduttore. (Figura 6.21)

6.2.3.1 Mappa di sensibilità per Z_O

In tabella 6.2 vengono riportari i valori di scarto massimi fra il peak field in condizioni nominali e quello calcolato per una determinata variazione di Z_O indicata come deltaZo.

Nelle righe vengono indicati i conduttori soggetti alla traslazione mentre nelle colonne quelli in cui viene calcolato il campo massimo.

In tabella sono state adottate le seguenti convenzioni riguardanti i segni dei valori numerici: la presenza di un numero positivo indica la diretta proporzionalità fra l'incremento di Z_O e quello del campo magnetico nel cavo mentre la presenza del segno "-" indica una inversa proporzionalità.

I numeri rossi indicano tutti i casi in cui sia presente una variazione di campo magnetico superiore a 0.1 T mentre i numeri blu indicano una situazione in cui il campo sia compreso fra i valori di 0.1 T e 0.01 T.

Tabella 6.2 Mappa di influenza del parametro Zo sul peak field [T]

		BLOCCHI IN CUI VIENE VALUTATO IL PEAK FIELD					
	Zo	strato esterno			strato interno		
		cavo3	cavo4	cavo 5	cavo 9	cavo 10	cavo 11
BLOCCHI MODIFICATI	cavo 4 e 5 deltaZo=14	**-0.17**	**0.51**	**0.21**	**0.15**	*0.04*	<0.01
	cavo 9 deltaZo=20	**-0.20**	**0.15**	**0.39**	**0.23**	**-0.23**	**-0.13**
	cavo10 deltaZo=3	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	*0.05*	*-0.02*
	cavo 11 deltaZo=3	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	*-0.03*	*0.08*

Da una analisi dei valori tabulati emerge il ruolo svolto dal conduttore numero 9 che, a causa della sua posizione geometrica centrale, influenza il campo magnetico di tutti i conduttori analizzati. Va inoltre osservato che questo cavo è l'unico ad essere in grado di variare Z_O di 20mm senza venir a contatto con i blocchi adiacenti.

Il blocco costituito da cavi 4 e 5 svolge anch'esso un ruolo di primo piano, un arretramento di questi conduttori, cioè una diminuzione di Z_O, con conseguente inspessimento dello spaziatore che li divide dal conduttore 3, garantisce un incremento del margine di sicurezza rispetto al campo critico in tutti i cavi presenti nei due strati ad eccezione di 3 dove tuttavia l'aumento del peak field non appare di entità preoccupanti.

I blocchi 10 e 11 esercitano una scarsa influenza su se stessi e sugli altri a causa della limitata libertà di movimento che consente traslazioni massime di 3mm.

6.2.4 Variazione della forma degli avvolgimenti

Al fine di completare l'analisi di sensibilità, si vuole ora individuare l'influenza dell'ellitticità degli spaziatori sul campo presente all'interno dei conduttori.

Per modificare la forma degli avvolgimenti sarebbe sufficiente variare il valore del parametro B_0 rappresentante il semi-asse maggiore dell'ellisse che descrive la superficie superiore dello spaziatore. Tuttavia in questa maniera, oltre alla forma verrebbe variata anche la posizione longitudinale dei cavi ottenendo dei valori del campo di picco dovuti alla sovrapposizione degli effetti del cambiamento di B_0 e della traslazione dei conduttori.

Una strada per ovviare a questo inconveniente ed essere così in grado di apprezzare la dipendenda del campo dalla curvatura del cavo consiste nel variare contemporaneamente B_0 e Z_0 in modo tale che la loro somma si mantenga costante e non vari la posizione lungo l'asse longitudinale z come mostrato in figura 6.22.

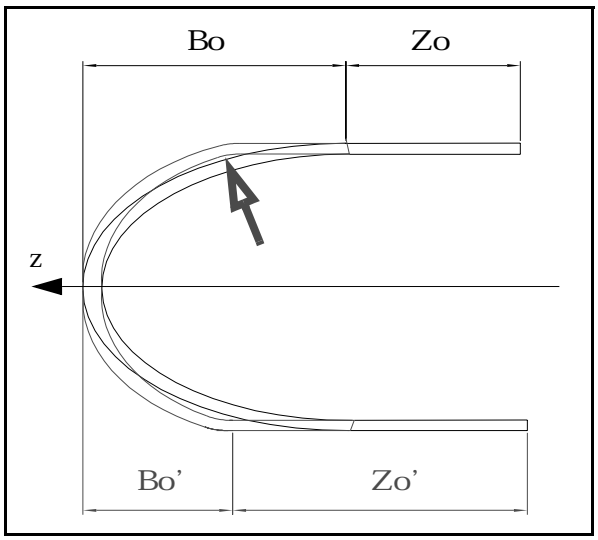


Figura 6.22 Modalità di variazione della forma del cavo modificando contemporaneamente Bo e Zo in modo che la lunghezza complessiva del cavo si mantenga costante

Un ulteriore accorgimento riguarda la modalità con cui variare la forma degli spaziatori: se si modifica un solo blocco di conduttori alla volta si verranno a creare delle zone, di estensione limitata, in cui i cavi appartenenti a gruppi differenti vedranno la loro distanza ridursi o aumentare sensibilmente in concomitanza della giunzione della sezione descritta da B_0 e quella da Z_0, come indicato dalla freccia rossa in figura 6.22. Per questo motivo i blocchi appartenenti allo stesso strato devono essere variati contemporaneamente.

Nei grafici di figura 6.23 e 6.24 sono riportati gli andamenti del peak field, nei cavi 3 e 4, a seguito della variazione della forma in tutto lo strato superiore.

Il cavo 3 presenta una variazione irregolare del campo, non risulta facile individuare una proporzionalità fra l'entità della variazione dei parametri B_0 e Z_0 e l'amdamento del peak field. Variando il semi asse dell'ellisse nell'intervallo fra +5 e -15 é possibile notare come il campo magnetico cresca nella prima parte del cavo al decrescere di B_0 a causa della particolare conformazione dello spaziatore che divide

il cavo 3 dal 4. Esso infatti separa cavi che nella parte dritta appartenevano allo stesso blocco e non possiede delle code che si raccordino con gli spaziatori di rame. In questa maniera, riducendo il valore di B_0 si aumenta la lunghezza della zona in cui i conduttori sono a diretto contatto fra loro.

Aumentando invece B_0 si incrementa l'ellitticità degli avvolgimenti diminuendo il campo nella zona finale del cavo poiché le distanze relative fra i conduttori risultano leggermente aumentate.

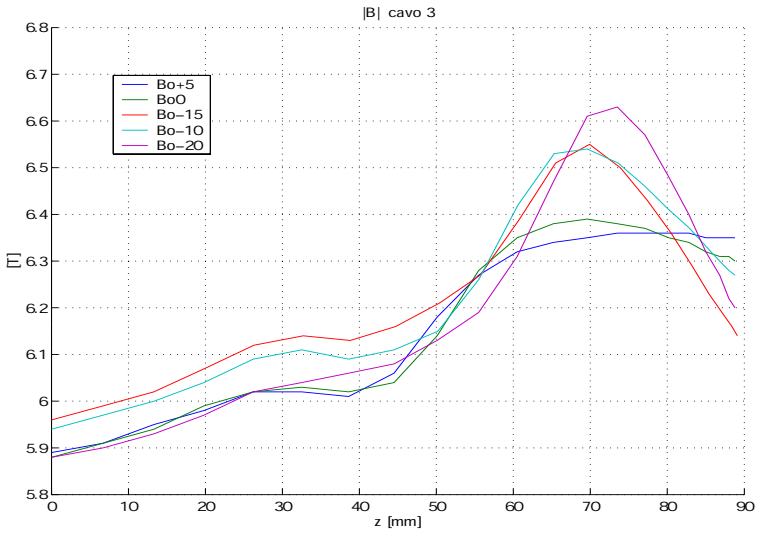


Figura 6.23 Variazione della forma degli spaziatori dello strato esterno: effetto sul cavo 3.

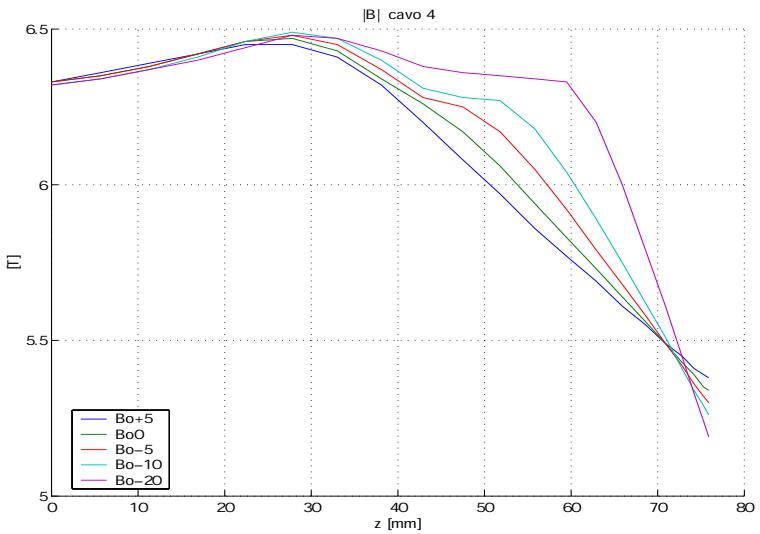


Figura 6.24 Variazione della forma degli spaziatori dello strato esterno: effetto sul cavo 4.

I cavi 4, figura 6.24, e 5 reagiscono in maniera differente alle variazioni di forma presentando un andamento decisamente più regolare.

Al contrario del conduttore 3 la prima parte del cavo che corrisponde alla zona descritta da Z_0 non appare influenzata dai cambiamenti che appaiono più evidenti nella sezione in cui i cavi vengono curvati. In particolare il peak field aumenta man mano che gli spaziatori assumono una forma più circolare (B_0 negativi) presentando dei picchi che sconsigliano una variazione della geometria in tale direzione.

Nello strato interno i margini di variazione dei parametri sono più limitati, B_0 oscilla fra -7 e +5, a causa del layout della bobina.

In questo caso l'andamento del peak field appare regolare in tutti i cavi analizzati e conferma la tendenza, già riscontrata nel blocco 4 dello strato superiore, a diminuire all'accentuarsi dell'ellitticità degli avvolgimenti, ossia al crescere di B_0

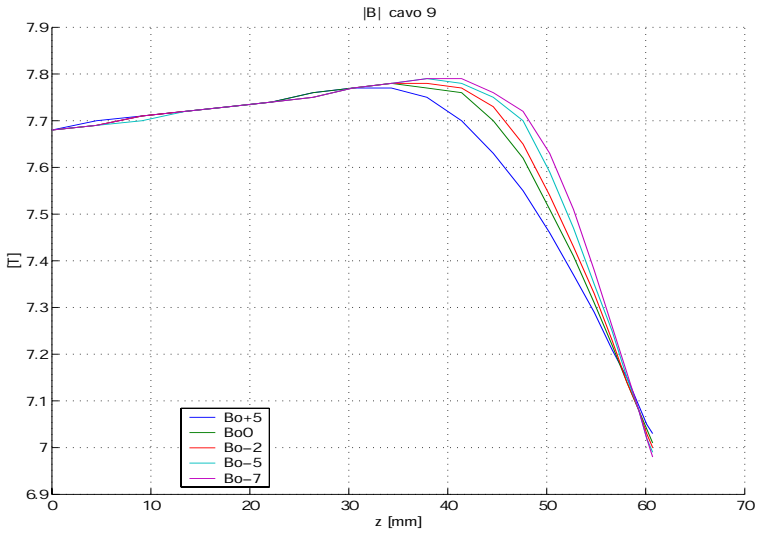


Figura 6.25 Variazione della forma degli spaziatori dello strato interno: effetto sul cavo 9.

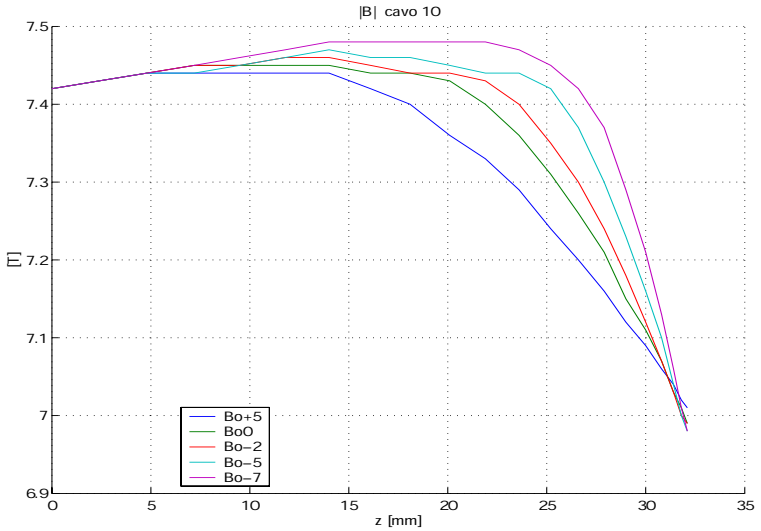


Figura 6.26 Variazione della forma degli spaziatori dello strato interno: effetto sul cavo 10.

Le uniche differenze riscontrate fra i cavi dello strato interno riguardano l'entità della variazione che nei cavi 10 (figura 6.26) e 11 risulta maggiore rispetto al cavo 9 (figura 6.25) a causa della maggior vicinanza dei primi due conduttori rispetto al terzo.

Se si procede all'analisi degli effetti prodotti su un cavo dalla variazione della geometria dello strato opposto, si nota come l'influenza non sia molto elevata nei blocchi dello strato inferiore ed in particolare nei cavi 10 e 11 poiché essi risultano distanti da qualsiasi conduttore dello strato superiore. Il conduttore 9, figura 6.28, più sensibile, presenta una variazione massima di campo di circa 0.03 T.

Nello strato superiori gli effetti sono leggermente più sensibili ma, come mostrato in figura 6.27 per il cavo 5, non superano i 0.12 T di variazione massima.

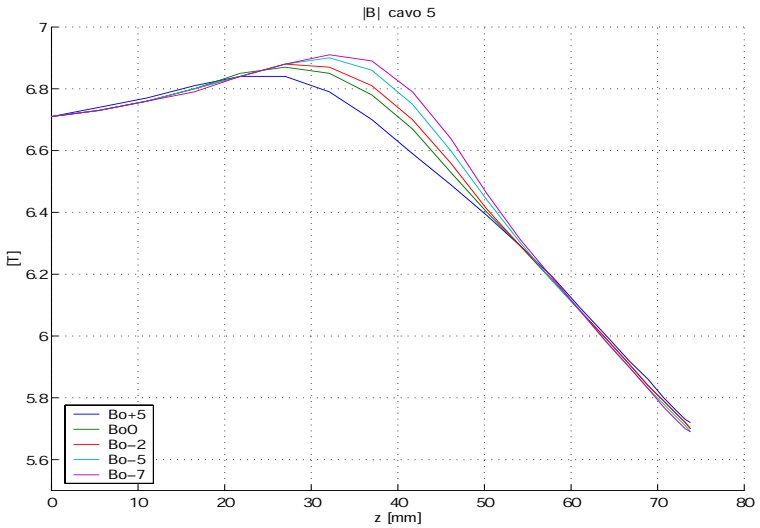


Figura 6.27 Variazione della forma degli spaziatori dello strato interno: effetto sul cavo 5.

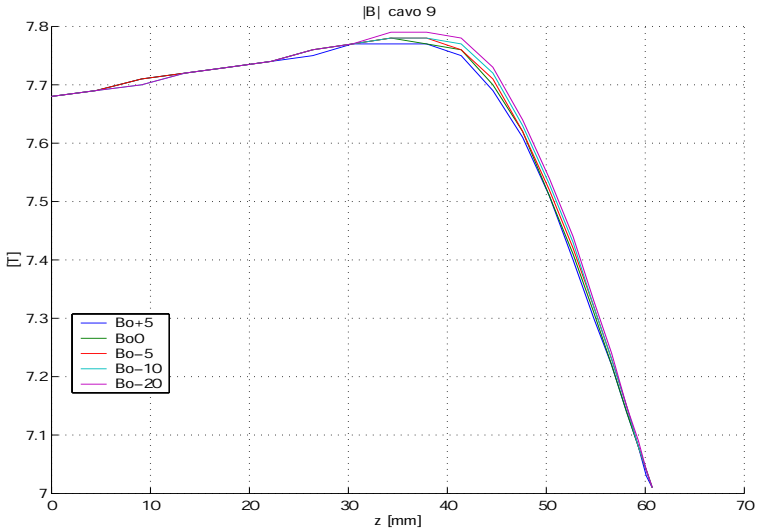


Figura 6.28 Variazione della forma degli spaziatori dello strato esterno: effetto sul cavo 9.

6.2.4.1 Mappa di sensibilità per la forma degli avvolgimenti

In tabella 6.3 vengono riportari i valori di scarto massimi fra il peak field in condizioni nominali e quello calcolato per una determinata variazione della forma degli avvolgimenti mediante il cambiamento del valore di B_0 e Z_0.

Nelle righe vengono indicati i conduttori soggetti alla traslazione mentre nelle colonne quelli in cui viene calcolato il campo massimo.

In tabella sono state adottate le seguenti convenzioni riguardanti i segni dei valori numerici: la presenza di un numero positivo indica la diretta proporzionalità fra l'incremento del parametro B_0 e quello del campo magnetico nel cavo mentre la presenza del segno "-" indica una inversa proporzionalità.

I numeri rossi indicano tutti i casi in cui sia presente una variazione di campo magnetico superiore a 0.1 T mentre i numeri blu indicano una situazione in cui il campo sia compreso fra i valori di 0.1 T e 0.01 T.

Tabella 6.3 Mappa di influenza del parametro Bo sul peak field [T].

FORMA Bo+Zo=cost.		BLOCCHI IN CUI VIENE VALUTATO IL PEAK FIELD					
		strato esterno			strato interno		
		cavo 3	cavo 4	cavo 5	cavo 9	cavo 10	cavo 11
BLOCCHI MODIFICATI	strato esterno	**-0.25**	**-0.53**	**-0.42**	*-0.03*	*0.04*	<0.01
	strato interno	*-0.04*	**-0.10**	**-0.12**	**-0.11**	**-0.16**	*-0.07*

Analizzando i valori riportati in tabella 6.3 è possibile osservare come sia presente una uniformità di andamento del peak field che in tutti i cavi tende ad aumentare al diminuire di B_0, ossia al tendere delle superfici ad una forma tondeggiante.

Variando gli spaziatori dello strato superiore si ottengono delle grosse variazioni di campo nei cavi stessi che ad essi si poggiano, fino a 0.5 T, tuttavia nella direzione che tende ad aumentare il peak field ed a ridurre il margine di sicurezza per il quench. Cambiamenti della forma che portino ad una riduzione di $|B|$ sono limitati a variazioni di B_0 di 5mm dalla geometria stessa della testa della bobina.

I cavi dello strato inferiori presi in esame non risentono in maniera significativa dei cambi apportati nello strato sovrastante a causa della loro particolare posizione che li pone ad una distanza superiore al raggio di influenza del cavo loro più vicino, il cavo 5.

Se si procede ad un cambiamento di forma degli avvolgimenti della bobina inferiore gli effetti sono significativi in tutti i cavi esaminati, sia nello strato interno che in quello esterno i cui conduttori risentono della presenza dei cavi sottostanti.

L'entità della variazione del campo magnetico dovuta alla trasformazione dello strato inferiore risulta inferiore rispetto alla bobina sovrastante poiché lo spostamento massimo consentito per il parametro B_0 è di soli 7mm contro i 20mm del caso precedente.

6.2.5 Osservazioni

Nei paragrafi precedenti sono stati presentati i risultati dell'analisi di sensibilità svolta al fine di individuare la dipendenza del campo di picco all'interno dei cavi in funzione della geometria dei conduttori stessi.

Sono stati presi in esame differenti casi per ogni parametro geometrico considerato e si è cercato di individuare un intervallo all'interno del quale sia possibile operare dei cambiamenti. Tali modifiche nella pratica si traducono in un cambiamento del progetto degli spaziatori ed in quanto tali non tutte realizzabili per problemi di lavorazione dei pezzi o per problemi di bobinabilità dei cavi attorno a queste nuove forme. Per questo motivo i dati raccolti nelle tabelle vanno intesi come indicazioni del comportamento del peak field a seguito di variazioni dei parametri e non in termini assoluti.

Analizzando ora i risultati ottenuti, emerge come Z_0 rappresenti il parametro più critico per il layout della bobina. Una traslazione dei blocchi 4 e 5 dello strato superiore o del blocco 9 di quello inferiore provoca una variazione di campo magnetico in tutti i conduttori circostanti. In particolare si può notare come ad una diminuzione di Z_0 corrisponda sempre una diminuzione del peak field nel cavo stesso su cui viene effettuata la modifica.

L'angolo Beta di inclinazione dei cavi lungo l'asse longitudinale della bobina presenta invece un carattere locale, ossia il suo raggio di influenza è limitato al solo cavo modificato o al più a quello immediatamente vicino.

La variazione della forma degli avvolgimenti non è facilmente comparabile con le modifiche precedentemente illustrate poichè coinvolge contemporaneamente tutti i blocchi appartenenti ad uno strato della bobina. L'unica considerazione possibile è che una forma maggiormente tondeggiante degli avvolgimenti, ossia una diminuzione di B_0, provoca un aumento del campo di picco.

6.3 Qualità di campo

Il campo magnetico prodotto da un dipolo superconduttore non è ideale, ossia se lo si scompone in serie di potenze (si veda pag. 22) si può notare come esso sia composto da una serie di multipoli spuri che si vengono a sommare al contributo dipolare puro.

La presenza di questi errori di campo ha origini svariate, tra cui quella di interesse specifico per lo studio qui approntato, il posizionamento dei cavi.

Per ottenere un campo dipolare puro si ha bisogno in ciascun polo di una distribuzione di corrente a forma di coseno, così come descritto a pag. 10. Nella pratica si cerca di approssimare questa configurazione mediante l'utilizzo di cavi superconduttori a sezione trapezoidale, affiancati gli uni agli alri e posti su due strati in modo da realizzare una sezione retta della bobina che si avvicini a quella ideale.

Le teste delle bobine costituiscono un'altra importante fonte di errori di campo poiché in queste zone si viene a perdere la succitata distribuzione di corrente a coseno in quanto i cavi vengono avvolti attorno agli spaziatori al fine di proseguire nell'altro lato della bobina e ritornare verso la parte dritta del magnete. In tabella 6.4 viene presentato il contributo dato dalle teste ai multipoli integrati sul magnete.

Tabella 6.4 Contributo delle teste al valore dei multipoli integrati su tutto il magnete in condizioni operazionali

	valore nominale parte dritta	contributo teste	finestra di accettabilità
b_3	7.35 unità	+0.9 unità	±3.0 unità
b_5	-0.98 unità	-0.2 unità	±0.3 unità

Andando ora ad analizzare la dipendenza di ciascun multipolo dalla geometria della testa della bobina si vuole offrire uno strumento in grado di suggerire, in caso di problemi durante la fase produttiva dei dipoli, la direzione da intraprendere per modificare i contributi al campo magnetico principale da parte delle varie componenti.

Inoltre, grazie alle tabelle di sensibilità prodotte come sintesi di tutte queste simulazioni, é possibile prevedere e stimare gli effetti dovuti a difetti di produzione delle bobine.

Tutti i calcoli vengono effettuati mediante il modello a doppia apertura con il giogo composto da *nested laminations,* ossia si suppone sia presente un anello di acciaio ferromagnetico posto ad una distanza di 236.5 mm dall'asse di simmetria della cold mass.

6.3.1 Analisi della qualità di campo lato non connessione

Il file di input utilizzato per questo tipo di analisi é all'incirca il medesimo preparato per il calcolo del peak field, con la sola differenza che ora vengono anche

definiti il raggio di riferimento, 17 mm, rispetto al quale viene scomposto il campo magnetico, la linea su cui viene calcolato il campo, ossia l'asse del canale di flusso, e la lunghezza del tratto interessato allo studio, i 180 mm che compongono la testa propriamente detta.

La suddivisione in blocchi dei conduttori è stata mantenuta per praticità la stessa illustrata in figura 6.3 per il lato non connessione.

Anche i parametri geometrici da variare sono i medesimi, l'angolo Beta di inclinazione dei cavi nella sezione longitudinale, la lunghezza della parte dritta dei cavi Z_0 e il semi asse dell'ellisse B_0.

6.3.2 Variazione di Beta

Lo scopo delle simulazioni effettuate è lo studio dell'influenza dell'angolo di inclinazione di ogni singolo blocco di conduttori sui coefficienti di multipolo integrati sulla lunghezza della testa della bobina.

Studiando l'andamento dei multipoli in funzione del parametro Beta è emersa nella quasi totalità dei casi una perfetta linearità che consente di trattare i risultati in termini di valori incrementali, unità di multipolo per grado, e permette una estrapolazione dei risultati per condizioni di Beta prossime a quella nominale senza dover necessariamente effettuare ulteriori calcoli.

In figura 6.29 é riportato a titolo di esempio il caso del blocco numero sette dello strato interno del lato non connessione ove risulta evidente la linearità fra l'andamento dei coefficienti e la variazione dell'angolo Beta.

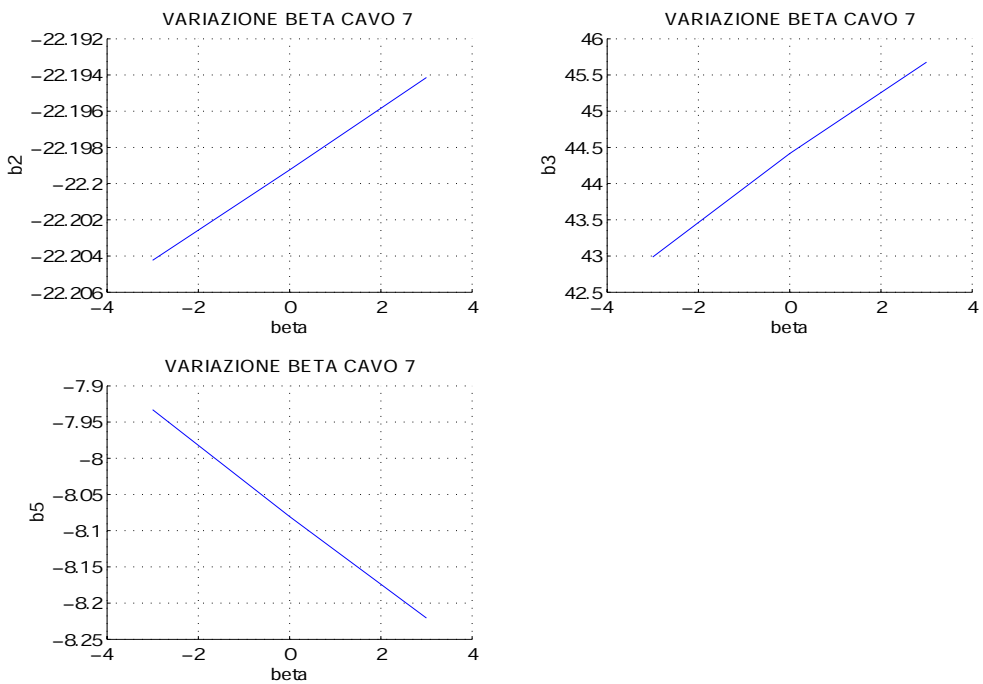


Figura 6.29 Andamento dei multipoli al variare di Beta nel blocco 7 dello strato interno del lato non connessione.

In tabella 6.5 sono riassunti tutti i calcoli effettuati nell'estremità della bobina, lato non connessione, per tutti i cavi dello strato interno.

Nella parte superiore è rappresentato lo scarto dei valori dei multipoli calcolati per Beta incrementato di 3° rispetto al caso con geometria nominale mentre in quella inferiore Beta è ridotto di 3°.

Per ogni coefficiente sono presenti due valori, il primo indica la variazione totale del multipolo a seguito del cambiamento di 3° dell'angolo Beta, il secondo scritto in carattere corsivo, indica la variazione di unità multipolari per ogni variazione di angolo.

In colonna sono indicati i blocchi responsabili della variazione di geometria mentre evidenziati in blu sono i casi più rilevanti in cui la variazione per grado dei coefficienti supera il valore di 0.1 unità/deg. L'ultima colonna riporta invece il valore dei multipoli calcolati in condizioni di geometria nominale in modo da poter meglio comprendere l'entità delle variazioni presentate nelle colonne adiacenti.

Tabella 6.5 Mappa di sensibilità: andamento dei multipoli b_2, b_3 e b_5 al variare di Beta nella testa della bobina lato non connessione, strato interno.

STRATO INTERNO --- LATO NON CONNESSIONE

BETA+3

	blocco 6	blocco 7	blocco 8&9	blocco 11	NOMINALE
b2	0.007	0.005	0.000	0.000	-22.199
	0.002	*0.002*	*0.000*	*0.000*	
b3	0.268	**1.262**	**0.525**	0.047	44.416
	0.089	***0.421***	***0.175***	*0.016*	
b5	-0.028	-0.140	**-0.326**	-0.028	-8.081
	0.009	*0.047*	***0.109***	*0.009*	

BETA-3

	blocco 6	blocco 7	blocco 8&9	blocco 11	NOMINALE
b2	-0.007	-0.005	0.000	0.000	-22.199
	0.002	*0.002*	*0.000*	*0.000*	
b3	-0.261	**-1.430**	**-0.548**	0.011	44.416
	0.087	***0.477***	***0.183***	*0.004*	
b5	-0.002	0.148	**0.409**	0.015	-8.081
	0.001	*0.049*	***0.136***	*0.005*	

Dai risultati riportati in tabella 6.5 emerge sostanzialmente una scarsa dipendenza dei multipoli dalla variazione dell'angolo di inclinazione dei cavi.

Il coefficiente più sensibile è il b_3 che presenta una variazione di 0.5 unità/deg nel caso venga modificato il blocco 7 mentre il blocco più influente risulta il numero 8&9 il cui cambiamento di Beta provoca variazioni apprezzabili sia in b_3 che in b_5.

I calcoli del blocco 10 sono stati omessi poiché dopo alcune prove si è visto che l'andamento seguiva quello del blocco 11 le cui variazioni sono trascurabili.

In tabella 6.6 sono riportati i calcoli riguardanti i conduttori dello strato esterno, lato non connessione, nella zona della testa della bobina.

Tabella 6.6 Mappa di sensibilità: andamento dei multipoli b_2, b_3 e b_5 al variare di Beta nella testa della bobina lato non connessione, strato esterno.

STRATO ESTERNO --- LATO NON CONNESSIONE

BETA+3

	blocco 1	blocco 2&3	blocco 4&5	NOMINALE
b2	0.027	-0.003	-0.020	-22.199
	0.009	*0.001*	*0.007*	
b3	**-0.346**	**2.043**	**0.392**	44.416
	0.115	***0.681***	***0.131***	
b5	0.226	-0.113	-0.034	-8.081
	0.075	*0.038*	*0.011*	

BETA-3

	blocco 1	blocco 2&3	blocco 4&5	NOMINALE
b2	-0.019	-0.037	-0.019	-22.199
	0.006	*0.012*	*0.006*	
b3	**-0.915**	**-1.657**	0.167	44.416
	0.305	***0.552***	*0.056*	
b5	0.160	0.109	0.030	-8.081
	0.053	*0.036*	*0.010*	

Anche per i blocchi dello strato esterno la variazione dell'angolo Beta non comporta dei grossi cambiamenti per quel che riguarda l'andamento dei multipoli.

Solamente b_3 presenta una sensibilità alla variazione dell'inclinazione dei conduttori, ed in particolare quando a variare sono i blocchi centrali, esattamente come accade per lo strato interno.

Il b_2 risulta invariato in virtù del fatto che esso dipende dalla simmetria destra-sinistra che in questo caso non viene modificata.

6.3.3 Variazione di Z_0

Si vuole ora analizzare l'effetto provocato sulla qualità di campo dallo spostamento della posizione dei blocchi di conduttori lungo la coordinata longitudinale z.

Analogamente al caso precedente in cui a variare era Beta, anche per Z_0 si registra una dipendenza lineare fra la variazione dei coefficienti e quella del parametro, che consente di estrapolare il valore dei multipoli anche a casi non direttamente calcolati.

In figura 6.30 viene riportato a titolo esemplificativo l'andamento dei coefficienti b2, b3 e b5 del blocco 1 del lato non connessione in funzione della variazione di Z_0.

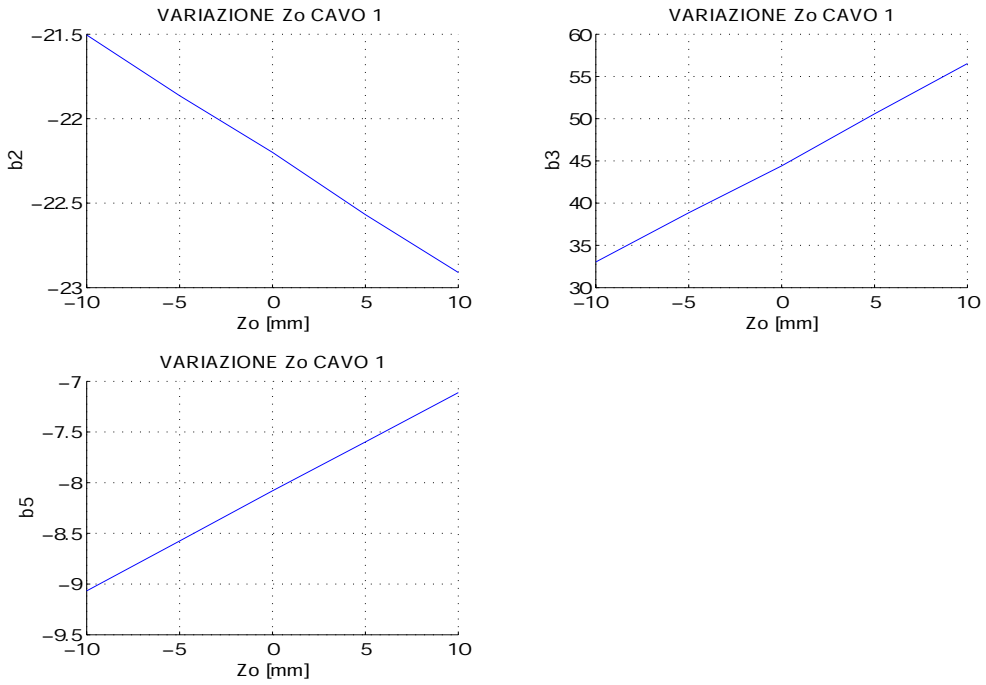


Figura 6.30 Andamento dei multipoli al variare di Zo nel blocco 1 dello strato esterno del lato non connessione.

In tabella 6.7 e 6.8 sono riassunti tutti i calcoli effettuati nell'estremità della bobina, lato non connessione.

Nella parte superiore è rappresentato lo scarto dei valori dei multipoli calcolati per Z_0 incrementato di 5 mm rispetto al caso con geometria nominale mentre in quella inferiore Z_0 è ridotto di 5 mm.

Per ogni coefficiente sono presenti due valori, il primo indica la variazione totale del multipolo a seguito del cambiamento di 5 mm del parametro Z_0, il secondo, in carattere corsivo, indica la variazione di unità multipolari per ogni millimetro di spostamento.

In colonna sono indicati i blocchi responsabili della variazione di geometria mentre evidenziati in blu sono i casi più rilevanti in cui la variazione per millimetro dei coefficienti supera il valore di 0.1 unità/mm ed in rosso quelli in cui supera 1 unità/mm.

Tabella 6.7 Mappa di sensibilità: andamento dei multipoli b_2, b_3 e b_5 al variare di Z_0 nella testa della bobina lato non connessione, strato interno.

STRATO INTERNO --- LATO NON CONNESSIONE

Zo+5

	blocco 6	blocco 7	blocco 8&9	blocco 10	blocco 11	NOMINALE
b2	-0.121	-0.107	-0.039	-0.004	0.000	-22.199
	0.024	*0.021*	*0.008*	*0.001*	*0.000*	
b3	9.932	**-0.692**	-6.405	**-2.089**	-1.857	44.416
	1.986	***0.138***	***1.281***	***0.418***	*0.371*	
b5	**1.870**	**-2.483**	-0.131	**0.582**	**0.603**	-8.081
	0.374	***0.497***	*0.026*	***0.116***	***0.121***	

Zo-5

	blocco 6	blocco 7	blocco 8&9	blocco 10	blocco 11	NOMINALE
b2	0.124	0.108	0.038	0.002	-0.065	-22.199
	0.025	*0.022*	*0.008*	*0.000*	*0.013*	
b3	-9.917	**0.686**	6.405	**2.091**	**1.849**	44.416
	1.983	***0.137***	***1.281***	***0.418***	***0.370***	
b5	**-1.865**	**2.480**	0.132	**-0.582**	**-0.603**	-8.081
	0.373	***0.496***	*0.026*	***0.116***	***0.121***	

Tabella 6.8 Mappa di sensibilità: andamento dei multipoli b_2, b_3 e b_5 al variare di Z_0 nella testa della bobina lato non connessione, strato esterno.

STRATO ESTERNO --- LATO NON CONNESSIONE

Zo+5

	blocco 1	blocco 2&3	blocco 4&5	NOMINALE
b2	-0.340	-0.358	-0.045	-22.199
	0.068	*0.072*	*0.009*	
b3	5.042	**-2.662**	**-1.059**	44.416
	1.008	***0.532***	***0.212***	
b5	**0.669**	**-0.929**	-0.030	-8.081
	0.134	***0.186***	*0.006*	

Zo-5

	blocco 1	blocco 2&3	blocco 4&5	NOMINALE
b2	0.356	0.317	0.005	-22.199
	0.071	*0.063*	*0.001*	
b3	-6.329	**3.230**	**1.628**	44.416
	1.266	***0.646***	***0.326***	
b5	-0.284	**0.920**	0.021	-8.081
	0.057	***0.184***	*0.004*	

L'ultima colonna riporta il valore dei multipoli calcolati in condizioni di geometria nominale in modo da poter meglio comprendere l'entità delle variazioni presentate nelle colonne adiacenti.

La traslazione dei cavi provoca un cambiamento della distanza relativa fra i blocchi di conduttori ed una variazione del tipo di interferenza esistente fra le linee di flusso magnetico da essi generate.

In tale maniera il campo magnetico risulta fortemente influenzato da questo tipo di modifica della geometria della testa della bobina ma non allo stesso modo per tutte le componenti.

Il contributo quadripolare è generato dagli effetti di cross talk fra i due differenti canali di fascio presenti nella cold mass. Essendo entrambe le aperture modificate alla stessa maniera non si verificano effetti significativi sul coefficiente b_2.

Il coefficiente b_3 presenta invece una spiccata sensibilità alla posizione longitudinale dei cavi nelle teste della bobina. In particolare i cavi che risultano più critici per questo multipolo sono quelli più esterni come il blocco 1 dello strato esterno ed il blocco 6di quello interno.

Per meglio comprendere questa spiccata dipendenza di b_3 bisogna analizzare l'andamento del coefficiente nella zona delle teste.

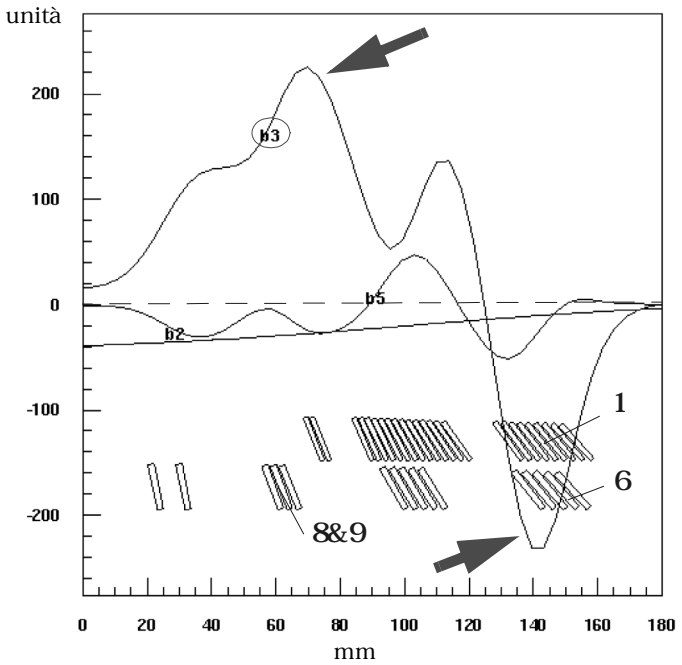


Figura 6.31 Andamento dei coefficienti di multipolo nella zona della testa della bobina, lato non connessione.

In generale si può notare come la componente sestupolare presenti dei minimi locali in corrispondenza di blocchi di conduttori, appartenenti ai due differenti strati, sovrapposti mentre presenti dei massimi quando vi siano solo cavi appartenenti ad uno solo dei due livelli

Per questo motivo se si aumenta il valore di Z_0 nei blocchi 1 e 6 separatamente si finisce per diminuire il numero di cavi sovrapposti riducendo pertanto il picco di minimo di b_3 e aumentando il picco positivo posto alla sinistra, di conseguenza aumentando il valore del coefficiente integrato su tutta la lunghezza della testa. (Si vedano le figure 6.32 e 6.33).

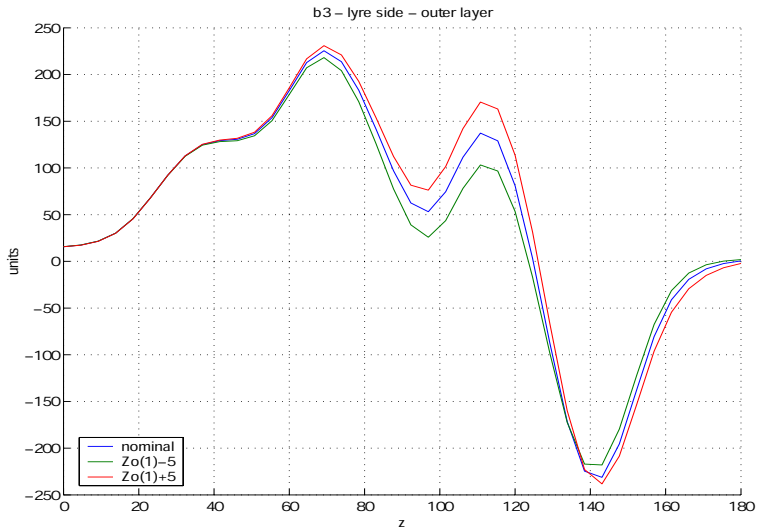


Figura 6.32 Andamento di b3 nella testa lato non connessione in funzione di Zo del blocco 1.

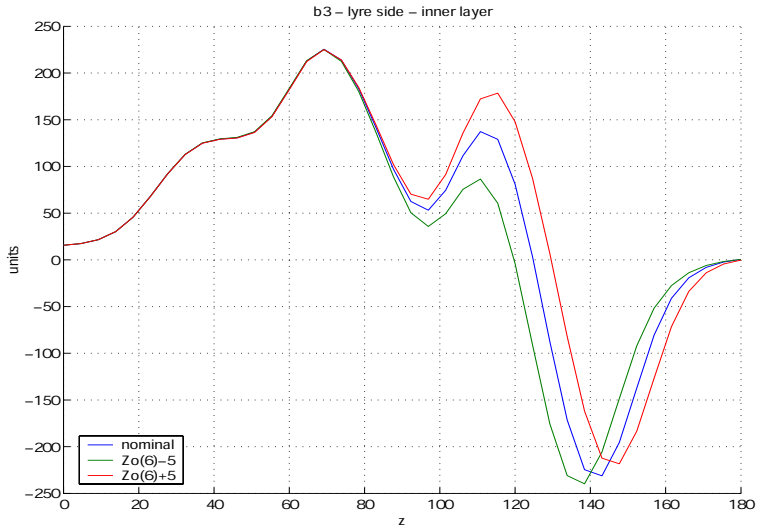


Figura 6.33 Andamento di b3 nella testa lato non connessione in funzione di Zo del blocco 6.

Il fenomeno inverso si verifica per il blocco 8&9 dove un aumento di Z_0 causa la sovrapposizione di tali blocchi con il blocco 4&5 riducendo il picco massimo di b_3 e conseguentemente il suo valore integrato.

Uno spostamento contemporaneo dei blocchi 1 e 6 verso z crescenti causa un aumento del valore integrato di b_3 poiché aumenta la superficie sottesa alla curva nella regione positiva, come mostrato in figura 6.34, mentre la regione negativa semplicemente trasla senza mutare di valore .

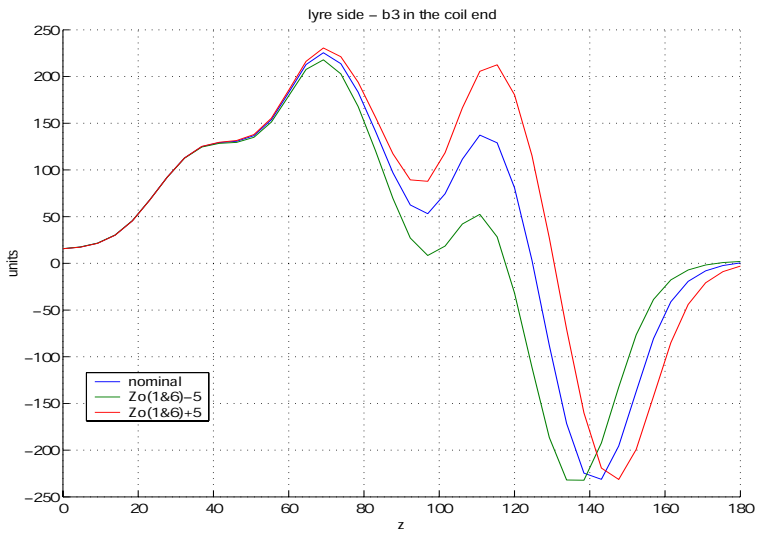


Figura 6.34 Andamento di b3 nella testa lato non connessione in funzione di Zo del blocco 1 e 6.

6.3.4 Variazione della forma degli avvolgimenti

La variazione della forma dei conduttori è ottenuta modificando i valori di B_0 e Z_0 in modo che la loro somma resti costante.

A differenza dell'analisi svolta per il peak field ove i conduttori venivano modificati tutti contemporaneamente si è scelto in questo caso di operare su un blocco di cavi alla volta per meglio individuare quelli più critici.

In tabella 6.9 e 6.10 sono riassunti tutti i calcoli effettuati nell'estremità della bobina, lato non connessione.

Nella parte superiore è rappresentato lo scarto dei valori dei multipoli calcolati per B_0 incrementato di 5 mm rispetto al caso con geometria nominale mentre in quella inferiore B_0 è ridotto di 5 mm.

Per ogni coefficiente sono presenti due valori, il primo indica la variazione totale del multipolo a seguito del cambiamento di 5 mm del parametro B_0, il secondo scritto in carattere corsivo, indica la variazione di unità multipolari per ogni millimetro di spostamento.

Tabella 6.9 Mappa di sensibilità: andamento dei multipoli b_2, b_3 e b_5 al variare di B_0 e Z_0 nella testa della bobina lato non connessione, strato interno.

STRATO INTERNO --- LATO NON CONNESSIONE

Bo+5 Zo-5

	blocco 6	blocco 7	blocco 8&9	blocco 10	blocco 11	NOMINALE
b2	0.023	0.023	0.008	0.000	-0.002	-22.199
	0.005	*0.005*	*0.002*	*0.000*	*0.000*	
b3	**-6.210**	**-4.357**	0.143	0.372	0.378	44.416
	1.242	***0.871***	*0.029*	*0.074*	*0.076*	
b5	**-1.527**	**0.921**	**0.827**	-0.035	-0.082	-8.081
	0.305	***0.184***	***0.165***	*0.007*	*0.016*	

Bo-5 Zo+5

	blocco 6	blocco 7	blocco 8&9	blocco 10	blocco 11	NOMINALE
b2	-0.022	-0.022	-0.008	0.000	0.001	-22.199
	0.004	*0.004*	*0.002*	*0.000*	*0.000*	
b3	**6.130**	**4.276**	-0.128	-0.346	-0.348	44.416
	1.226	***0.855***	*0.026*	*0.069*	*0.070*	
b5	**1.511**	**-0.892**	**-0.793**	0.031	0.074	-8.081
	0.302	***0.178***	***0.159***	*0.006*	*0.015*	

Tabella 6.10 Mappa di sensibilità: andamento dei multipoli b_2, b_3 e b_5 al variare di B_0 e Z_0 nella testa della bobina lato non connessione, strato esterno.

STRATO ESTERNO --- LATO NON CONNESSIONE

Bo+5 Zo-5

	blocco 1	blocco 2&3	blocco 4&5	NOMINALE
b2	0.089	0.071	-0.014	-22.199
	0.018	*0.014*	*0.003*	
b3	**-4.349**	**-2.897**	0.295	44.416
	0.870	***0.579***	*0.059*	
b5	-0.222	**0.513**	0.074	-8.081
	0.044	***0.103***	*0.015*	

Bo-5 Zo+5

	blocco 1	blocco 2&3	blocco 4&5	NOMINALE
b2	-0.078	-0.110	-0.025	-22.199
	0.016	*0.022*	*0.005*	
b3	**3.010**	**3.436**	0.273	44.416
	0.602	***0.687***	*0.055*	
b5	**0.605**	**-0.514**	-0.082	-8.081
	0.121	***0.103***	*0.016*	

In colonna sono indicati i blocchi responsabili della variazione di geometria mentre evidenziati in blu sono i casi più rilevanti in cui la variazione per millimetro dei coefficienti supera il valore di 0.1 unità/mm ed in rosso quelli in cui supera 1 unità/mm. L'ultima colonna invece riporta il valore dei multipoli calcolati in condizioni di geometria nominale in modo da poter meglio comprendere l'entità delle variazioni presentate nelle colonne adiacenti.

Ancora una volta il coefficiente più sensibile alle variazioni della geometria della testa è il b_3. Gli effetti sono leggermente più lievi che nel caso della traslazione dei cavi, tuttavia ciò che si verifica non è molto dissimile. La variazione della forma degli spaziatori fa sì che si vengano a creare delle zone, in prossimità del punto in cui il cavo viene curvato per tornare verso la parte dritta, in cui il il blocco di conduttori modifica la sua posizione rispetto a quelli sovrastanti o sottostanti. In questa maniera gli effetti sul multipoli non si fanno più sentire in corrispondenza della posizione longitudinale del cavo ma un po' prima poiché come si è spiegato in precedenza la posizione lungo l'asse z dei cavi non cambia.

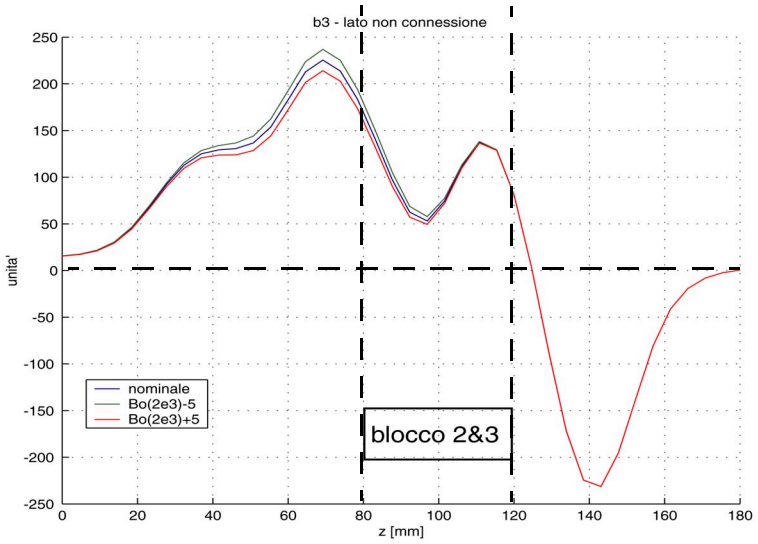


Figura 6.35 Andamento di b3 nella testa della bobina, lato non connessione, al variare di Bo Zo del blocco 2&3.

In figura 6.35 è mostrato l'effetto della variazione di forma del blocco 2&3 sull'andamento di b_3. La zona compresa fra le linee tratteggiate è quella in cui è presente fisicamente il blocco di conduttori nella sezione longitudinale. Come si può notare dal grafico, il coefficiente di sestupolo varia sensibilmente nella regione che precede la parte finale dei cavi, ossia là dove varia in maniera più marcata la forma dei conduttori (figura 6.22) e dove quindi si vengono a creare le maggiori differenze di posizione rispetto ai cavi sottostanti, nella fattispecie quelli appartenenti ai blocchi 7 e 8&9.

6.3.5 Analisi della qualità di campo lato connessione

Si vogliono ora ripetere i calcoli svolti in precedenza per lo studio della sensibilità della qualità di campo anche nel lato connessione.

La testa della bobina si presenta questa volta con una assenza di simmetria fra la sua parte destra e quella sinistra. Per questo motivo occorre definire una numerazione dei cavi differente a seconda che si considerino i conduttori da una parte o dall'altra rispetto all'asse di simmetria longitudinale e non come nel lato non connessione ove la numerazione della parte tridimensionale è unica si che il cavo occupi la prte destra o quella sinistra.

Nelle figure 6.36 e 6.37 sono indicati i numeri dei blocchi di cavi così come definiti nel file di input del modello, sviluppato per il lato connessione, in ROXIE.

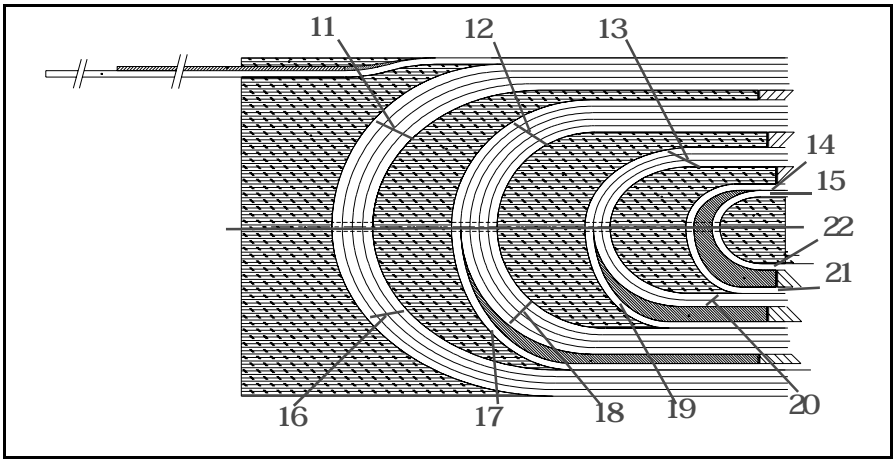


Figura 6.36 Numerazione dei blocchi di cavi dello strato interno, lato connessione.

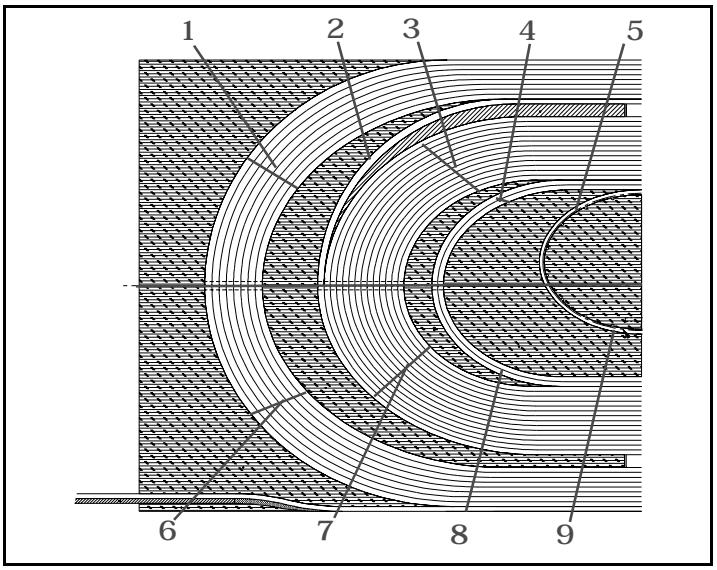


Figura 6.37 Numerazione dei blocchi di cavi dello strato esterno, lato connessione.

I parametri geometrici in gioco rimangono Beta, Z_0 e B_0 così come non cambiano le modalità con cui questi possono essere variati

6.3.6 Variazione di Beta

Nelle tabelle 6.11 e 6.12 sono riassunti tutti i calcoli effettuati nell'estremità della bobina, lato connessione, per tutti i blocchi di cavi.

Nella parte superiore è rappresentato lo scarto dei valori dei multipoli calcolati per Beta incrementato di 3° rispetto al caso con geometria nominale mentre in quella inferiore Beta è ridotto di 3°.

Per ogni coefficiente sono presenti due valori, il primo indica la variazione totale del multipolo a seguito del cambiamento di 3° dell'angolo Beta, il secondo scritto in carattere corsivo, indica la variazione di unità multipolari per ogni variazione di angolo.

In colonna sono indicati i blocchi responsabili della variazione di geometria mentre evidenziati in blu sono i casi più rilevanti in cui la variazione per grado dei coefficienti supera il valore di 0.1 unità/deg. L'ultima colonna riporta invece il valore dei multipoli calcolati in condizioni di geometria nominale in modo da poter meglio comprendere l'entità delle variazioni presentate nelle colonne adiacenti

La variazione dell'angolo Beta nei cavi di ambo gli strati non presenta una particolare influenza sui coefficienti, ad eccezione del b_3 che risulta sensibile alle modifiche apportate in particolare ai blocchi di conduttori più esterni della bobina.

L'andamento dei multipoli in questa zona conferma i risultati già riscontrati nel lato non connessione, compresa la linearità della variazione dei coefficienti al variare dell'angolo di inclinazione.

.

Tabella 6.11 Mappa di sensibilità: andamento dei multipoli b_2, b_3 e b_5 al variare di Beta nella testa della bobina lato connessione strato interno.

STRATO INTERNO --- LATO CONNESSIONE

Beta+3

	blocco 11&16	blocco 12&17&18	blocco 13&19&20	blocco 14&21	blocco 15&22	NOMINALE
b2	0.00 *0.00*	0.00 *0.00*	0.00 *0.00*	0.00 *0.00*	0.00 *0.00*	-22.72
b3	0.33 ***0.11***	1.25 ***0.42***	0.55 ***0.18***	0.09 *0.03*	0.05 *0.02*	80.14
b5	0.00 *0.00*	-0.11 *0.04*	-0.30 ***0.10***	-0.05 *0.02*	-0.03 *0.01*	-3.38

STRATO INTERNO --- LATO CONNESSIONE

Beta-3

	blocco 11&16	blocco 12&17&18	blocco 13&19&20	blocco 14&21	blocco 15&22	NOMINALE
b2	0.00 *0.00*	0.00 *0.00*	0.00 *0.00*	0.00 *0.00*	0.00 *0.00*	-22.72
b3	-0.35 ***0.12***	-1.44 ***0.48***	-0.60 ***0.20***	-0.06 *0.02*	0.00 *0.00*	80.14
b5	-0.04 *0.01*	0.10 *0.03*	0.38 ***0.13***	0.06 *0.02*	0.03 *0.01*	-3.38

Tabella 6.12 Mappa di sensibilità: andamento dei multipoli b_2, b_3 e b_5 al variare di Beta nella testa della bobina lato connessione strato esterno.

STRATO ESTERNO --- LATO CONNESSIONE
Beta+3

	blocco 1&6	blocco 2&3&7	blocco 4&8	blocco 5&9	NOMINALE
b2	0.02 *0.01*	0.02 *0.01*	0.00 *0.00*	0.00 *0.00*	-22.72
b3	0.31 ***0.10***	1.74 ***0.58***	0.12 ***0.04***	0.04 ***0.01***	80.14
b5	0.03 *0.01*	-0.09 *0.03*	-0.03 *0.01*	-0.01 *0.00*	-3.38

STRATO ESTERNO --- LATO CONNESSIONE
Beta-3

	blocco 1&6	blocco 2&3&7	blocco 4&8	blocco 5&9	NOMINALE
b2	-0.02 *0.01*	-0.02 *0.01*	0.00 *0.00*	0.00 *0.00*	-22.72
b3	-0.28 *0.09*	-1.93 ***0.64***	-0.13 *0.04*	-0.03 *0.01*	80.14
b5	-0.04 *-0.01*	0.09 *0.03*	0.04 *0.01*	0.01 *0.00*	-3.38

6.3.7 Variazione di Z_0

Nelle tabelle 6.11 e 6.12 sono riassunti tutti i calcoli effettuati nell'estremità della bobina, lato connessione. Nella parte superiore è rappresentato lo scarto dei valori dei multipoli calcolati per Z_0 incrementato di 5 mm rispetto al caso con geometria nominale mentre in quella inferiore Z_0 è ridotto di 5 mm.

Per ogni coefficiente sono presenti due valori, il primo indica la variazione totale del multipolo a seguito del cambiamento di 5 mm del parametro Z_0, il secondo scritto in carattere corsivo, indica la variazione di unità multipolari per ogni millimetro di spostamento.

In colonna sono indicati i blocchi responsabili della variazione di geometria mentre evidenziati in blu sono i casi più rilevanti in cui la variazione per millimetro dei coefficienti supera il valore di 0.1 unità/mm ed in rosso quelli in cui supera 1 unità/mm.

L'ultima colonna riporta il valore dei multipoli calcolati in condizioni di geometria nominale in modo da poter meglio comprendere l'entità delle variazioni presentate nelle colonne adiacenti.

L'analisi dei risultati, ottenuti mediante le simulazioni, conferma pienamente i dati ricavati per il lato non connessione. Il multipolo più sensibile alla traslazione è il b_3, specialmente se a variare è il parametro Z_0 dei blocchi 1&6, 11&16 e 13&19&20. Si ripresenta in pratica la medesima situazione riscontrata per l'altro lato poichè uno slittamento del blocco 11&16 o del blocco 1&6 fa sì che questi modifichino la loro posizione reciproca, in particolare varia il numero dei conduttori appartenenti a strati differenti aventi una medesima posizione lungo l'asse longitudinale z. Come è stato infatti descritto in precedenza, la presenza di conduttori sovrapposti provoca un picco negativo nell'andamento del b_3 mentre la presenza di cavi non aventi dei blocchi al di sopra o al di sotto provoca un picco positivo, come nel caso del blocco 13&19&20.

Tabella 6.13 Mappa di sensibilità: andamento dei multipoli b_2, b_3 e b_5 al variare di Zo nella testa della bobina lato connessione strato interno.

STRATO INTERNO --- LATO CONNESSIONE
Zo+5

	blocco 11&16	blocco 12&17&18	blocco 13&19&20	blocco 14&21	blocco 15&22	NOMINALE
b2	-0.10	-0.11	-0.04	-0.01	0.00	-22.72
	0.02	*0.02*	*0.01*	*0.00*	*0.00*	
b3	8.03	0.54	-5.79	-2.20	-1.99	80.14
	1.61	***0.11***	***1.16***	***0.44***	***0.40***	
b5	1.53	-2.17	-0.49	0.37	0.60	-3.38
	0.31	***0.43***	***0.10***	*0.07*	***0.12***	

STRATO INTERNO --- LATO CONNESSIONE
Zo-5

	blocco 11&16	blocco 12&17&18	blocco 13&19&20	blocco 14&21	blocco 15&22	NOMINALE
b2	0.10	0.11	0.04	0.00	-0.01	-22.72
	0.02	*0.02*	*0.01*	*0.00*	*0.00*	
b3	-8.03	-0.54	5.79	2.21	1.99	80.14
	1.61	***0.11***	***1.16***	***0.44***	***0.40***	
b5	-1.53	2.17	0.49	-0.37	-0.59	-3.38
	0.31	***0.43***	***0.10***	*0.07*	***0.12***	

Tabella 6.14 Mappa di sensibilità: andamento dei multipoli b_2, b_3 e b_5 al variare di Zo nella testa della bobina lato connessione strato esterno.

STRATO ESTERNO --- LATO CONNESSIONE
Zo+5

	blocco 1&6	blocco 2&3&7	blocco 4&8	blocco 5&9	NOMINALE
b2	-0.31	-0.35	-0.03	0.00	-22.72
	0.06	*0.07*	*0.01*	*0.00*	
b3	5.30	-2.42	-1.31	-0.69	80.14
	1.06	***0.48***	***0.26***	***0.14***	
b5	0.44	-0.90	-0.04	0.04	-3.38
	0.09	***0.18***	*0.01*	*0.01*	

STRATO ESTERNO --- LATO CONNESSIONE
Zo-5

	blocco 1&6	blocco 2&3&7	blocco 4&8	blocco 5&9	NOMINALE
b2	0.31	0.35	0.02	0.00	-22.72
	0.06	*0.07*	*0.00*	*0.00*	
b3	-5.25	2.43	1.32	0.69	80.14
	1.05	***0.49***	***0.26***	***0.14***	
b5	-0.44	0.90	0.04	-0.04	-3.38
	0.09	***0.18***	*0.01*	*0.01*	

La differente distribuzione dei cavi fra la parte destra e quella sinistra non sembra apportare modifiche sostanziali alla sensibilità dei multipoli rispetto al lato non connessione ove regnava una perfetta simmetria.

Per quel che riguarda in particolare b_3 si nota solamente una leggera riduzione dell'entità della variazione del valore, che nell'altro lato ammontava a 1.98 unità a fronte di una traslazione di 5 mm del blocco esterno dello strato inferiore, mentre ora ammonta a 1.61 unità.

Un'altra fondamentale differenza fra le due teste è costituita dalla presenza del cavo di alimentazione della bobina che fa si che i multipoli non si annullino alla fine della bobina e la presenza di un avvolgimento in più all'interno dello strato superiore, il cavo del layer jump.

In figura 6.38 si osserva l'andamento dei coefficienti di multipolo lungo tutta la testa lato connessione. Il conduttore cerchiato è il cavo che dà origine al layer jump e che non è presente nel lato non connessione. La sua presenza fa si che nella parte dritta adiacente la testa si abbia un aumento sensibile dei multipoli dispari ed in particolare di b_3 che raddoppia il suo valore come già precedentemente mostrato a pag. 79.

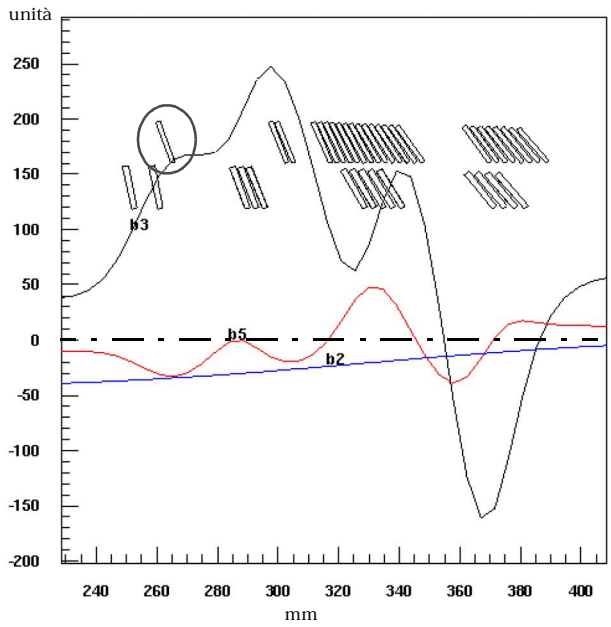


Figura 6.38 Andamento dei multipoli nella testa della bobina, lato connessione.

Il layer jump influenza inoltre l'andamento del b_3 nella testa; esso costituisce infatti un blocco senza cavi al di sotto e come tale genera un picco positivo che incrementa il valore di b_3 integrato, come mostrato in figura 6.39 dalla freccia numero 1.

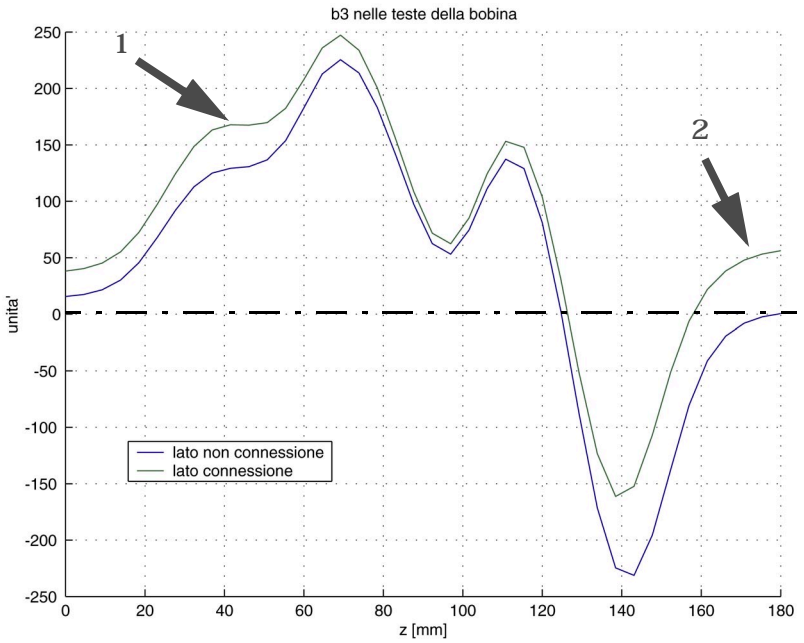


Figura 6.39 Confronto dell'andamento del b3 nelle due teste.

La freccia due evidenzia invece l'effetto della presenza dei cavi di alimentazione che proseguono dritti dalla parte dritta per uscire dalla cold mass.

6.3.8 Variazione della forma degli avvolgimenti

Nelle tabelle 6.15 e 6.16 sono riassunti tutti i calcoli effettuati nell'estremità della bobina, lato connessione.

Nella parte superiore è rappresentato lo scarto dei valori dei multipoli calcolati per B_0 incrementato di 5 mm rispetto al caso con geometria nominale mentre in quella inferiore B_0 è ridotto di 5 mm.

Per ogni coefficiente sono presenti due valori, il primo indica la variazione totale del multipolo a seguito del cambiamento di 5 mm del parametro B_0, il secondo scritto in carattere corsivo, indica la variazione di unità multipolari per ogni millimetro di spostamento.

In colonna sono indicati i blocchi responsabili della variazione di geometria mentre evidenziati in blu sono i casi più rilevanti in cui la variazione per millimetro dei coefficienti supera il valore di 0.1 unità/mm ed in rosso quelli in cui supera 1 unità/mm. L'ultima colonna invece riporta il valore dei multipoli calcolati in condizioni di geometria nominale in modo da poter meglio comprendere l'entità delle variazioni presentate nelle colonne adiacenti.

Aumentando il valore di B_0 e conseguentemente riducendo Z_0 si ottiene una forma degli avvolgimenti con maggiore ellitticità. Questo di variazione ha come conseguenza quella di ridurre il valore dei multipoli ed in particolare di b_3.

Il blocco più influente risulta ancora una volta quello più esterno dello strato inferiore poiché, un cambiamento della forma dello spaziatore su cui poggia, modifica la quantità di cavi appartenenti al blocco stesso che sono situati al di sotto dei conduttori del blocco 1&6, il più esterno dello strato superiore.

Tabella 6.15 Mappa di sensibilità: andamento dei multipoli b_2, b_3 e b_5 al variare di Bo e Zo nella testa della bobina lato connessione strato interno.

STRATO INTERNO --- LATO CONNESSIONE
BO+5 Zo-5

	blocco 11&16	blocco 12&17&18	blocco 13&19&20	blocco 14&21	blocco 15&22	NOMINALE
b2	0.02 *0.00*	0.02 *0.00*	0.01 *0.00*	0.00 *0.00*	0.00 *0.00*	-22.72
b3	-5.02 ***1.00***	-4.86 ***0.97***	-0.25 *0.05*	0.30 *0.06*	0.38 *0.08*	80.14
b5	-1.25 ***0.25***	0.65 ***0.13***	0.92 ***0.18***	0.08 *0.02*	-0.06 *0.01*	-3.38

STRATO INTERNO --- LATO CONNESSIONE
BO-5 Zo+5

	blocco 11&16	blocco 12&17&18	blocco 13&19&20	blocco 14&21	blocco 15&22	NOMINALE
b2	-0.02 *0.00*	-0.02 *0.00*	-0.01 *0.00*	0.00 *0.00*	0.00 *0.00*	-22.72
b3	4.96 ***0.99***	4.75 ***0.95***	0.23 *0.05*	-0.27 *0.05*	-0.35 *0.07*	80.14
b5	1.24 ***0.25***	-0.62 ***0.12***	-0.87 ***0.17***	-0.08 *0.02*	0.05 *0.01*	-3.38

Tabella 6.16 Mappa di sensibilità: andamento dei multipoli b_2, b_3 e b_5 al variare di Bo e Zo nella testa della bobina lato connessione strato esterno.

STRATO ESTERNO --- LATO CONNESSIONE
Bo+5 Zo-5

	blocco 1&6	blocco 2&3&7	blocco 4&8	blocco 5&9	NOMINALE
b2	0.07 *0.01*	0.09 *0.02*	0.01 *0.00*	0.00 *0.00*	-22.72
b3	-3.39 ***0.68***	-3.35 ***0.67***	-0.01 *0.00*	0.09 *0.02*	80.14
b5	-0.39 *0.08*	0.47 *0.09*	0.08 *0.02*	0.01 *0.00*	-3.38

STRATO ESTERNO --- LATO CONNESSIONE
Bo-5 Zo+5

	blocco 1&6	blocco 2&3&7	blocco 4&8	blocco 5&9	NOMINALE
b2	-0.07 *0.01*	-0.09 *0.02*	-0.01 *0.00*	0.00 *0.00*	-22.72
b3	3.35 ***0.67***	3.31 ***0.66***	0.01 *0.00*	-0.09 *0.02*	80.14
b5	0.38 *0.08*	-0.47 *0.09*	-0.08 *0.02*	-0.01 *0.00*	-3.38

6.3.9 Osservazioni

In generale si può affermare che per quel che riguarda la variazione di tutti i parametri geometrici presi in considerazione per effettuare questa analisi di sensibilità non sono riscontrabili differenze di rilievo tra il comportamento manifestato dagli avvolgimenti del lato non connessione e quelli del lato connessione.

Esistono differenze sostanziali per quel che riguarda la grandezza dei coefficienti legata principalmente alla presenza del layer jump nella zona dritta attigua alla testa della bobina del lato connessione e a quella dei cavi di collegamento fra i blocchi dei conduttori che fanno sì che i multipoli ed, in particolare il b3, siano costantemente più elevati nel lato connessione in tutta la lunghezza della testa come mostrato in figura 6.39.

Il multipolo più sensibile alla geometria della testa è il b_3 per cui sono state riscontrate le maggiori variazioni a fronte di cambiamenti dei parametri che descrivono la topologia dei cavi. Per la componente sestupolare è stata riscontrata una dipendenza evidente dal posizionamento relativo fra i cavi appartenenti ai due diversi strati che compongono la bobina: la presenza di due cavi aventi identica coordinata longitudinale ma appartenenti a strati differenti genera picchi negativi del multipolo, viceversa blocchi senza cavi presenti al di sopra o al di sotto picchi positivi.

Il b_5 risulta sensibile solo al cambiamento di Z_0 dei blocchi più esterni della bobina con variazioni dell'ordine del decimo di Tesla per millimetro di spostamento.

Il b_2 appare del tutto insensibile alle modifiche apportate alla geometria dei cavi della testa. Esso dipende essenzialmente dagli effetti di cross talk generati dalla presenza di due canali di flusso con relative bobine in un'unica struttura meccanica ed in quanto tale può essere modificato solamente modificando una sola delle due aperture.

Capitolo 7

Applicazioni pratiche del modello

Nel capitolo seguente si vuole mostrare come il modello elettromagnetico delle teste, oltre a fornire un valido strumento per accelerare i tempi di modifica del layout delle bobine durante la fase di produzione in serie, possa essere utilizzato per analizzare gli effetti della variazione di alcuni parametri geometrici e fisici a causa delle sollecitazioni subite dai conduttori durante le varie fasi di assemblaggio del magnete.

7.1 Proposta di variazione dello strato esterno della bobina nelle teste 130

7.2 Studio della compattazione dei cavi nelle teste della bobina 134

7.2.1 Teste della bobina dopo il bobinaggio 134

7.2.2 Teste della bobina dopo la polimerizzazione. . . . 138

7.2.3 Osservazioni 142

7.1 Proposta di variazione dello strato esterno della bobina nelle teste

Una immediata applicazione del modello elettromagnetico sviluppato è rappresentata da una proposta di modifica del layout dello strato esterno della bobina nella zona delle teste.

Dai calcoli effettuati, emerge che a fronte di uno spostamento dei conduttori 4 e 5 dello strato esterno, lato non connessione, nella direzione che porta questi ad allontanarsi dai cavi successivi, si ottiene una riduzione sensibile del peak field ed un aumento consistente del margine di sicurezza nei confronti del quench.

Questo caso è stato preso in esame poiché, nelle misure effettuate sui primi prototipi di dipoli, si è evidenziata una certa criticità al quench nei conduttori più interni dello strato esterno.

Il cambiamento coinvolge lo spaziatore su cui poggiano i primi due avvolgimenti dello strato esterno e lo spaziatore a mezzaluna che divide questo dai successivi cavi (figura 7.1).

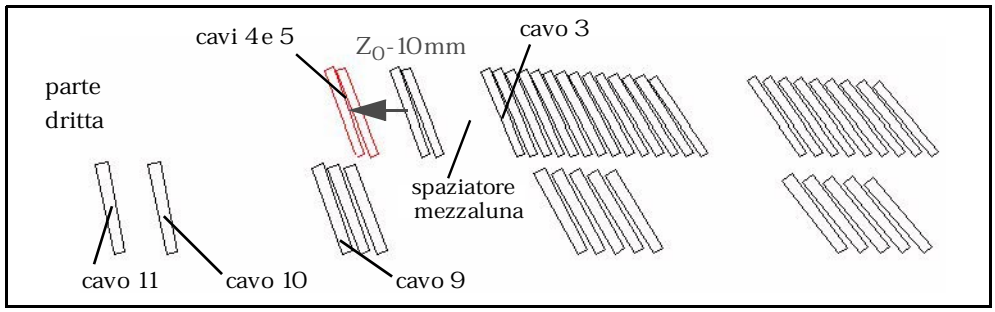


Figura 7.1 Variazione di Zo dei conduttori 4 e 5 pari a -10 mm

Inspessendo lo spaziatore a mezzaluna modificandone solo la superficie interna si ottiene di allontanare ulteriormente i cavi 4 e 5 dal cavo 3 riducendo in questa maniera il peak field. Se la traslazione dei conduttori fosse di 10 mm si otterrebbero le variazioni di campo di picco riportate in tabella 7.1.

Tabella 7.1 Variazione del peak field nei cavi presi in esame a seguito del cambiamento di -10 mm del parametro Z_0 del blocco 4&5.

	cavo 3	**cavo 4**	**cavo 5**	**cavo 9**	**cavo 10**	**cavo 11**
variazioni del peak field [T]	+0.14	-0.45	-0.42	-0.14	+0.03	<0.01

La diminuzione del peak field risulta evidente, 0.4 T, nei cavi interessati dallo spostamento, il 4 ed il 5, mentre un leggero incremento dell'ordine del decimo di Tesla è registrato nel cavo 3. I conduttori dello strato interno non sembrano particolarmente influenzati e comunque il cavo 9 che è il più prossimo alla zona di cambiamento, presenta una diminuzione del campo di picco di un decimo di Tesla circa.

La massima variazione concessa dalla geometria degli avvolgimenti sarebbe di -14 mm. Tuttavia una modifica del genere finirebbe per annullare completamente il valore di Z_0 dei cavi 4 e 5 che si troverebbero divisi immediatamente dopo la fine della sezione dritta del magnete, la qual cosa crea dei problemi di bobinaggio e di tensioni applicate sui cavi.

Si è studiato inoltre il comportamento della qualità di campo a seguito di questa variazione in modo da verificare che ciò non comporti dei peggioramenti dei coefficienti di multipolo.

In tabella vengono comparati i valori dei multipoli in condizioni nominali con quelli calcolati con il layout modificato.

Tabella 7.2 Valore dei coefficienti di multipolo in condizioni di geometria nominale e dopo la variazione dello strato esterno del lato non connessione

	b2	**b3**	**b5**
geometria nominale	-22.199	44.416	-8.081
geometria modificata	-22.172	47.395	-8.036

Come si può notare non vi sono variazioni di rilievo salvo che per il b_3 ove si registrano 3 unità di multipolo di incremento che non costituiscono tuttavia una quantità allarmante se rapportata alle 44 unità di componente sestupolare presenti in condizioni nominali.

In figura 7.2 viene presentato l'aspetto della testa della bobina prima e dopo la modifica degli spaziatori dello strato superiore così come è stato elaborato dal modello sviluppato in ROXIE.

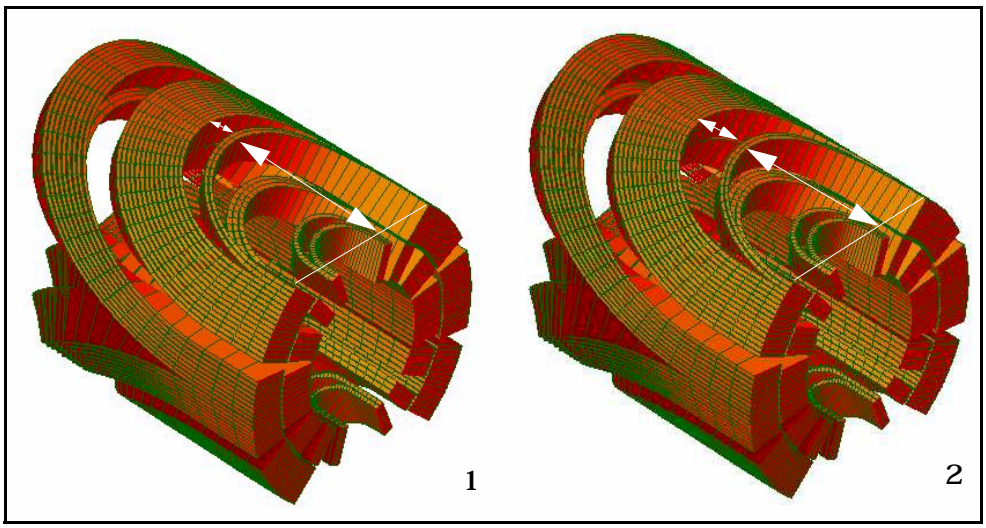


Figura 7.2 Aspetto della bobina lato non connessione elaborato in ROXIE: (1)layout attuale dei conduttori; (2)layout modificato con lo spostamento di 10 mm dei conduttori più interni dello strato superiore.

Al fine di conservare una certa simmetria fra le due estremità del magnete si propone di applicare la medesima modifica anche al lato connessione.

In questo caso il blocco di cavi movimentato è il blocco 4&8, anch'esso separato dai successivi mediante lo spaziatore a mezzaluna così come mostrato in figura 7.3.

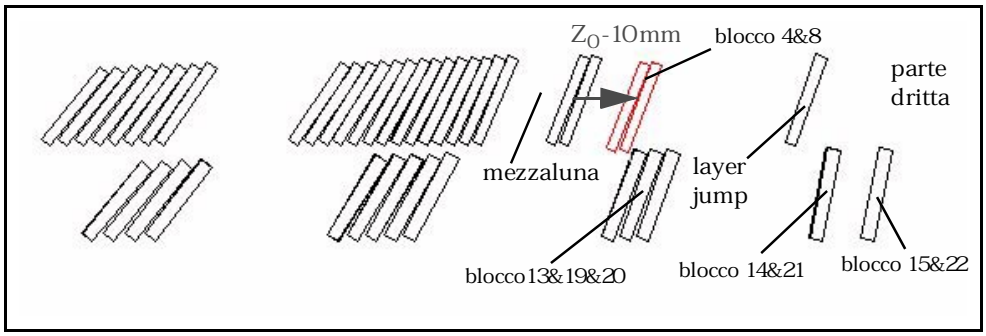


Figura 7.3 Variazione di Zo del blocco 4, lato connessione, pari a -10 mm

La principale differenza rispetto al caso precedente stà nel fatto che ora i cavi appartenenti al blocco 4&8 non sono più gli avvolgimenti più interni dello strato superiore a causa della presenza del cavo che darà origine al layer jump.

Le variazioni del peak field nei cavi presi in esame sono riassunte in tabella 7.3

Tabella 7.3 Variazione del peak field nei cavi presi in esame a seguito del cambiamento di -10 mm del parametro Z_0 del blocco 4&8.

	layer jump	**blocco 4&8**	**blocco 13&19&20**	**blocco 14&21**	**blocco 15&22**
variazioni del peak field [T]	+0.05	-0.45	-0.10	+0.03	<0.01

Analogamente al lato non connessione si riscontra una sensibile diminuzione del campo di picco nei cavi soggetti alla traslazione mentre nel cavo che origina il layer jump si riscontra un lieve aumento di circa 0.05 T dovuto all'avvicinamento dei conduttori. I blocchi dello strato interno presentano variazioni lievi che portano alla diminuzione del peak field nei cavi più prossimi al blocco 4&8, ossia il blocco 13&19&20 e dei lievi aumenti negli avvolgimenti più interni.

L'analisi della qualità di campo, nell'estremità lato connessione, a seguito della variazione dello strato esterno ha prodotto risultati del tutto identici a quelli individuati nell'altra testa, confermando sostanzialmente una stabilità dei multipoli (tabella 7.4). Solo b_3 presenta un aumento di tre unità di multipolo, praticamente trascurabile rispetto alla magnitutdine del contributo sestupolare che ammonta ad una ottantina di unità.

Tabella 7.4 Valore dei coefficienti di multipolo in condizioni di geometria nominale e dopo la variazione dello strato esterno del lato connessione

	b2	b3	b4
geometria nominale	-22.57	81.49	-2.92
geometria modificata	-22.52	84.15	-2.84

In figura 7.4 viene presentato l'aspetto della testa della bobina prima e dopo la modifica degli spaziatori dello strato superiore così come è stato elaborato dal modello sviluppato in ROXIE.

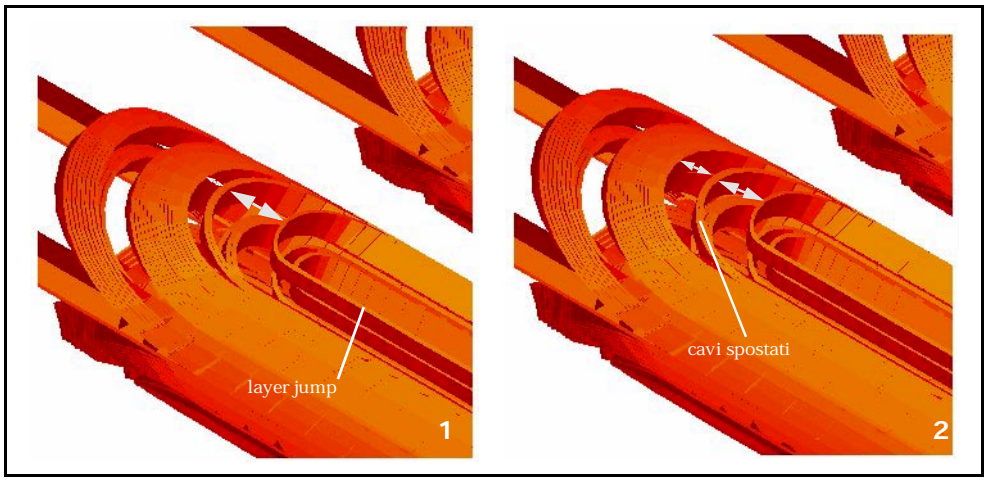


Figura 7.4 Aspetto della bobina lato connessione elaborato in ROXIE: (1)layout attuale dei conduttori; (2)layout modificato con lo spostamento di 10 mm dei conduttori 4&8 dello strato superiore.

Questa proposta di variazione dello strato superiore della bobina è stata presentata durante un "bending magnets working group" svoltosi al CERN ed è stata considerata come una delle possibili strade da intraprendere nell'eventualità che durante la produzione di serie emergesse la necessità di incrementare il margine di sicurezza per il quench.

7.2 Studio della compattazione dei cavi nelle teste della bobina

Durante la fase di progettazione della bobina del dipolo principale di LHC sono state formulate delle ipotesi circa la comprimibilità dei cavi in fase di assemblaggio del magnete. Tali studi hanno permesso di stimare l'effettivo ingombro dei conduttori in modo che alla fine di tutti i processi di montaggio la bobina abbia esattamente la configurazione geometrica ottimale sia per la stabilità del campo magnetico e sia per la prevenzione dei quench.

Dalle misure effettuate sulle prime bobine utilizzate nei magneti della preserie è emerso come la lunghezza effettiva della testa vari e si discosti leggermente dai disegni.

Nell'ottica di stimare l'influenza di queste deviazioni dal progetto sulla qualità di campo e sul peak field si è deciso di utilizzare il modello elettromagnetico sviluppato in ROXIE, inserendo in input la geometria misurata nella pratica sulle bobine prodotte, per valutare lo scostamento dei parametri fisici rispetto ai valori nominali.

7.2.1 Teste della bobina dopo il bobinaggio

Il primo passo da effettuarsi per creare una bobina è, come si è visto nel capitolo 2, il bobinaggio propriamente detto. Durante questo processo i cavi superconduttori vengono avvolti attorno agli spaziatori mediante una opportuna macchina in grado di fornire un pretensionamento che permetta la messa in tensione dei cavi.

La prima parte di questa applicazione del modello è proprio dedicata allo studio della compattazione dei conduttori durante il bobinaggio. Per fare ciò ci si è avvalsi della collaborazione di una delle tre ditte incaricate di produrre le bobine per il dipolo principale di LHC, ANSALDO di Genova. [32]

In tabella 7.5 sono riportati gli spessori dei blocchi di cavi dello strato interno, misurati sul lato inferiore della bobina, dopo il bobinaggio. La prima colonna indica la sigla della bobina realizzata mentre nelle altre colonne sono riportate le misure dei blocchi di ambo le teste espresse in millimetri, misurate lungo l'asse longitudinale del magnete.

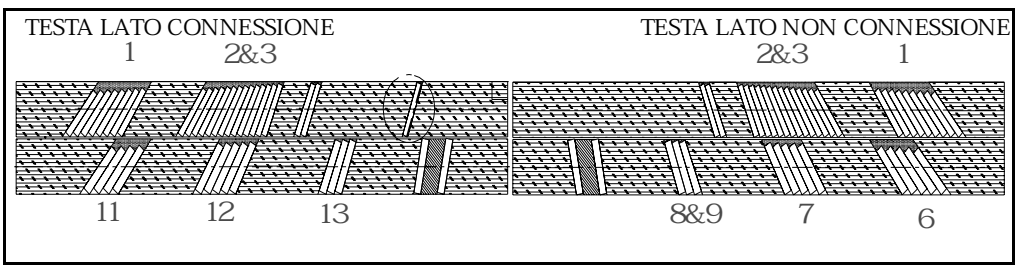


Figura 7.5 Numerazione dei blocchi di conduttori nelle due teste della bobina

Tabella 7.5 Dimensione dei blocchi dello strato interno delle teste bobinate da ANSALDO.

	LATO NON CONNESSIONE			LATO CONNESSIONE		
MAGNETE	**BLOCCO 6 [mm]**	**BLOCCO 7 [mm]**	**BLOCCO 8&9 [mm]**	**BLOCCO 11 [mm]**	**BLOCCO 12 [mm]**	**BLOCCO 13 [mm]**
I014	14.70	14.30	7.90	13.00	16.20	8.90
I011	15.40	14.10	7.00	11.50	14.70	8.70
I010	15.00	14.00	6.60	11.80	14.70	7.50
I009	15.40	14.60	7.80	12.90	14.40	8.60
valore medio	15.13	14.25	7.33	12.30	15.00	8.43
valore nominale	17.98	15.79	8.72	14.29	15.79	8.72
variazione	-2.86	-1.54	-1.40	-1.99	-0.79	-0.30

Nelle ultime tre righe è possibile trovare il valore mediato su tutte le bobine di ANSALDO degli spessori di ogni blocco, il corrispondente valore nominale e lo scarto fra i due valori.

Nella totalità dei casi si è di fronte ad una compressione dei cavi maggiore di quella stimata nel progetto, in particolare nel lato non connessione ove complessivamente lo strato inferiore della bobina risulta più corto di 5.8 mm.

Le misure pervenute relative allo strato esterno risultano lacunose e di non facile interpretazione. Per questo motivo si è stimata la compattazione dei blocchi calcolando la variazione media di spessore per ogni singolo cavo dello strato interno e la si è utilizzata per calcolare le dimensioni dei blocchi dello strano esterno.

Tabella 7.6 Stima delle dimensione dei blocchi dello strato esterno delle teste bobinate da ANSALDO.

	LATO NON CONNESSIONE		LATO CONNESSIONE	
MAGNETE	**BLOCCO 1 [mm]**	**BLOCCO 2&3 [mm]**	**BLOCCO 1 [mm]**	**BLOCCO 2&3 [mm]**
valore medio	20.78	26.95	19.87	29.61
valore nominale	24.83	33.25	21.95	33.25
variazione	-4.05	-6.30	-2.08	-3.64

Come si può notare dalle stime effettuate in tabella 7.6, moltiplicando la compressione media di ogni cavo dello strato interno per il numero di cavi di ogni blocco di quello esterno, nel lato non connessione si arriva ad avere una bobina di 10.35 mm più corta della lunghezza nominale. Si osservi che in questa maniera si sovrastima il valore della compressione dei blocchi poiché i cavi appartenenti allo strato superiore sono di spessore minore.

Si procede ora ad inserire queste dimensioni dei blocchi all'interno del modello elettromagnetico. L'analisi viene svolta solo per il lato non connessione ove sono riscontrate le maggiori variazioni poiché, come si è visto nel capitolo riguardante l'analisi di sensibilità, non vi sono grosse differenze di comportamento fra le due teste della bobina.

Per prima cosa si procede a calcolare il valore integrato dei multipoli lungo tutta l'estremità della bobina e lo si confronta con i valori ottenuti dal modello in condizioni di geometria nominale (tabella 7.7).

Tabella 7.7 Confronto dei multipoli nella testa lato non connessione nelle condizioni di bobina con geometria nominale ed in quelle riscontrate sulle bobine ANSALDO dopo l'operazione di bobinaggio.

	MULTIPOLI NOMINALI	MULTIPOLI ANSALDO	scarto
b1	5824.46	5665.79	-158.67
b2	-22.22	-21.58	0.64
b3	44.70	36.65	-8.05
b4	-0.68	-0.66	0.02
b5	-8.08	-9.39	-1.30
b6	-0.01	-0.01	0.00
b7	-0.27	-0.38	-0.11
b8	0.00	0.00	0.00
b9	0.10	0.08	-0.02
b10	0.00	0.00	0.00
b11	0.18	0.17	-0.01

I coefficienti che subiscono percentualmente la variazione maggiore sono il b_3 ed il b_5. Il coefficiente di sestupolo subisce una diminuzione in valore assoluto di 8.05 unità su 44.70 unità di valore nominale mentre il coefficiente di decapolo aumenta in valore assoluto di 1.30 unità passando da -8.08 a -9.39 unità di multipolo.

In figura 7.6 viene mostrato l'andamento dei multipoli b_3 e b_5 sia nel caso in cui si consideri la geometria nominale sia che si introduca la geometria ricavata dalle misure effettuate. Risulta possibile in questo modo localizzare le zone di maggior variazione che come era d'obbligo attendersi si concentrano nella zona centrale del grafico, in corrispondenza del blocco 2&3 che, essendo quello contenente il maggior numero di cavi, mostra la maggior compressione, -6.30 mm rispetto allo spessore nominale.

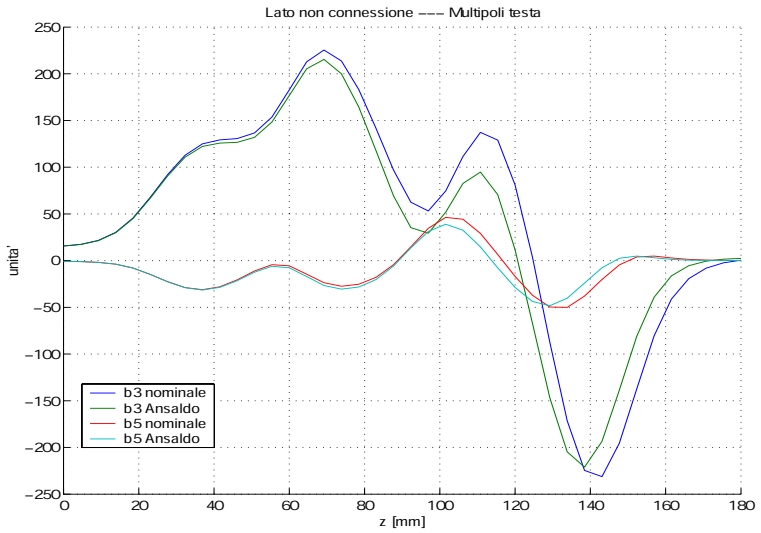


Figura 7.6 Confronto dei multipoli nella testa lato non connessione nelle condizioni di bobina con geometria nominale ed in quelle riscontrate sulle bobine ANSALDO dopo l'operazione di bobinaggio.

Se ora si procede a riscalare i coefficienti come è stato fatto nel capitolo precedente, diventa possibile confrontarli direttamente con i valori misurati a freddo sui primi magneti giunti al CERN.

Tabella 7.8 Confronto fra i multipoli calcolati dal modello in condizioni di geometria nominale e modificata con i valori misurati a freddo.

LATO NON CONNESSIONE	b2	b3	b5
MODELLO (nominale)	23.22	19.00	-2.32
MODELLO (modificato)	23.09	17.29	-2.61
MISURE A FREDDO	10.82	8.28	-1.52
2x σ	*[1.75]*	*[0.88]*	*[1.38]*

In tabella 7.8 vengono riassunti i valori dei multipoli calcolati dal modello sia in condizioni di geometria nominale sia utilizzando i parametri geometrici misurati sui dipoli bobinati da ANSALDO, riscalati su tutta la lunghezza delle bobina di misura, 1150mm; questi vengono poi confrontati con le misure a freddo.

Il tenere in conto della compressione delle teste della bobina consente di avvicinare il b_3 calcolato al valore reale seppur senza riuscire a colmare il divario esistente. Nel caso di b_5 si registra una lieve crescita della differenza fra il coefficiente calcolato e quello misurato senza però uscire dalla finestra di incertezza che circonda il valore reale medio.

Lo scostamento della lunghezza della testa dal valore nominale non influenza in maniera importante il margine di sicurezza per il quench poiché i cavi critici per questo fenomeno sono quelli più interni in cui la variazione di spessore risulta praticamente trascurabile, restando inoltre invariata la distanza reciproca fra i blocchi appartenenti allo stesso strato della bobina.

A titolo esemplificativo in figura 7.7 viene mostrato l'andamento del peak field nel conduttore 3, il primo cavo del blocco 2&3, in cui non sono riscontrabili variazioni di rilievo.

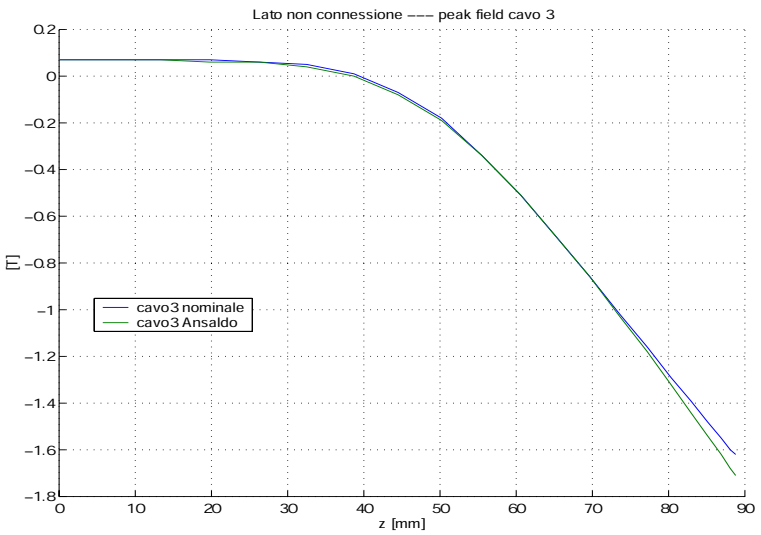


Figura 7.7 Andamento del peak filed nel cavo 3

7.2.2 Teste della bobina dopo la polimerizzazione

La fase successiva al bobinaggio è la polimerizzazione o cottura. La bobina viene messa sotto pressione e portata ad una temperatura di circa 185°C al fine di far reagire il collante epossidico presente sui nastri isolanti dei cavi e sugli spaziatori, conferendo così agli avvolgimenti una consistenza strutturale.

Per poter valutare gli effetti di questo processo sulla dimensione delle teste della bobina, è stato chiesto ad un'altra ditta incaricata della produzione delle bobine, NOELL, di effettuare delle misure del tutto analoghe a quelle effettuate in precedenza per il bobinaggio.

In tabella 7.9 sono riportati gli spessori dei blocchi di cavi dello strato interno, misurati sul lato inferiore della bobina, dopo la polimerizzazione. La prima colonna indica la sigla della bobina realizzata mentre nelle altre colonne sono riportate le misure dei blocchi di ambo le teste espresse in millimetri, misurate lungo l'asse longitudinale del magnete.

Tabella 7.9 Dimensione dei blocchi dello strato interno delle teste bobinate e polimerizzate da NOELL.

	LATO NON CONNESSIONE			LATO CONNESSIONE		
MAGNETE	**BLOCCO 6 [mm]**	**BLOCCO 7 [mm]**	**BLOCCO 8&9 [mm]**	**BLOCCO 11 [mm]**	**BLOCCO 12 [mm]**	**BLOCCO 13 [mm]**
NO110	15.20	13.50	7.28	12.20	14.80	9.10
NO111	15.60	14.40	6.30	12.55	13.70	9.07
NO113	15.94	14.78	5.93	12.81	14.01	8.91
NO114	16.44	14.77	7.45	12.16	13.13	8.42
NO115	17.40	14.16	6.93	-	-	-
NO116	16.12	15.05	6.90	13.31	16.20	9.71
NO117	16.90	14.75	5.86	12.90	14.45	7.81
NO118	18.27	15.82	7.31	14.05	12.93	8.89
NO119	18.21	16.47	8.30	14.23	15.63	7.57
valore medio	16.55	14.72	6.92	13.03	14.36	8.69
valore nominale	17.98	15.79	8.72	14.29	15.79	8.72
variazione	-1.43	-1.08	-1.80	-1.26	-1.43	-0.04

Nelle ultime tre righe è possibile trovare il valore mediato su tutte le bobine di NOELL degli spessori di ogni blocco, il corrispondente valore nominale e lo scarto fra i due valori.

Poiché le misure sono state effettuate su bobine in cui i due strati erano stati già saldati mediante il layer jump, non è possibile ottenere nessuna informazione riguardante lo strato superiore. Si è proceduto quindi, esattamente come nel caso precedente, a stimare la compressione utilizzando la compressione media pro cavo misurata nello strato interno, moltiplicandola per il numero di conduttori appartenenti a ciascun blocco dello strato superiore (tabella 7.10).

Tabella 7.10 Stima delle dimensione dei blocchi dello strato esterno delle teste bobinate e polimerizzate da NOELL

	LATO NON CONNESSIONE		LATO CONNESSIONE	
MAGNETE	**BLOCCO 1 [mm]**	**BLOCCO 2&3 [mm]**	**BLOCCO 1 [mm]**	**BLOCCO 2&3 [mm]**
valore medio	21.86	28.63	20.11	30.03
valore nominale	24.83	33.25	21.95	33.25
variazione	-2.97	-4.62	-1.84	-3.22

Esattamente come verificato per le bobine di ANSALDO anche in questo caso si ha una maggior compressione del lato non connessione ove per altro è minore il

numero di spaziatori e chips, ritenuti indeformabili. Lo strato superiore della bobina è stimato accorciarsi di circa 7.59 mm dal lato non connessione contro i 5.06 mm del lato connessione.

Si procede ora ad inserire queste dimensioni dei blocchi all'interno del modello elettromagnetico. L'analisi viene svolta solo per il lato non connessione ove sono riscontrate le maggiori variazioni poiché, come si è visto nel capitolo riguardante l'analisi di sensibilità, non vi sono grosse differenze di comportamento fra le due teste della bobina.

Tabella 7.11 Confronto dei multipoli nella testa lato non connessione nelle condizioni di bobina con geometria nominale ed in quelle riscontrate sulle bobine NOELL dopo l'operazione di bobinaggio e polimerizzazione.

	MULTIPOLI NOMINALI	MULTIPOLI NOELL	scarto
b1	5824.46	5698.93	-125.53
b2	-22.22	-21.72	0.50
b3	44.70	37.59	-7.11
b4	-0.68	-0.66	0.02
b5	-8.08	-8.97	-0.89
b6	-0.01	-0.01	0.00
b7	-0.27	-0.27	0.00
b8	0.00	0.00	0.00
b9	0.10	0.08	-0.02
b10	0.00	0.00	0.00
b11	0.18	0.17	-0.01

Per prima cosa si procede a calcolare il valore integrato dei multipoli lungo tutta l'estremità della bobina e lo si confronta con i valori ottenuti dal modello in condizioni di geometria nominale (tabella 7.11).

I multipoli maggiormente influenzati dalla compattazione delle teste appaiono, ancora una volta, il b_3 e il b_5. Il b3 riduce il suo valore di 7.11 unità assestandosi a 37.59 unità di multipolo mentre b_5 passa da -8.08 a -8.97 unità.

In figura 7.8 viene confrontato l'andamento di b_3 e b_5 nelle condizioni di geometria nominale e nelle condizioni misurate sulle bobine NOELL dopo la polimerizzazione. Si riscontrano all'incirca le medesime variazioni individuate nel caso delle bobine ANSALDO, ossia un maggior scostamento nella zona centrale del grafico, in corrispondenza del blocco più compresso, il blocco 2&3 dello strato esterno.

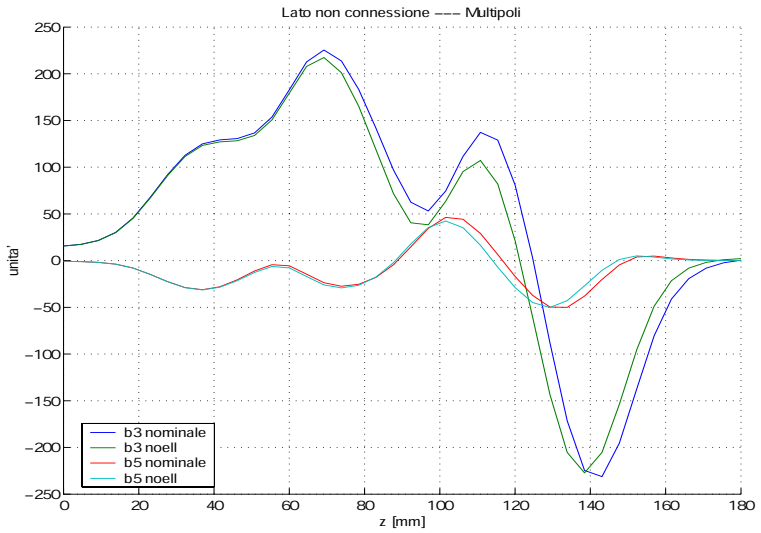


Figura 7.8 Confronto dei multipoli nella testa lato non connessione nelle condizioni di bobina con geometria nominale ed in quelle riscontrate sulle bobine NOELL dopo l'operazione di bobinaggio e polimerizzazione.

Esattamente come è stato fatto in precedenza per le bobine di ANSALDO, si procede ora a riscalare i coefficienti in modo da rendere possibile il confronto diretto con i valori misurati a freddo sui primi magneti giunti al CERN.

Tabella 7.12 Confronto fra i multipoli calcolati dal modello in condizioni di geometria nominale e modificata con i valori misurati a freddo.

LATO NON CONNESSIONE	b2	b3	b5
MODELLO (nominale)	23.22	19.00	-2.32
MODELLO (modificato)	23.12	17.50	-2.52
MISURE A FREDDO	10.82	8.28	-1.52
2x σ	*[1.75]*	*[0.88]*	*[1.38]*

In tabella 7.12 vengono riassunti i valori dei multipoli calcolati dal modello sia in condizioni di geometria nominale sia utilizzando i parametri geometrici misurati sui dipoli bobinati e polimerizzati da NOELL, riscalati su tutta la lunghezza delle bobina di misura, 1150mm; questi vengono poi confrontati con le misure a freddo.

Gli effetti prodotti dalla correzione della geometria delle teste all'interno del modello sono grosso modo gli stessi riscontrati nel paragrafo precedente, ossia un lieve riavvicinamento del b_3 al valore misurato ed un leggero peggioramento per b_5 che resta tuttavia molto prossimo al suo valore reale.

Per quel che riguarda il problema del peak field per la prevenzione dei quench si rimanda alle considerazioni fatte in precedenza per le bobine di ANSALDO.

7.2.3 Osservazioni

Sebbene i risultati ottenuti dall'analisi delle bobine di ANSALDO e da quelle polimerizzate di NOELL siano molto simili non è tuttavia possibile attuare uno studio comparato per stimare l'effetto della sola polimerizzazione o valutare l'omogeneità fra le due ditte produttrici. Si sta infatti ragionando su bobine prodotte da due differenti ditte, misurate in differenti istanti della catena produttiva. Al momento non è possibile riuscire ad ottenere i due tipi differenti di misura dal medesimo costruttore, tuttavia non è da escludersi per il futuro.

In sostanza non appaiono conseguenze di notevole gravità dovute a queste variazioni del valore medio della lunghezza della testa per quel che riguarda il margine di sicurezza per il quench mentre vanno valutate le variazioni di b_3 e b_5 per verificare se siano sufficienti a far uscire i coefficienti dalle finestre di valori imposte dalla fisica dell'acceleratore.

Conclusioni

Scopo dichiarato del lavoro era la creazione di un modello tridimensionale in grado di svolgere un'analisi elettromagnetica delle zone finali delle bobine nel dipolo principale di LHC.

Il programma è stato realizzato utilizzando ROXIE, un software sviluppato al CERN, ed è stato validato confrontandone i risultati con le misure della qualità di campo effettuate, sia a temperatura ambiente sia in condizioni operazionali, sui magneti fino ad ora prodotti.

Un buon accordo generale è emerso dalla comparazione dei dati, sebbene nel lato non connessione permangano delle differenze sensibili di valore per il multipolo b_3. Tali discrepanze possono essere imputate a fenomeni che non sono stati presi in considerazione durante la fase di sviluppo del modello.

Sebbene l'aderenza con la realtà debba ancora essere migliorata si è potuto utilizzare il codice per svolgere un'analisi di sensibilità del campo magnetico perturbando la forma degli spaziatori delle teste. Variando infatti i parametri geometrici nell'intorno del loro valore nominale è stato possibile individuare i blocchi di conduttori più sensibili alle deformazioni della bobina e vedere l'andamento dei coefficienti multipolari e del campo magnetico massimo all'interno dei cavi stessi a seguito di tali modifiche.

Le matrici di sensibilità redatte sia per i multipoli che per il peak field forniscono un utile strumento per accelerare i tempi necessari alla variazione del layout delle teste delle bobine nel caso se ne presentasse la necessità durante la fase di produzione in serie dei dipoli.

Da una prima analisi delle suddette mappe di sensibilità è emersa una possibile modifica del progetto dello strato esterno delle teste. Tale modifica consentirebbe di aumentare il margine di sicurezza per il quench in quei cavi che in passato sono stati considerati critici per questo tipo di fenomeno. Questa proposta di modifica è stata presentata ai responsabili del progetto del dipolo e giudicata interessante.

Un'interessante applicazione del modello è stato lo studio dell'effetto delle deformazioni delle teste delle bobine a seguito del bobinaggio e della polimerizzazione. Grazie alla collaborazione delle ditte incaricate dell'assemblaggio dei dipoli della preserie è stato possibile stimare l'influenza delle deformazioni causate da questi processi della produzione sulla stabilità del campo magnetico.

Si vogliono ora evidenziare dei possibili sviluppi del modello al fine di migliorarne le prestazioni:

- risulta necessario avviare un'indagine al fine di poter individuare ed inserire nel codice tutti i parametri fisici fino ad ora trascurati che sono

all'origine della discordanza, rispetto alle misure, del valore del b_3 nelle teste lato non connessione;

- al fine di ottenere una analisi completa del comportamento delle teste risulta importante accoppiare il modello elettromagnetico con un modello meccanico in grado di tenere in conto la deformazione dei cavi dovuta alle forze di Lorentz generate durante il funzionamento del magnete ed alla compressione applicata durante il bobinaggio e la polimerizzazione. In quest'ottica è stata preparata una campagna di test da effettuare sui conduttori nei prossimi mesi per cercare una correlazione empirica che descriva l'andamento dello spessore dei cavi in funzione del raggio di curvatura e dell'angolo di inclinazione.

Appendice A

Analisi delle misure di qualità di campo

Qa Misure a caldo della qualità di campo 146
Qa.a Misure sui prototipi 146
Qa.b Misure sui magneti della preserie 148
Qb Misure a freddo della qualità di campo. 150
Qb.a Misure SERIE 1 151
Qb.b Misure SERIE 2 151
Qb.c Misure SERIE 3 152

0.a Misure a caldo della qualità di campo

Le *misure a caldo* vengono effettuate a temperatura ambiente e per questo motivo il dipolo non può essere alimentato con corrente nominale, poiché i superconduttori sono in fase resistiva, ma viene utilizzata una corrente di 20A.

Inoltre in questa fase della produzione le bobine delle due aperture non sono ancora collegate fra loro per cui viene alimentata una sola bobina per volta.

Il principale vantaggio di questo tipo di misura risiede nel fatto che le bobine possano essere testate immediatamente dopo la fine del collaraggio, direttamente nel sito di produzione, senza dover attendere la fine dell'assemblaggio e la messa in temperatura della cold mass.

Questa caratteristica può diventare determinante in fase di produzione di serie poiché grazie a questo genere di analisi è possibile risalire ad eventuali difetti di bobinaggio sistematici e correggere le procedure di produzione in tempo reale evitando che l'errore si propaghi a numerosi magneti.

La qualità di campo si esprime scomponendo in serie di potenze il campo magnetico misurate nel centro del canale di fascio. I coefficienti della serie indicano il contributo fornito dai multipoli di ordine superiore al dipolo b_1. [9]

$$B(x,y) = B_y + i \cdot (B_x) = 10^{-4} B_1 \sum_{n=1}^{\infty} (b_n + i \cdot a_n) \cdot \left[\frac{x+iy}{Rref}\right]^{(n-1)} \qquad (A.1)$$

Il campo viene quindi sviluppato intorno al valore di B_1, il campo principale, come mostrato nell' equazione (A.1). Esistono tuttavia due possibili campi di riferimento B_1, il *campo centrale* che il campo magnetico misurato nella parte dritta del magnete, ed il *campo locale* che è invece quello mediato lungo ogni singola bobina di misura lunga 750mm.

Le misure a caldo sui primi dipoli giunti al CERN sono state effettuate con entrambi i metodi sopra descritti, in particolare i coefficienti dei prototipi sono stati riferiti al campo centrale mentre quelli dei dipoli della preserie a quello locale. Il passaggio dai valori misurati in un sistema all'altro è sempre possibile mediante un fattore di scala.

0.a.a Misure sui prototipi

Si vogliono ora riportare i valori ottenuti dalle misure effettuate sulle teste delle bobine dei prototipi sviluppati al CERN. Questi dati non sono stati utilizzati nello calcolo del valore medio dei multipoli utilizzato in questo lavoro di tesi per il confronto con i risultati del modello poiché la configurazione della bobina è differente dalla versione definitiva scelta per i magneti della serie. In particolare nelle teste non è ancora presente lo spaziatore a mezzaluna che separa i primi due avvolgimenti dello strato superiore dai successivi.

Tabella 0.1 Misura dei multipoli nelle teste lato connessione dei prototipi di dipolo.

PROTOTIPI --- LATO CONNESSIONE				
	b1	b2	b3	b5
Bobina 1	6063.82	-5.75	21.83	-2.98
Bobina 2	5924.21	-1.50	23.98	-2.40
Bobina 3	6273.44	-3.23	21.69	-2.78
Bobina 4	6265.03	1.15	25.29	-1.90
Bobina 5	6382.51	-1.59	24.94	-1.84
Bobina 6	5945.06	-2.68	27.11	-2.04
Bobina 7	6011.26	-3.38	17.67	-2.40
Bobina 8	6125.88	-2.06	12.29	-3.44
Bobina 9	6202.22	-2.87	22.23	-1.50
Bobina 10	5919.46	0.71	22.87	-1.83
MEDIA	6111.29	-2.12	21.99	-2.31
σ	156.10	2.01	4.26	0.61

multipoli riferiti al campo centrale

Tabella 0.2 Misura dei multipoli nelle teste lato non connessione dei prototipi di dipolo.

PROTOTIPI --- LATO NON CONNESSIONE				
	b1	b2	b3	b5
Bobina 1	6082.82	0.02	-1.28	-2.44
Bobina 2	6259.18	2.61	-2.20	-2.48
Bobina 3	5868.22	-0.60	-1.56	-1.98
Bobina 4	5747.22	0.32	-1.90	-2.04
Bobina 5	5880.86	-1.24	-2.08	-2.36
Bobina 6	6259.96	1.04	0.79	-2.13
Bobina 7	6086.03	-0.41	-9.89	-1.91
Bobina 8	5950.05	0.72	-10.08	-2.14
Bobina 9	5920.73	-1.55	-4.58	-1.42
Bobina 10	6221.94	-0.61	-6.30	-1.66
MEDIA	6027.70	0.03	-3.91	-2.06
σ	171.71	1.22	3.72	0.34

multipoli riferiti al campo centrale

I dati riportati nelle tabelle 0.1 e 0.2 sono riferiti al campo centrale, ossia misurato nella parte dritta del magnete. Esso costituisce un valore costante per tutte le venti bobine che compongono la lancia di misura.

Al fine di poter confrontare questi multipoli con quelli misurati sui magneti della preserie che sono riferiti al campo locale è necessario moltiplicare ogni coefficiente per un fattore di scala pari a $b_1/10000$. Per come sono stati definiti i coefficienti di multipolo infatti, se lo sviluppo in serie avviene attorno al campo locale della bobina di misura, il b_1 assume sempre valore 10000 unità.

Nelle tabelle 0.3 e 0.4 è stata fatta questa conversione.

Tabella 0.3 Misura dei multipoli nelle teste lato connessione dei prototipi di dipolo riscalati al campo locale.

PROTOTIPI --- LATO CONNESSIONE				
	b1	b2	b3	b5
Bobina 1	10000.00	-9.48	36.00	-4.91
Bobina 2	10000.00	-2.53	40.48	-4.05
Bobina 3	10000.00	-5.15	34.57	-4.43
Bobina 4	10000.00	1.84	40.37	-3.03
Bobina 5	10000.00	-2.49	39.08	-2.88
Bobina 6	10000.00	-4.51	45.60	-3.43
Bobina 7	10000.00	-5.62	29.39	-3.99
Bobina 8	10000.00	-3.36	20.06	-5.62
Bobina 9	10000.00	-4.63	35.85	-2.41
Bobina 10	10000.00	1.20	38.64	-3.10
MEDIA	10000.00	-3.91	35.69	-4.04
σ	0.00	3.23	7.93	0.94

multipoli riferiti al campo locale

Tabella 0.4 Misura dei multipoli nelle teste lato non connessione dei prototipi di dipolo riscalati al campo locale.

PROTOTIPI --- LATO NON CONNESSIONE				
	b1	b2	b3	b5
Bobina 1	10000.00	0.03	-2.10	-4.01
Bobina 2	10000.00	4.17	-3.51	-3.96
Bobina 3	10000.00	-1.02	-2.66	-3.37
Bobina 4	10000.00	0.56	-3.31	-3.55
Bobina 5	10000.00	-2.11	-3.54	-4.01
Bobina 6	10000.00	1.66	1.26	-3.40
Bobina 7	10000.00	-0.67	-16.25	-3.14
Bobina 8	10000.00	1.21	-16.94	-3.60
Bobina 9	10000.00	-2.61	-7.74	-2.39
Bobina 10	10000.00	-0.98	-10.12	-2.67
MEDIA	10000.00	0.48	-5.88	-3.63
σ	0.00	1.93	6.80	0.33

multipoli riferiti al campo locale

0.a.b Misure sui magneti della preserie

Come già accennato in precedenza, i magneti della preserie sono stati misurati sviluppando in serie il campo direttamente nell'intorno del campo locale, il campo magnetico medio presente in ciascuna bobina di misura. Con questo sistema è più facilmente comprensibile il contributo di ciascun multipolo alla sezione presa in esame poiché lo si riscala al valore effettivo di campo presente.

Non tutti i magneti della preserie contengono lo spaziatore a mezzaluna inserito nello strato esterno delle bobine. Per questo motivo sono state selezionate solo le misure dei dipoli con il layout aggiornato. Salvo future modifiche, l'ultima configurazione della preserie dovrebbe essere quella finale dei dipoli principali di

LHC e per questo motivo è stata presa in esame per effettuare la validazione del modello elettromagnetico delle teste.

Tabella 0.5 Misura dei multipoli nelle teste lato connessione dei dipoli della preserie.

	PRESERIE --- LATO CONNESSIONE			
	b1	b2	b3	b5
Bobina 1	10000.00	2.59	31.05	-3.59
Bobina 2	10000.00	1.70	36.50	-2.04
Bobina 3	10000.00	2.41	39.31	-1.56
Bobina 4	10000.00	-0.96	42.36	-1.58
Bobina 5	10000.00	-6.50	44.81	-1.26
Bobina 6	10000.00	1.09	45.46	-1.29
Bobina 7	10000.00	6.04	24.38	-5.99
Bobina 8	10000.00	6.17	26.09	-5.79
Bobina 9	10000.00	0.51	21.06	-6.75
Bobina 10	10000.00	-0.44	23.82	-5.85
Bobina 11	10000.00	-0.73	34.27	-4.26
Bobina 12	10000.00	3.22	36.03	-3.65
Bobina 13	10000.00	2.88	30.50	-5.59
Bobina 14	10000.00	-0.35	31.27	-5.70
Bobina 15	10000.00	3.10	33.88	-5.31
Bobina 16	10000.00	3.28	35.82	-5.46
MEDIA	10000.00	1.50	33.54	-4.10
σ	0.00	3.04	7.35	1.97

multipoli riferiti al campo locale

Tabella 0.6 Misura dei multipoli nelle teste lato non connessione dei dipoli della preserie.

	PRESERIE --- LATO NON CONNESSIONE			
	b1	b2	b3	b5
Bobina 1	10000.00	-1.10	-6.87	-3.59
Bobina 2	10000.00	1.78	-6.44	-3.64
Bobina 3	10000.00	1.47	-2.81	-2.60
Bobina 4	10000.00	1.25	-4.03	-2.76
Bobina 5	10000.00	-4.42	-7.27	-2.00
Bobina 6	10000.00	0.15	-6.16	-2.81
Bobina 7	10000.00	-1.88	-7.99	-3.58
Bobina 8	10000.00	-2.00	-7.87	-3.61
Bobina 9	10000.00	3.37	-9.01	-3.88
Bobina 10	10000.00	0.91	-8.07	-3.20
Bobina 11	10000.00	-1.10	2.16	-2.34
Bobina 12	10000.00	2.71	1.85	-2.28
Bobina 13	10000.00	-0.52	1.22	-3.25
Bobina 14	10000.00	-3.76	3.22	-2.69
Bobina 15	10000.00	-0.69	3.30	-3.02
Bobina 16	10000.00	-2.64	2.83	-2.84
MEDIA	10000.00	-0.40	-3.25	-3.01
σ	0.00	2.24	4.80	0.56

multipoli riferiti al campo locale

0.b Misure a freddo della qualità di campo

Le *misure a freddo* vengono effettuate nelle condizioni di temperatura e corrente elettrica nominali in cui dovrà operare il magnete.

I dati ricavati sono di immediata lettura e permettono di verificare la qualità di campo in condizioni operative. Questo tipo di test viene realizzato sui magneti ultimati e posti nel criostato, richiede tempi abbastanza lunghi per portare in temperatura la cold mass.

Tutte le misure effettuate a freddo sono state riscalate al campo locale, non si ha quindi bisogno di moltiplicarle per fattori di scala.

E' possibile individuare tre serie distinte di misure che non possono essere comparate fra loro poiché si riferiscono a configurazioni del magnete distinte fra loro.

La serie 1 raggruppa tutte le misure effettuate sui primi prototipi di magneti in cui il giogo nelle teste era costituito da sole laminazioni non ferromagnetiche. La lunghezza della zona con laminazioni particolari è identica per ambo le estremità del magnete.

La serie 2 è invece formata dai prototipi aventi laminazioni non ferromagnetiche in corrispondenza delle teste della bobina ma in quantità differenti nelle due estremità.

Nella serie 3 sono invece raggruppati prototipi e magneti della preserie con la configurazione del giogo definitiva, ossia con le nested laminations in corrispondenza delle teste della bobina.

Solamente i magneti appartenenti alla serie 3 sono stati presi in considerazione per effettuare la validazione del modello elettromagnetico.

A differenza delle misure a caldo che vengono effettuate su bobine collarate in cui non è stata ancora effettuata la connessione fra le bobine delle due aperture, le misure a freddo sono svolte su magneti completamente assemblati in cui tutte e due le aperture sono alimentate.

Nelle tabelle seguenti vengono riportati multipoli rilevati in ciascuno dei due canali di fascio.

O.b.a Misure SERIE 1

Tabella O.7 Misura dei multipoli nelle teste lato connessione dei prototipi appartenenti alla serie 1.

SERIE 1 --- LATO CONNESSIONE				
	b1	b2	b3	b5
apertura 1	10000.00	39.61	22.20	-3.21
apertura 2	10000.00	36.15	22.32	-3.02
apertura 1	10000.00	39.63	20.27	-2.19
apertura 2	10000.00	38.33	18.17	-2.06
apertura 1	10000.00	38.56	18.44	-2.41
apertura 2	10000.00	36.07	17.03	-2.38
MEDIA	10000.00	38.06	19.74	-2.55
σ	0.00	1.60	2.21	0.46

Tabella O.8 Misura dei multipoli nelle teste lato non connessione dei prototipi appartenenti alla serie 1.

SERIE 1 --- LATO NON CONNESSIONE				
	b1	b2	b3	b5
apertura 1	10000.00	11.99	1.25	-2.04
apertura 2	10000.00	12.20	3.41	-1.96
apertura 1	10000.00	10.96	-0.63	-1.46
apertura 2	10000.00	11.61	-2.78	-1.17
apertura 1	10000.00	12.60	-1.04	-1.13
apertura 2	10000.00	12.18	-3.50	-1.95
MEDIA	10000.00	11.92	-0.55	-1.62
σ	0.00	0.57	2.56	0.42

O.b.b Misure SERIE 2

Tabella O.9 Misura dei multipoli nelle teste lato connessione dei prototipi appartenenti alla serie 2.

SERIE 2 --- LATO CONNESSIONE				
	b1	b2	b3	b5
apertura 1	10000.00	38.35	21.84	-1.75
apertura 2	10000.00	38.27	20.69	-1.32
MEDIA	10000.00	38.31	21.27	-1.54
σ	0.00	0.06	0.81	0.30

Tabella O.10 Misura dei multipoli nelle teste lato non connessione dei prototipi appartenenti alla serie 2.

SERIE 2 --- LATO NON CONNESSIONE				
	b1	b2	b3	b5
apertura 1	10000.00	37.96	0.65	0.56
apertura 2	10000.00	38.30	5.91	-1.22
MEDIA	10000.00	38.13	3.28	-0.33
σ	0.00	0.24	3.72	1.26

O.b.c Misure SERIE 3

Tabella O.11 Misura dei multipoli nelle teste lato connessione dei prototipi e dei magneti della preserie appartenenti alla serie 3.

SERIE 3 --- LATO CONNESSIONE

	b1	b2	b3	b5
apertura 1	10000.00	10.34	24.62	-2.06
apertura 2	10000.00	10.72	24.55	-1.89
apertura 1	10000.00	12.03	21.52	-2.02
apertura 2	10000.00	10.74	21.70	-1.52
apertura 1	10000.00	11.93	23.23	-1.99
apertura 2	10000.00	12.82	24.43	-1.57
MEDIA	10000.00	11.43	23.34	-1.84
σ	0.00	0.97	1.44	0.24

Tabella O.12 Misura dei multipoli nelle teste lato non connessione dei prototipi e dei magneti della preserie appartenenti alla serie 3

SERIE 3 --- LATO NON CONNESSIONE

	b1	b2	b3	b5
apertura 1	10000.00	11.07	9.00	-2.24
apertura 2	10000.00	9.52	8.56	-2.30
apertura 1	10000.00	11.02	8.02	-1.57
apertura 2	10000.00	10.40	7.75	-1.55
apertura 1	10000.00	12.18	8.17	-0.79
apertura 2	10000.00	10.74	8.18	-0.67
MEDIA	10000.00	10.82	8.28	-1.52
σ	0.00	0.88	0.44	0.69

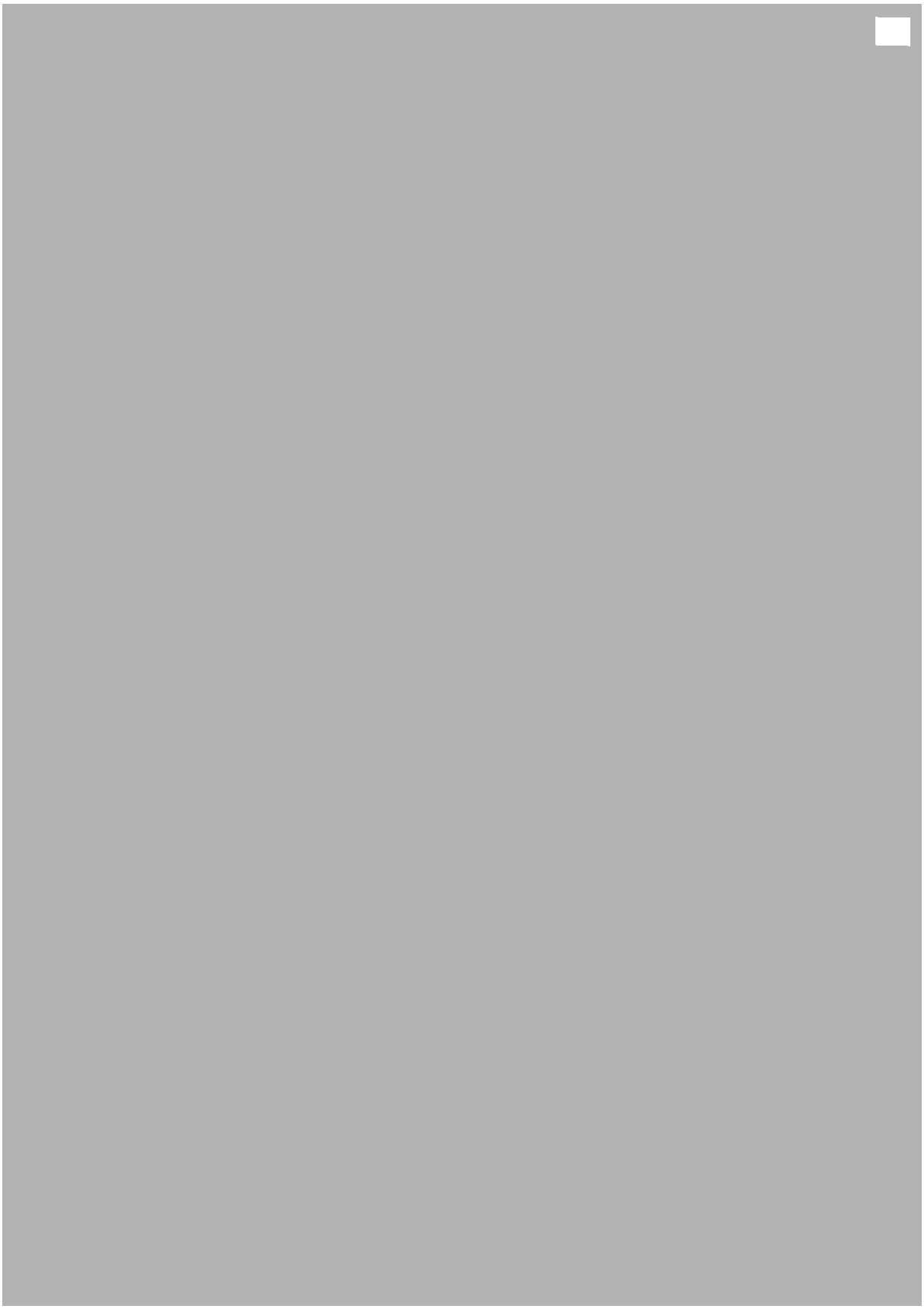
Appendice B

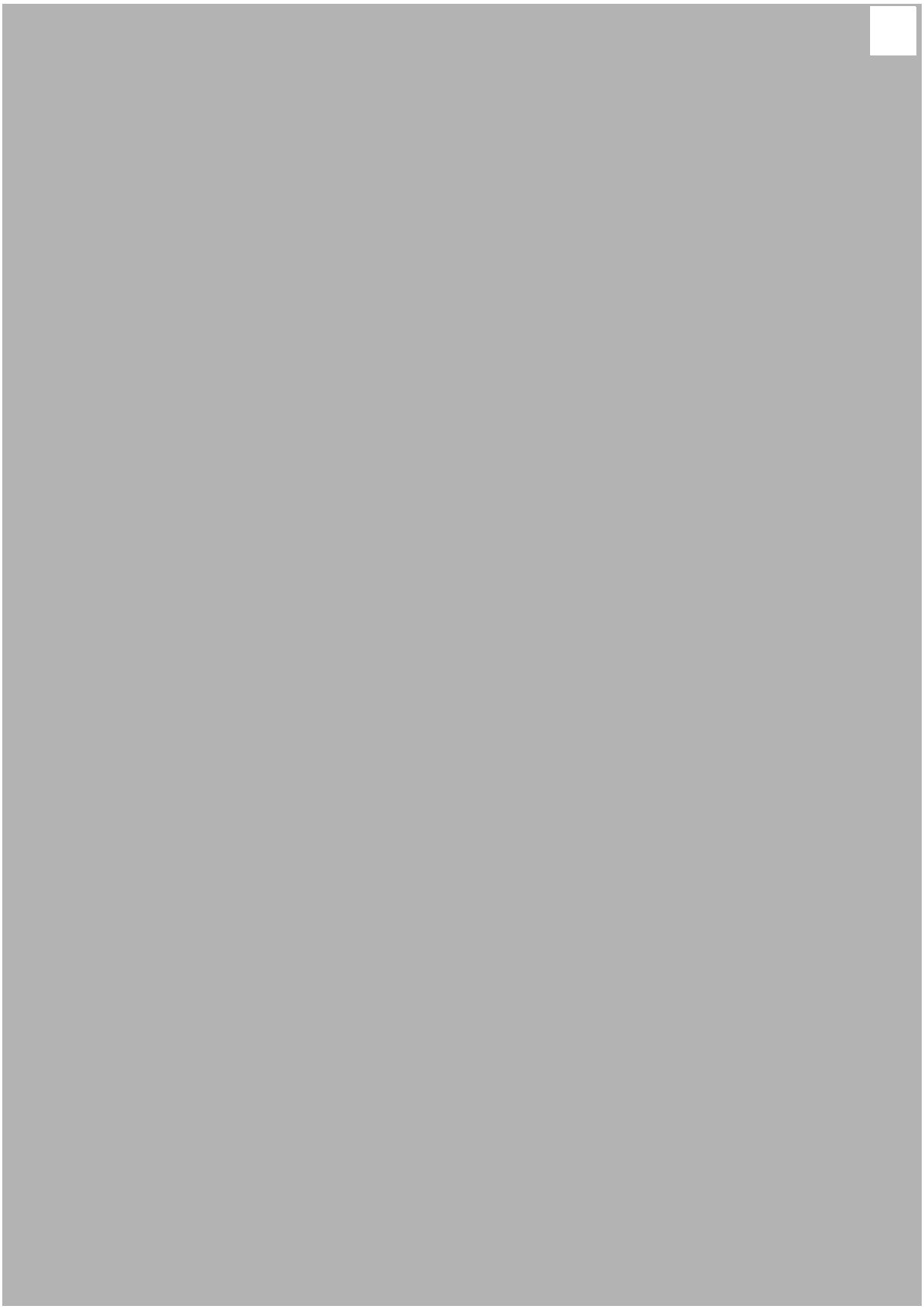
Articolo presentato alla conferenza "Magnet Technology 17"

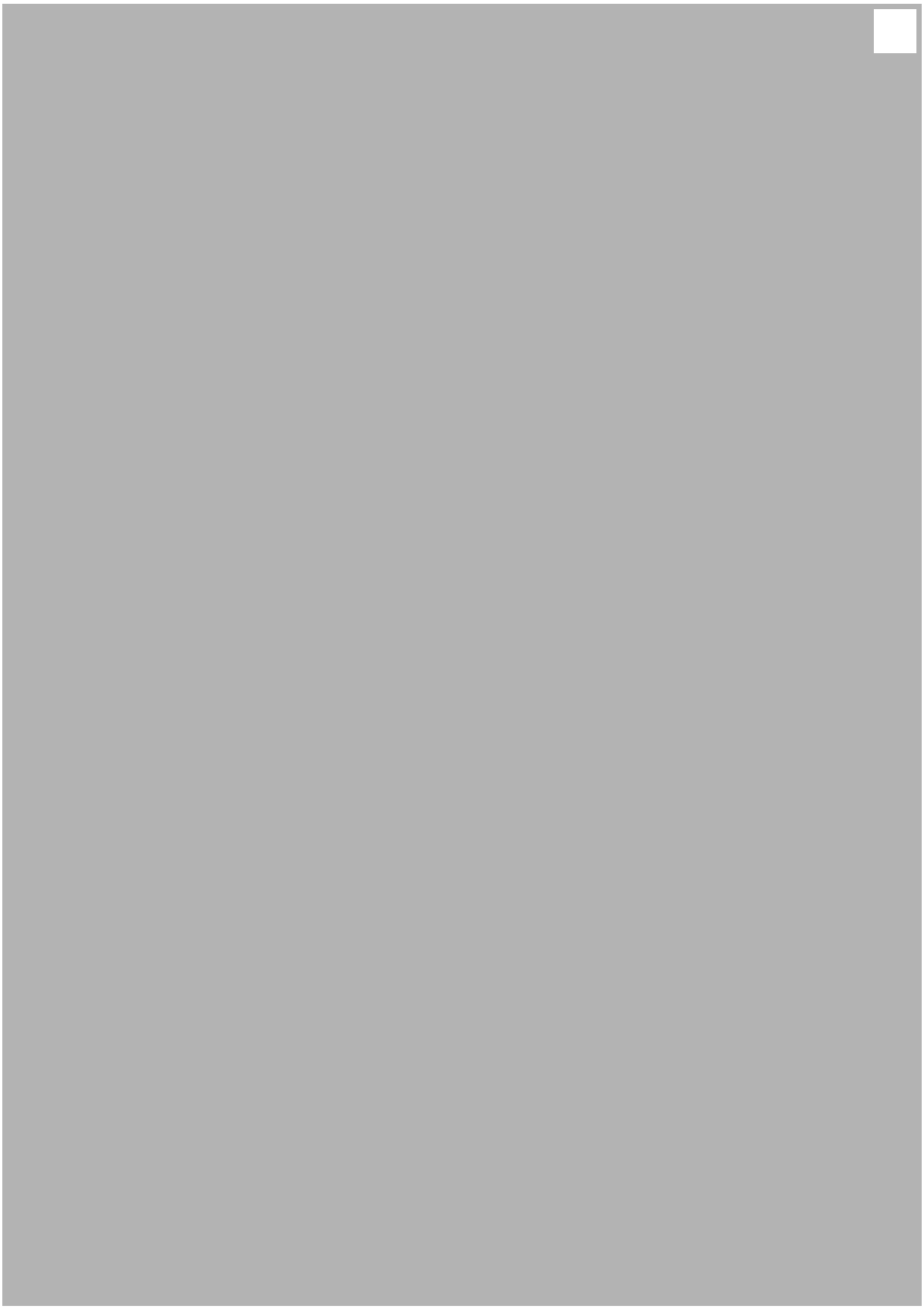
Durante il periodo che va dal 24 al 28 settembre 2001 si è svolta a Ginevra la conferenza internazionale "Magnet Technology 17", un incontro biennale che raduna tutti i più importanti esperti mondiali nel campo della tecnologia dei magneti.

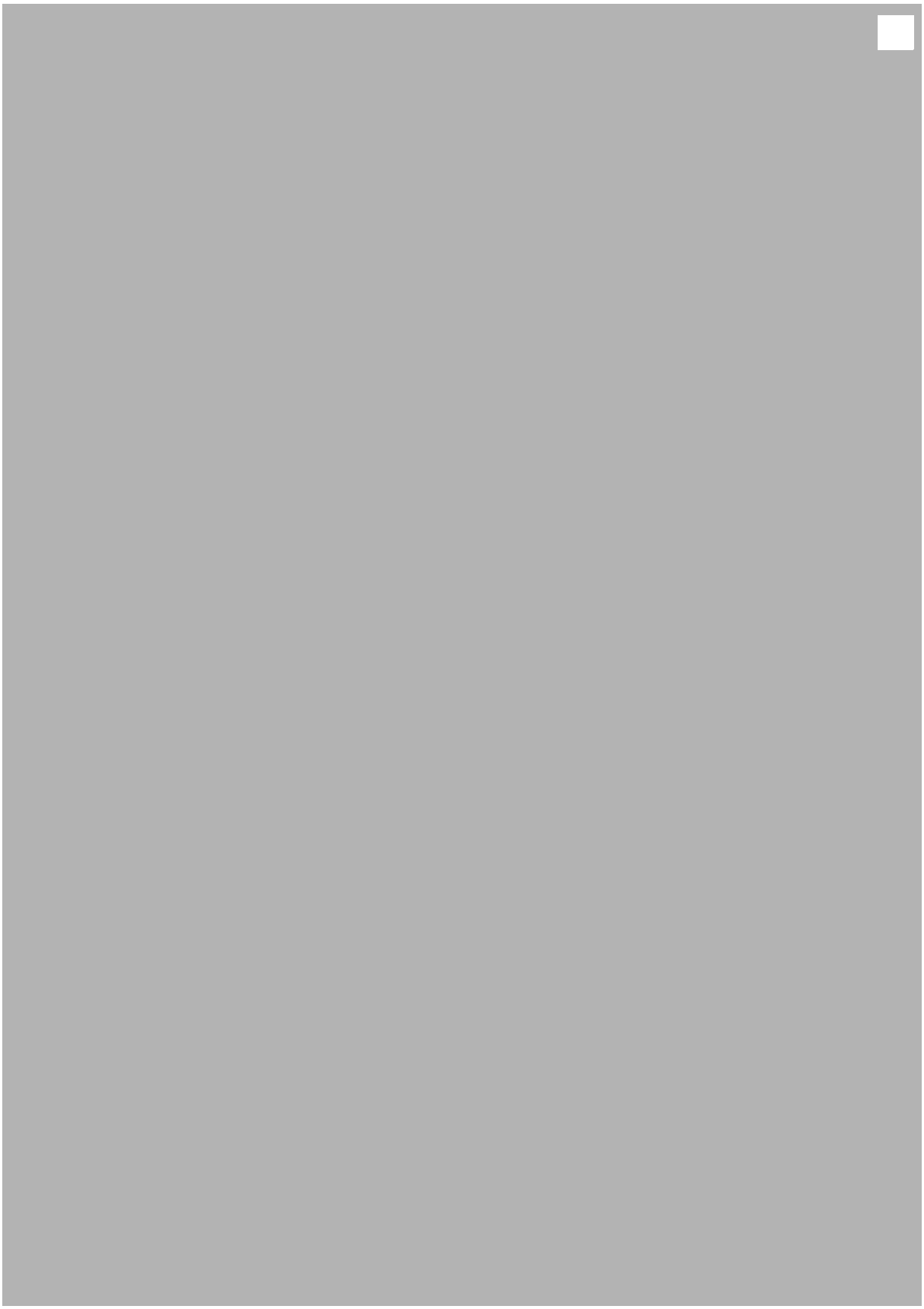
In questa sede è stato presentato, nella sezione poster, un articolo dal titolo "Development and Manufacture of the Coil End Spacers of the LHC dipoles".

Si riporta in questa appendice il testo di suddetto lavoro così come è stato sottoposto alla IEEE per la pubblicazione.









Bibliografia

1 **LHC The Large Hadron Collider. Conceptual Design**
The LHC Study Group, CERN/AC/95-05(LHC) 20/10/1995

2 **Field, Forces and Mechanics of Superconducting Magnets**
Romeo Perin, CAS CERN Acceleretor School, "Superconductivity in particle accelerators". CERN 96-03 May 1996

3 **Analysis of the magnetic field perturbations in dipoles and quadrupoles of the Large Hadron Collider**
Stefano Redaelli, tesi di laurea, Università degli Studi di Milano, Corso di Laurea in Fisica, a.a 1999-2000

4 **Manifacture and performance of the LHC main dipole final prototypes**
M. Modena, K. Artoos, M. Bajko, L. Bottura, M. Buzio, P. Fessia, O. Pagano, D. Perini, F. Savary, W. Scandale, A. Siemko, G. Spigo, E.Todesco, I. Vanenkov, J.Vlogaert, C. Wiss. CERN, Geneva, Switzerland

5 **Design, Manufacturing Status, First Results of the LHC Main Dipole Final Prototypes and Steps towards Series Manufacture**
K. Artoos, L. Bottura, P. Fessia, M. Bajko, M. Modena, O. Pagano, D. Perini, F. Savary, W. Scandale, A. Siemko, G. Spigo, E. Todesco, J. Vlogaert, C. Wiss. CERN, Geneva, Switzerland

6 **http://lhc.web.cern.ch/lhc/**

7 **http://public.web.cern.ch/Public/ACCELERATORS/Welcome.html**

8 **Comunicazione privata con Dr. Ezio Todesco, CERN LHC-MMS-MA**

9 **Coil size and geometric field quality in short model dipoles for LHC**
Z. Ang, L. Bottura, S. Russenschuck, A. Siemko, D. Tommasini and L. Walckiers. LHC Project Report 359, CERN.

10 **The Large Hadron Collider**
L.R. Evans, European Organization for Nuclear Research, CH-1211 Geneva 23, Switzerland

11 **CERN ACCELERATOR SCHOOL - Superconductivity in particle accelerators**
S. Turner editor, CERN 96-03 May 1996

12 **Technical Specification for Machined End-Spacers for 90LHC Main Dipole Magnets**
LHC Project document No.: LHC-MB__A-CI-0003

13 **Tubes et barres industriels, rigides, ronds, stratifiés, à base de résines thermodurcissables, a usages électriques**
Norme Européenne EN 61212-1, Août 1995

14 **Compilation of radiation damage test data pt.2; 2nd edition**
Tavlet, Fontaine, Shönbacher, CERN-98-01 18 May 1998

15 **High performance composites with resin matrices**
N.L. Hancox

16 **MatWeb Materials Property Database**
http://matweb.com

17 **Comunicazione privata con Ing.Farina della TOSTI s.r.l.**

18 **Status of the Costruction of the First 15 m long Superconducting Dipole Prototype for the LHC**
M.Bona, R.Perin and L.Rossi. LHC PROJECT REPORT 174, 14 May 1998

19 **Superconducting Magnet Fabrication and Quality Control**
R.Penco Ansaldo Energia, Genova, Italy

20 **ROXIE: Routine for the Optimization of magnet X-sections, Inverse field calculation and coil End design**
S.Russenschuck editor, First International Roxie Users Meeting and Workshop, CERN, 16-18 March 1998

21 **Measurement and Analysis of Axial End Forces in a Full-Length Prptotype of LHC Main Dipole Magnets**
K.Artoos, T.Kurtyka, F.Savary, R.Valbuena and J. Vlogaert. LHC Project Report 340

22 **Test Results on the Long Models and Full Scale Prototype of Second Generation LHC arc Dipoles**
J.Billan, M.Bona, L.Bottura, D.Leroy, O.Pagano, R.Perin, D.Perini, L.Rossi, F.Savary, A.Siemko, P.Sievers, G.Spigo, J.Vlogaert, L.Walckiers, C.Wyss. LHC Project Report 244

23 **Magnetic Errors of the LHC Dipoles and Possible Cures**
R.Bartolini, P.Fessia, D.Perini, W.Scandale, E.Todesco, CERN, LHC Division, CH 1211 Geneva, Switzerland

24 **FISICA GENERALE, Elettromagnetismo, Relatività ed Ottica**
E. Amaldi, R. Bizzarri, G. Pizzella. Zanichelli Editore

25 **Problems of the mechanics of composite winding**
Yu.M. Tarnopol'skii, A.I. Beil' , pag 49-52

26 **Magnetic Conditioning In Superfluid**
S. Caspi. Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, CA 94720. August 29, 1988

27 **FIELD QUALITY OF THE END SECTIONS OF SSC DIPOLES**
W.V. Hassenzahl et al. IEEE TRANSACTION ON MAGNETIC, vol. mag-23, No. 2, march 1987

28 **General Parameters for Equipment Installed in the LHC**
LHC Project Document No. LHC-PM-ES-0002.00 rev.0.2-draft, page 11 of 14

29 **An Alternate Method for Designing Dipole Magnet Ends**
W.L Pope, M.A. Green, C. Peters, S. Caspi and C.E. Taylor, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA, USA. August 1988.

30 **Twin Rotating Coils for Cold Magnetic Measurements of 15m Long LHC Dipoles**
J. Billan, L. Bottura, M. Buzio, G. D'Angelo, G. Deferne, O. Dunkel, P. Legrand, A. Rijllart, A. Siemko, P. Sievers, S. Schloss and L. Walckiers. LHC Project Report 361.

31 **Quench Protection**
K.H. Mess, DESY, Hamburg, Germany.

32 **Comunicazione privata con Ing. Modena Michele, CERN LHC-MMS-MD**

33 **Magnetic Field in the End Region of the SSC Quadrupole Magnet**
S. Caspi, M. Helm and L.J. Laslett, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, CA 94720.

34 **Three-Dimensional Magnetic Field Produced by Aximmetric Iron Yoke**
L.J. Laslett, S. Caspi, M. Helm and V. Brady, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, CA 94720.

35 **Coil End Design for the SSC Collider Dipole Magnet**
J.S. Brandt, N.W. Bartlett et al. Fermi National Accelerator Laboratory, J.M. Cook, Argonne National Laboratory, S. Caspi, Lawrence Berkeley Laboratory, M.A. Gordon, F.Nobrega, SSC Laboratory.

36 **The Use of Harmonics in 3-D Magnetic Fields**
S. Caspi, M. Helm and L.J. Laslett, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, CA 94720.

37 **Method for Field Computation for the Development of SSC Superconducting Magnets**
R. Jayakumar, D. Orrell, G. Snitchler, C.Haddock, J. Turner, N. Kallas and G. Spigo, Magnet Division Superconducting Supercollider Laboratory, 2550 Beckleymeade Avenue Dallas, Tx 75237.

38 **Superconducting Magnets for Accelerators: a Review**
Martin N. Wilson, CERN, CH-1211 Geneva 23, Switzerland

39 **Current Redistribution in the Cables of LHC Magnets**
A.P. Verweij, LHC Project Note 90, CERN, CH-1211 Geneva 23, Switzerland.

40 **The "INVERSE PROBLEM" to the Evaluation of the Magnetic Field**
S. Caspi, M.Helm and L.J. Laslett, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, June 1995.

41 **Magnetic Lenght of LHC Prototype Dipoles in Warm and Cold Conditions**
L. Bottura, CERN, CH-1211 Geneva 23, Switzerland.

42 **Control of field quality for the production of the main LHC dipoles**
P. Ferracin, O. Pagano, S. Redaelli, W. Scandale, E. Todesco, CERN, LHC Division, CH-1211 Geneve Switzerland. LHC Project Report 467.

43 **Field Quality of the Final Focus Superconducting Magnets for KEKB Interaction Region**
T. Ogitsu, N. Ohuchi, T. Ozaki and K. Tsuchiya, EPAC 1998.

44 **Field Quality of the Main Dipole Magnets for the LHC Accelerator**
L.Bottura, A. Faus-Golfe, L. Walckiers, R. Wolf, CERN, Geneva, Switzerland.

45 **Influence of Mechanical Tolerances on Field Quality in the LHC Main Dipoles**
W. Scandale, E. Todesco, P. Tropea, LHC Project Report 351, CERN, CH-1211 Geneva 23, Switzerland.

46 **Correcting Multipole Errors during Dipole Production**
L.R. Evans, LHC Project Note 80, CERN, CH-1211 Geneva 23, Switzerland.

47 **Correlations between multipolar errors in superconducting magnets**
F. Galluccio. LHC Note 177, 1992. CERN, CH-1211 Geneva 23, Switzerland.

48 **Unitarizable scalar multipoles**
W.F. Heidenreich, Department of Physics, UCLA, Los Angeles, CA 90024.