

Frascati, April 19, 1996

Note: **MM-13****MISURA DELLE CARATTERISTICHE MAGNETICHE DEL  
QUADRUPOLO PROTOTIPO PER GLI ARCHI DEI MAIN RINGS**

*B. Bolli, F. Iungo, N. Ganlin, F. Losciale, M. Paris, M. Preger,  
C. Sanelli, F. Sardone, F. Sgamma, M. Troiani*

**1. INTRODUZIONE**

Il prototipo del quadrupolo degli archi di DA NE ha un diametro di gola di poco superiore a quello dei quadrupoli dell'Accumulatore [1] adottati anche per i tratti dritti degli anelli principali (108 mm invece di 100); le dimensioni del giogo sono invece molto maggiori per essere compatibili con la camera da vuoto degli archi che prevede tre zone, una centrale per il fascio e due laterali, separate da quella centrale da una sottile fessura, dove la luce di sincrotrone emessa dai magneti curvanti e dai wigglers incide su speciali assorbitori di rame raffreddati ad acqua.

Il primo prototipo del quadrupolo, realizzato dall'ANSALDO GIE, è stato consegnato ai Laboratori nel Maggio 1995. La Figura 1 mostra il magnete oggetto della presente nota. Il profilo polare è dato in Figura 2, mentre la Tabella 1 indica le coordinate del profilo stesso. Questo primo prototipo è stato completamente caratterizzato effettuando una approfondita campagna di misure magnetiche che hanno dimostrato la correttezza del profilo polare adottato, permettendo di approvare "magneticamente" il quadrupolo prototipo. Tuttavia, su tale quadrupolo sono state rilevate una serie di imperfezioni meccaniche tali da indurre l'ANSALDO Energia a sostituire completamente i lamierini dei quattro quadranti conservando sia le piastre di testa, su cui è stato ottimizzato il chamfer, come si dirà nel seguito, sia le bobine di eccitazione. A seguito di ciò è stato realizzato un secondo quadrupolo prototipo, consegnato a Frascati nel Marzo 1996, che è stato nuovamente misurato.

La presente nota riporta i risultati delle misure effettuate sul primo prototipo di quadrupolo prima e dopo il chamfer e quelli ottenuti sul secondo prototipo avente lo stesso chamfer del primo.



Figura 1 - Quadrupolo prototipo per gli archi dei Main Rings.

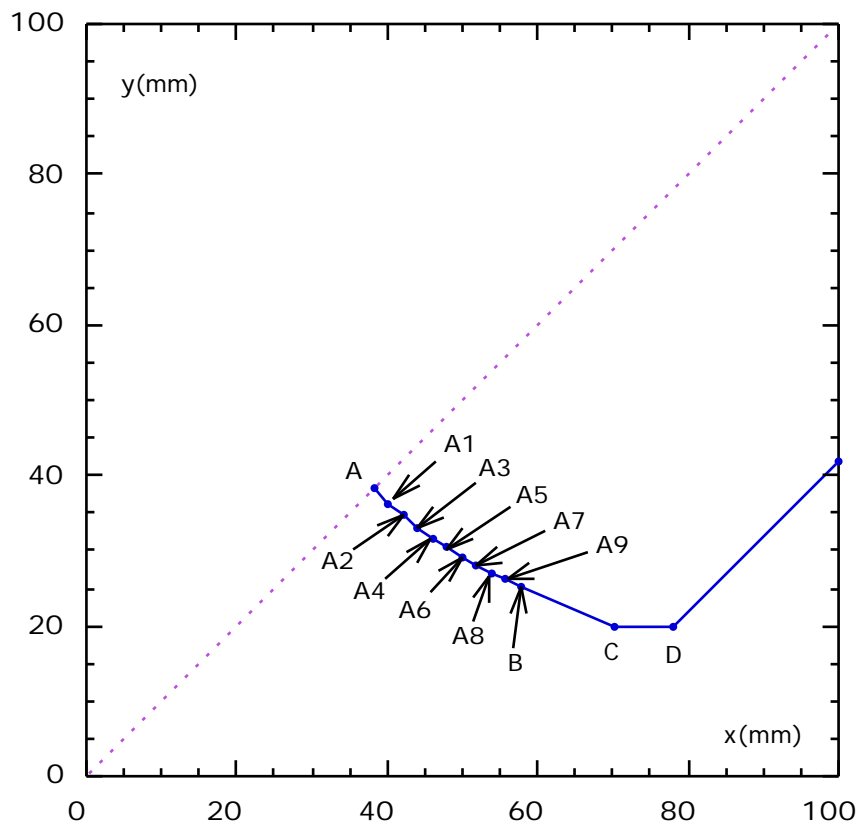


Figura 2 - Profilo polare del quadrupolo.

Tabella 1 - Coordinate del profilo polare

Punto	x (mm)	y (mm)
A	38.18	38.18
A1	40.14	36.33
A2	42.09	34.64
A3	44.05	33.10
A4	46.00	31.70
A5	47.95	30.40
A6	49.91	29.21
A7	51.86	28.11
A8	53.82	27.09
A9	55.77	26.14
B	57.72	25.26
C	70.10	19.85
D	77.85	19.85

## 2. MISURA DELLA QUALITÀ DEL CAMPO

Il magnete è stato allineato rispetto al coordinatometro a sonda di Hall [2] ed è stato misurato il campo verticale al centro del magnete sul piano orizzontale di simmetria a 3 cm dall'asse, sia a destra che a sinistra, in funzione della corrente di eccitazione. La differenza tra i valori assoluti delle due misure risulta sempre minore di 1 G. Pertanto riportiamo in Figura 3 l'andamento del gradiente in funzione della corrente di eccitazione, definito come il valore del campo misurato diviso per la distanza dall'asse. Il punto di lavoro dei quadrupoli di questo tipo negli anelli di DA NE raggiunge al massimo 5.25 T/m a 510 MeV di energia del fascio.

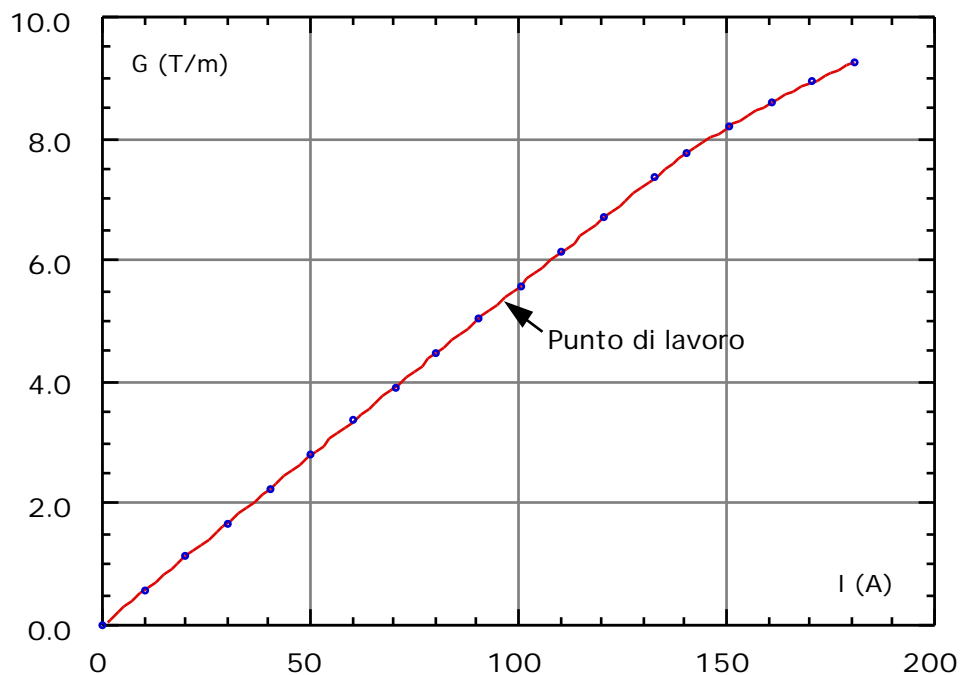
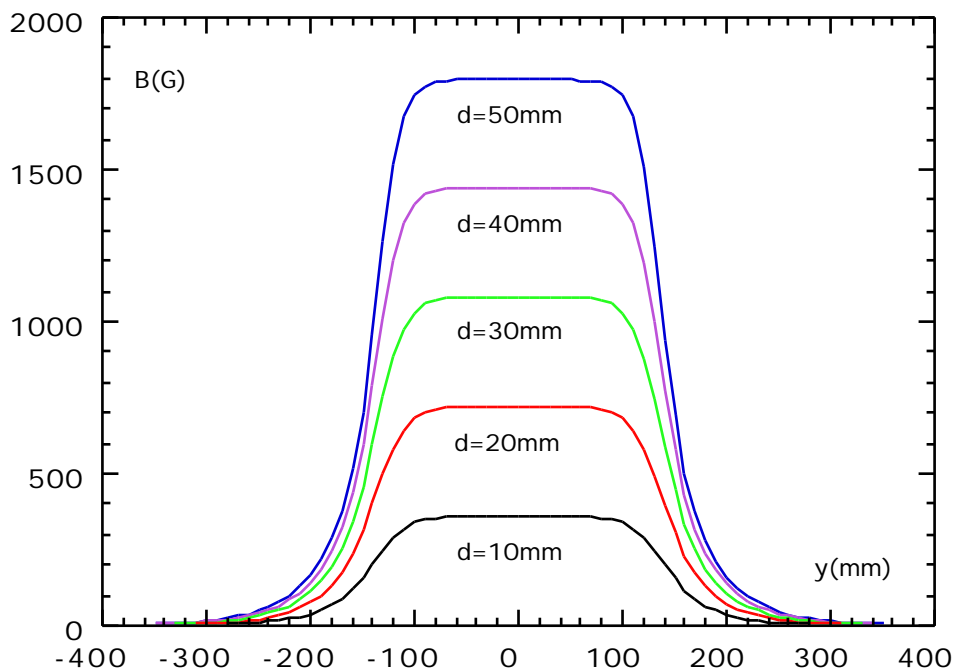


Figura 3 - Gradiente del quadrupolo in funzione della corrente di eccitazione.

L'andamento della componente verticale del campo in funzione della posizione nella direzione longitudinale è stato misurato sul piano di simmetria orizzontale lungo rette parallele all'asse del magnete, in 11 diverse posizioni spaziate di 10 mm una dall'altra. Nella Figura 4 sono rappresentati questi andamenti, per semplicità solo da una parte rispetto all'asse, ad un gradiente di 3.6 T/m, che corrisponde al valore medio dei gradienti ai quali saranno portati questi magneti negli anelli principali di DA NE. Le curve rappresentano la differenza tra la misura parallela all'asse e quella presa sull'asse di simmetria in modo da compensare le deviazioni introdotte dalle tolleranze del sistema di movimentazione della sonda, che, in presenza dei forti gradienti caratteristici dei campi quadrupolari, danno sull'asse valori di campo fino a 1.4 G.



*Figura 4 - Andamento longitudinale del campo verticale lungo rette parallele all'asse di simmetria a varie distanze (d) dall'asse.*

Si può definire la lunghezza magnetica del quadrupolo come il rapporto tra l'integrale del campo misurato ad una certa distanza dall'asse, e cioè l'area al disotto delle curve di Figura 4, ed il valore del campo nella zona costante vicina al centro del magnete. Questa lunghezza magnetica dipende, naturalmente, dalla distanza dall'asse, ed in Figura 5 sono indicate le dipendenze della lunghezza magnetica dalla distanza sia al gradiente nominale medio di 3.6 T/m che per quello, vicino al valore massimo, di 8 T/m. Si può notare che la lunghezza magnetica risulta praticamente indipendente dalla distanza nella zona utile ( $\pm 30$  mm) attorno all'asse, e che diminuisce di 2 mm in tra 3.6 ed 8 T/m. Il valore della lunghezza magnetica al centro, ottenuto interpolando le curve di Figura 5, risulta di 302.7 mm a 3.6 T/m e di 300.5 mm ad 8 T/m.

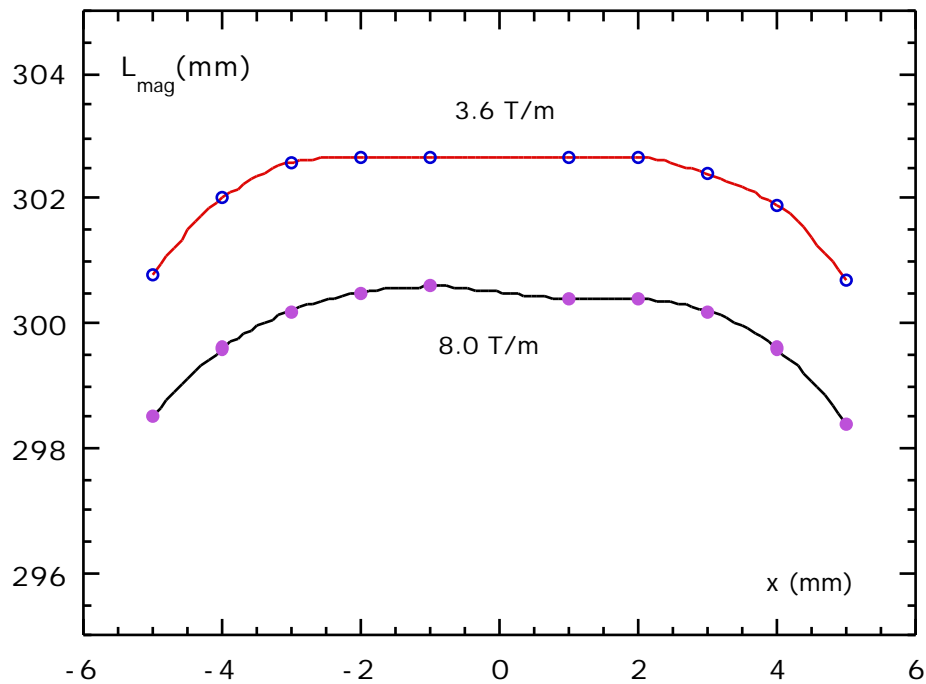


Figura 5 - Lunghezza magnetica del quadrupolo in funzione della distanza dall'asse

Il quadrupolo è stato quindi misurato con il sistema a bobina rotante, per valutarne la qualità del campo integrato. Sono state eseguite misure su tutto il range di corrente di alimentazione. Nella Figura 6 è rappresentata la deviazione dal campo ideale ai limiti della zona utile, e cioè su di un cerchio di 30 mm di raggio al gradiente tipico di 3.6 T/m. Nella figura sono riportate le componenti radiale ed azimutale e la loro somma vettoriale. Dal numero di periodi per giro si vede facilmente che la componente principale di ordine superiore è un dodecapolo.

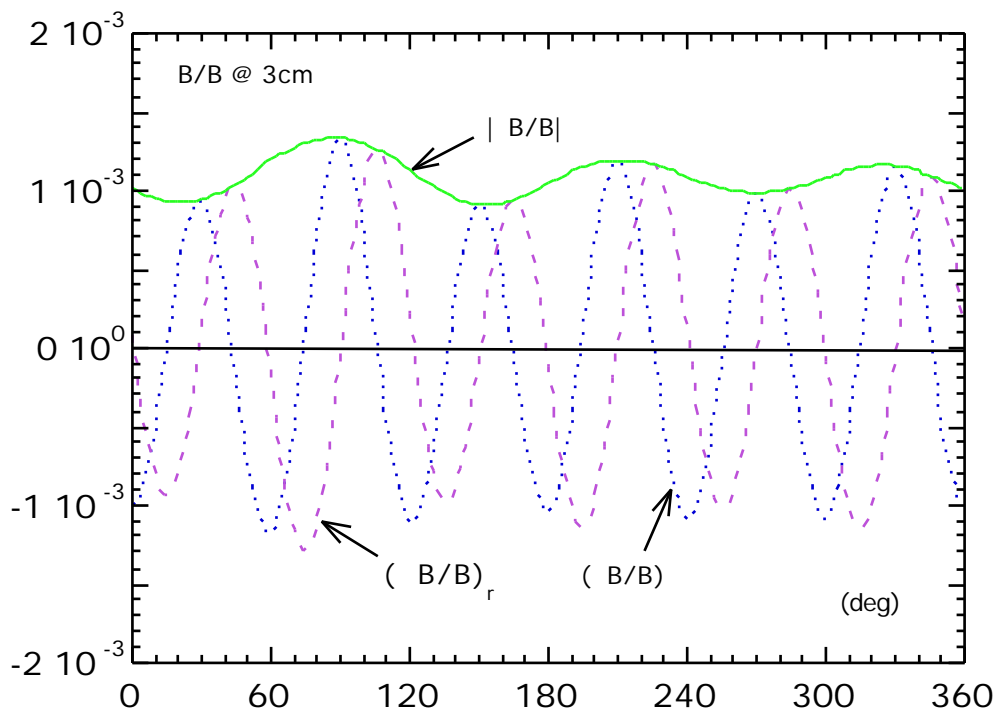


Figura 6 - Deviazione dal campo ideale su di un cerchio di raggio = 30 mm.

L'andamento dei termini di ordine superiore che maggiormente contribuiscono all'errore di campo in funzione della corrente è mostrato nella Figura 7. Come si può vedere dalla figura il peso relativo dei diversi contributi sostanzialmente non dipende dalla corrente di alimentazione.

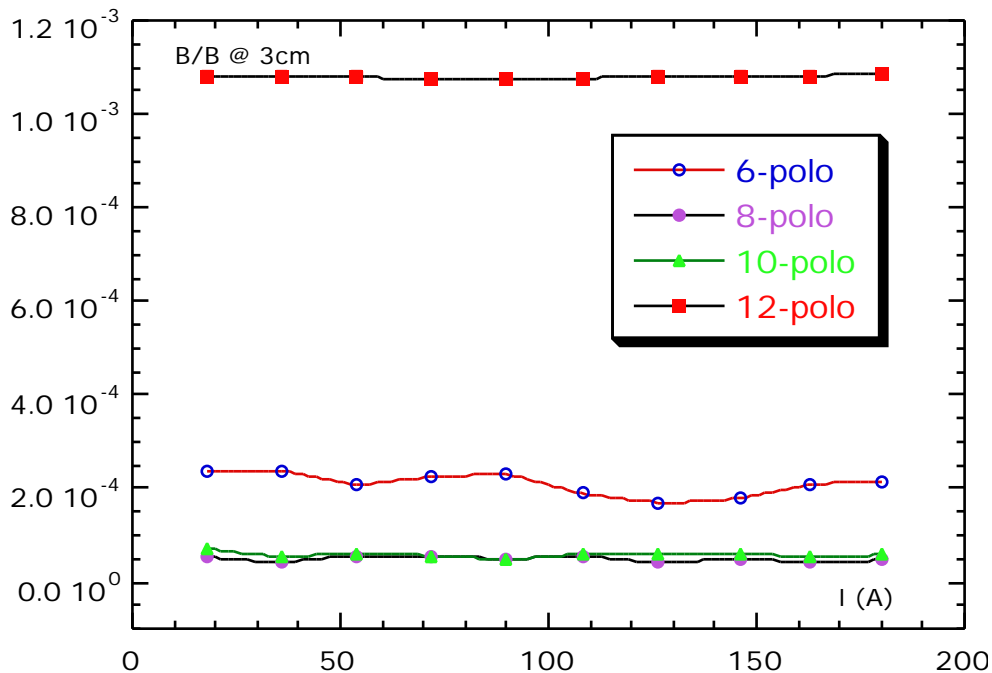


Figura 7 - Contributi dei termini di ordine superiore all'errore di campo in funzione della corrente.

Seguendo il metodo già sperimentato con successo nel caso dei quadrupoli dell'Acceleratore di DA NE [1], abbiamo quindi lavorato le testate rimovibili dei poli, applicando un taglio a 45° all'estremità di ciascun polo per ridurre il contributo del termine di dodecapolo. È stato eseguito un primo taglio di 5 mm, che ha dimezzato il dodecapolo. Il secondo taglio, previsto dall'estrapolazione lineare, è stato di 10 mm ed ha mostrato una debole saturazione dell'effetto. Per portare il contributo del dodecapolo al disotto di quello degli altri termini è stato applicato un ulteriore abbassamento di 1 mm, portando così il "chamfer" totale a 11 mm, in buon accordo con il risultato del quadrupolo dell'Acceleratore (10 mm di chamfer) tenendo conto del rapporto dei raggi di gola.

La Figura 8 mostra l'andamento dei contributi multipolari in funzione della profondità del chamfer. Questo andamento non dipende dalla corrente di alimentazione del magnete. Come si vede dalla figura, i termini di 8-polo, 10-polo e 20-polo restano piccoli e praticamente indipendenti dal chamfer. Il sestupolo è indicato con una linea tratteggiata, in quanto la sensibilità del sistema di misura ai diversi termini multipolari cresce con l'ordine del multipolo, e per il sestupolo, che è il primo dei multipoli presenti in un quadrupolo, i valori misurati sono al limite della sensibilità del sistema.

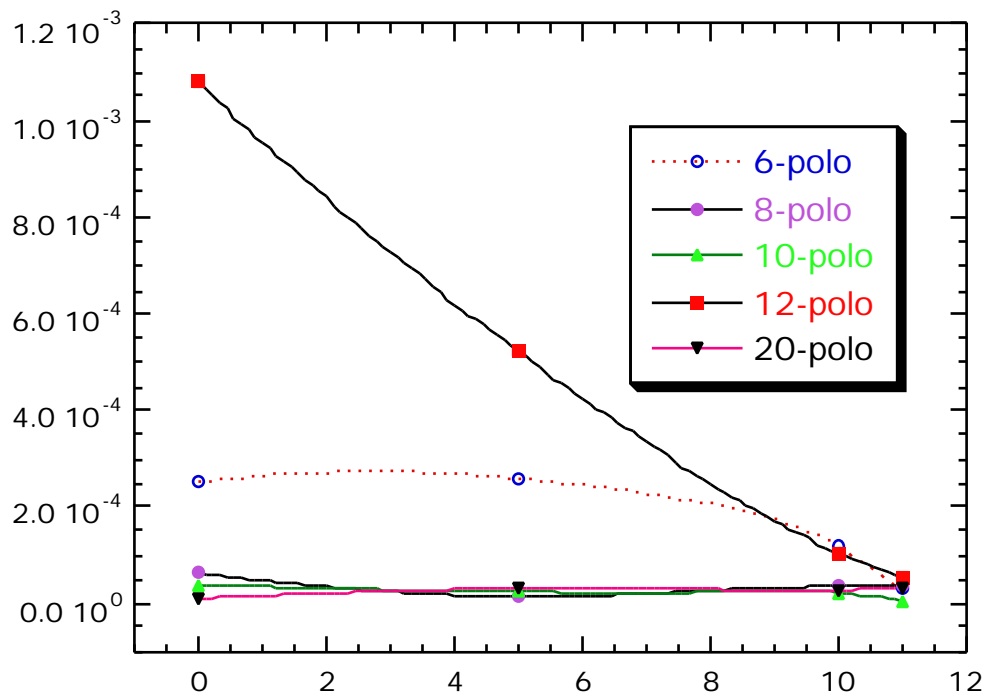


Figura 8 - Andamento dei termini multipolari in funzione del chamfer.

L'errore di campo misurato dopo il procedimento di chamfer dal sistema a bobina rotante è mostrato nella Figura 9, dove la scala verticale è ridotta di un ordine di grandezza rispetto alla Figura 6. Non si vede più il contributo dominante del dodecapolo, ed il valore massimo della deviazione dal campo ideale è pari a  $1.2 \times 10^{-4}$ , al limite della risoluzione del sistema di misura.

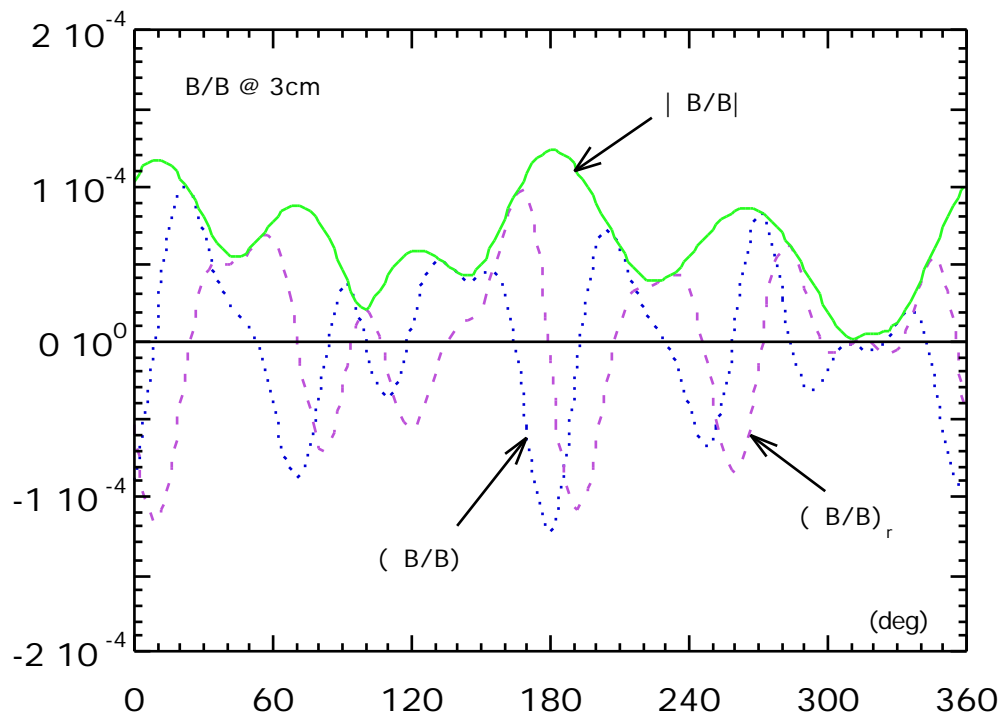


Figura 9 - Errore di campo su di un cerchio di raggio = 30 mm dopo il chamfer di 11 mm.

Nella Figura 10 è riportato l'andamento con la corrente di alimentazione del gradiente integrato misurato con la bobina rotante e del valor medio sui  $360^\circ$  del modulo della deviazione relativa dal campo ideale. Se si escludono il primo e l'ultimo punto (corrispondenti rispettivamente a 0.5 e 9.2 T/m), la curva dell'errore rimane al disotto di  $10^{-4}$ . La Figura 11 mostra invece l'andamento con la corrente di alimentazione dei diversi contributi multipolari. Il sestupolo non è stato indicato, in quanto il suo valore risulta praticamente nell'errore di misura. È mostrato invece il 20-polo, poichè, dopo la procedura di chamfering, il suo contributo è risultato confrontabile con quello degli altri termini multipolari.

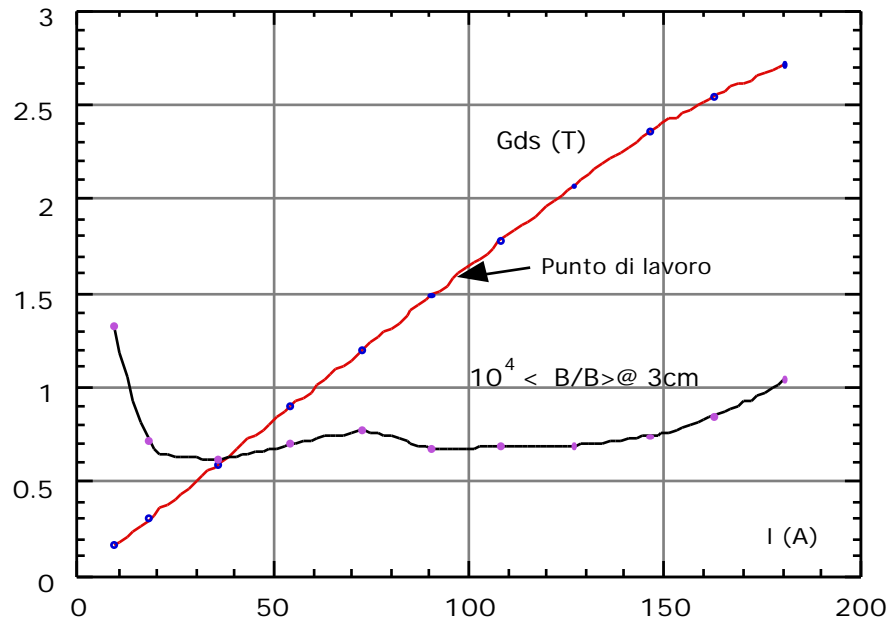


Figura 10 - Gradiente integrato e valor medio del modulo dell'errore relativo misurato su di un cerchio di 3 cm di diametro attorno all'asse dopo il chamfering.

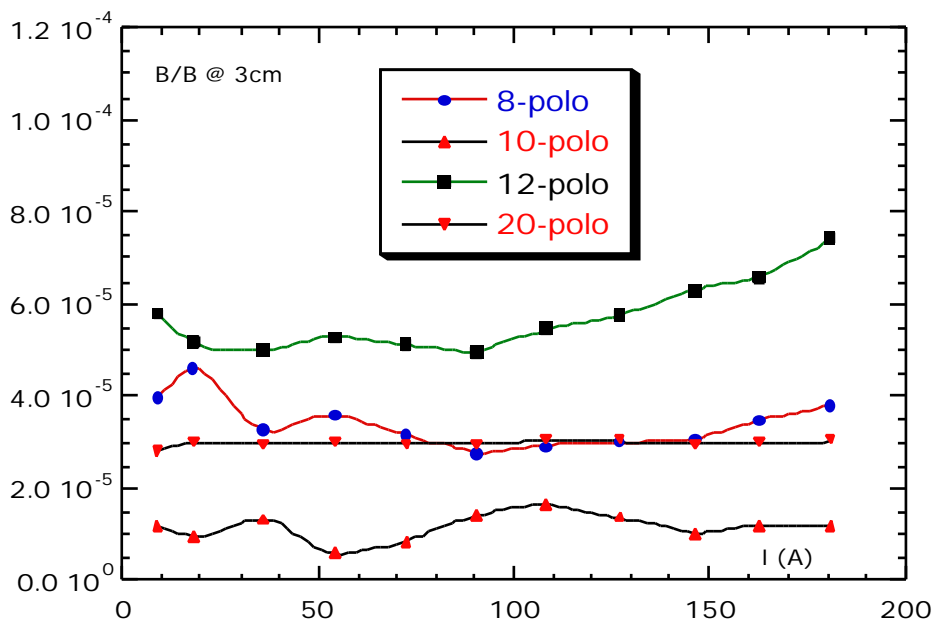


Figura 11 - Andamento con la corrente dei contributi multipolari dopo il chamfering.



Al termine della procedura di chamfering, il magnete è stato riallineato sul coordinatometro a sonda di Hall per misurare la nuova lunghezza magnetica. La Figura 12 mostra i nuovi andamenti misurati all'interno della zona utile. Anche dopo il chamfer la lunghezza magnetica è praticamente indipendente dalla distanza dall'asse ed i nuovi valori misurati sono 296.0 mm a 3.6 T/m (-6.7 mm rispetto alla misura prima del chamfer, e 293.9 mm ad 8 T/m (-6.6 mm).

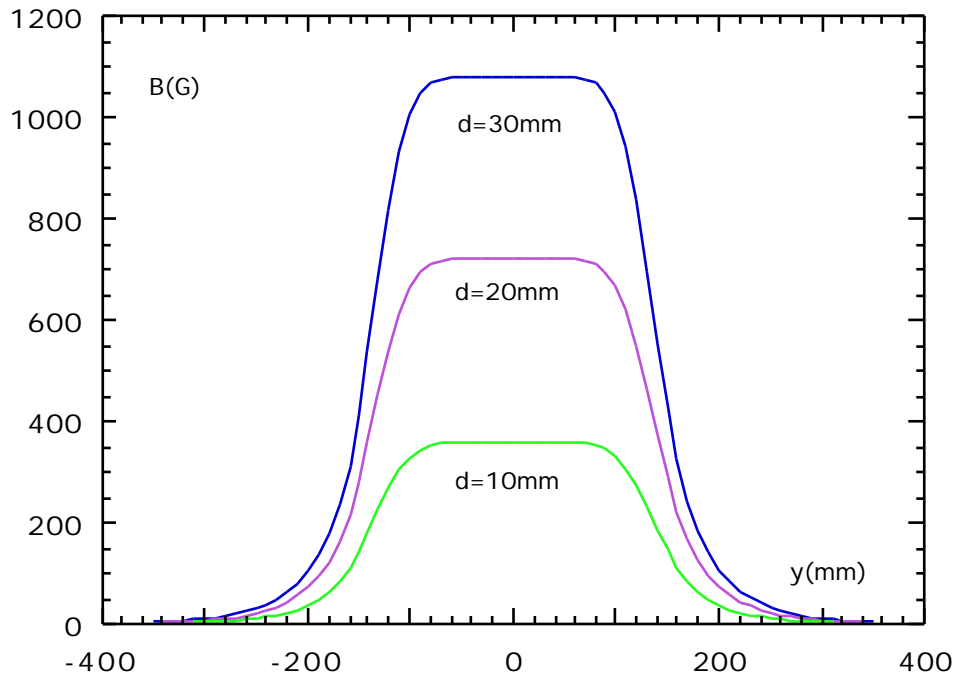


Figura 12 - Andamento longitudinale del campo verticale lungo rette parallele all'asse di simmetria a varie distanze ( $d$ ) dall'asse dopo il chamfer.

Per i motivi citati nell'Introduzione, il magnete è stato quindi rimandato in fabbrica, ed i quadranti ricostruiti con un nuovo set di lamierini. Il magnete, che utilizza le stesse bobine e le stesse piastre terminali sagomate sul primo prototipo, è stato quindi rimisurato con il sistema a bobina rotante, per controllare la qualità di campo e con quello a sonda di Hall per la lunghezza magnetica.

La Figura 13 mostra il risultato del sistema a bobina rotante vicino al punto di lavoro nominale: la deviazione rispetto al valore ideale risulta superiore a quella del primo prototipo, ma tuttavia sempre inferiore al valore specificato.

Il gradiente integrato è dato in Figura 14, insieme con il valor medio della deviazione dal campo ideale sul cerchio di 30 mm di raggio attorno all'asse, in funzione della corrente di alimentazione, mentre la Figura 15 rappresenta il contributo dei diversi termini multipolari (il deca polo non compare in quanto trascurabile): rispetto al primo prototipo si nota un aumento del sestupolo e dell'ottupolo, il primo ancora molto vicino al potere risolutivo del sistema di misura. Per quanto riguarda il termine ottupolare, che non rispetta la simmetria quadrupolare, si tratta di verificare sulla serie che verrà prodotta dall'Ansaldo se si tratta di un errore sistematico o casuale.

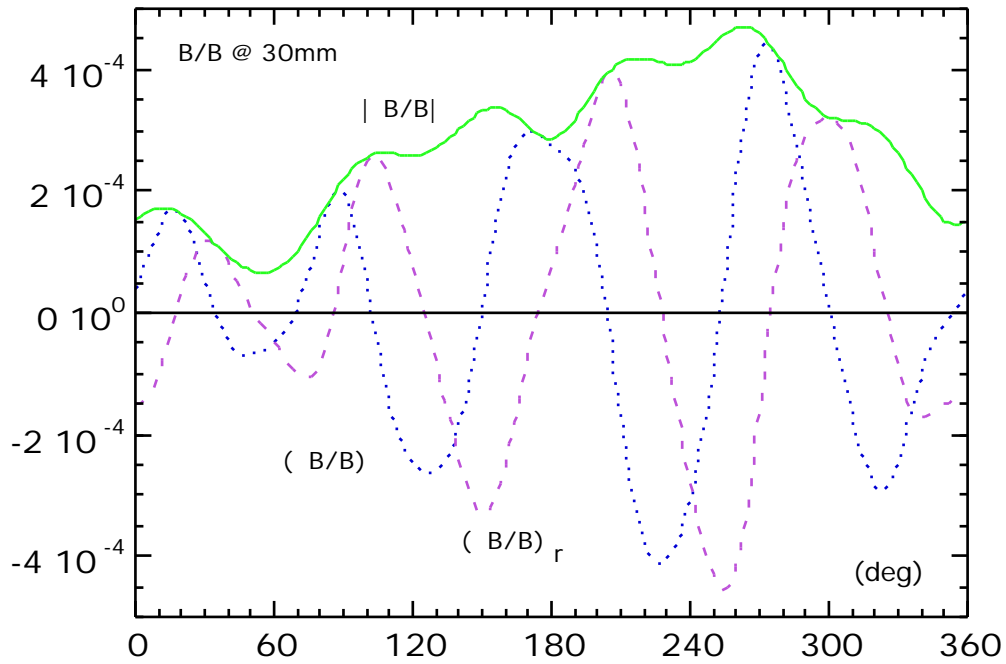


Figura 13 - Deviazione relativa dal campo ideale a 30 mm dall'asse del secondo prototipo del quadrupolo (@90.5A)

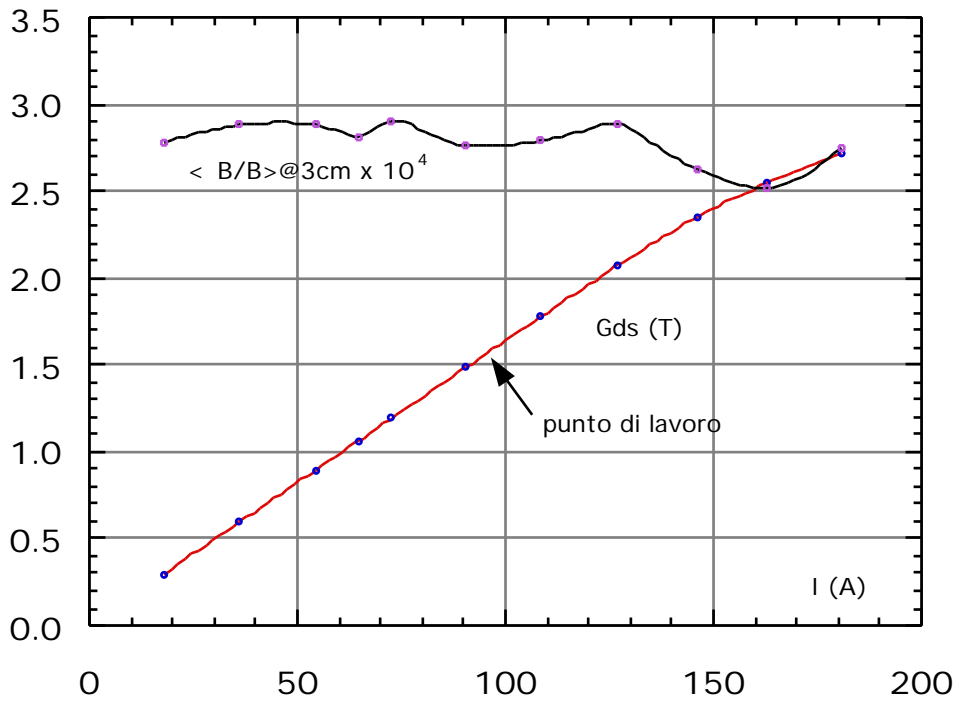


Figura 14 - Gradiente integrato e deviazione media dal campo ideale a 30 mm dall'asse del secondo quadrupolo in funzione della corrente per il secondo prototipo.

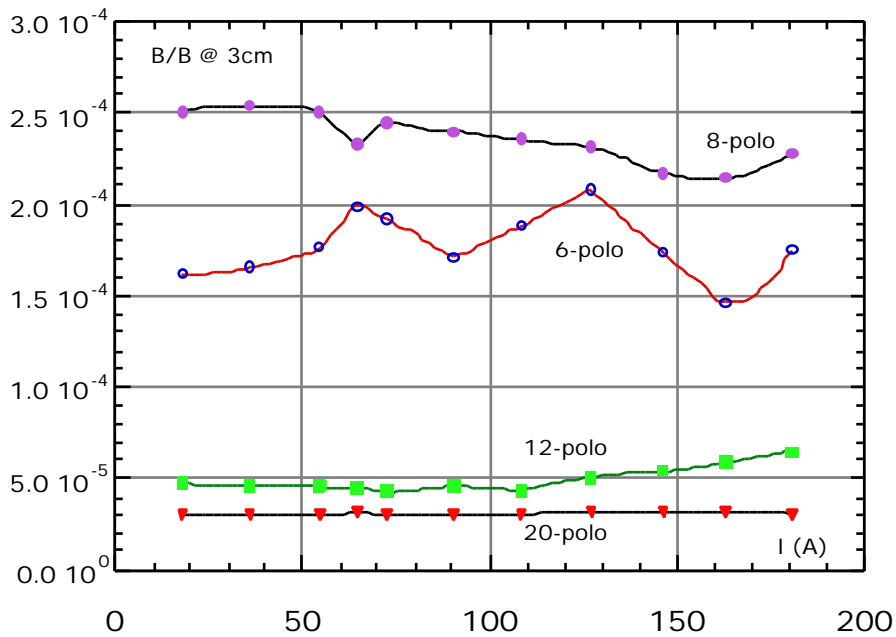


Figura 15 - Andamento con la corrente dei contributi multipolari del secondo prototipo.

L'andamento del campo lungo rette parallele all'asse del magnete sul piano mediano è stato misurato a tre diverse correnti di alimentazione (64.6A, 145.5A e 180.0A), ottenendo risultati del tutto simili a quelli riportati in Figura 12. Le lunghezze magnetiche, trovate dividendo il valore dell'integrale di campo a diverse distanze dall'asse per il campo al centro del magnete, sono riportate nella Figura 16. Nella stessa Figura, per confronto, sono riportati i valori delle lunghezze magnetiche ottenute dalla larghezza a metà altezza, misurando cioè la distanza tra i due punti in cui il campo è esattamente la metà del valore misurato al centro del magnete. I valori trovati con il primo metodo sono in accordo con quelli misurati sul primo prototipo, mentre quelli ricavati con il secondo sistema sono sensibilmente inferiori (di 15mm).

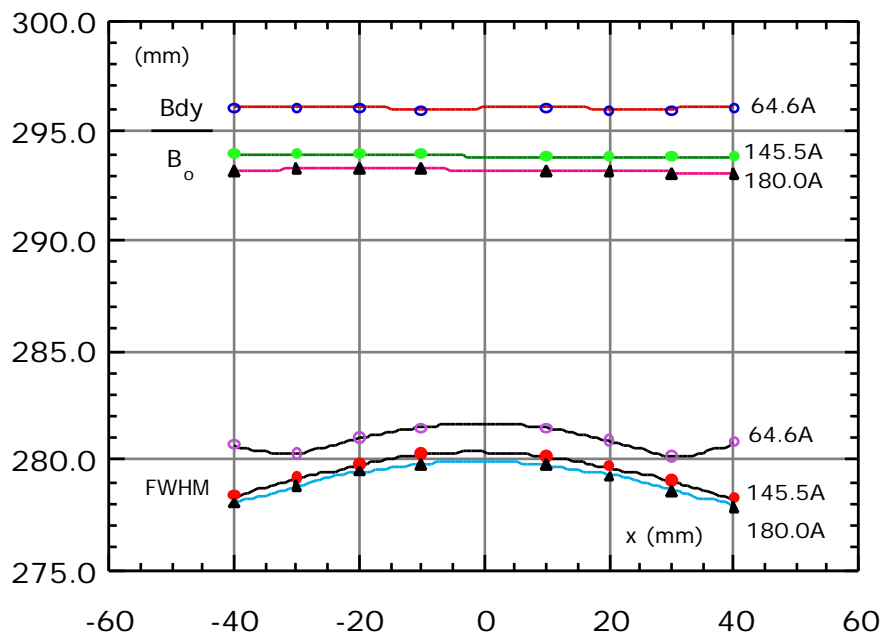


Figura 16 - Lunghezza magnetica del secondo quadrupolo prototipo.

### 3. MISURE ELETTRICHE E TERMICHE

Sul prototipo del quadrupolo sono state effettuate un certo numero di misure elettriche che vengono descritte nel seguito. Prima di entrare nel dettaglio, si riassumono in Tabella 2 i parametri fondamentali del quadrupolo prototipo.

**Tabella 2** - Parametri del quadrupolo degli archi degli anelli principali di DA NE

	Unità	Nominale	Massimo
Energia	MeV	510	750
Gradiente nominale	T/m	3.6	8
Diametro di gola	mm	108	108
Zona utile	mm	± 30	± 30
Qualità di campo   B/B		$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Lunghezza magnetica di progetto	m	0.3	0.3
N. di Spire per polo		65	65
Corrente	A	65.6	149
Densità di corrente	A/mm <sup>2</sup>	1.99	4.475
Sezione del conduttore	mm*mm	7*7	7*7
Diametro foro di raffreddamento	mm	4.5	4.5
Resistenza per magnete	m	115	118
Tensione	V	7.48	17.58
Induttanza	H	52.5	52.5
Potenza	W	486	2620
Circuiti idraulici per magnete		4	4
Portata totale per magnete	L/s	0.06	0.06
Caduta di pressione	ATM	1.7	1.7
Temperatura acqua all'ingresso	°C	32	32
Incremento di temperatura	°C	2	10

La resistenza del quadrupolo è stata misurata usando un micro-ohmmetro, AOIP mod. OM 20, a temperatura ambiente (@ 23 °C). Il valore misurato è stato di 115.04 m , rispetto il valore teorico di 114 m .

Misura analoga è stata effettuata usando il metodo Volt-Amperometrico misurando i seguenti valori:

$$17.25 \text{ V @ } 146.5 \text{ A, corrispondenti a } 118 \text{ m}$$

Tale valore è consistente con il precedente tenendo conto dell'incremento di temperatura di 10°C.

Resistenza ed induttanza del quadrupolo sono state anche misurate per mezzo dello LCR meter HP 4284 A, a differenti frequenze. I risultati sono riportati in Fig. 17. I valori in d.c. corrispondenti possono essere estrapolati dalle curve in figura.

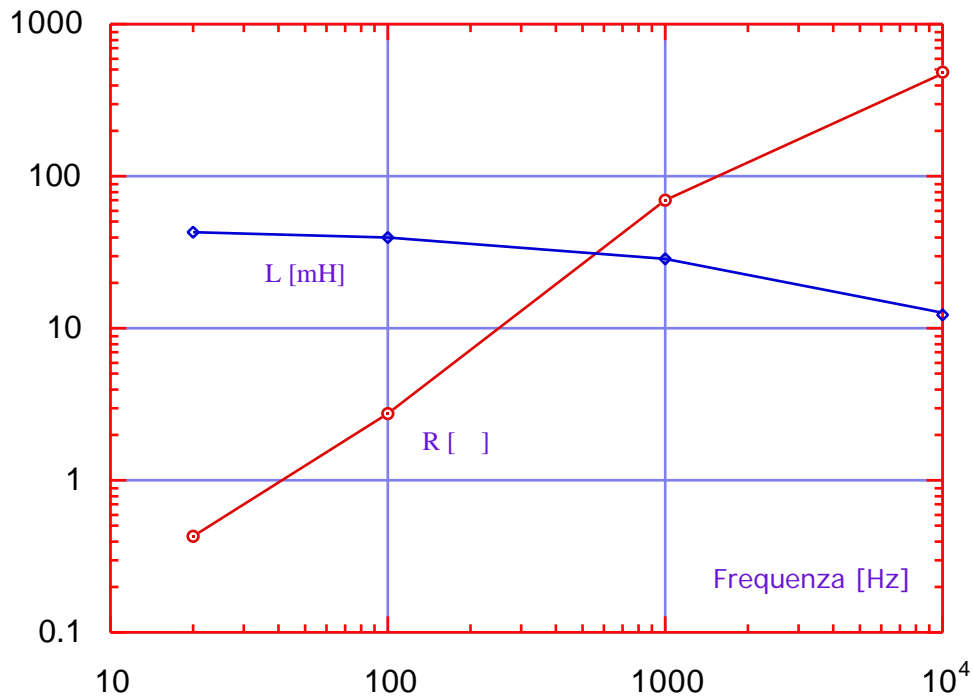


Fig. 13 - Resistenza ed induttanza in funzione della frequenza

## REFERENZE

- [1] B. Bolli, F. Iungo, M. Modena, M. Preger, C. Sanelli, F. Sgamma, M. Troiani, S. Vescovi - "Measurements on TESLA quadrupole prototype for the DA NE Accumulator and Main Rings - DA NE Technical Note MM-4 (2/12/94).
- [2] F. Iungo, M. Modena, Q. Qiao, C. Sanelli - "DA NE magnetic measurements systems" - DA NE Technical Note MM-4 (2/12/94).