

ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE  
Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-85/64(R)  
23 Dicembre 1985

C. Sanelli: PROGETTO MAGNETICO DEI COMPENSATORI PER S.CO.W.

C. Sanelli: PROGETTO MAGNETICO DEI COMPENSATORI PER S.CO.W.

1.- INTRODUZIONE

Il progetto del Wiggler Superconduttore per Adone prevede un magnete s.c. composto da un unico polo centrale con due schermi laterali non eccitati e due magneti compensatori convenzionali. La Fig. 1 riporta schematicamente l'andamento del campo magnetico e dell'orbita del fascio di particelle. Il picco centrale di campo è dovuto al polo s.c. del Wiggler, i due pianerottoli attigui al picco sono dovuti agli schermi del magnete; i due pianerottoli più esterni sono dovuti ai magneti compensatori.

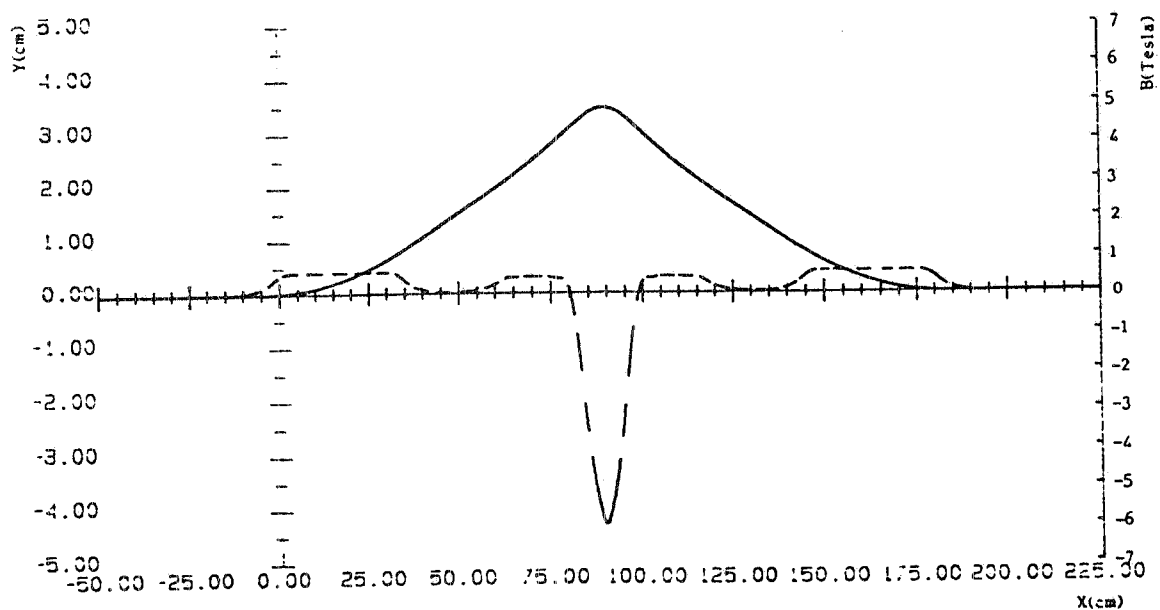


Fig. 1 - Andamento del campo magnetico ed orbita del fascio nel progetto del Wiggler s.c. per Adone.

L'uso dei magneti compensatori è imposto dal requisito che lungo la traiettoria del fascio:

$$\int B dl = 0;$$

e come è possibile vedere in Fig. 1 l'area del picco negativo non è annullata da quella dei pianerottoli dovuti agli schermi. D'altra parte esigenze connesse alla luce emessa dal fascio (si desidera avere un unico picco di luce per necessità sperimentali) impediscono di incrementare le aree positive, da cui la necessità dell'uso di magneti compensatori esterni. Il progetto magnetico di questi compensatori è basato su due requisiti fondamentali:

- il campo massimo sotto il polo deve essere dello stesso ordine di grandezza di quello degli schermi;
- l'ingombro dei magneti deve essere compatibile con gli ingombri del criostato ed il tutto deve essere contenuto nella sezione diritta di Adone.

Fissata quindi una lunghezza del magnete di 0.33 m, ne è risultato un campo dipolare di 0.57 T onde poter azzerare l'integrale del campo. Il progetto magnetico si è imperniato intorno a questo valore, anche se saranno poi le misure magnetiche sul magnete Wiggler a determinare l'esatto valore.

## 2.- STRUTTURA MAGNETICA

La struttura magnetica proposta è quella di magnete ad H, con un rapporto larghezza polo/gap pari a 4. La Fig. 2 schematizza tale geometria mostrando a sinistra la sezione di 1/4 di magnete ed a destra una vista laterale delle testate.

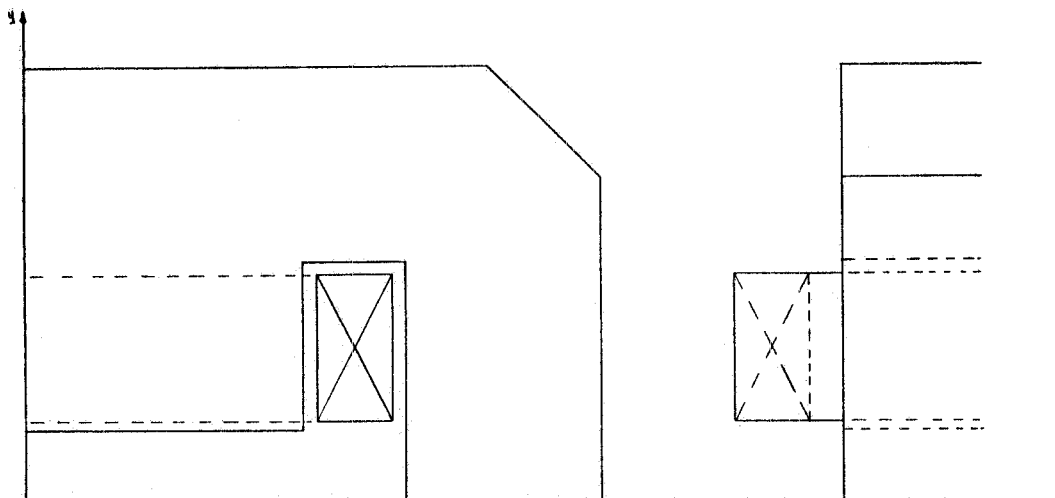


Fig. 2 - 1/4 di magnete e vista laterale della testata.

Tale configurazione, tra le varie possibili, ha il vantaggio di limitare l'ingombro delle testate ed inoltre lascia la possibilità di applicare su queste degli schermi per il confinamento del campo nella direzione della traiettoria del fascio. La Tabella I riassume le caratteristiche del magnete.

Tabella I - Caratteristiche del magnete

Altezza gap	50 mm
Larghezza del polo	200 mm
Larghezza gamba di ritorno	70 (x2) mm
Campo nominale sull'asse	5.74 kG
Campo massimo sull'asse	8.83 kG
Numero di bobine	2
Eccitazione nominale per bobina	11475 Asp
Eccitazione massima per bobina	18000 Asp
Densità di corrente nominale	16.35 A/mm <sup>2</sup>
Densità di corrente massima	25.65 A/mm <sup>2</sup>
Numero di spire/bobina	18
Dimensioni del conduttore Cu	8x8 Ø 5 mm <sup>2</sup>
Superficie utile Cu	39 mm <sup>2</sup>
Corrente nominale	637.5 A
Corrente massima	1000.0 A
Potenza nominale per magnete	8.9 kW
Potenza massima per magnete	22.0 kW
Tensione ai capi di un magnete nom.	14 V
Tensione ai capi di un magnete mas.	22 V
Resistenza di un magnete	0.022 Ω
Induttanza di un magnete	2.6 mH

La mappa dei campi magnetici è stata ottenuta usando il codice di calcolo MAGNET su VAX; la configurazione studiata è quella di Fig. 2. Il codice ha permesso di valutare l'assorbimento del ferro; che alla massima eccitazione (1000 A) risulta essere del 2.5% delle amperspire totali applicate, mentre a campo nominale (637.5 A) tale assorbimento scende allo 0.5%. Particolare attenzione è stata rivolta allo studio degli shims onde ottenere una zona utile più ampia possibile. Il miglior risultato lo si è ottenuto con uno shim a due gradini sugli ultimi due cm del polo, il primo gradino di altezza 0.5 mm, il secondo di 1.2 mm. Il campo sull'asse rimane costante entro  $\pm 0.1\%$  per  $\pm 7.2$  cm ed entro  $\pm 0.01\%$  entro  $\pm 6.6$  cm a campo nominale. La Fig. 3 mostra l'allargamento della zona utile dovuto agli shims; la curva a tratto continuo è relativa ad

un polo piatto senza shims. La figura non riporta tutti i casi analizzati, per shims di area superiore a quella ottimale ( $17 \text{ mm}^2$ ) si ha un effetto di innalzamento della curva che peggiora la zona utile. La Fig. 4 mostra l'andamento del campo sull'asse del magnete alla massima eccitazione, si ha ancora una buona zona utile con variazioni del  $\pm 0.01\%$  entro  $\pm 5.4 \text{ cm}$  e del  $\pm 0.1\%$  entro  $\pm 7.0 \text{ cm}$ .

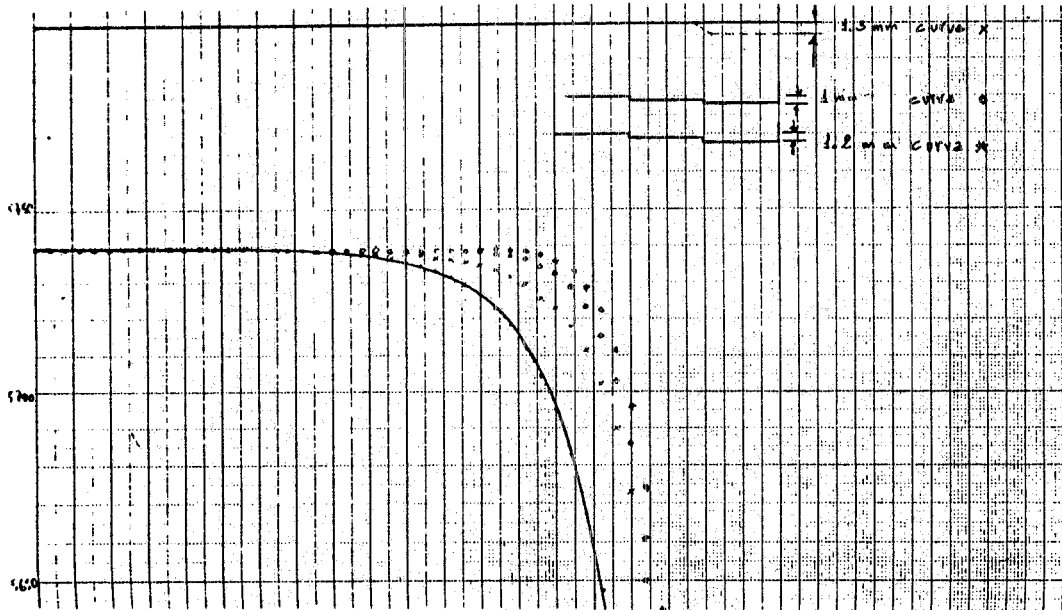


Fig. 3 - Allargamento della zona utile dovuto agli shims.

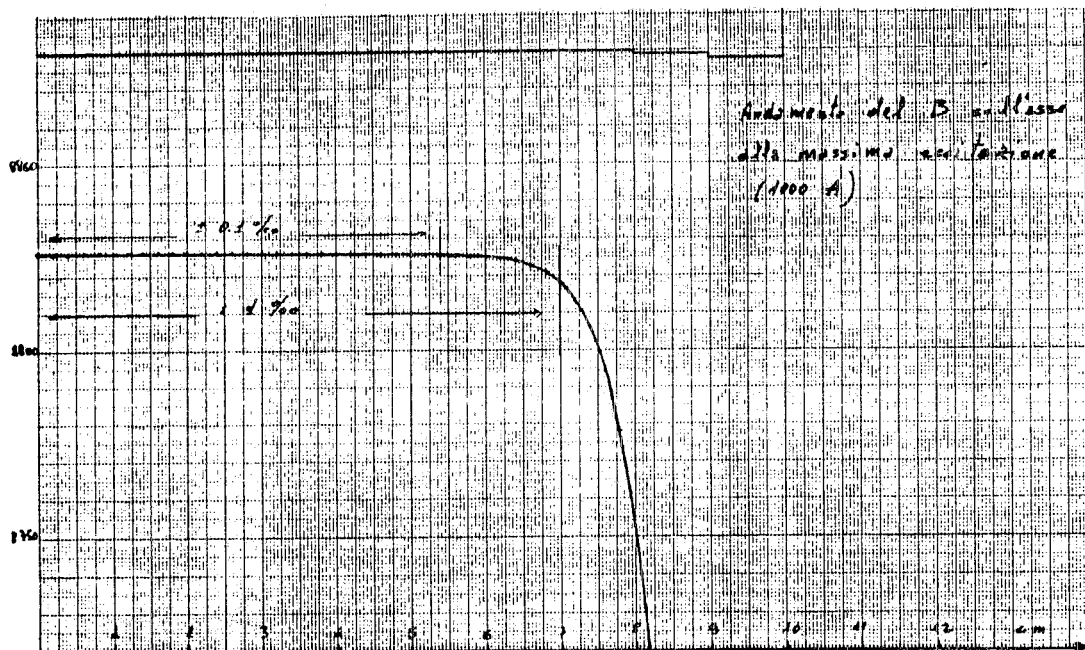


Fig. 4 - Andamento del B sull'asse alla massima eccitazione.

La Fig. 5 mostra l'andamento del campo (nominale) a  $\pm 6$  mm dall'asse, indicando una zona utile con variazioni del  $\pm 0.01\%$  entro  $\pm 6.0$  cm e del  $\pm 0.1\%$  entro  $\pm 7.8$  cm. La Fig. 6 è l'analogo della Fig. 5 ma a campo massimo, si ha  $\pm 0.01\%$  entro  $\pm 6.6$  cm ed  $\pm 0.1\%$  entro  $\pm 7.6$  cm.

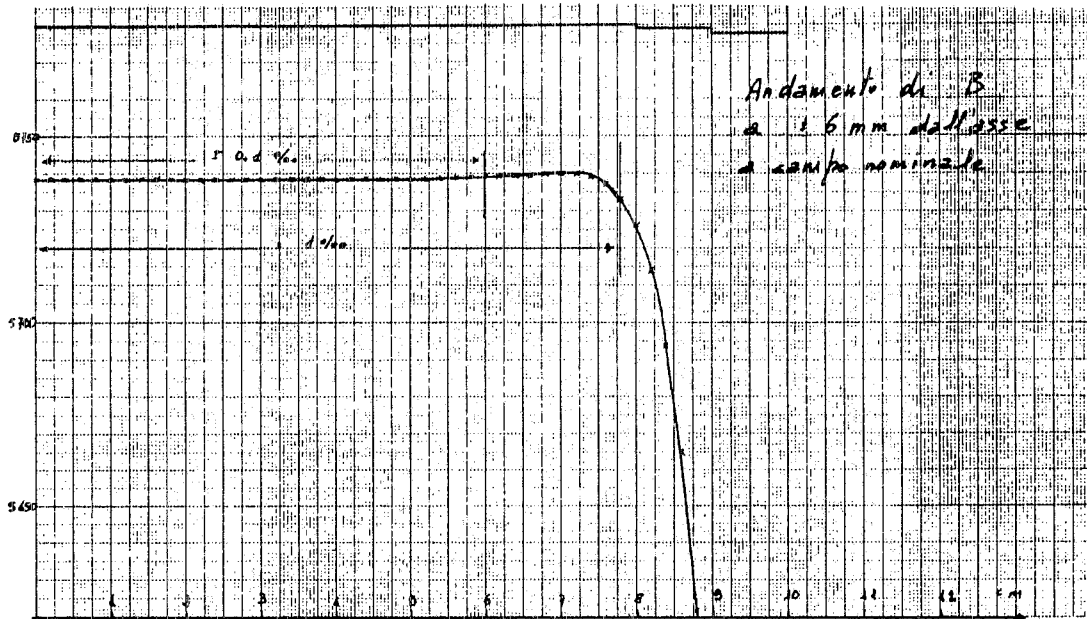


Fig. 5 - Andamento del B a +6 mm dall'asse a campo nominale.

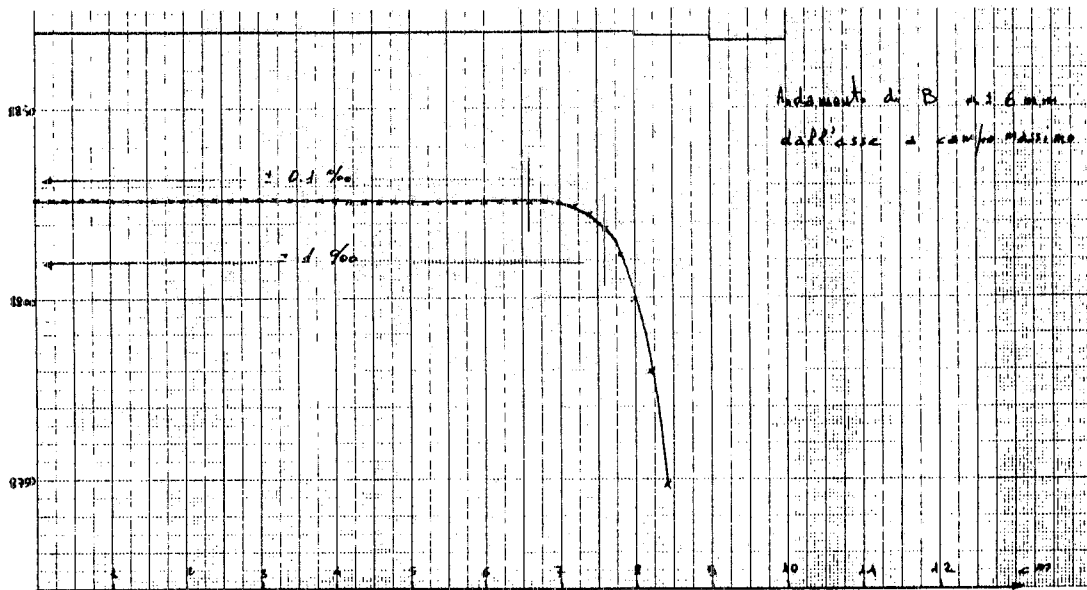


Fig. 6 - Andamento del B a +6 mm dall'asse a campo massimo.

### 3.- CORREZIONE SESTUPOLARE

Il Wiggler s.c., essendo una struttura magnetica in cui il ferro è in saturazione (permeabilità relativa 1.3-1.4), introduce un sestupolo il cui integrale lungo l'orbita delle particelle è di difficile valutazione allo stato attuale del progetto. Una possibilità che ci si vuole riservare è quella di poter sagomare il profilo polare del magnete compensatore in modo tale da poter introdurre un sestupolo integrato di segno opposto a quello introdotto dal Wiggler, in modo da azzerarne l'integrale. Partendo dalla definizione del potenziale per un sestupolo:

$$U = B_S (3y^2 x - x^3);$$

si ottiene l'espressione dell'induzione B:

$$B_x = 3\mu_0 B_S (y^2 - x^2); \quad B_y = 6\mu_0 B_S (x y); \quad (1)$$

facendo riferimento al sistema di Fig. 7, lungo l'asse y, per  $x = 0$ , l'induzione ha la

sola componente  $B_x$ :

$$B_x = 3\mu_0 B_S y^2;$$

definiamo la costante sestupolare:

$$\frac{1}{2} \frac{d^2 B_x}{dy^2} = 3\mu_0 B_S = S \quad (\text{T/m}^2)$$

la (1) diventa:

$$\begin{aligned} B_x &= S(y^2 - x^2); \\ B_y &= 2Sxy; \end{aligned} \quad (2)$$

se a questo campo di sestupolo si vuole sommare un dipolo le cui componenti siano:

$$B_x = B_0; \quad B_y = 0;$$

si ottiene:

$$B_x = S(y^2 - x^2) + B_0; \quad B_y = 2Sxy; \quad (3)$$

da cui

$$H_x = \frac{S}{\mu_0} (y^2 - x^2) + \frac{B_0}{\mu_0}; \quad H_y = \frac{2S}{\mu_0} xy; \quad (4)$$

ma poichè:

$$H = \nabla U;$$

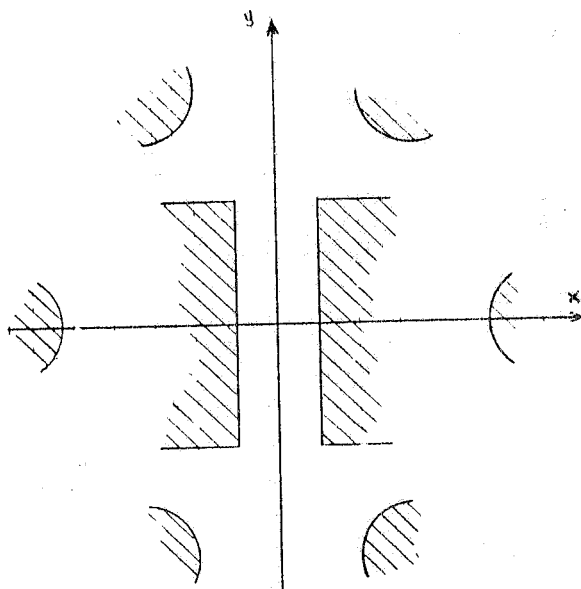


Fig. 7 - Sistema di riferimento dipolo - sestupolo.

integrando le (4) si trova l'espressione del potenziale magnetico a meno di una costante:

$$U = \frac{S}{\mu_0} y^2 x - \frac{S}{\mu_0} \frac{x^3}{3} + \frac{B_0 x}{\mu_0} + C. \quad (5)$$

Poichè si vuole trovare l'espressione analitica del profilo polare, che è una equipotenziale, si può porre:

$$\frac{S}{\mu_0} y^2 x - \frac{S}{\mu_0} \frac{x^3}{3} + \frac{B_0}{\mu_0} x = \text{cost}; \quad (6)$$

imponendo la condizione che per  $y = 0$ ,  $x = g/2 = x_0$ , dove  $g = \text{gap}$ , si ha dalla (6):

$$-\frac{S}{\mu_0} \frac{x_0^3}{3} + \frac{B_0 x_0}{\mu_0} = \text{cost}; \quad (7)$$

sostituendo questa espressione della costante in (6), si ha:

$$\frac{S}{\mu_0} y^2 x - \frac{S}{\mu_0} \frac{x^3}{3} + \frac{B_0 x}{\mu_0} = \frac{B_0 x_0}{\mu_0} - \frac{S}{\mu_0} \frac{x_0^3}{3}; \quad (8)$$

dividendo nella (8) per  $B_0$  e ponendo:

$$k = \frac{S}{B_0};$$

si ha:

$$x(1 + ky^2) - \frac{1}{3} kx^3 = x_0 - \frac{k}{3} x_0^3; \quad (9)$$

questa curva è simmetrica rispetto l'asse delle ascisse, dalla (9) si ottiene con alcuni passaggi:

$$y = \pm \sqrt{\frac{2}{kx} \left( x_0 - \frac{x_0^3}{3x} + \frac{x^2}{3} - \frac{1}{k} \right)}; \quad (10)$$

che dà l'espressione dell'ordinata  $y = f(x)$ .

La (10) va risolta tenendo presente che per ottenere soluzioni reali, il radicando della (10) deve essere positivo, ciò si traduce nelle seguenti condizioni (per variazioni di  $x$  nei dintorni di  $x_0$ ):

$$\text{per } S > 0 \quad x = < x_0 = g/2 ;$$

$$\text{per } S < 0 \quad x > = x_0 = g/2 .$$

La Fig. 8 mostra alcuni profili teorici ricavati dalla (10) per il caso  $S > 0$ , per vari valori di  $S$  e nelle seguenti ipotesi:

$$x_0 = g/2 = 0.025 \text{ (m)}; \quad B_0 = 0.574 \text{ (T)}.$$



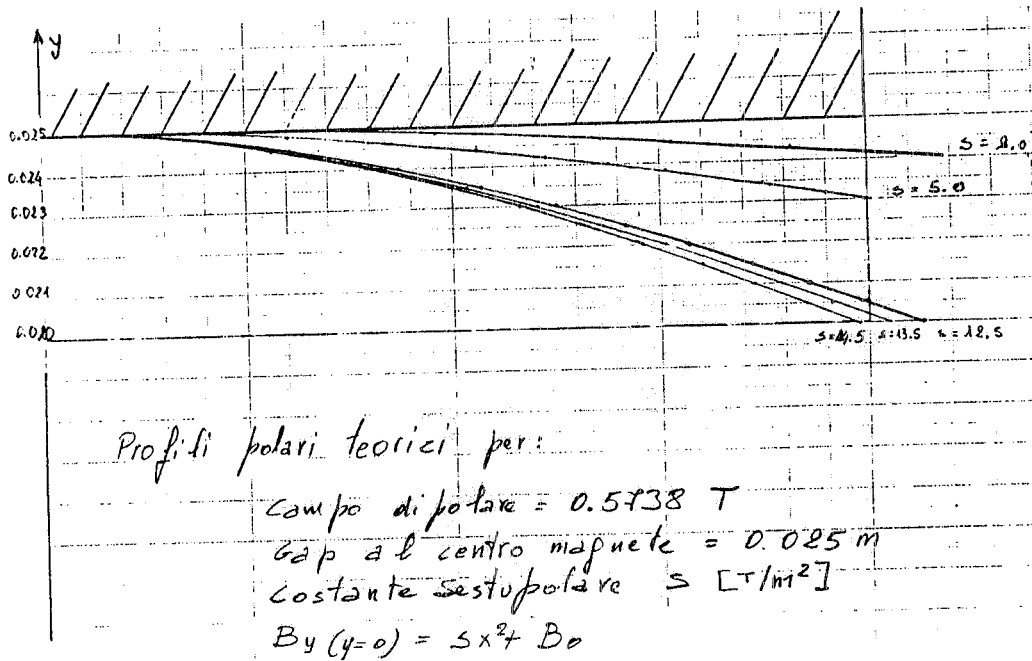


Fig. 8 - Profili polari teorici per diversi valori di  $S$ .

A verifica di quanto detto si sono effettuati alcuni run di MAGNET, dando al polo un profilo ricavato dalla (10) per vari valori di  $S$ . Le Fig. 9 e 10 riportano, per  $S = 5$  e  $S = 13.5$  rispettivamente, l'andamento del campo sull'asse calcolato da MAGNET, linea continua, e teorico, ricavato dalla (3), linea tratteggiata. Lo scostamento tra le due curve è molto piccolo; infatti ad una distanza dal centro del polo di 5 cm (ricordiamo che il 1/2 polo è 10 cm) si ha un  $DB/B$  (teorico) pari allo 0.19% per il caso  $S = 5$  e 0.33% per  $S = 13.5$ .

In conclusione, una volta effettuate le misure magnetiche sul Wiggler superconduttore e verificata l'esigenza o meno di sagomare il profilo polare dei magneti compensatori, la procedura descritta permetterà la lavorazione della sovrascarpa polare a seconda che si voglia un plateau piatto oppure una componente sestupolare aggiunta a quella di dipolo.

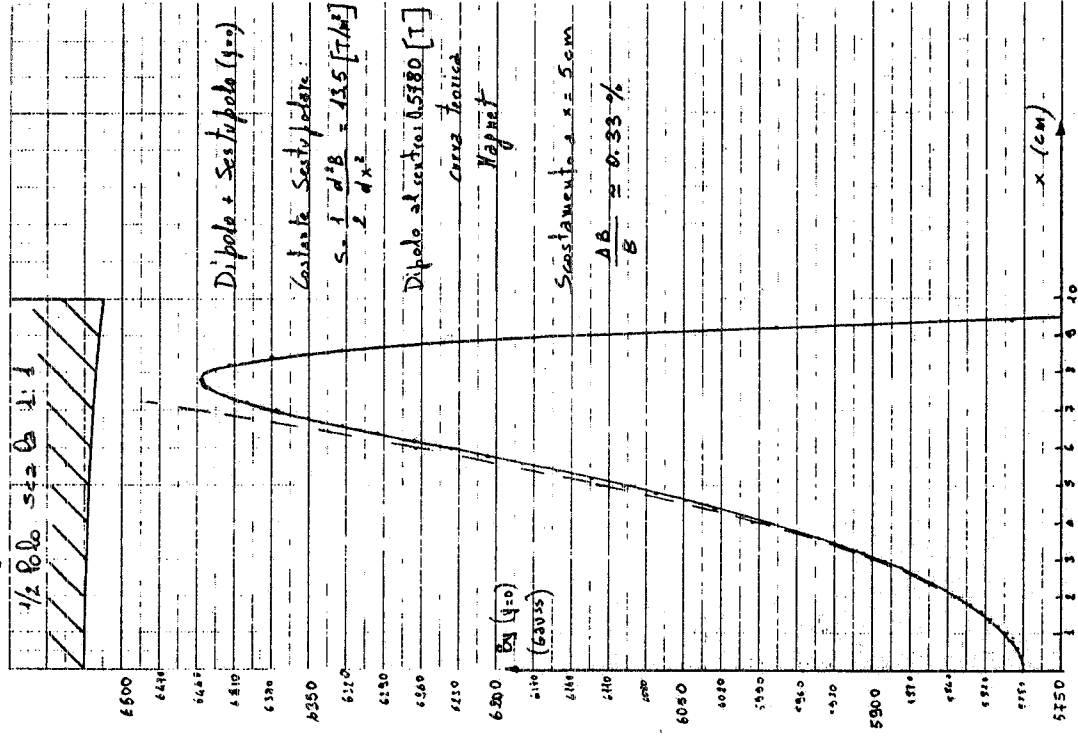


Fig. 10 - Dipolo + sestupolo,  $S = 13.5 (T/m^2)$ .

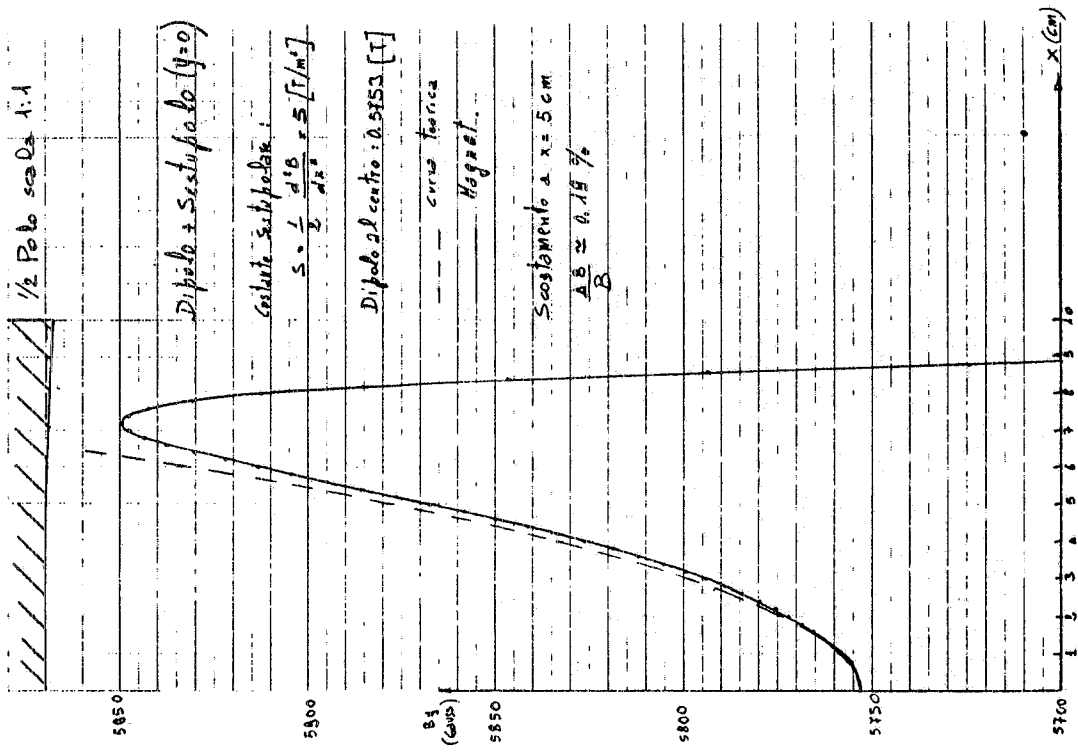


Fig. 9 - Dipolo + sestupolo,  $S = 5 (T/m^2)$ .