

LNF - 68/72
12 Dicembre 1968

A. Catitti e G. Pasotti: RELAZIONE SUL PROGETTO DEL
MAGNETE PER ESPERIENZE CON ADONE DI TIPO SOLE-
NOIDE TRASVERSALE E LONGITUDINALE.

Nota Interna: n. 421
12. 12. 1968.

A. Catitti e G. Pasotti: RELAZIONE SUL PROGETTO DEL MAGNETE
PER ESPERIENZE CON ADONE DI TIPO SOLENOIDE TRASVERSALE
E LONGITUDINALE. -

INTRODUZIONE. -

A seguito del Congressino sulla sperimentazione con Adone, tenutosi a Frascati nel Febbraio 1966, un apposito gruppo di studio ha esaminato le possibili soluzioni del magnete necessario alla sperimentazione suddetta. La relazione⁽¹⁾ di tale gruppo di studio concludeva che sarebbe stato opportuno costruire un magnete a forma di solenoide che potesse essere montato nella sezione esperienze di Adone sia longitudinalmente che trasversalmente rispetto al fascio.

Successivamente il gruppo magneti ha esaminato con maggior attenzione i problemi tecnici che nascevano nel progetto di cinque soluzioni del magnete⁽²⁾ e, a seguito delle conclusioni del gruppo di studio succitato, ha eseguito un progetto più dettagliato di un magnete a solenoide da montare trasversalmente e di uno da montare longitudinalmente sul fascio di Adone. Si è visto infatti che sarebbe stato assai difficoltoso prevedere un solenoide unico che potesse essere montato indifferentemente nelle due direzioni. L'unica parte del solenoide trasversale che potrebbe probabilmente essere utilizzata nella disposizione longitudinale è la bobina esterna.

2.

In questa nota si riportano alcune considerazioni di carattere generale su questi due magneti e le principali caratteristiche tecniche dei due progetti.

1) - CONSIDERAZIONI DI CARATTERE GENERALE. -

Entrambi questi magneti sono costituiti essenzialmente da tre parti fondamentali: un solenoide esterno per produrre il campo magnetico principale, una struttura in ferro per convogliare il flusso di ritorno ed un sistema magnetico di compensazione per evitare che il campo principale perturbi l'orbita del fascio di Adone. Non è necessario che questo sistema di compensazione annulli completamente il campo sul fascio in tutta la zona interessata dal magnete, ma è sufficiente ottenere in tale zona la condizione $\left| \int B_t \cdot dl \right| \leq 2 \text{ gauss} \times \text{metro}$ (B_t = campo trasverso rispetto al fascio).

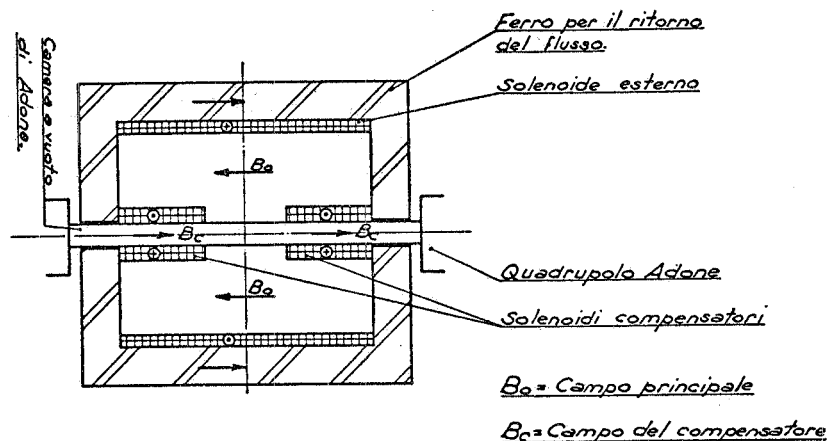


FIG. 1 - Disposizione schematica del magnete longitudinale.

In Fig. 1 è riportato uno schema del magnete montato longitudinalmente. In esso la compensazione è ottenuta mediante due solenoidi, montati attorno alla camera a vuoto, che lasciano un'ampia area libera attorno alla zona delle reazioni; si evita così che le particelle prodotte dalle reazioni stesse debbano attraversare lo spessore dei conduttori del solenoide di compensazione come avverrebbe se esso fosse continuo. Con la disposizione longitudinale, il magnete risulta concatenato topologicamente con la camera a vuoto di Adone e non lo si può rimuovere senza aprire la camera stessa; operazione questa assai complicata e che comporta lunghi periodi di fermo alla macchina. Per evitare ciò si può ricorrere alla disposizione trasversale (v. Fig. 2) nella quale tutti i componenti del magnete (solenoidi principale, ferro, magneti compensatori) sono costituiti da parti che è possibile smontare senza interferire con la camera a vuoto. In questa soluzione, d'altro canto, la compensazione risulta estremamente più delicata poiché il campo magnetico principale è trasversale rispetto ai fasci.

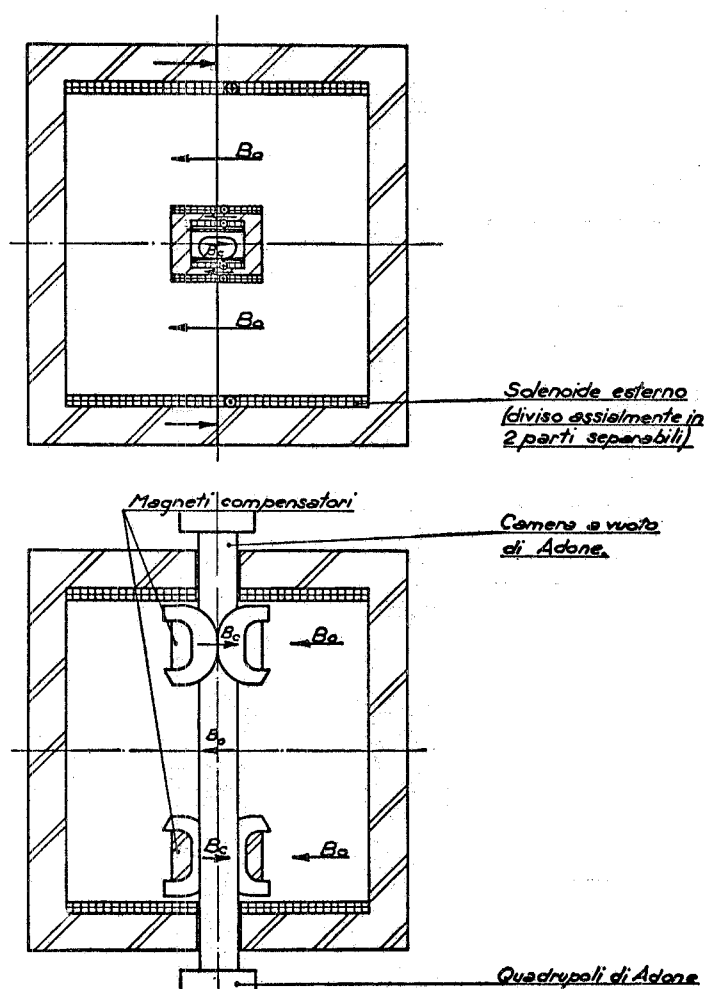


FIG. 2 - Disposizione schematica del magnete trasversale.

sai contenuto per evitare un eccessivo assorbimento delle particelle che debbono attraversare il solenoide per giungere alle camere a scintilla esterne).

Per ridurre la potenza dissipata è stato fatto un calcolo di massima sulla possibilità di impiegare un solenoide superconduttore (almeno per i compensatori) ma, dato il basso campo magnetico richiesto, il filo superconduttore non viene sufficientemente sfruttato e tale soluzione non risulta economicamente vantaggiosa senza peraltro permettere la riduzione degli ingombri.

2) - CARATTERISTICHE TECNICHE DEL MAGNETE TRASVERSALE. -

Nel presente paragrafo diamo un elenco delle principali caratteristiche delle parti componenti il magnete ed una descrizione del metodo di accesso alle camere a scintilla interne ed alla camera a vuoto di Adone.

Nei due progetti studiati si è dovuto tener conto che per esigenze sperimentali il magnete deve avere il maggior angolo solido possibile (per ottenere un'elevata velocità di conteggio) ed una buona risoluzione in momento delle particelle. La risoluzione dipende da $BL^{3/2}$, BL^2 o $BL^{5/2}$ a seconda del tipo di camera a scintilla usata⁽¹⁾ (B = campo magnetico, L = lunghezza della traiettoria della particella in direzione normale al campo magnetico). Ne deriva la necessità di avere elevati valori di questi due parametri. D'altra parte le dimensioni radiali massime del solenoide sono vincolate (almeno per il magnete trasversale) dallo spazio a disposizione nella sezione delle esperienze. Dal canto suo il campo B è legato sia alla potenza max dell'alimentatore (fissata per ragioni economiche a 2 MW) sia allo spessore dei conduttori del solenoide principale (che deve essere as

aggiustato per evitare un eccessivo assorbimento delle particelle che debbono attraversare il solenoide per giungere alle camere a scintilla esterne).

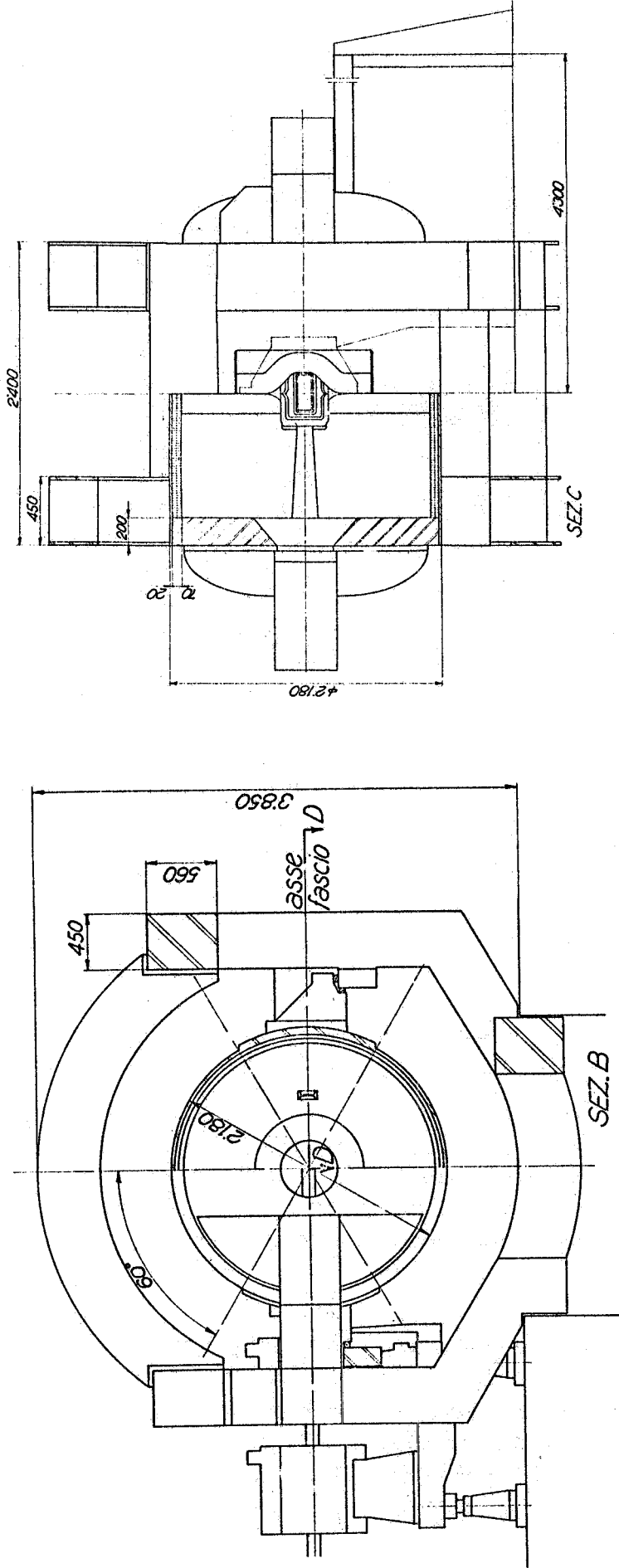


FIG. 3a

FIG. 3b

FIG. 3 - Disegno d'assieme del magnete trasversale
 a) - vista e sezione B (piano verticale \perp al fascio)
 b) - vista e sezione C (piano verticale \parallel al fascio)

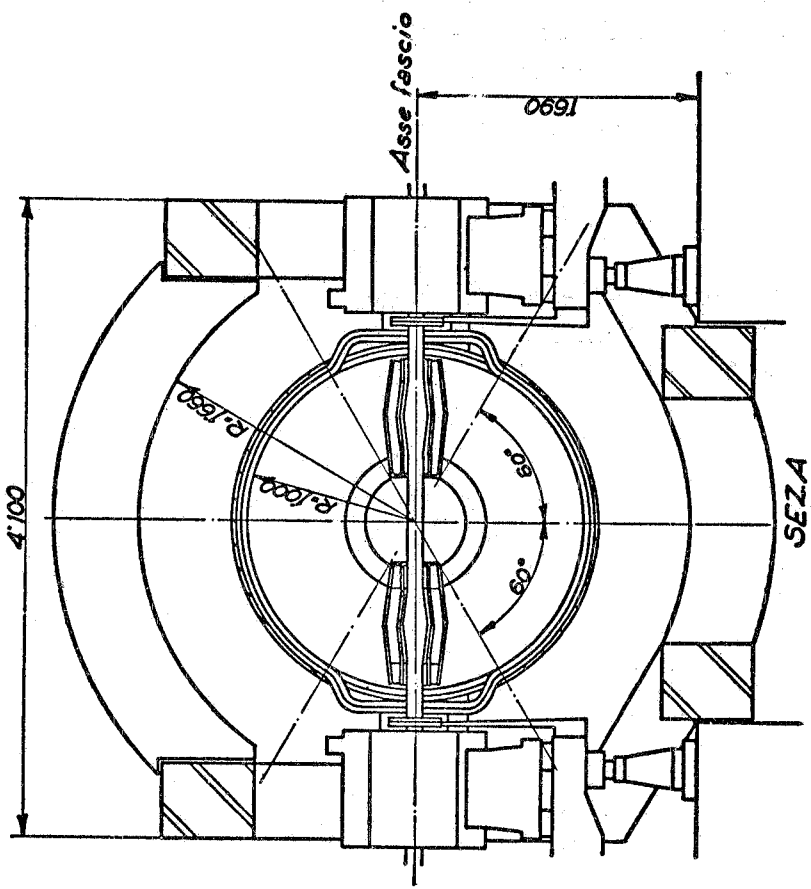


FIG. 3d

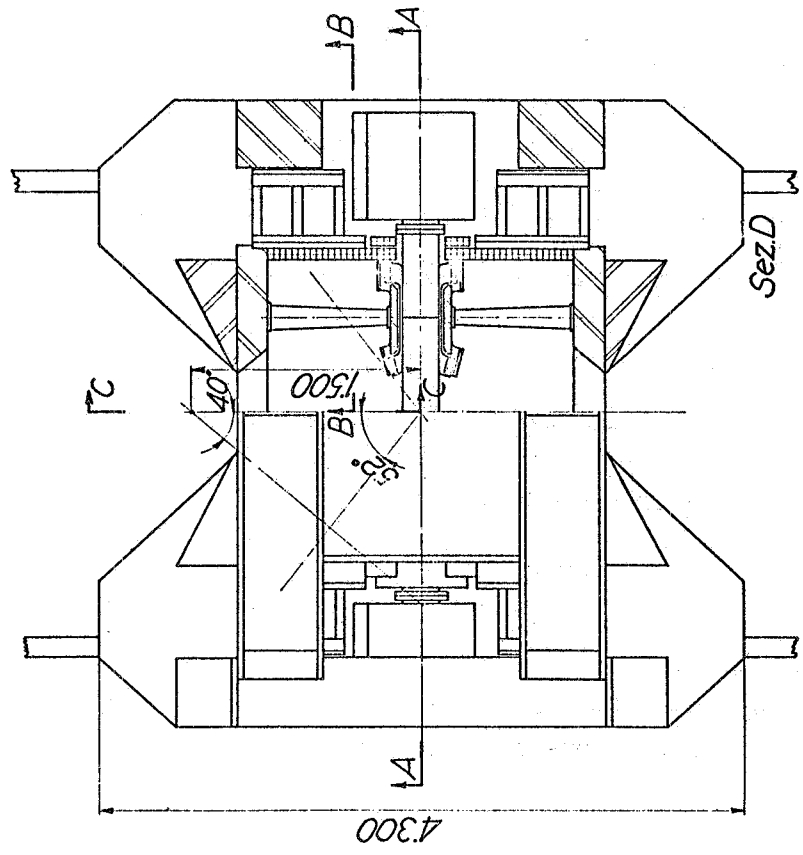


FIG. 3c

FIG. 3 - Disegno d'assieme del magnete trasversale
 c) - vista e sezione D (piano orizzontale)
 d) - Sezione A (piano verticale || al fascio).

6.

In Fig. 3 (a, b, c, d) è riportato il disegno d'assieme del magnete. In ciascuna vista della figura sono indicati pure gli angoli liberi da ingombri, interni al solenoide, utilizzabili per le esperienze.

Il campo magnetico max previsto è $\sim 4,5$ KG.

A) - Bobina principale. -

E' costituita da un solenoide a sezione circolare formato da due strati sovrapposti di conduttori di alluminio a sezione rettangolare con foro centrale in cui scorre l'acqua per il raffreddamento.

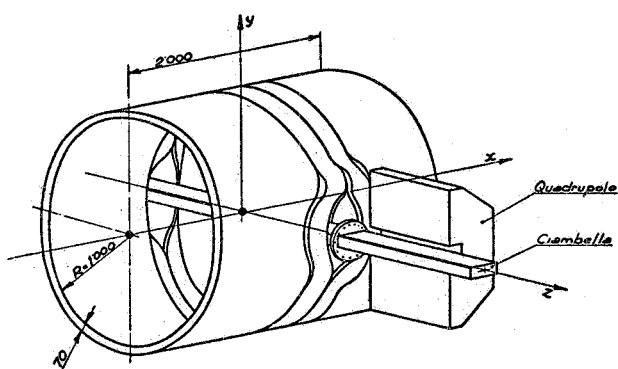


FIG. 4 - Prospettiva schematica della bobina principale con assi di riferimento (magnete trasversale).

La bobina è divisa assialmente in due sezioni di uguale lunghezza, indipendenti tra loro e separabili; ognuna delle due sezioni è contenuta in un tubo di irrigidimento in alluminio dello spessore di 20 mm, e viene sostenuta da due supporti laterali, scorrevoli su guide per mezzo di pattini a rulli. Ciò consente di allontanare l'una dall'altra le due sezioni della bobina, per accedere all'interno. Tale operazione si rende necessaria, oltre che per il montaggio iniziale, sia per ispezionare le camere a scintilla interne, che per eseguire eventuali lavori di manutenzione (sulla ciambella di Adone, sull'avvolgimento, ecc.).

Si prevede di fare eseguire tali movimenti da servomeccanismi telecomandati.

Principali caratteristiche della bobina:

- 1) - Non è concatenata meccanicamente con la camera a vuoto di Adone.
- 2) - Conduttori: in alluminio, sezione 34 x 22 mm con foro centrale $\varnothing 9$ mm.
- 3) - Numero di spire: 164 (avvolte su due strati).
- 4) - Corrente max: 5000 A.
- 5) - Tensione 260 V^(x) ($t_{media} = 50^{\circ}C$).

(x) - Questa tensione può risultare leggermente diversa (± 6 V) a causa della tolleranza di fabbricazione sulle sezioni del conduttore.

- 6) - Densità di corrente: $7,5 \text{ A/mm}^2$.
- 7) - Isolante: nastro di vetro mica.
- 8) - Raffreddamento: n. 82 circuiti in parallelo:
portata acqua $\sim 16 \text{ lt/sec}$ ($\Delta T = 20^\circ\text{C}$)
pressione acqua $\leq 10 \text{ Atm.}$
- 9) - Potenza assorbita: 1300 KW.
- 10) - Peso dell'avvolgimento: $\sim 2000 \text{ Kg.}$

B) - Struttura in ferro. -

La struttura in ferro (v. Fig. 5) consta essenzialmente di due piastroni terminali posti alle estremità della bobina, quattro colonne verticali e quattro gioghi orizzontali.

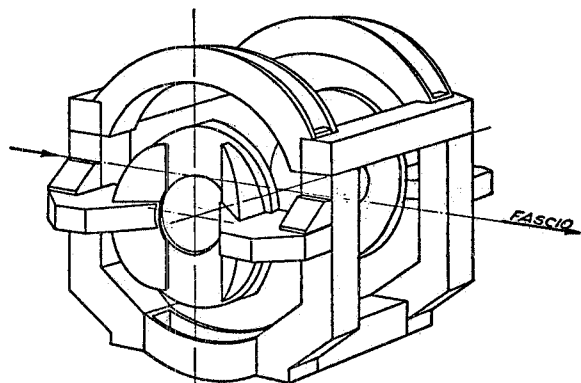


FIG. 5 - Prospettiva schematica del ferro (magnete trasversale).

Il flusso prodotto dalla bobina viene convogliato dalle piastre terminali, tramite le espansioni che le sostengono, verso le colonne e quindi verso i gioghi, che ne assicurano il ritorno.

La sezione dei gioghi e delle colonne è rettangolare, con lati di cm 45×56 .

Si prevede di usare ferro C 10 UNI od a contenuto di carbonio anche inferiore per avere una bassa caduta magnetica. L'induzione max è stata tenuta a valori di $\sim 14 \div 16 \text{ KG}$,

il che ha consentito di mantenere la caduta magnetica in tutto il ferro entro un $4 \div 5\%$ del totale delle Asp. prodotte; ciò rende molto lineare, in tutta la zona di utilizzazione, la caratteristica campo-corrente semplificando i problemi della compensazione del campo sull'orbita di Adone. Il complesso gioghi-colonne è fisso, e si prevede di sostenerlo con un traliccio di carpenteria alloggiato nella fossa presente nella sezione diritta di Adone.

I piastroni terminali, sostenuti da due espansioni laterali, possono invece traslare nella direzione dell'asse del magnete, e sono inoltre solidali con i supporti delle sezioni della bobina, concorrendo a sopportarle; la traslazione è effettuata per mezzo di pattini a rulli.

Lo spessore dei piastroni di testa è di 200 mm , ed il peso dell'intera struttura è di circa 78 Tonn.

8.

C) - Magneti compensatori. -

I due magneti compensatori, (v. Fig. 6) uguali tra loro, sono costituiti da un mantello in ferro (che circonda la camera a vuoto di Adone) e da due avvolgimenti, uno posto internamente ed uno esternamente al ferro stesso. L'avvolgimento esterno ha essenzialmente il compito di annullare il campo magnetico nel suo interno, mentre l'avvolgimento interno serve a produrre all'interno del compensatore un campo B_c uguale e di direzione contraria a quello del campo principale B_0 . L'andamento dei flussi magnetici in questo tipo di compensatore risulta schematicamente illustrato in Fig. 7.

Il ferro è stato dimensionato in modo da mantenere l'induzione entro ~ 18 KG; in tal modo la caduta magnetica nel ferro del compensatore è contenuta entro \sim il 6% del numero di Asp. prodotte dall'avvolgimento interno.

I magneti non sono concatenati con la ciambella di Adone, in quanto sono divisi ognuno in due parti, indipendenti e separabili tra loro, secondo un piano verticale passante per l'asse della bobina principale. I "semi magneti" sono supportati indipendentemente, mediante travi a sbalzo fissate ai piastroni terminali; essi quindi si aprono quando vengono fatte allontanare tra loro le due semibobine.

Le travi di supporto dei semi magneti, sostengono inoltre i cavi di alimentazione ed i tubi dell'acqua di raffreddamento degli avvolgimenti. Oltre agli avvolgimenti citati vi è su ciascun compensatore un'altra piccola bobina (v. Fig. 6) il cui alimentatore è pilotato da un sistema di sonde magnetiche poste sulla ciambella di Adone. Questa bobina ha lo scopo di mantenere la compensazione in maniera automatica a tutti i valori di campo del magnete. Le cause di perturbazione che questa bobina deve compensare sono molteplici (variazione delle permeabilità del ferro tra i bassi e gli alti campi, variazione della "lunghezza magnetica" dei compensatori tra i bassi e gli alti campi, disomogeneità del ferro, ecc.). La principale di queste cause è la prima, la quale fa sì che il campo max del solenoide principale e del compensatore siano inferiori rispettivamente del 4% e del 6% a quello che sarebbe se la permeabilità fosse costante. Poiché la variazione di permeabilità fa ridurre sia il campo principale che quello del compensatore, sarebbe sufficiente che l'avvolgimento per la compensazione fine producesse al max un numero di Asp. pari al 6% dell'avvolgimento interno del compensatore. Sia per tener conto delle altre cause di perturbazione che per ragioni di prudenza, si è deciso di prevedere che questo avvolgimento produca il 10% delle Asp. dell'avvolgimento interno del compensatore. Onde permettere l'alloggiamento delle sonde per il rilievo del campo di cui si è parlato prima è stato lasciato uno spazio libero di 8 mm tra l'avvolgimento per la compensazione fine e la camera a vuoto (da una parte sola di essa).

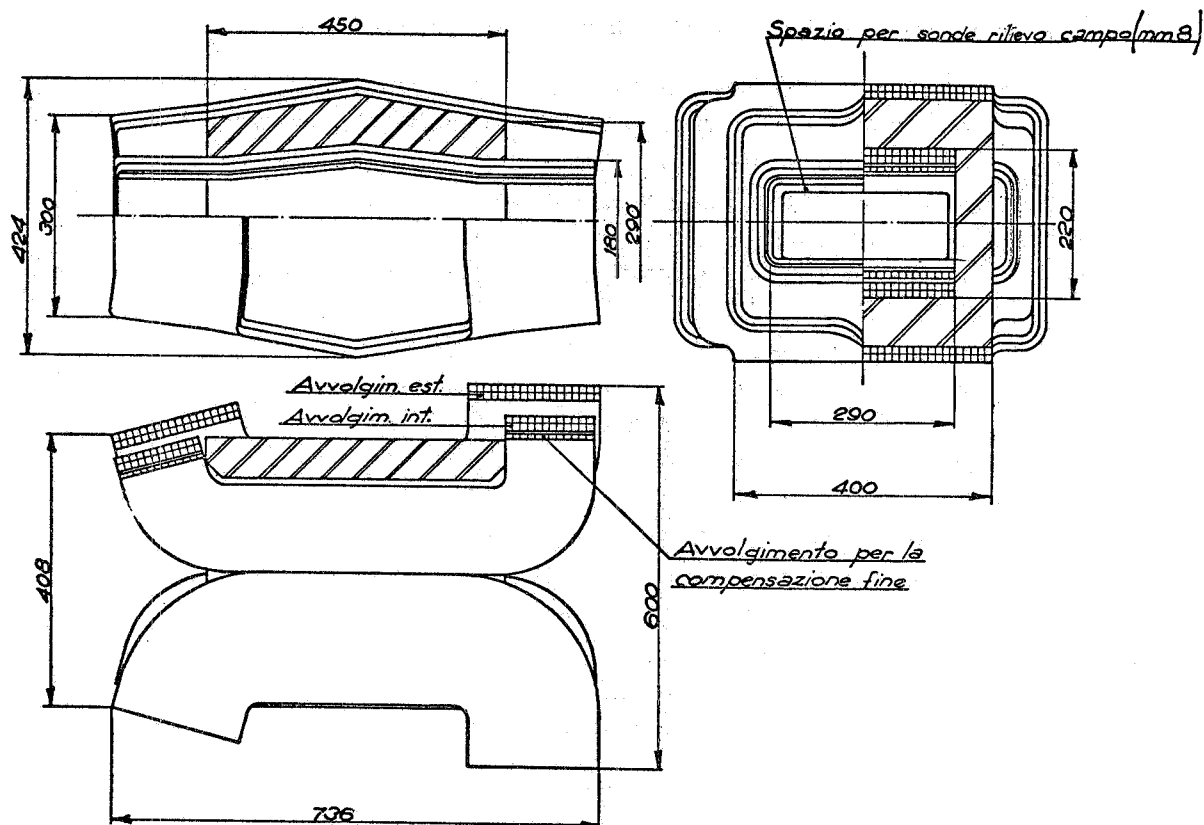


FIG. 6 - Disegno d'assieme di un compensatore del magnete trasversale.

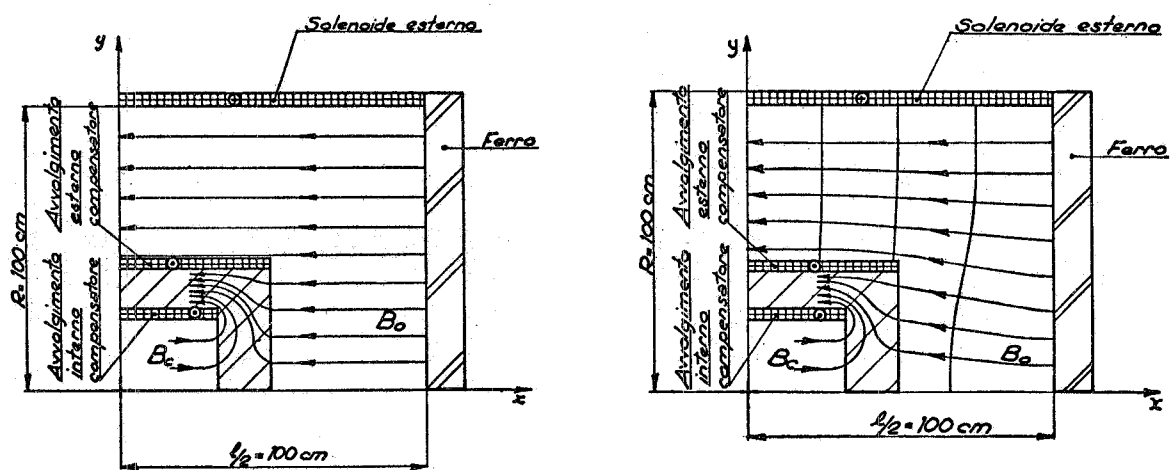


FIG. 7 - Andamento schematico dei flussi nel magnete trasversale
 a) - Con compensazione perfetta
 b) - Con eccesso di Asp. nella bobina esterna del compensatore.

10.

Caratteristiche di ogni magnete compensatore:

- 1) Conduttori: per l'avvolgimento esterno, in rame, sez. 12x12 mm con foro centrale \emptyset 6 mm; per l'avvolgimento interno, in rame, sez. 11x11 mm con foro centrale \emptyset 7 mm.
- 2) Numero di spire dell'avvolgimento esterno: 30^(x); (costituita ciascuna da 2 conduttori in parallelo).
- 3) Numero di spire dell'avvolgimento interno: 24^(x); (costituita ciascuna da 2 conduttori in parallelo).
- 4) Corrente in ciascuno dei due avvolgimenti: 5000 A
- 5) Caduta di tensione nei due avvolgimenti in serie: \sim 63 V ($t_{\text{media}} = 60^{\circ}\text{C}$)
- 6) Potenza totale dei due avvolgimenti: 315 KW (pot. tot. assorbita dai 2 magneti compensatori 630 KW).
- 7) Isolamento: nastro di vetro mica.
- 8) Raffreddamento: portata acqua \sim 2,5 lt/sec
pressione acqua \leq 10 Atm.
- 9) Peso di un magnete: \sim 400 Kg.
- 10) Caratteristiche delle bobine per la compensazione fine:
 - Numero di spire: 32 ogni bobina
 - Condutt.: rame sez. mm 8x8 con foro mm 5x5
 - Corrente: 470 A
 - Tensione: 15 V ($t_{\text{media}} = 60^{\circ}\text{C}$)
 - Potenza assorbita \sim 7 KW (Potenza totale assorbita da entrambe le bobine di compensazione fine 14 KW).

3) - CARATTERISTICHE TECNICHE DEL MAGNETE LONGITUDINALE. -

In Fig. 8 è riportato un disegno d'insieme del complesso; in esso sono indicati anche gli angoli liberi da ingombri, interni al solenoide, utilizzabili per le esperienze. In questo magnete la caduta magnetica nel ferro è maggiore che in quello trasversale per cui il campo max sarà lievemente inferiore ($B_{\text{max}} \sim 4,3 \text{ KG}$).

A) - Bobina principale. -

L'avvolgimento esterno di questo magnete è praticamente identico a quello del § 2), eccetto che non è separabile al centro e che non ha le aperture per il passaggio della camera a vuoto di Adone: infatti essa è coassiale con l'avvolgimento. Questa bobina risulta quindi concatenata

(x) - Ciascuna delle ultime 6 spire di entrambi gli avvolgimenti è munita di una presa di corrente per eseguire la regolazione grossolana della compensazione durante la fase di messa a punto iniziale.

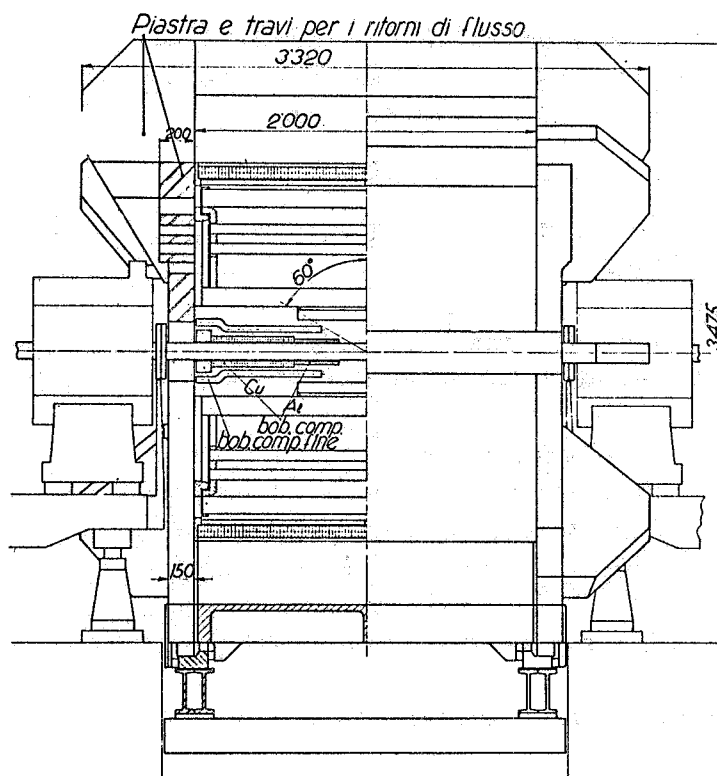
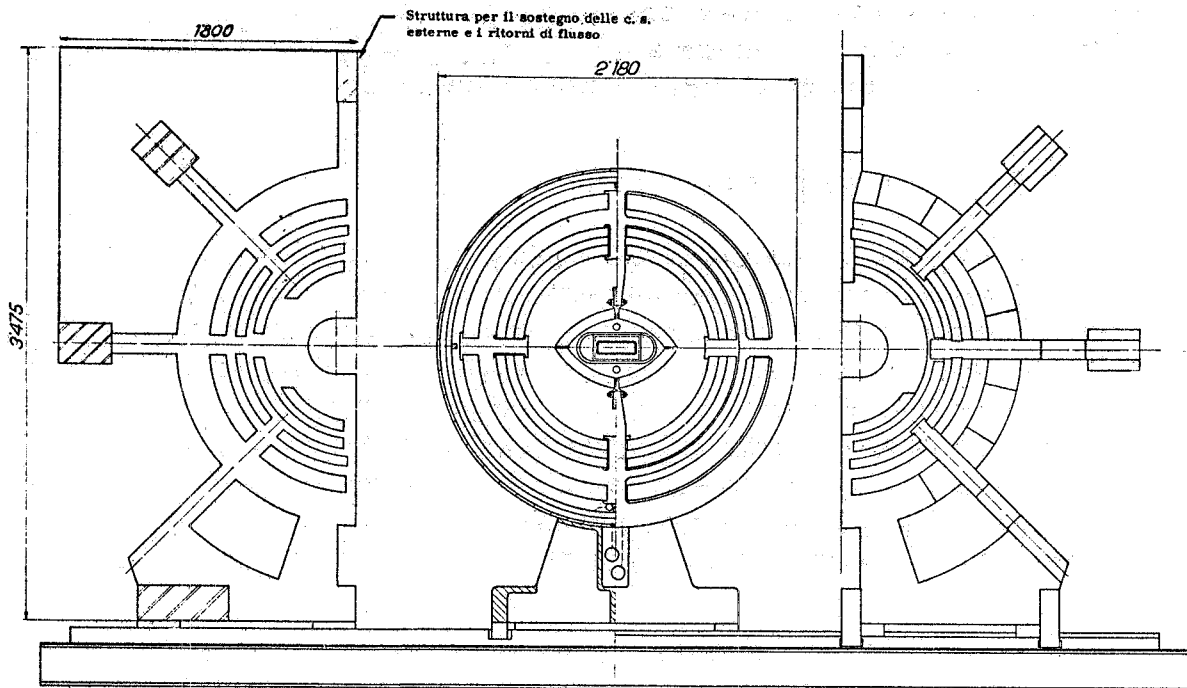


FIG. 8 - Disegno d'assieme del magnete longitudinale
 a) - vista e sezioni sul piano verticale \perp al fascio
 b) - vista e sezioni sul piano verticale \parallel al fascio.

12.

con la camera a vuoto. Il metodo previsto per accedere all'interno del solenoide (per introdurre le camere a scintilla, per eseguire lavori di manutenzione, ecc.) è illustrata al punto D del presente paragrafo.

B) - Bobine di compensazione. -

Le bobine di compensazione constano di due avvolgimenti a sezione rettangolare con i lati minori costituiti da due semicerchi (v. Fig. 8). I conduttori sono, per ogni avvolgimento, in parte in rame ed in parte in alluminio. Le bobine, montate direttamente sulla ciambella, sono distanziate tra loro in modo da lasciare libera una zona al centro (circa 28 cm), per permettere una visuale libera, dal centro del magnete, di 120° sul piano verticale. Sul piano orizzontale, dove la bobina presenta una larghezza maggiore, la visuale di 120° è oscurata soltanto dai conduttori in alluminio, mentre il tratto di bobina con i conduttori in rame, rimane fuori da tale angolo.

La sezione dei conduttori di rame è di 15 x 18 mm con foro centrale di 5 mm di diametro; la sezione dei conduttori di alluminio è di 20 x 10 mm con foro centrale di 5 mm di diametro.

Anche in questo magnete vi è necessità di un avvolgimento per la compensazione fine; in questo caso esso deve compensare l'intera caduta del ferro del circuito esterno (~ 65000 Asp.)

Caratteristiche di ogni bobina:

- 1) Numero di spire: 60 in rame (distribuite su 2 strati) e 24 in alluminio.
- 2) Corrente max: 5000 A
- 3) Tensione: 56 V
- 4) Densità di corrente: 20 A/mm² nel rame, 28 A/mm² nell'alluminio.
- 5) Potenza: 280 KW (potenza totale assorbita dalle 2 bobine di compensazione 560 KW).

6) Isolamento: nastro di vetro mica.

7) Raffreddamento: separato nei due tratti in rame e in alluminio.

Portata acqua, rispettivamente: 1, 15 e 1, 1 lt/sec.

Pressione circuito Al ≤ 10 Atm.

" " Cu ≤ 10 Atm.

8) Caratteristiche delle bobine per la compensazione fine:

- numero spire: 80
- conduttori: in rame 8 x 8 con foro 5 x 5
- corrente: 400 A
- tensione: 30 V
- potenza assorbita: 12 KW (potenza totale assorbita da entrambi i circuiti per la compensazione fine 24 KW).

Le bobine di compensazione sono avvolte su di un supporto solido con la ciambella di Adone, lasciando lo spazio per permettere il riscaldamento per degassare la ciambella stessa e per permettere l'introdu

zione di sonde per il rilievo del campo.

- Peso totale del rame: 320 Kg (2 solenoidi)
- Peso totale dell'alluminio: 280 Kg (2 solenoidi).

C) Complesso portante le camere a scintilla interne. -

Il complesso è costituito da due piastre in alluminio, la cui sagomatura è visibile nel disegno d'insieme del magnete, fissate alle testate della bobina principale, e collegate tra loro da travi in alluminio. Tra queste due piastre è posto, con la possibilità di ruotare intorno al proprio asse, che coincide con l'asse della bobina principale, un tamburo formato da un traliccio in alluminio. In questo traliccio vanno inserite le camere a scintilla. Le camere più interne sono montate su due travi d'alluminio che collegano le piastre fisse.

Il complesso descritto è stato disegnato in modo molto indicativo, in quanto non si conoscono ancora le caratteristiche delle camere a scintilla.

D) Struttura in ferro. -

La struttura in ferro per il ritorno di parte del flusso, (una parte viene convogliata nel ferro delle camere a scintilla esterne) consta di due piastroni posti alle testate della bobina principale, collegate tra loro mediante travi in ferro a sezione rettangolare, che hanno anche il compito di dare rigidità all'insieme. I piastroni frontali, dello spessore di 150 + 200 mm, presentano delle finestre in corrispondenza delle camere a scintilla interne, per permetterne l'osservazione, ed in essi è ricavato inoltre l'alloggiamento per le camere esterne. Tutto il complesso è diviso in due parti, ed è apribile secondo un piano verticale passante per l'asse del magnete stesso. Pattini a rulli, scorrevoli su rotaie, sopportano le due parti del complesso.

Il peso totale della struttura è di \sim 26 tonn.

E) Metodo previsto per introdurre ed estrarre le camere a scintilla interne. -

L'introduzione o l'estrazione delle camere a scintilla interne avviene nel seguente modo: si apre la struttura in ferro e si fanno traslare le due parti che la compongono in modo da allontanarle e da liberare completamente il complesso formato dalla bobina e dal suo carrello supporto. In tal modo è possibile estrarre o introdurre solo le camere a scintilla che si trovano nella parte superiore, in quanto quelle che si trovano inferiormente vengono nascoste dai quadrupoli di Adone. Per ripetere l'operazione su quest'ultime camere, occorre ruotare il tamburo ove sono inserite

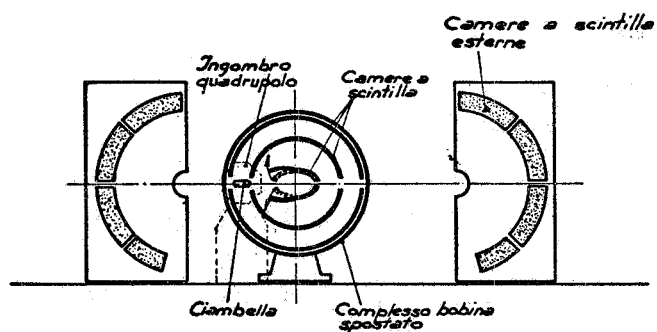


FIG. 9 - Spostamenti da eseguire per estrarre le camere a scintilla interne dal magnete longitudinale.

in modo da portarle fuori dalla zona nascosta.

Vi è inoltre la possibilità di far traslare il complesso della bobina per un certo tratto, dopo aver fatto ruotare le camere più interne allontanandole tra loro in modo che non interferiscano con la ciambella di Adone (v. Fig. 9); questo movimento, eseguito alternativamente nei due sensi, permette di accedere all'interno della bobina, per eventuali lavori di manutenzione.

4) - CONSIDERAZIONI SULLA POSSIBILITA' DI RIDURRE L'INGOMBRO DEI COMPENSATORI DEL SOLENOIDE TRASVERSALE. -

Per ridurre gli ingombri del compensatore lungo l'asse y (v. Figg. 4 e 7) e quindi aumentare l'angolo solido utilizzabile per le esperienze, si può diminuire lo spessore del ferro del compensatore. Ciò comporta però l'introduzione di una forte disuniformità nel campo magnetico del solenoide, che potrebbe però essere accettata. Esaminiamo tale possibilità. In Fig. 7a è schematizzato il percorso dei flussi magnetici nel ferro del compensatore in un quadrante del piano xy quando il numero di Asp/m nel solenoide principale e nell'avvolgimento esterno del compensatore sono uguali. In queste condizioni, se il campo principale B_0 e quello del compensatore B_c sono uguali in valore assoluto, e pari a 4,5 KG, nel ferro del compensatore si ha un'induzione max di $\sim 17 \div 18$ KG.

Aumentando il numero di Asp/m prodotte dall'avvolgimento esterno del compensatore, una parte del flusso ϕ_0 del solenoide principale viene respinta e non attraversa più il ferro del compensatore (v. Fig. 7b); si può allora ridurre lo spessore di tale ferro conservando in esso la stessa induzione. Si è calcolato che aumentando queste Asp di un fattore 2, si può ridurre di ~ 2 cm lo spessore del ferro (e quindi l'ingombro del compensatore).

Con metodo iterativo⁽³⁾ è stata ricavata una mappa approssimata^(x) dei potenziali magnetici nella regione cui si riferisce la Fig. 7, quando il numero di Asp/m dell'avvolgimento esterno del compensatore è doppio di quello del solenoide principale; in Fig. 10 è riportata tale mappa as-

(x) - (v. Pagina seguente).

sieme all'andamento delle linee equipotenziali. In Fig. 11 compare una mappa, ricavata dalla Fig. 10, delle variazioni percentuali subite dal campo magnetico assiale, normalizzato a B_0 , $[(B_x - B_0/B_0) 100]$ ed i valori del campo trasverso, normalizzato a B_0 , $[(B_y/B_0) 100]$ che nasce dall'aumento delle Asp. nel compensatore.

Nelle Figg. 12 e 13 sono riportati gli stessi grafici delle Figg. 10 e 11 ottenuti per un aumento delle Asp dell'avvolgimento esterno del compensatore di un fattore 1.5 anziché 2. Nelle Figg. 14 + 17 riportiamo gli stessi grafici delle Figg. 10 + 13 ricavati per il piano XZ.

Ringraziamo vivamente il prof. G. Sacerdoti per l'incoraggiamento ed i suggerimenti al presente lavoro, e la lettura critica di esso.

Desideriamo inoltre ringraziare il sig. S. Falcioni per l'esecuzione dei calcoli e dei grafici relativi alle mappe di campo con il metodo iterativo.

BIBLIOGRAFIA. -

- (1) - U. Amaldi Jr. et al. ; Relazione del gruppo di studio per la sperimentazione con campo magnetico presso Adone, LNF-67/3 (1967).
- (2) - Gruppo magneti, Appunti sul progetto tecnico del magnete per esperienze con Adone, LNF-67/11 (Int.) (1967).
- (3) - E. Durand, Electrostatique et magnétostatique (Masson et Cie, Paris, 1953).

(x) - Per ricavare una mappa esatta in 3 dimensioni si sarebbero dovuti affrontare lunghi calcoli che avrebbero richiesto notevole dispendio di tempo e l'uso di calcolatori. Per ottenere almeno un andamento di prima approssimazione del campo, si è risolto il problema a due dimensioni, prendendo le quote che il magnete assume nel piano xy per $z = 50$ cm (v. Fig. 18) e nel piano xz per $y = 0$. Sono state fatte anche altre approssimazioni delle quali le principali sono:

- 1) non è stata considerata l'apertura circolare esistente al centro dei piastroni di testa del magnete;
- 2) si è supposta infinita la permeabilità del ferro;
- 3) gli avvolgimenti sono stati considerati di spessore trascurabile.

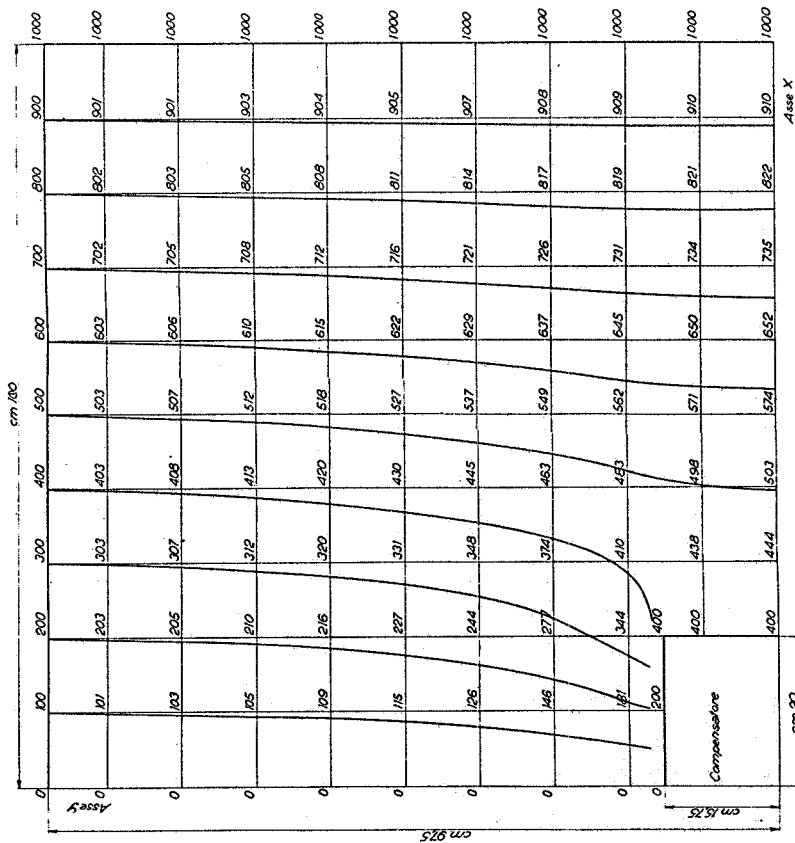


FIG. 10 - Mappa dei potenziali magnetici, in millisimi del potenziale max di mezza bobina, e andamento delle linee equipotenziali, che si ottengono raddoppiando le Asp della bobina esterna del compensatore del magnete trasversale. Piano xy ($Z = 50 \text{ cm} - v. \text{ Fig. 18}$).

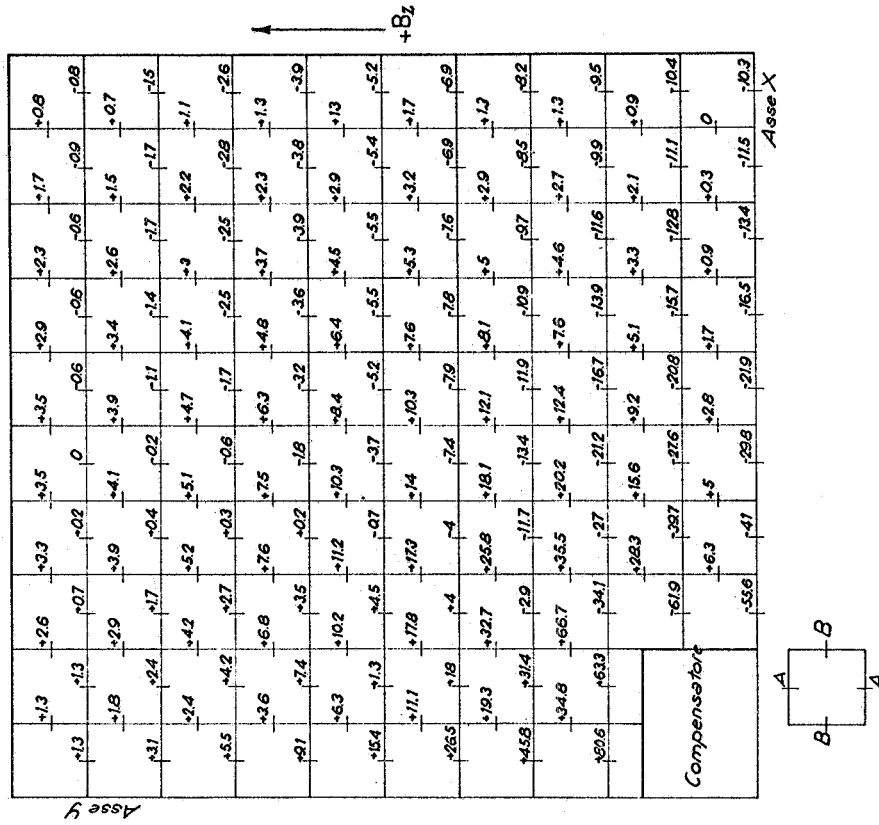


FIG. 11 - Punti A: mappa delle variazioni del campo assiale $[(B_x - B_0/B_0) 100]$ causate dal raddoppio delle Asp nella bobina esterna del compensatore. Punti B: mappa del campo trasverso $[(B_y/B_0) 100]$ che nasce dal raddoppio delle Asp di cui sopra.

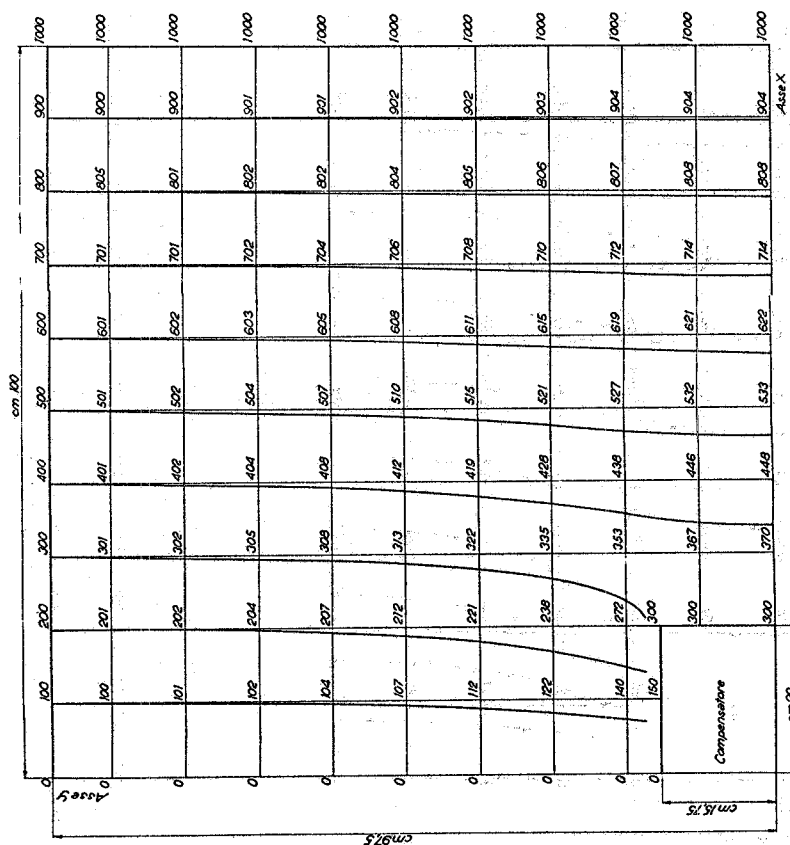


FIG. 12 - Come Fig. 10 per un aumento di un fattore 1,5 (anziché 2) delle Asp. della bobina esterna del compensatore.

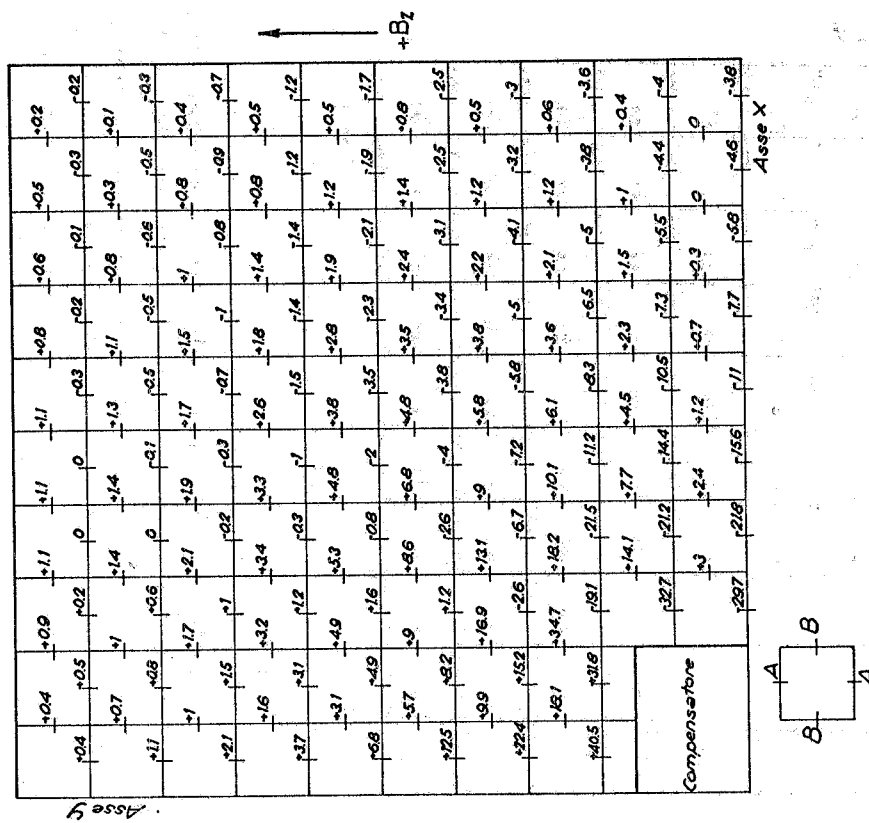
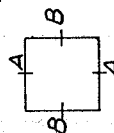


FIG. 13 - Come Fig. 11 per un aumento di un fattore 1,5 delle Asp. della bobina esterna del compensato re. Punti A: variazione campo assiale $[(B_x - B_o) / B_o] 100$. Punti B: mappa del campo trasverso $[(B_y / B_o) 100]$.



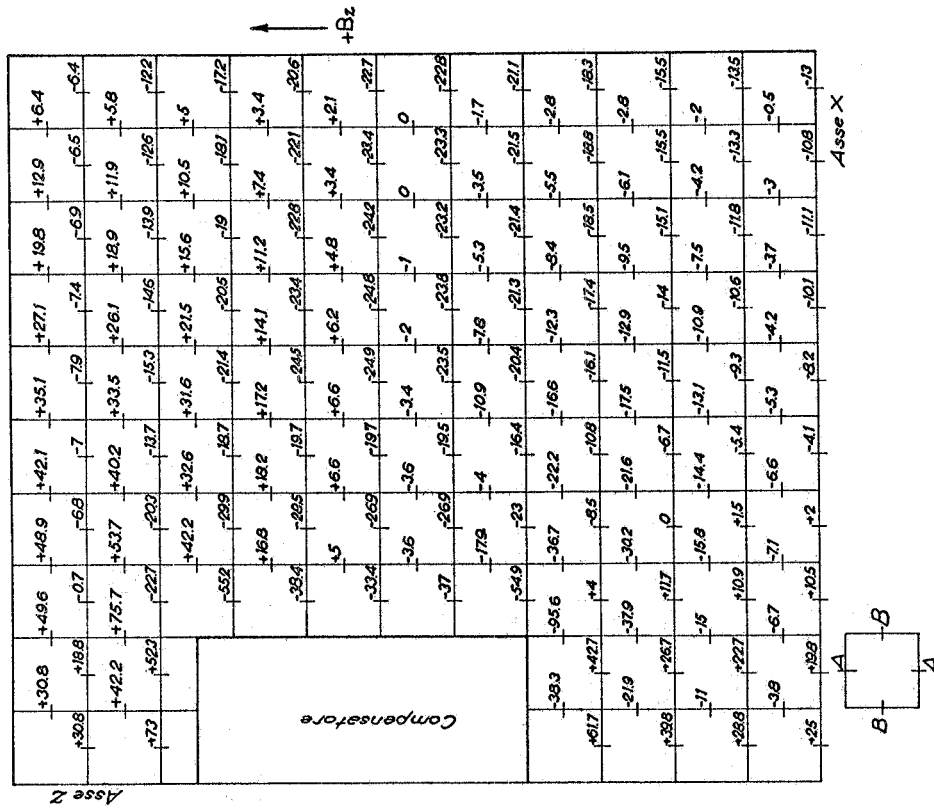


FIG. 15 - Punti A: mappa delle variazioni del campo assiale $[(B_x - B_0/B_0) 100]$ causate dal raddoppio delle Asp nella bobina esterna del compensatore. Punti B: mappa del campo trasverso $[(B_y/B_0) 100]$ che nasce dal raddoppio delle Asp di cui sopra.

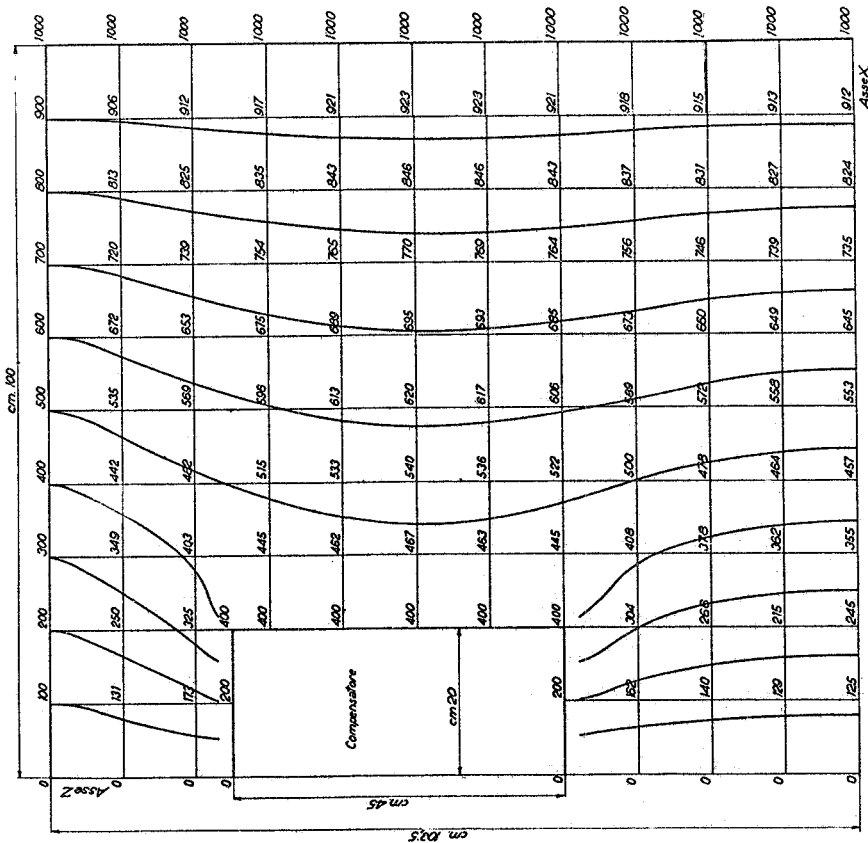


FIG. 14 - Mappa dei potenziali magnetici, in millisimi del potenziale max di mezza bobina, e andamenti delle linee equipotenziali, che si ottengono raddoppiando le Asp della bobina esterna del compensatore del magnete trasversale. Piano xz ($y = 0$).

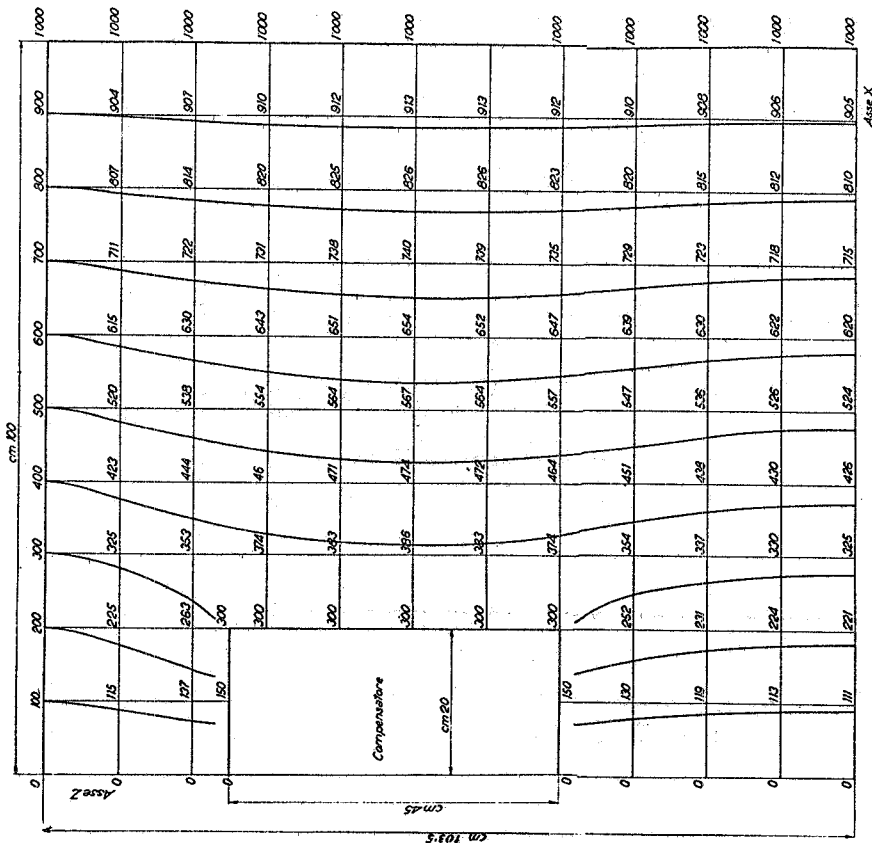


FIG. 16 - Come Fig. 14 per un aumento di un fattore 1,5 (anziché 2) delle Asp della bobina esterna del compensatore.

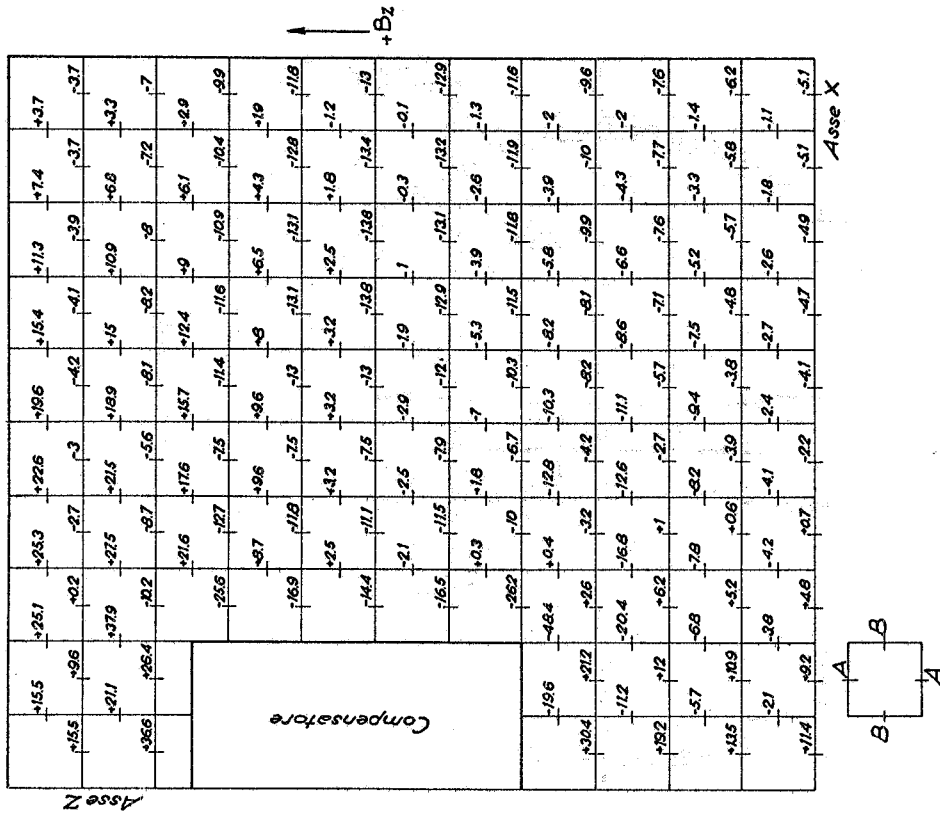


FIG. 17 - Come Fig. 15 per un aumento di un fattore 1,5 (anziché 2) delle Asp della bobina esterna del compensatore.

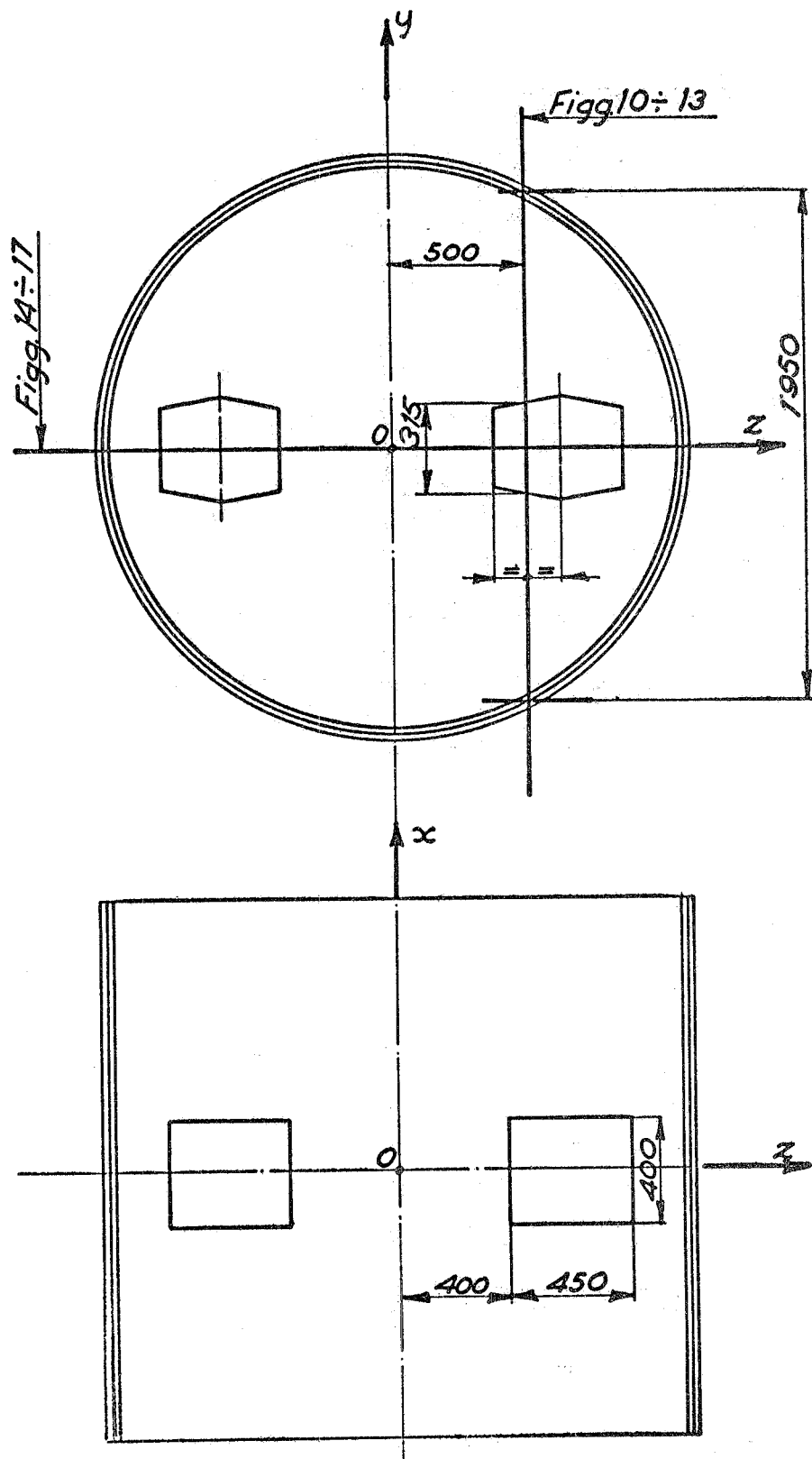


FIG. 18 - Piani ai quali si riferiscono le mappe riportate nelle figg. 10 ÷ 17.