

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-54/41 (1. 12. 54)

G. Sacerdoti: DIMENSIONAMENTO DEL POLO E DELLA GAMBA DI
RITORNO DEL C DEL MAGNETE "DAVID"

COMITATO NAZIONALE PER LE RICERCHE NUCLEARI
LABORATORI NAZIONALI DI FRASCATI

Relazione n°: M 48 (1.12.1954)

Edizione definitiva - 10 Aprile 1959.

G.C. Sacerdoti: DIMENSIONAMENTO DEL POLO E DELLA GAMBA DI RITORNO DEL 'C' DEL MAGNETE DELL'ELETTROSINCROTRONE ITALIANO E GENERALIZZAZIONE DEL PROBLEMA.-

Introduzione

E' attualmente in funzione presso i laboratori di Frascati il magnete del sincrotrone italiano da 1.000 MeV.

Per dimensionare il ferro di questo magnete senza spreco di materiale, e nella migliore maniera, si è dovuto fare uno studio dell'andamento dei flussi magnetici elaborando i dati ricavati da misure su modelli analogici.

L'interesse di questo studio non è limitato alla progettazione del magnete del Sincrotrone Italiano, ma riveste interesse più generale, perchè può servire come schema nel progetto dei magneti a Co ed H in generale: nella pratica della fisica nucleare magneti di questo tipo sono necessari non solo per i sincrotroni, ma anche come strumenti per la misura dell'energia alle particelle stesse.

Per rendere possibile il calcolo di dimensionamento di altri magneti, i rilievi dei flussi magnetici sono stati eseguiti e tabulati anche per profili polari che

non sono quelli del sincrotrone italiano.

Nei paragrafi che seguono sono riportati i risultati degli studi compiuti: i calcoli numerici si riferiscono al nostro caso specifico.

§ 1) Criteri nella scelta della struttura del magnete di un Sincrotrone.

I dati fondamentali che determinano le strutture e le dimensioni di un magnete di un sincrotrone sono i seguenti:

- 1) Dimensioni dell'intraferro (zona utile).
- 2) Raggio medio dell'intraferro.
- 3) Frequenza di eccitazione del magnete.
- 4) Induzione magnetica nel traferro.

Questi dati determinano sia la struttura che le dimensioni del magnete più di quanto non sembri a prima vista.

Per avere una tensione di eccitazione ragionevole, il numero di spire del circuito di eccitazione è entro certi limiti determinato.

Data la frequenza di eccitazione, anche la dimensione, la posizione e l'ingombro del rame restano fissati per rendere minime le perdite totali (ohmiche più addizionali) nel rame. Questo qualora si adottino per conduttori piattine di rame.

Nel caso che i conduttori siano intrecciati, le dimensioni della finestra del rame restano determinate unicamente dal costo di tutto l'insieme della costruzione.

Anche lo spessore e la forma dei lamierini magnetici sono determinati dai dati sopra indicati.

La convenienza o meno di usare la struttura a C con ciambella interna od esterna dipende dal rapporto tra lunghezza dell'intraferro e raggio: in altre parole quan

do tale rapporto β è maggiore di 0,08 conviene fare interna la ciambella: con un rapporto minore conviene farla esterna. La eventualità di usare la struttura ad H si presenta quando la sezione verticale del magnete ha notevoli dimensioni: tale struttura presenta il vantaggio di una maggiore simmetria nel circuito magnetico, di esercitare un'azione schermante rispetto campi magnetici esterni e di facilitare il montaggio se i lamierini sono di forte dimensioni. Unico grave svantaggio è quello di non permettere accessibilità alla ciambella. La struttura H è valida quando il rapporto tra la lunghezza dell'intraferro e raggio è dell'ordine di 0,08-0,18.

La tecnica dell'assemblaggio dei lamierini dipende dallo spessore di questi e dalla loro dimensione radiale: se il Prof. Wilson dell'Università di Cornell è riuscito a costruire un magnete con lamierini quasi del tutto sciolti lo si deve alle piccole dimensioni dei lamierini stessi.

Per illustrare quanto detto, riportiamo alcuni dati significativi riguardanti alcuni sincrotroni esistenti:

Elettro-sincrotrone dell'università di Glasgow 300 MeV (G.B.)

Raggio 125 cm

Dimensioni intraferro 17,8 x 9,8 cm²

$\beta = 0,14$ e quindi C con ciambella interna.

Laminato sottile (0,35 mm): pacchi imbullonati

Magnete a blocchi discontinui

Frequenza di eccitazione 50 p/sec (con 5 p. per sec.)

Elettro-sincrotrone dell'università di Cornell-300 MeV (USA)

Raggio 100 cm.

Dimensioni 14 x 8,25 cm²

$\beta = 0,14$: C con ciambella interna

Lamierini imbullonati

Frequenza 30 Periodo al secondo

Elettrosincrotrone dell'università di Cornell 1000 MeV(U.S.A.)

Raggio 381 cm.

Dimensione intraferro 8x4 cm² $\beta = 0,02$: C con ciambella esterna

Lamierini sciolti con pochi pacchetti incollati

Curvatura continua.

Frequenza di eccitazione 30 p/sec.

Protosincrotrone del Brookhaven National Laboratory 3 BeV(U.S.A.)

Raggio 915 cm.

Dimensione intraferro 91 x 23 cm² $\beta = 0,10$: C con ciambella esterna

Lamierini di ferro spessi saldati ai bordi

Curvatura non continua

Frequenza di eccitazione 1/2 p/sec

Protosincrotrone dell'università di Birmingham 1,3 BeV (G.B.)

Raggio 488 cm

Dimensione intraferro 33 x 21 cm² $\beta = 0,07$: C con ciambella esterna

Lamierini di spessore circa 0,35 mm

Elettrosincrotrone dell'università di California 520MeV (U.S.A.)

Raggio 350 cm

Dimensioni intraferro 24,7 x 22

 $\beta = 0,07$: struttura ad H.

Nel caso del sincrotrone italiano ci siamo trovati di fronte ad un magnete avente caratteristiche nuove: è un problema tecnico nuovo. Il sincrotrone italiano è quello dei più grandi di dimensioni tra tutti i sincrotroni eccitati a frequenza elevata (20 p/sec).

Lo svolgimento logico del progetto del magnete di un sincrotrone segue questo ordine:

1) Determinazione della forma 'grossa' del polo affinché

non si abbia saturazione alla base di esso.

- 2) Determinazione della sezione della bobina interna di eccitazione e calcoli relativi all'isolamento e al raffreddamento del rame.
- 3) Dimensionamento del C, studio dell'andamento del campo magnetico nel ferro e scelta del lamierino.
- 4) Soluzione della struttura azimutale del magnete.
- 5) Calcolo delle caratteristiche elettriche del magnete.
- 6) Calcolo degli sforzi e verifica che la struttura prevista li sopporti.

Scopo di questo studio è di indicare il procedimento seguito per dimensionare il ferro del magnete. Si è adottato il seguente ordine di esposizione:

- a) tabulazione dei dati necessari al calcolo delle dimensioni del polo (rilievo dei flussi dispersi, fattore di stipamento, ecc....)
- b) Dimensionamento del polo e del C del magnete.

§ 2) Calcolo e tabulazione dei dati necessari a tracciare il profilo dei poli e del C del magnete.

In fig. 1) è rappresentata schematicamente la sezione di un magnete del tipo a C, tipo che è stato pre-scritto per il sincrotrone italiano.

In fig. 2) è rappresentato in particolare il profilo del polo di tale magnete. Riferendoci ai simboli indicati nella figura, vediamo che i dati che determinano la forma del profilo del polo sono i seguenti: (i valori numerici si riferiscono al nostro caso specifico)

$$\frac{l}{Lb/2} = \left(k - \frac{4}{3}\right) \quad n = 5,279 \frac{Lb}{2} \left(k - \frac{4}{3}\right) \frac{Lb}{2} \tan \alpha$$

$$m = n + \frac{2}{3} \frac{Lb}{2}$$

I rapporti tra il campo magnetico medio dell'in

traferro tra P ed S, (Fig. 2) e i campi magnetici nelle sezioni m ed n, (fig.2) dipendono dalla forma del polo.

Il rapporto $B'm/B_0$ tra il campo magnetico medio nel ferro cioè escluso l'isolamento nella sezione m, e il campo B_0 nell'intraferro sull'orbita media) e il rapporto $B'n/B_0$ (analogo al precedente ma riferito alla sezione n) dipendono dal coefficiente di stipamento del ferro e dal rapporto $R/R-\Delta R$, tra il raggio R dall'orbita media e il raggio $R-\Delta R$ nel punto F (vedi fig. 2 e 3).

Il campo magnetico medio nella gamba di ritorno del C dipende dalla forma e dimensioni della finestra per il rame dell'avvolgimento, dalla forma del polo, dal coefficiente di stipamento dei lamierini del C, e dal rapporto tra il raggio medio R dell'intraferro e raggio interno R_i (Fig. 3).

Noi assumeremo per i poli un coefficiente di stipamento pari a 0,85. Per i lamierini del C, essendo essi incollati con araldite ed essendo costituiti da lamierini fosfatizzati superficialmente del tipo Armco Transcor 2,29 di cifra di perdita 1,27 Watt/Kg. possiamo assumere il coefficiente di stipamento lungo il raggio interno R_i , pari a 0,90.

La curvatura del magnete è ottenuta intercalando lamierini con dimensioni radiali diverse: tra i C di lamierino che costituiscono il magnete, in corrispondenza delle ali, si pongono, anche per ottenere uno stipamento maggiore di ferro, dei pezzi di lamierino più corti.

Schematizziamo, per i calcoli che seguiremo, tale struttura come in fig. 3): in tale fig. ad ogni 5 C interi affiancati si interpongono, tra le ali esterne, uno nell'ala superiore e uno nell'ala inferiore, dei rettangoli di lamierino di larghezza $2\Delta R$ alti come l'ala del lamierino.

Fissati i rapporti $c/(Lb/2)$ ed $d/(Lb/2)$ che sono

le dimensioni (riferite alla semialtezza dell'intraferro) dei risalti per il sostegno e riferimento dei poli, nel progetto del polo possiamo giocare sui parametri K e α . $L_a/(L_b/2)$ è fissato in base a ragionamenti sulle oscillazioni orizzontali e verticali degli elettroni. Sarà opportuno mantenere K sufficientemente elevato (compatibilmente con le proporzioni geometriche della costruzione) per ridurre il flusso disperso nella finestra per il rame, che altrimenti caricherebbe di flusso la gamba di ritorno del C e causerebbe perdite nei conduttori, specie nel caso in cui fossero massicci. L'angolo α dovrà essere il più piccolo possibile, compatibilmente con l'induzione media del ferro del polo che da α dipende (nota naturalmente, l'induzione massima richiesta nell'intraferro). Per una sagomatura di massima del polo e del lamierino si sono rilevati, per una serie di profili polari aventi le dimensioni indicate nella tabella I (ogni polo è indicato da un K ed un α), i seguenti dati riportati in tabella III:

$$(1) \quad \frac{\bar{\Phi}_{P_{\infty}F}}{\bar{\Phi}_{PS}} \quad (2) \quad \frac{\bar{\Phi}_{FN,PS}}{\bar{\Phi}_{PS} FN} = \frac{B_m}{B_0}$$

$$(3) \quad \frac{2\bar{\Phi}_{ES} + \bar{\Phi}_{PS}}{\bar{\Phi}_{PS}} \frac{PS}{EE'} = \frac{B_n}{B_0}$$

$$(4) \quad \frac{B_m}{B_0} \frac{1}{\frac{R-AR}{R} 0,85} = \frac{B'_m}{B_0}$$

$$(5) \quad \frac{B_n}{B_0} \frac{1}{\frac{R-AR}{R} 0,85} = \frac{B'_n}{B_0}$$

I simboli usati nelle espressioni precedenti hanno i seguenti significati: (vedi fig. 2 e 3).

$\bar{\Phi}_{xy}$ - flusso magnetico per unità di lunghezza di circonferenza nel tratto compreso fra le circonferenze che passano per i punti x e y .

$x y$, distanza tra i punti x e y .

R , raggio medio nell'intraferro

ΔR , semilarghezza della base del polo

B_0 , campo magnetico medio nell'intraferro tra P e S

B_m , campo magnetico medio nella sezione m (mediando nel ferro e nell'isolante tra i lamierini).

B_n , analogo al precedente ma riferito alla sezione n

B'_m , campo magnetico medio del ferro (nella sezione m) cioè escluso isolante tra i lamierini.

B'_n , analogo al precedente ma riferito alla sezione n .

Gli altri simboli si trovano in fig. 2.

I valori dati dall'espressione (4) e (5) si riferiscono all'ipotesi, che i poli abbiano lungo la circonferenza di raggio $R - \Delta R$, un coefficiente di stipamento 0,85 (cioè non siamo ben pressati), e che l'assemblaggio avvenga secondo lo schema di fig. 3 (per il polo e per il C).

Le grandezze (4) e (5) tabulate nella tabella III sono state riportate in parte nei grafici di fig. 4. Per un dato K noi abbiamo quindi B'_m/B_0 e B'_n/B_0 tracciati in funzione di α .

I dati rilevati bastano a dimensionare il ferro ma non l'induttanza del magnete: per calcolare questa bisogna determinare i punti di indifferenza del campo magnetico e, fissate con precisione le posizioni degli avvolgimenti di eccitazione del magnete, ricavare il flusso totale concatenato con i singoli conduttori delle bo-

(°) - Si può costruire una tabella analoga alla III cambiando sia il raggio R che il rapporto $L_a/L_b/2$ quando si faccia ipotesi che tra P ed S (distanti rispettivamente (fig. 2) da D e C di $2/3 L_b/2$) il campo magnetico si mantenga uniforme indipendentemente dalla lunghezza PS .

bine, e il flusso, disperso alle testate (°°).

§ 3) Dimensionamento del polo e dei C del magnete

Fissiamo innanzi tutto i dati che ci servono nel calcolo: (vedi fig. 2 e 8, Tab. IV).

R (raggio medio dell'intraferro) = 3600 mm.

Lb (altezza intraferro) = 86 mm.

La (larghezza intraferro) = 227 mm.

K (altezza finestra per il rame riferita all'altezza dell'intraferro) = 3,25

Lcu (larghezza della finestra per il rame) = 170 mm

ML = 142 mm

ξ_p (coefficiente di stipamento nel polo) = 0,85

ξ_{Fe} (coefficiente di stipamento nel ferro dei lamierini lungo la circonferenza di raggio R_i) = 0,90⁽⁺⁾

Bo (campo magnetico nell'intraferro) = 10.000 gauss

(°°) - I dati indicati nella tabella III sono stati rilevati su modelli in foglio di alluminio: si ritaglia da un foglio di alluminio un profilo simile a quello della sezione verticale delle espansioni polari: si dispongono nella rimanente parte del foglio degli elettrodi in corrispondenza delle bobine di eccitazione del magnete, e si regolano opportunamente le correnti negli elettrodi. Le linee equipotenziali che si rilevano sul foglio mediante metodi potenziometrici, non sono che linee del flusso magnetico nell'intraferro del magnete. Le misure sono state effettuate dal Dr. Sanna con una apparecchiatura preparata dall'Ing. Amman. La precisione del metodo è stata stimata del $\pm 2\%$.

I dati riportati nell'ultima colonna di tabella III servono a dare un'idea dell'attendibilità dei risultati.

(+) - Si presume ξ_p minore di ξ_{Fe} perchè il passo azimutale dei blocchi dei poli è 1/6 di quello dei blocchi dei C e perciò si presume di perdere più spazio per l'intercapedine tra i blocchi.

$B_{\max fe}$ (campo magnetico massimo nel ferro dei lamierini) _
14300 gauss

$B_{\max p}$ (campo magnetico massimo nel ferro del polo) _ 14200
gauss

Tipo di ferro usato per i lamierini Armco Tran-
-Cor; 2,29 cifra di perdita: 1,27 watt/Kg. a 50 Hz, 10.000
gauss (vedi catalogo Armco Hot Rolled Electrical Steel,
pag. 7).

Da questi dati si ottiene:

$\mu_{fe\text{rel}}$ - permeabilità magnetica relativa nel ferro dei la-
mierini corrispondente ad un campo magnetico di
14300 gauss = 800 (vedi catalogo Armco, Hot Rol-
led Electrical Steel, Pag. 33)

$\alpha = 18^\circ$. Infatti per tale valore di α dal diagram-
ma di fig. 4 risulta nella sezione n del polo (che
è la sezione in condizioni peggiori nel polo) $B'n =$
 $= 14.200$ gauss in accordo alla condizione posta
che sia: $B_{\max p} \leq 14200$ gauss.

La semilarghezza della base del polo ΔR , essen-
do $K = 3,25$, $\alpha = 18^\circ$, vale 154 mm. Questo valore si ottie-
ne interpolando linearmente (vedi Tab. III) tra i valori
di ΔR relativi a $K = 3,25$, $\alpha = 15^\circ$ e $K = 3,25$, $\alpha = 30^\circ$.

Dai dati precedenti il polo risulta completamen-
te determinato.

Passiamo ora al calcolo della dimensione radiale
della gamba di ritorno del C. Il flusso magnetico compreso
fra le circonferenze passanti per M e per L (fig. 2) si cal-
cola immaginando tra i punti M ed L un andamento triangola-
re delle amperspire (fig. 5).

Definiamo larghezza equivalente dell'intraferro,
quella lunghezza che moltiplicata per il campo magnetico
medio tra P ed S ($PS = 169,6$ mm) ci fornisce il flusso to-
tale che passa per la gamba di ritorno del C. Tale lunghez-
za risulta data dalla seguente formula:

$$(6) \quad L_{eq} = \frac{\frac{I_{P_{\infty F}}}{I_{PS}}}{\frac{I_{PS}}{I_{PS}}} p_s + \frac{LM}{2K}$$

L_{eq} calcolata con la (6) rappresenta in realtà un valore per eccesso perchè $V_F < V_M$ (vedi Tabella III). Nella (6) il valore di:

$$\frac{I_{P_{\infty F}}}{I_{PS}} \approx 2.07$$

è stato ottenuto interpolando linearmente tra i valori che questa grandezza assume per $K = 3,25$, $\alpha = 15^\circ$ ($\approx 2,02$) e per $K = 3,25$, $\alpha = 30^\circ$ ($\approx 2,24$) (vedi Tabella III)

Con i nostri valori numerici si ottiene:

$$L_{eq} = 351 + 23 + 3 \approx 377 \text{ mm (con } \approx 3 \text{ mm di sicurezza)}$$

Scriveremo con l'equazione che ci permette di calcolare la dimensione radiale L_q della gamba di ritorno del C:

$$(7) \quad L_q = \frac{L_{eq} \cdot B_o}{\frac{E}{\gamma_c} \cdot B_{\max \text{ ferro}} \cdot \frac{R_i}{R}}$$

Nella (7) il significato delle notazioni usate, è riportato al principio del paragrafo II.

Dalle figure 2 e 7, si ha inoltre:

$$(7') \quad R_i = R - \Delta R - L_{cu} - L_q$$

Sostituendo la (7') nella (7) si ottiene un'equazione di II grado nella L_q che risolta da una sola soluzione costruttivamente accettabile che è, nel nostro caso (I caso)

$$L_q \approx 340 \text{ mm}$$

Con questo valore di L_q dalla (7') si ricava

$$R_i = 2936 \text{ mm}$$

Si calcola ora il rapporto γ tra le amperspire assorbite dal ferro e quelle assorbite dall'aria, tale rapporto è dato dalla seguente formula:

$$(8) \quad \gamma = \frac{B_{\max fe} \cdot l_{m fe}}{\mu_{fe} \text{ relative}} \cdot \frac{1}{L_b B_0}$$

ove:

$B_{\max fe}$ campo magnetico massimo nel ferro = 14300 gauss

B_0 campo magnetico nell'intraferro = 10.000 gauss

$l_{m fe}$ lunghezza media del cammino magnetico nel ferro -
 ≈ 2.000 mm

L_b altezza intraferro

$\mu_{fe rel}$ permeabilità magnetica relativa nel ferro = 800 (vedi catalogo Armco Hot Rolled Elect. Steels, pag. 33)

Introducendo nella (8) questi valori si ottiene:

$$\gamma = 4,2 \cdot 10^{-2}$$

Il rapporto tra le amperspire assorbite dal ferro, rispetto a quelle assorbite dall'aria, è circa uguale al rapporto tra l'energia magnetica immagazzinata nel ferro e quella immagazzinata nell'aria, è quindi uguale, si può dire, al rapporto delle potenze assorbite del ferro a quelle assorbite dall'aria.

Per il dimensionamento del ferro del magnete non abbiamo avuto bisogno di rilevare i punti di indifferenza del campo magnetico. Il flusso locale attorno alle bobine esterne non carica la gamba di ritorno del C, ma investe solo una zona di ferro vicino alla bobina stessa: tale zona è più stipata di ferro di quanto non lo sia la gamba.

Il peso del magnete (solo ferro lamierini) risulta di circa 100 Tonn. Nella Tabella IV sono riassunti i risultati dei calcoli.

§ 4) Utilizzazione delle tabelle I - II - III per la progettazione dei magneti.

Come abbiamo detto nell'introduzione, lo schema calcolo svolto nei precedenti paragrafi e i dati delle tabelle I - II - III possono essere usati per il rapporto di magneti a C od a H.

Per rendere più esteso il campo di utilizzazione dei dati delle tabelle conviene fare le seguenti ipotesi (vedi fig. 2):

- a) che per i valori di ' α ' (vedi fig. 2) diversi da quelli per cui si sono fatti i rilievi, si possa interpolare costruendo curve del tipo di quelle indicate in fig. 4
- b) che il flusso magnetico da P ed S aumenti a parità degli altri dati del magnete proporzionalmente all'aumentare della lunghezza P.S.

Con queste ipotesi resta chiaro il procedimento per usare i dati tabulati nei casi che si presentano nella pratica, e chiariscono pure i limiti di validità e di precisione che di volta in volta tale procedimento comporta.

§ 5) Riassunto e conclusioni.

Nel paragrafo 1° si sono esposti i criteri adottati per il progetto del magnete del sincrotrone italiano: fissato il raggio del sincrotrone, il suo intraferro e la frequenza di eccitazione del magnete rimane determinata la struttura meccanica della costruzione. Si sono confrontati i dati di partenza del progetto del sincrotrone italiano con dati analoghi di altri sincrotroni già costruiti.

Nel paragrafo 2° si sono riassunti i risultati dei rilievi dell'andamento del flusso magnetico tra le espansioni polari effettuati con la tecnica del foglio di alluminio. Questi dati servono a dimensionare il ferro del magnete affinché non si abbia saturazione nel ferro stesso: essi sono raccolti nella tabella I e II.

Le grandezze che ci occorrono per determinare la pendenza della scarpa polare, una volta fissato il rapporto K tra l'altezza della finestra del rame e l'altezza dell'intraferro, sono il rapporto $PS/FN \times \phi_{FN}/\phi_{PS}$ (rapporto tra il flusso che passa per la base del polo e il flusso che passa per la faccia dell'espansione polare prospiciente all'intraferro), il valore di $R - \Delta R/R$ e il coefficiente di stipamento.

La dimensione radiale della gamba del magnete si ricava con la formula (7) del testo. Come è ovvio tale dimensione è proporzionale a $Leq B_0$ che è il flusso magnetico che la gamba deve sopportare. Questo flusso è stato calcolato come somma del flusso che passa alla base del polo, più il flusso che investe la bobina.

Nel paragrafo 3 si sono determinati, seguendo i criteri ora riassunti, le dimensioni del C del magnete del sincrotrone.

I risultati di questi calcoli sono riassunti in fig. 6.

Nel paragrafo 4 si è discussa l'utilità dei dati e delle formule ricavate precedentemente, nel caso di progetti di magneti: le tabelle I e II risultano particolarmente utili in molti casi che in pratica si presentano.

Ringrazio vivamente il Dr. Sanna per i suggerimenti e per l'aiuto che mi ha dato nello svolgimento del lavoro.

Bibliografia:

- Glasgow University. AC-ROBB - 300 MeV Glasgow synchr. (1947)
- Cornell University. D.R. Corson et al.: The 300 MeV Synchrotron (1953)
- Review of Sci. Inst., 24, 9. - Brookhaven Cosmotron (1953)
- I.N.F.N. Sez. Acceleratore, Rel. G 22 - Sanna G.: Parametri caratteristici degli elettrosincrotroni di energia superiore ai 500 MeV. (1956)

K	tg α	$\frac{Lb}{2}$	$\frac{Hcu}{2}$	c	d	La	h	l	m	n
2	0°	20	40	6,66	6,66	105,58	13,33	13,33	118,91	105,58
	15°	!	!	!	!	!	!	!	125,77	112,44
	30°	!	!	!	!	!	!	!	133,96	120,63
	45°	!	!	!	!	!	!	!	145,61	132,28
3	0°	20	60	6,66	6,66	105,58	13,33	33,33	118,91	105,58
	15°	!	!	!	!	!	!	!	136,17	122,84
	30°	!	!	!	!	!	!	!	156,76	143,43
	45°	!	!	!	!	!	!	!	185,31	171,98
3,25	0°	20	65	6,66	6,66	105,58	13,33	38,33	118,91	105,58
	15°	!	!	!	!	!	!	!	138,77	125,44
	30°	!	!	!	!	!	!	!	162,46	149,13
	45°	!	!	!	!	!	!	!	195,31	181,98
4	0°	20	80	6,66	6,66	105,58	13,33	53,33	118,91	105,58
	15°	!	!	!	!	!	!	!	146,63	133,30
	30°	!	!	!	!	!	!	!	179,69	166,36
	45°	!	!	!	!	!	!	!	225,55	212,22

TAB. I - DIMENSIONI GEOMETRICHE DEI POLI SU CUI E' STATO RILEVATO L'ANDAMENTO DEL FLUSSO SERVENDOSI DELL'ANALOGIA INVERSA SUI FOGLI DI ALLUMINIO ($\mu = \infty$). PER I SIMBOLI CONFRONTARE LA FIG. 2 ED IL § 3 DELLA RELAZIONE. I NUMERI RAPPRESENTANO LE DIMENSIONI IN mm DEL MODELLO SU CUI SONO STATE EFFETTIVAMENTE RILEVATE LE MISURE.-

K	V _F	V _E	V _M	V _A	V _C	V _S	V _P	V _D	V _B	V _N	V _P	
2	0°	550	730	590	1420	1650	2530	8240	9120	9430	10770	11110
	15°	473	780	490	1457	1660	2564	8190	9054	9300	10810	11110
	30°	586	910	530	1660	1850	2760	8080	8930	9080	10560	11110
	45°	400	770	570	1720	1880	2700	8005	8820	8990	10790	11110
3	0°	230	320	680	1370	1610	2500	8165	9040	9310	10990	11110
	15°	500	634	710	1690	1980	2810	8135	8950	9180	10870	11110
	30°	586	726	674	1960	2160	2940	8030	8840	9070	10950	11110
	45°	360	544	417	2050	2220	2970	7765	8560	8710	10910	11110
3,25	0°	156	208	542	1330	1596	2609	8238	9103	9279	11046	11110
	15°	417	526	590	1920	2010	2896	8180	8910	9100	10874	11110
	30°	220	340	370	1840	1940	2790	8200	8790	8960	10950	11110
	45°	340	510	360	2090	2320	3090	7890	8590	8700	10960	11110
4	0°	440	475	1000	1670	1900	2690	7890	8690	8630	10850	10750
	15°	320	370	630	1750	1950	2730	7860	8630	8570	10890	10890

TAB. II - Parte I^a - VALORE DEI POTENZIALI RILEVATI SUI MODELLI DEI POLI IN FOGLI DI ALLUMINIO NEI PUNTI F, E, (vedi fig.2). I MODELLI SONO STATI REALIZZATI CON DIVERSA PENDENZA DELLA SCARPA POLARE E CON DIVERSI VALORI DI K. GLI ELETTRODI CHE ALIMENTANO IL FOGLIO DI ALLUMINIO SONO DISPOSTI IN CORRISPONDENZA DELLE BOBINE DI ECCITAZIONE DEL MAGNETE (ANALOGIA CONIUGATA TRA LINEE DI FLUSSO MAGNETICO E POTENZIALE ELETTRICO). TALI VALORI SONO VALIDI AL $\pm 2\%$.

K	α	$\frac{\Phi_{P_0} F}{\Phi_{PS}}$	$\frac{\Phi_{FN} \cdot \frac{SP}{FN}}{\Phi_{SP}} = \frac{B_m}{B_0}$	$\frac{2\Phi_{ES} + \Phi_{PS}}{\Phi_{PS}} \times \frac{PS}{EE'} = \frac{B_n}{B_0}$	$\frac{B_m}{B_0} \times \frac{1}{R-AR} \times \frac{1}{R} \times \frac{B'_m}{B_0}$ $\times \frac{1}{0,85} = \frac{B'_m}{B_0}$	$\frac{B_n}{B_0} \times \frac{1}{R-AR} \times \frac{1}{R} \times \frac{B'_n}{B_0}$ $\times \frac{1}{0,85} = \frac{B'_n}{B_0}$	AR	$\frac{2VES + VPS}{2VAE + VAB}$
2	0°	1,849	1,188	1,2097	1,449	1,468	128	0,9913
	15°	1,89	1,153	1,147	1,4093	1,402	135	1
	30°	1,978	1,104	1,10924	1,3535	1,359	144	1,011
	45°	2,018	1,061	1,0307	1,3055	1,2676	156	0,99945
3	0°	1,92	1,260	1,323	1,537	1,614	128	0,9985
	15°	1,99	1,128	1,1675	1,385	1,43	146	1,0078
	30°	2,088	1,025	1,0289	1,265	1,27	168	0,9937
	45°	2,24	0,937	0,924	1,167	1,11	199	0,9974
3,25	0°	1,946	1,283	1,384	1,57	1,69	128	1,0235
	15°	2,024	1,103	1,174	1,353	1,44	149	1,0265
	30°	2,012	0,9566	1,01	1,183	1,25	175	1,039
	45°	2,24	0,84	0,901	1,049	1,125	210	1,02

TAB. III - AR = m/2 x 227/La mm. (vedi fig. 2 e § 3) del testb)

R = 3600 mm - Per gli altri simboli vedi il testo.

I DATI NUMERICI SONO VALIDI $\approx \pm 2\%$

I NUMERI DELL'ULTIMA COLONNA DOVREBBERO ESSERE SENSIBILMENTE UGUALI AD 1 - SONO STATI CALCOLATI PER CONTROLLARE I RISULTATI DEL RILIEVO.

MAGNETE	Notaz. Usate	Caso Numerico
α	α	18°
K	K	3,25
Larghezza base polo	Lp	308 mm
Larghezza finestra rame	Lcu	170 mm
Altezza finestra rame	Hcu	280 mm
Dimensioni intraferro	LaxLb	227 x 86 mm ²
Larghezza gamba C	Lq	340 mm
Raggio medio	R	3600 mm
Raggio interno lamierino	Ri	2936 mm
Raggio massimo lamierini	Rmax	3754 mm
Altezza lamierino	He	960 mm
Dimensione radiale lamier.	Lr	818 mm
Circonferenza orbita media	2πR	22619 mm
Tipo di ferro		Tran. Cor 2,29
Bo Intraferro	Bo	10.000 Gauss
B _{max} ferro C	B _{maxfe}	14.300 gauss
B _{max} Ferro polo	B _{maxP}	14.200 gauss
$\gamma = \frac{\text{energia ferro}}{\text{energia aria}}$		4,2 x 10 ⁻²
μ_{rel} Ferro (B _{max} ferro)	$\mu_{rel.fe}$	800
Coeff. stipamento polo		0,85
Coeff. Stipamento C		0,95
Peso ferro		98 Tonn.
cifre di perdita del ferro (a 10000 Gs e 50 H ₂)		1,27 Watt/Kg
Perdite nel ferro a 25p/s.		30+34 kW

TAB. IV - Risultati ottenuti nel caso numerico esaminato
(vedi § 3)

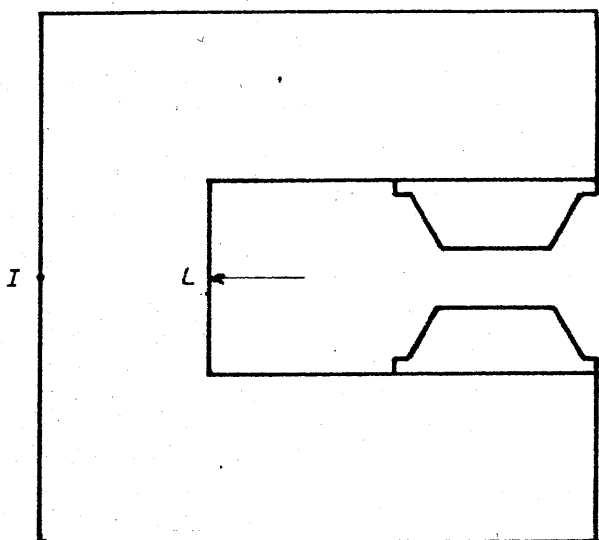


FIG.1 - SEZIONE FERRO MAGNETE

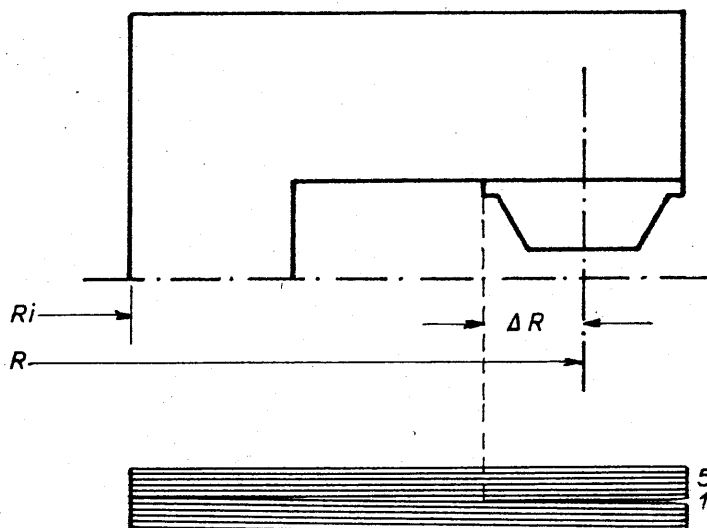


FIG.3 - ASSEMBLAGGIO LAMIERINI
(schema)

$$h = \frac{2}{3} \frac{Lb}{2}$$

$$c = d = \frac{1}{3} \frac{Lb}{2}$$

$$l = \left(K - \frac{4}{3} \right) \frac{Lb}{2}$$

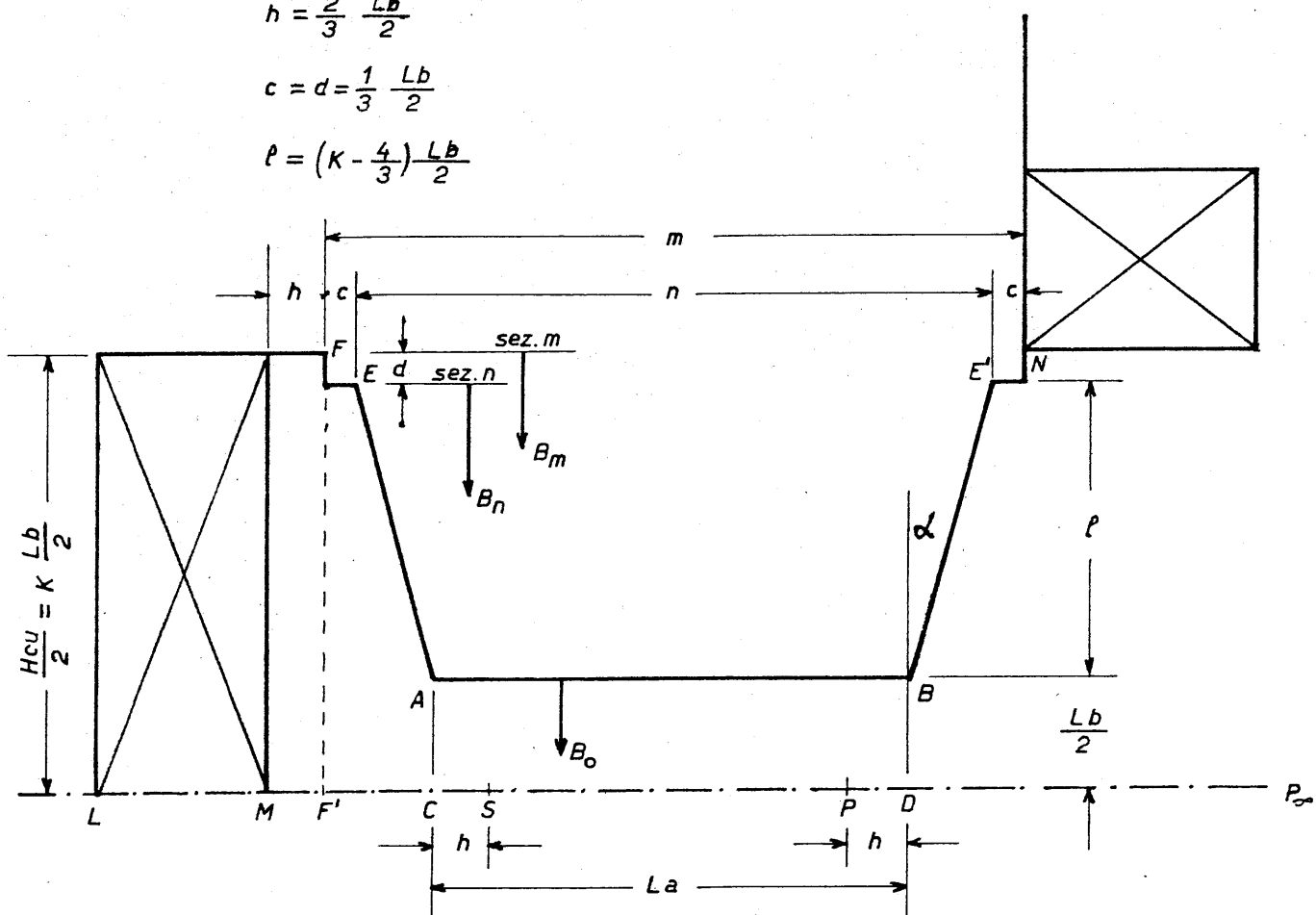


FIG.2 - PROFILO DEL POLO

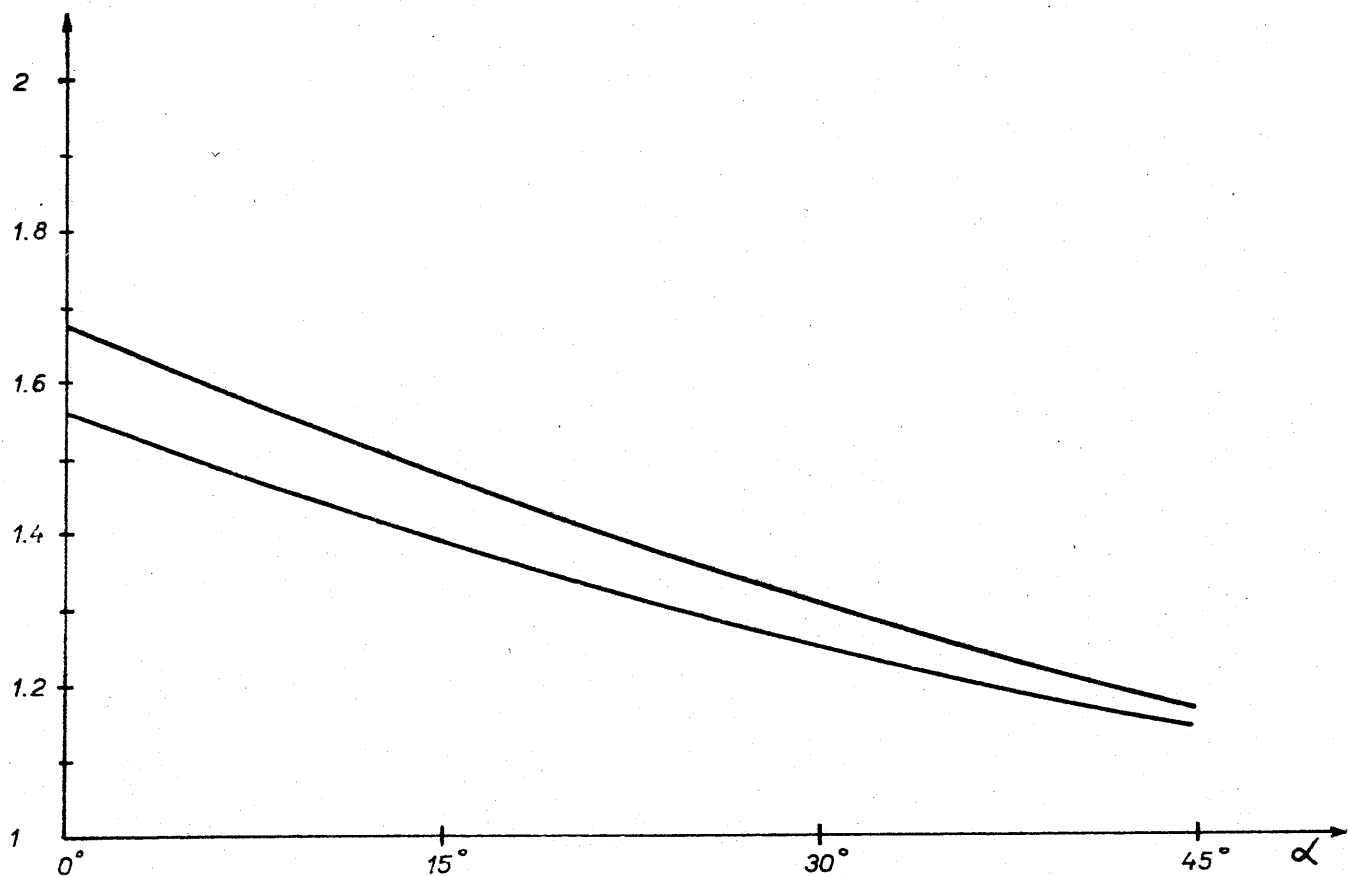


FIG. 4

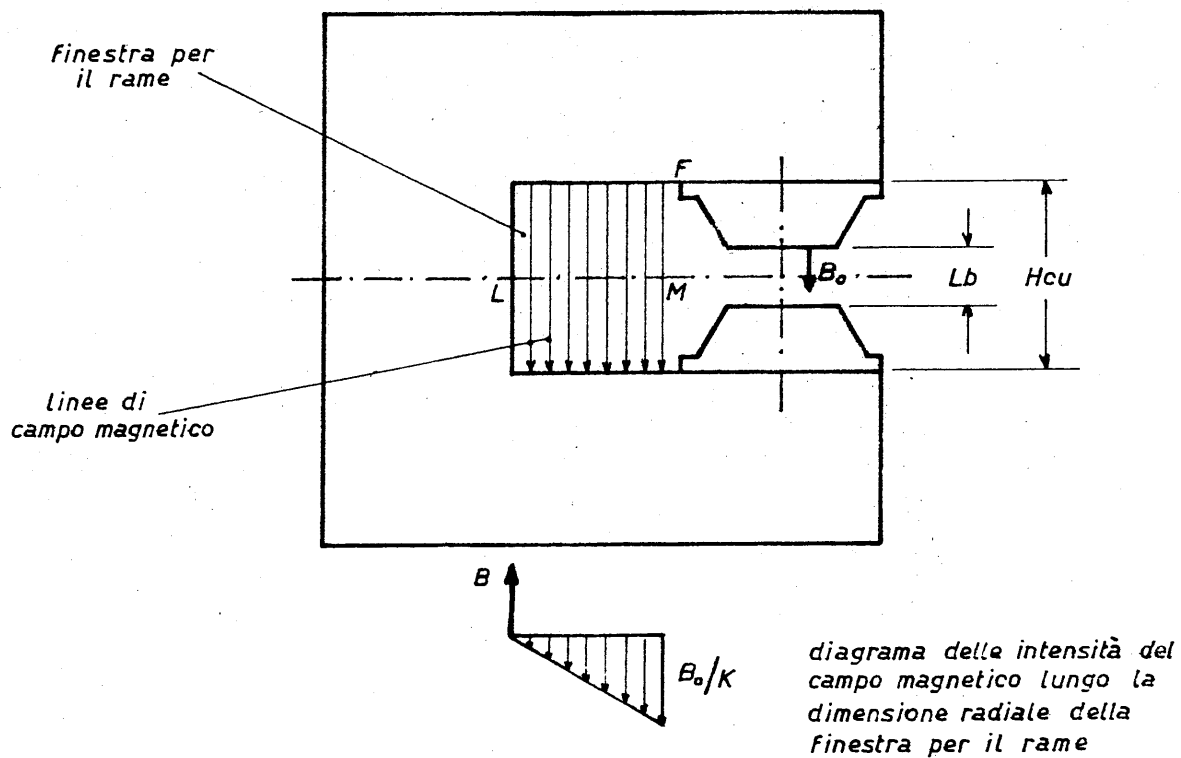


FIG. 5 - ANDAMENTO DEL CAMPO MAGNETICO NELLA FINESTRA PER IL RAME SCHEMATIZZATO PER CALCOLARE IL FLUSSO DISPERSO

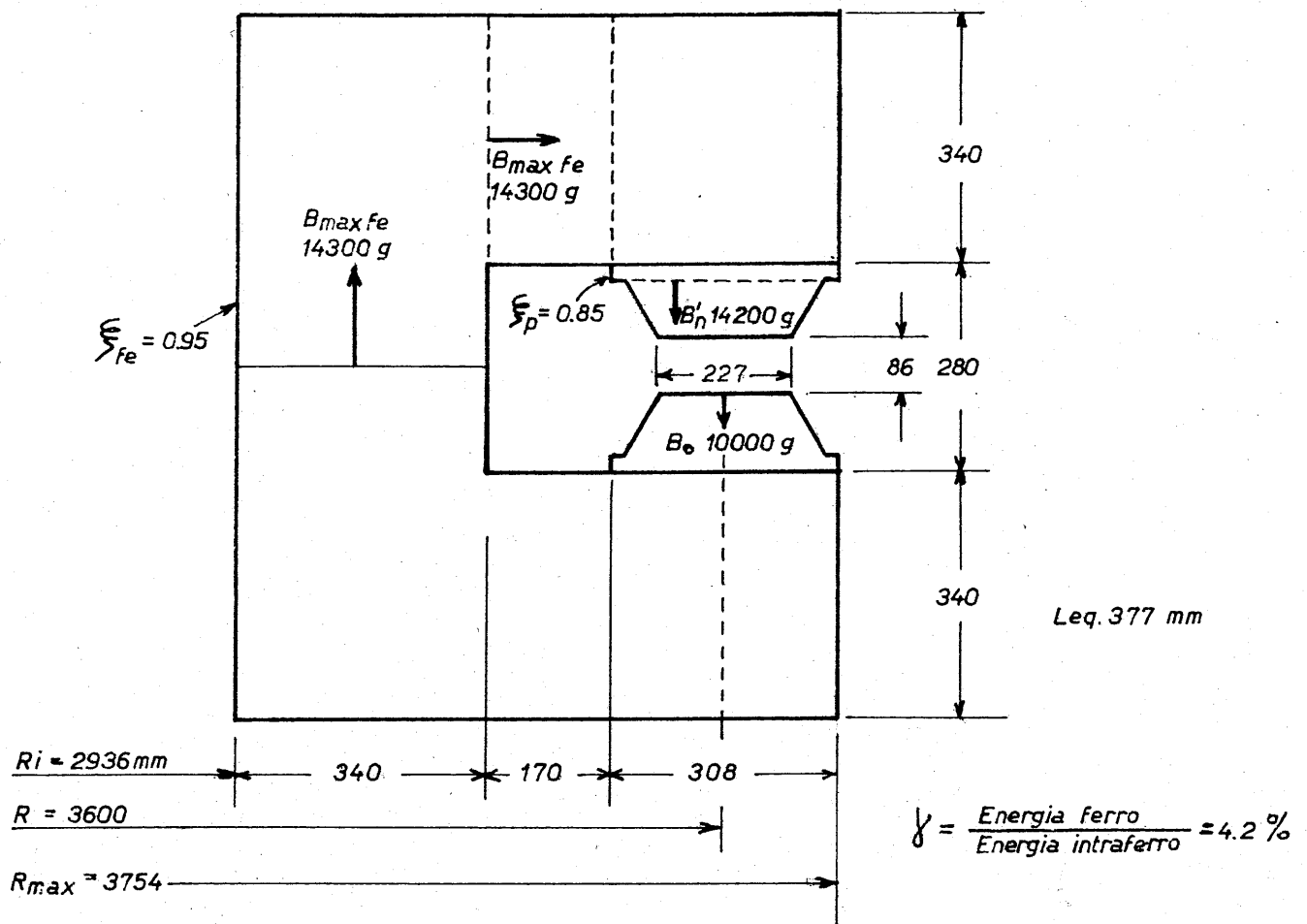


FIG. 6 - DIMENSIONI LAMIERINO CALCOLATE NEL I CASO

