

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-54/42 (7. 12. 54)

G. Sacerdoti, R. Toschi: INFORMAZIONI TECNICHE PER IL PROGETTO
DEL MAGNETE DEL SINCROTRONE DA 1 BeV E DELLA SUA ALIMENTA
ZIONE.

ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE

Sezione Acceleratore

INFORMAZIONI TECNICHE PER IL PROGETTO DEL MAGNETE DEL
SINCROTRONE DA 1 BEV E DELLA SUA ALIMENTAZIONE. (°)

7 Dicembre 1954.

Relazione n° M49

(°) Calcoli dell'Ing. G. C. Sacerdoti con la collaborazione
dell'Ing. R. Toschi.-

-1-

PROGETTO SCIENTIFICO DI MASSIMA DEL MAGNETE DEL SINCROTRONE
DA I BEV E DELLA SUA ALIMENTAZIONE ESEGUITO PRESSO LA
SEZIONE ACCELERATORE DELL'I. N. F. N.

Introduzione

Presso la Sezione Acceleratore dell'I.N.F.N. é in corso il progetto scientifico di un sincrotrone per elettroni da I BEV. L'elemento fondamentale di questa macchina é il magnete: esso opportunamente alimentato, crea tra le sue espansioni polari un campo magnetico crescente col tempo, che costringe gli elettroni, che fra queste espansioni si muovono, a percorrere determinate orbite chiuse.

Tale campo deve avere inoltre proprietà focheggianti per quel che riguarda le oscillazioni verticali e orizzontali degli elettroni.-(Nota 1.)

Il buon funzionamento di un sincrotrone dipende soprattutto dalla precisione con cui il magnete é realizzato.

Il magnete é, insieme al macchinario necessario alla sua alimentazione, la piú costosa fra tutte le parti che costituiscono un sincrotrone. A costruzione avvenuta, apportare anche lievi modifiche al magnete é oltremodo oneroso e difficile.

In questa relazione sono raccolti i risultati dello studio del magnete che ~~potranno essere utili~~ ^{dovranno servire di base} alla Ditte costruttrice per l'esecuzione del progetto tecnico del magnete e sua alimentazione.

-
- Nota 1- S. Livigston Particles Accelerators. "Advances in Electronic" - Vol. I pag.269 Ed. Marton New York.
f.k. Goward.- Betatrons and Synchrotrons-
" The Acceleration of Particles to high energies"
London Institute of Physics.

Questa relazione è così suddivisa:

Capitolo I. + Progetto del magnete -

- §1) Dati fondamentali del magnete del sincrotrone.
- §2) Dimensionamento del C e del polo del magnete.
- §3) Problemi relativi alle bobine di eccitazione del magnete e illustrazione di alcune soluzioni possibili.
- §4) Illustrazione di alcune soluzioni possibili per l'assemblaggio dei lamierini.
- §5) Questioni relative alla forma delle espansioni polari e al loro fissaggio.
- §6) Questioni relative alle testate.
- §7) Banco di sostegno e incastellatura.
- §8) Dati elettrici derivati e sforzi elettromagnetici.
- §9) Precisioni e tolleranze.

Capitolo II. - Progetto dell'alimentazione del magnete. -

- §1) Descrizione del tipo di alimentazione.
- §2) Descrizione del macchinario necessario alla alimentazione.
- §3) Requisiti a cui il macchinario deve soddisfare.

- Capitolo I. -

Progetto del magnete.

§ 1) Dati fondamentali del magnete del sincrotrone.

Nella fig. 1) sono illustrate schematicamente una sezione orizzontale ed una verticale del magnete. Nella sezione orizzontale si vedono 4 settori curvi (quadranti) separati da 4 tratti rettilinei (sezioni diritte). Ogni quadrante è costituito dall'insieme di lamierini magnetici aventi forma di un C, impacchettati opportunamente. Sotto le ali del C vengono applicate le espansioni polari fra le quali si ottiene il campo magnetico che guida gli elettroni. Una condotta a tenuta di vuoto detta "ciambella", destinata ad ospitare gli elettroni, nella quale viene fatto il vuoto, viene posta tra le espansioni polari e nelle sezioni diritte, venendo così a costituire un anello continuo.

Il magnete è eccitato da un avvolgimento il cui schema relativo ad un solo quadrante è indicato in figura 1) (sezione orizzontale e sezione verticale). La parte dell'avvolgimento contrassegnata con A sarà chiamata bobina interna; la parte contrassegnata con B, bobina esterna (inferiore e superiore). (°)

(°).- La bobina esterna è necessaria per evitare che le sezioni diritte siano attraversate da tutti i conduttori della bobina interna: in tal caso oltre alle difficoltà tecniche, nel realizzare collegamenti, si avrebbero disturbi nelle apparecchiature sistemate in prossimità delle sezioni diritte (iniettore, cavità risonante,) e perturbazioni al moto degli elettroni passanti, entro la ciambella, per le sezioni diritte (nelle quali invece il campo magnetico dovrebbe almeno teoricamente mancare). Inoltre una bobina esterna disposta come in fig. 1), riduce i flussi dispersi con vantaggio economico nell'alimentazione del magnete e nel magnete stesso. Con tale disposizione è possibile anche smontare l'espansione polare senza muovere la bobina.

I dati di partenza per il progetto del magnete fissati dal Gruppo Teorico della Sezione Acceleratore dell' I.N.F.N. sono i seguenti: (vedi fig. 1):

raggio dell'orbita stabile degli elettroni	, R = 3600 mm
lunghezza delle sezioni diritte	L = 1206 mm
altezza dell'intraferro	$L_b = 86$ mm
larghezza intraferro	$L_a = 227$ mm
campo magnetico massimo dell'intraferro	$B_{max} = 9260$ gs. (°)
campo magnetico nell'intraferro nell'istante di iniezione degli elettroni	$B_i = 22,7$ gs.
coefficiente di campo magnetico $(\frac{\Delta B}{B} \cdot \frac{r}{\Delta r})$	n = 0,61
frequenza di eccitazione del magnete	f = 25 p/s

Da questi dati seguono immediatamente i seguenti:

$$2\pi R = 22619 \text{ mm}$$

$$\text{lunghezza dell'orbita } \overset{\text{principale}}{\text{degli}} \text{ elettrone } \ell = 2\pi R + 4L = 27443 \text{ mm}$$

$$\Lambda = \ell / 2\pi R = 1,213$$

$$\text{energia massima degli elettroni accelerati } E_{max} = 1000 \text{ MeV.}$$

§2) Dimensionamento del C e del polo del magnete (forma grossa) (°°)

Per stabilire la forma grossa del polo e le dimensioni del C del magnete, oltre ad aver fissati i dati fondamentali del magnete, è necessario: fare alcune ipotesi generali sullo assemblaggio dei lamierini sia del C che delle espansioni polari; fissare il tipo di lamierini sia per C che per i poli, per stabilire il valore del campo magnetico massimo che si può avere ^{mediamente} nel ^{ferro del} C e del polo.

(°).- Nella relazione M48 B_{max} è stato chiamato B_0 .

(°°).- A questa relazione viene pure allegata una copia della relazione M-48 in cui l'argomento di questo paragrafo è stato trattato con maggior completezza.

Noi ammettiamo che i lamierini dei C e dei poli siano impacchettati come in fig. 2. I lamierini forma di C sono raggruppati in pacchetti di 4+6; i vari pacchetti sono affiancati e disposti a raggiera (ventaglio) in modo da costituire i quadranti: in corrispondenza delle ali dei C si riempiono i cunei d'aria, che con questa disposizione si ottengono, con pezzi rettangolari di lamierino che penetrano tra i pacchetti per un tratto lungo come la base del polo cioè fino al punto F (fig.2)

Fixiamo i seguenti coefficienti:

k_p coefficiente di stipamento lungo la circonferenza passante per F = 0,85: questo è anche il coefficiente di stipamento dei poli nel punto F
 k_{fe} coeff. di stipamento lungo la costa interna dei C (punto I fig.I) = 0,9 Si pensa di potere ottenere almeno questi valori per i coeff. di stipamento sia usando bulloni che collante per l'impacchettamento dei lamierini

Nei calcoli che seguiranno abbiamo ammesso di adottare sia per i C che per i poli il tipo di lamierini Tran-Cor/ 2/29 dell'Armco isolato con Carlyte. La Ditta che costruirà il magnete potrà proporre altri tipi di lamierini. Riportiamo qui sotto i dati relativi alle proprietà elettriche, magnetiche, e meccaniche di questo tipo di lamierino (la fonte dei dati è il catalogo dell' Armco- " Hot Rolled Electrical Steel " pag. 33- 35) In fig.3 e fig.4 sono riportate le curve $B_k = B_k(H)$ e $H_k = H_k(H)$, e il ciclo di isteresi per un campo magnetico massimo nel ferro pari a 10.000 gs. ~~La cifra di perdita per~~
 ~~$B_{maxfe} = 10.000$ gs. - La cifra di perdita per $B_{maxfe} = 10.000$ gs. e f~~

$f = 50$ Hz è di 1,27 Watt/ Kg. -

La densità di questi lamierini è di 7,55 tonn/ m³

La permeabilità relativa del ferro μ_{fe} assume il suo valore massimo $\mu_{fe} = 5.700$ per $B_{fe} = 4.200$ gs. Inoltre si ha:

per $B_{fe} = 10.000$ gs. $\mu_{fe} = 3.700$

per $B_{fe} = 14.000$ gs. $\mu_{fe} = 1.000$

Da un esame del grafico $\mu_{fe} = \mu_{fe}(H)$ possiamo pertanto accettare un valore medio per il campo magnetico massimo nel ferro ^{di} per circa 14000 gauss nella gamba di ritorno del C e di circa 13200 gs. nei poli: infatti in queste condizioni l'energia immagazzinata nel ferro costituisce una piccola parte dell'energia immagazzinata nell'aria ed il valore di μ_{fe} ^{nei poli} rimane sufficientemente alto (≈ 1600) per campi alti (≈ 13000 gs).

Se riassumiamo per la finestra destinata ad ospitare il rame le seguenti dimensioni:

L_{cu} - larghezza finestra per il rame ≤ 170 mm.

H_{cu} - altezza " " " " = 280 mm.

per il C e per il profilo grosso del polo possono fornirsi i seguenti dati:

$\alpha \approx 18^\circ$

$K = 3,25$

$L_p = 308$ mm.

$L_g = 340$ mm.

$R_i \geq 2936$ mm

$R_{max} = 3754$ mm

$L_r \leq 818$ mm

$H_e = 960$ mm (per i simboli vedi ^{TAB.} fig. 1)

§3) Problemi relativi alle bobine di eccitazione e illustrazione di alcune soluzioni possibili.-

La bobina di eccitazione serve ad ottenere nell'intraferro un campo magnetico che varia nel tempo con la seguente legge (fig. 6):

$B_0(t) = B_b - B_a \cos \omega t$ con

$\omega = 157 \text{ sec}^{-1}$

$B_a = (B_{max} - B_{min}) / 2$

$B_b = (B_{max} + B_{min}) / 2$

$B_{max} = 9260$ Gauss

B_{min} = valore ^{minimo} massimo del campo magnetico ~~negative~~.

Gli elettroni vengono iniettati all'istante T_i (fig. 6) quando $B_0(t)$ assume un valore di 22,7 Gauss, e vengono accelerati fino all'istante T_u in cui $B_0(t)$ assume il valore B_{max} (figura 6).

In ogni istante il campo magnetico è circa proporzionale (a campi compresi fra 1.000 e 10.000 gs.) alla corrente che percorre la bobina di eccitazione.

Infatti varrà la relazione:

$$A_{st} = A_{si} + A_{sfe} \quad \text{con } A_{si} = \frac{B_0 L_b}{\mu_0} \quad \text{e} \quad A_{sfe} = \frac{B_{fe} L_{fe}}{\mu_0 \mu_{rfe}}$$

A_{st} amperspire assorbite nell'intero circuito magnetico

A_{si} amperspire assorbite nell'intraferro = $\frac{B_0(t)}{\mu_0} L_b$

A_{sfe} amperspire assorbite nel ferro

L_{fe} Cammino magnetico ~~costante~~ nel ferro

B_{fe} Induzione magnetica nel ferro

μ_{rfe} Permeabilità relativa nel ferro

Quando $B_0(t) = B_{max} = 9260$ Gauss $A_{si} = 63400$ Amper

e le A_{sfe} sono ~~circa~~ ^{solo} il 3,5% delle A_{si}

per cui:

$$A_{st_{max}} = 63400 + 2200 = 65600 \text{ Amper}$$

$A_{st_{max}}$ = Amperspire totali massime di eccitazione

Per realizzare un'andamento nel tempo del campo magnetico come in fig. 6 le A_{st} debbono assumere valori negativi. Si può vedere (*) che con un valore delle amperspire totali minime $A_{st_{min}}$ (negative) maggiore dell' I' delle amperspire massime, il campo magnetico $B_0(t)$ passa per lo zero.

(*) Infatti nel grafico di fig. 4 che rappresente la curva di isteresi del lamierino tipo Tran-Cor 2, 29 per un campo magnetico massimo di 10.000 gs., si vede che le amperspire corrispondenti alla forza coercitiva sono minori del 20% delle totali amperspire assorbite dal ferro. E' presumibile che anche allorquando l'induzione magnetica nel ferro assume il valore di 14.000 gs. (come è nel nostro caso) il rapporto fra le amperspire assorbite nel ferro e quelle corrispondenti alla forza coercitiva, rimanga ^{circa} lo stesso.

Nell'ipotesi che le amperspire assorbite nel ferro siano ~~5'~~ ^{meno del} 5% delle amperspire assorbite nell'aria, le amperspire corrispondenti alla forza coercitiva saranno $\leq \frac{2}{10} \cdot \frac{5}{100} = I'$ delle amperspire ^{massime} assorbite nell'aria.

Ammettiamo di volere ottenere nell'intraferro un campo magnetico minimo B_{min} (negativo) pari al 9% di B_{max} : è sufficiente che le $A_{st_{min}}$ assumano un valore pari al 10% delle $A_{st_{max}}$.

Pertanto sarà in numeri: $A_{st_{min}} = 6560$ Amper

Ne derivano i seguenti dati (vedi anche par. 8)

Valore massimo della corrente totale: 5470

$$I_{t_{max}} = \frac{A_{st_{max}}}{N} = \frac{65600}{12} \approx 5466 \text{ Amper}$$

Valore minimo della corrente totale: 547

$$I_{t_{min}} = \frac{A_{st_{min}}}{N} = \frac{6560}{12} \approx 546 \text{ Amper}$$

Ammettendo in prima approssimazione che sia:

$$I_t(t) = I_{cc} - I_{ca_{max}} \cos \omega t \quad \text{dove}$$

I_t = corrente totale t = tempo

I_{cc} = componente continua della corrente

$I_{ca_{max}}$ = ampiezza della componente alternata della corrente

sarà: (*) $I_{ca_{max}} = \frac{|I_{t_{max}}| + |I_{t_{min}}|}{2} \approx 3000 \text{ Amper}$

$$I_{cc} = \frac{|I_{t_{max}}| - |I_{t_{min}}|}{2} \approx 2460 \text{ Amper}$$

(Se $A_{s_{min}} = 0$ risulta $I_{cc} = 2740 \text{ amp.}$)

Per ottenere valori ragionevoli (≈ 6.000 volt) per la tensione di alimentazione fissiamo il valore del numero N di spire dell'avvolgimento

$$N = 12$$

Lo spazio massimo lasciato a disposizione per la bobina interna è di:

$$L_{cu} \times H_{cu} = 170 \times 280 \text{ mm.}$$

(il valore di L_{cu} si deve intendere come un limite superiore alla larghezza della finestra per il rame) Tale spazio deve contenere il rame (12 spire), l'isolante fra spira e spira e fra le spire e il ferro ed infine i condotti per la circolazione dell'acqua di raffreddamento.

(*) Le perdite negli avvolgimenti sono state calcolate per

$$I_{ca_{max}} = 3000 \text{ amp. e } I_{cc} = 2460 \text{ amp.}$$

Le dimensioni dell'induttore di protezione sono dimensionate per una I_{cc} pari a 2.740 Ampere.

Un buon avvolgimento deve presentare i seguenti requisiti:

- 1) Dare le minime perdite compatibilmente allo spazio ad esso riservato .
- 2) Avere un sistema di raffreddamento efficace che contenga la sovr-temperatura massima del rame rispetto alle temperature ambiente entro 15° (definita secondo le norme CEI)
- 3) Essere isolato a sufficienza verso massa e ~~traspira~~ e spira (almeno un isolamento di classe B).

Le perdite dell'avvolgimento si devono dividere in perdite per corrente continua e perdite per corrente alternata. Tale divisione si presenta necessaria per poter prevedere le potenze che i generatori a cc. e a ca. debbono fornire per alimentare il magnete. (vedi cap. II)
(alimentazione).

Le perdite per c.a. sarà opportuno suddividerle in perdite ohmiche e perdite per correnti parassite.

Sarà facile calcolare le perdite ohmiche , mentre più difficile sarà prevedere le perdite per correnti parassite che sono perciò pericolose: nei risultati che seguiranno sono state calcolate tali perdite nell'ipotesi che il campo magnetico abbia un andamento come in fig.7 cioè investa gli avvolgimenti secondo la direzione verticale. Tale ipotesi può portare a valori ottimistici per perdite per correnti parassite: infatti nel caso che si usi piattina ^{nei conduttori} se essa è disposta come in figura (10) anche una piccola parte componente radiale del campo magnetico nella finestra del rame può provocare perdite molto forti in quanto questa componente investe la piattina in direzione normale alla sua dimensione maggiore.

Presso la nostra sezione sono stati presi in considerazione quattro tipi di soluzioni per l'avvolgimento che ora illustreremo.

I Soluzione

Il conduttore scelto per tale tipo di avvolgimento (fig.8) è realizzato con treccia di rame racchiusa in un involucro di ottone od altro materiale di resistività maggiore di quella del rame. L'acqua di raffreddamento scorre entro l'involucro a contatto con la treccia oppure entro un tubo posto entro la treccia. La sezione della bobina interna verrebbe assumere l'aspetto indicato in fig: (8X)

da essa si vede che l'avvolgimento di un quadrante è costituito da ^{di conduttore intrecciato} 12 spire ~~ciascuna formata da una treccia~~. In questo caso le correnti parassite indotte nel rame sono quasi completamente eliminate.

I problemi più complessi sono quelli dei collegamenti alle testate fra conduttori della bobina interna ed esterna dato che essi non sono sufficientemente flessibili da permettere piegature alle testate che evitino le saldature e quello dei collegamenti fra i conduttori e le prese d'acqua corrispondenti (prese che anche in questo caso devono essere isolate verso massa per una tensione di 7.000 volt.)

Diamo ora alcuni dati relativi a tale tipo di avvolgimento:

Numero di spire per quadrante 12: ciascuna spire è costituita da una treccia di fili di rame.

Diametro dei fili costituenti la treccia	≈ 1,5mm
Sezione di rame di una spira	≈ 1500mm ²
Altezza finestra rame	≈ 280mm
Larghezza finestra rame	≈ 170mm
Lunghezza totale di treccia di rame occorrente per l'intero avvolgimento del magnete	≈ 672m
Peso totale di rame occorrente per l'avvolgimento del magnete	≈ 9.000Kg.
Resistenza dell'avvolgimento del magnete	≈ 0,0078 Ω
Perdita per corrente continua dell'avvolgimento del magnete ($I_{cc} = 2460$ Ampere)	≈ 47Kw
Perdite per corrente alternata (ohmiche) dell'avvolgimento del magnete ($I_{ca_{max}} = 3.960$ 3.000)	≈ 35Kw
Perdite totali (cc.+ca.) dell'avvolgimento del magnete	≈ 82Kw
Sovra temperatura del rame rispetto alla temperatura ambiente (definita secondo le norme CEI)	≈ 15°
Circuiti di acqua di raffreddamento in parallelo	≈ 8
Acqua necessaria al raffreddamento	≈ 1,3 l/s
Velocità media dell'acqua in ogni circuito	≈ 0,45m/s
Perdite di carico dell'acqua	= —

II Soluzione

In questa soluzione, adottata dal Professor Wilson dell'Università di Cornell nel Sincrotrone ch'egli ha costruito, l'avvolgimento è realizzata mediante piattina di rame. La sezione di una generica piattina è illustrata in figura (9) e nella stessa fig. è disegnata la sezione della bobina interna: l'avvolgimento di un quadrant è costituito da 12 spire ciascuna formata da una piattina.

Adottando questo tipo di avvolgimento è necessario nel computo delle perdite elettriche tenere conto con maggiore approssimazione che nei casi precedenti delle perdite per correnti parassite che vengono indotte nel rame. Fissato il numero N di conduttori, aumentando lo spessore Δ (fig. 9) del conduttore, le perdite per correnti parassite nel conduttore stesso, qualora il campo magnetico abbia l'andamento indicato in fig. 7, aumentano secondo Δ^3 . Le perdite ohmiche diminuiscono invece secondo $1/\Delta$. La curva delle perdite totali in funzione di Δ avrà perciò un minimo e questo capita nel nostro caso quando $\Delta \approx 10 \text{ mm. } (^{\circ})$

E' bene perciò tenere i conduttori ad una certa distanza dai poli nella cui vicinanza il campo magnetico ha una componente radiale per evitare che questa componente, che investe la piattina normalmente alla sua dimensione più grande, faccia aumentare troppo le perdite per correnti parassite nel rame.

(^o) Diamo qui le formule conclusive che permettono di calcolare le perdite ohmiche e per correnti parassite nel rame, queste ultime nell'ipotesi che il campo abbia direzione verticale e il suo valore entro la finestra per il rame (fig. 7) vari linearmente, e sia interamente polarizzato. Le formule che diamo permettono di calcolare le perdite (ohmiche e per correnti parassite) in N conduttori affiancati (in direzione radiale) per unità di lunghezza (in direzione assimutale) e per unità di altezza (in direzione verticale):

$$\text{Perdite ohmiche} = P_{\Omega} = \frac{3}{8} \frac{B_{max}^2}{K^2 \mu^2} \frac{R}{N} \cdot \frac{1}{\Delta} \quad (1)$$

$$\text{Perdite c.p.} = P_{cp} = \frac{f}{96} \frac{B_{max}^2 \omega^2}{\rho K^2 N^2} \left(\sum_1^N A^2 \right) \Delta^3 \quad (2)$$

A numero intero compreso fra 1 ed N

B_{max} campo magnetico massimo nell'intraferro

ρ resistività del rame

(continua a pag. 13)

L'acqua di raffreddamento scorre entro condotti ricavati nella piattina. Piattine di questo tipo si fabbricano in U.S.A.

Si presenta anche in questo caso il problema delle connessioni alle testate fra conduttori della bobina interna ed esterna e fra i conduttori e le prese dell'acqua di raffreddamento. Per esempio il professore Wilson ha risolto il problema delle giunzioni alle testate avvitando le piattine di testa e interponendo tra le superfici di contatto polvere d'argento. (~~fig. 10 bis~~ ^{dis. MA 168})

Diamo ora alcuni dati relativi a questo tipo di avvolgimento:
 Numero di spire per quadrante 12. Ciascuna spira costituita da una piattina.

Spessore della piattina	≈	12 mm
Altezza della piattina	≈	120 mm
Sezione di rame di una piattina	≈	1320 mm ²
Lunghezza totale di piattina occorrente per l'avvolgimento del magnete	≈	672 m
Peso totale di rame occorrente per l'avvolgimento del magnete	≈	7999 Kg.
Resistenza dell'avvolgimento del magnete	≈	0,009 Ω
Perdite per corrente continua d l'avvolgimento del magnete ($I_{cc} = 2460 \text{ Amp}$)	≈	56 Kw
Perdite per corrente alternata per l'avvolgimento del magnete (ohmiche e correnti parassite) ($I_{cmax} = 3000 \text{ Amp}$)	≈	42+85 = 127 Kw
Perdite totali (cc.+ca.) dell'avvolgimento del magnete	≈	183 Kw
Sovratemperatura del rame rispetto alla temperatura ambiente (definite secondo le norme CEI)	≈	15°
Acqua necessaria al raffreddamento	≈	3 l/s.
Velocità media dell'acqua in ogni est ^{circuito}	≈	0,43 m/s
Perdita di carico dell'acqua	≈	1 Atm
Diametro tubi di raffreddamento	≈	6 mm.
Circuiti di raffreddamento in parallelo	≈	96

III Soluzione

In questa soluzione, del tipo di quella proposta dall'Ing. Carlevaro, dell'Ansaldo San Giorgio, ognuna delle 12 spire dell'avvolgimento di un quadrante è costituita da 44 piattine di rame in parallelo.

Ciascuna piattina, opportunamente isolata dalle contigue nel tratto compreso tra una testata e l'altra di uno stesso quadrante ($\approx 6m.$) viene trasposta secondo lo schema Roebel in modo da rendere anti-induttivo il circuito delle 44 piattine in parallelo. Pertanto le correnti parassite indotte nel rame sono ovviamente molto inferiori a quelle del caso precedente (piattina unica) essendo ora le dimensioni di un singolo conduttore molto inferiori: le perdite per correnti parassite si possono comunque calcolare anche in questo caso con le formule date nella nota di pag. 11 opportunamente adattandole. L'acqua di raffreddamento può scorrere entro condotti sistemati tra una spira e l'altra.

(continuazione della nota a pag. 11)

K = rapporto tra l'altezza finestra rame e l'altezza dell'intraferro

μ_c = permeabilità magnetica dell'aria. ω = Pulsazione della c. a.

Δ = spessore del conduttore (dimensione radiale).

Sommando la (1) e la (2), derivando rispetto a Δ ed eguagliando a zero si ha ^{il} valore di Δ per cui sono minime le perdite totali dell'avvolgimento nelle ipotesi sopra dette:

$$\Delta_{min} = 12 \frac{S^2 N}{\mu_c^2 \omega^2} \frac{1}{\sum \frac{1}{A^2}} \quad (3)$$

Sostituendo nella (3) i nostri valori, e cioè:

$$N = 6 \quad S = 17,8 \frac{mm^2}{cm} \quad \mu_c = 1,26 \times 10^{-6} \text{ H/m}$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi 25$$

si trova:

$$\Delta_{min} \approx 10 \text{ mm.}$$

Diamo ora alcuni dati relativi a questo tipo di avvolgimento:

Numero di spire per quadrante: 12. Ciascuna spira è costituita da 44 piattine in parallelo.

Dimensione delle piattine = 5x5mm²

Sezione di rame di una spira ≈ 1.100 mm²

Lunghezza totale di piattina occorrente per l'avvolgimento del magnete ≈ 29.000 m

Peso totale di rame occorrente per l'avv. del magnete. ≈ 6.600 Kg.

Resistenza dell'avv. del magnete ≈ 0,012 Ω

Perdita per corrente continua dell'avv. del magnete ≈ 67 kW (I_{cc} = 2460 Amp.)
Perdite per corrente alternata dell'avvolgimento
del magnete (ohmiche + correnti parassite) ≈ 50+15=65 kW (I_{ca} = 3000 Amp.)

Perdite totali (cc.+ca.) dell'avv. del magnete = 132 Kw

Sovratemperatura del rame rispetto alla temperatura ambiente (definita secondo le norme CEI) = 15°

Circuiti d'acqua di raffreddamento in parallelo nel magnete = 8

Acqua necessaria al raffreddamento ≈ 2,3 l/s

Velocità media dell'acqua in ogni circuito ≈ 1,2 m/s

Perdita di carico dell'acqua ≈ 4 - 5 Atm.

IV Soluzione (Proposte dell'ing. Busolino della Ditta Pirelli)

L'avvolgimento è, in questa soluzione, realizzato mediante treccie di rame isolata con un involucro di nylon: l'acqua di raffreddamento scorre a contatto del rame entro l'involucro di nylon. La sezione di un conduttore generico (cioè di una treccia con relativo involucro) è indicata in figura 10; in figura 11 è eseg. disegnata schematicamente la sezione della bobina interna. L'avvolgimento di un quadrante è costituito da 12 spire ciascuna formata da 20 trecce in parallelo che, nel percorso compreso fra una testata e l'altra di uno stesso quadrante (= 6m), vengono trasposte secondo lo schema Roebel in modo da costituire un circuito antinduttivo nel quale perciò le perdite per correnti parassite sono ridotte quasi completamente a zero.

Il problema delle giunzioni alle testate ^{si} semplifica se si pensa ~~che questi~~ ^{possono realizzare} conduttori sono sufficientemente lunghi e flessibili per eseguire sei spire (cioè metà dell'avvolgimento di un quadrante) senza saldature. Pertanto per ogni quadrante essendo dodici le spire, oc-

correrà una sola saldatura fra le spire. Questo avvolgimento si potrà realizzare su una sagoma opportuna ~~e montarlo successivamente sul magnete~~. Se si prevedono poi due circuiti d'acqua di raffreddamento in parallelo per ciascun quadrante bisognerà realizzare quattro collegamenti alle testate fra le spire e le corrispondenti prese per l'acqua (prese che devono essere isolate verso massa per una tensione di 6000v).

Diamo ora alcuni dati relativi a questo tipo di avvolgimento:

Numero di spire per quadrante: 12. Ciascuna spira é costituita da 20 trecce in parallelo.

Diametro per fili costituenti la treccia	= 1 ÷ 2 mm.
Sezione di rame di una treccia	≈ 40 mm ²
Sezione di rame di una spira (costituita da 20 trecce)	≈ 800 mm ²
Spessore del nylon di rivestimento	≈ 1 mm.
Altezza finestra rame	≈ 280 mm.
Larghezza finestra rame	≈ 160 mm.
Lunghezza massima della treccia di rame continua	≈ 84 mm.
Lunghezza totale della treccia di rame occorrente per l'intero avvolgimento del magnete	≈ 13.500 mm.
Peso del rame occorrente per l'avvolgimento del magnete	≈ 4.800 Kg.
Resistenza dell'avvolgimento del magnete	≈ 0,015 Ω
Perdite per corrente continua della avvolgimento del magnete ($I_{cc} = 2460$ Amp.)	≈ 92 Kw
Perdite per corrente alternata (ohmiche) dell'avvolgimento del magnete ($I_{ca\ max} = 3000$)	≈ 68 Kw
Perdite totali dell'avvolgimento del magnete	≈ 160 160 Kw
Sovratemperatura del rame rispetto alla temperatura ambiente (definite secondo le norme CEI)	= 15°
Circuito d'acqua in parallelo del magnete	= 8
Acqua necessaria al raffreddamento	= 2,7 3,2 l/
Velocità media dell'acqua in ogni circuito	= 1,7 2 m/
Perdita di carico dell'acqua (attendiamo dalla Bitta Pirelli dati più precisi sulle perdite di carico per decidere sulla accettabilità o meno di questa soluzione)	

§ 4) Illustrazione di alcune possibili soluzioni per l'assemblaggio dei lamierini a U del magnete

Per impacchettare i lamierini si può fare uso di collanti e di bulloni : tra le due soluzioni estreme, cioè l'uso di bulloni senza collanti e viceversa, esistono soluzioni intermedie quali quella di intercalare pacchetti incollati con pacchetti di lamierini sciolti : i pacchetti incollati, con l'ausilio di tiranti o di spingenti ancorati al banco di sostegno del magnete, comprimono i lamierini sciolti. - Lo spessore dei pacchetti elementari, la posizione di bulloni e dei tiranti, la qualità e la quantità del collante devono essere opportunamente scelti perché l'assemblaggio dei lamierini soddisfi alle ~~seguenti~~ ~~le~~ condizioni di precisione meccaniche ed elettromagnetiche elencate nel par. 9) ~~numeri 3, 4, 13.~~

Il coefficiente di slippamento deve essere il più grande possibile compatibilmente con l'isolamento tra lamierino e lamierino. Non vi devono essere certe-circuiti tra i lamierini per sbavature e contatti. ^{possibili} Maggiori dettagli sulle strutture del magnete sono illustrate nei disegni allegati al "Promemoria" all'industria" già consegnati alle Ditte concorrenti alla costruzione del magnete.

Per quel che riguarda i criteri e le modalità di montaggio del blocco si veda al par. ~~4~~.

§ 5) Questioni relative alla forma delle espansioni polari e al loro fissaggio.

La forma approssimata ("grossa") delle espansioni polari é rappresentata in fig. I.

Questo profilo (teoricamente come nel disegno MA- 205D) dovrà essere modificato leggermente per ottenere nell'intraferro un andamento di campo magnetico in funzione del raggio ^{quale} é stato precisato dal gruppo ^{Teorico} solo dopo i rilievi magnetici su modelli, potremo stabilire definitivamente la forma del polo.

Le dimensioni del profilo finale si discosteranno, da quelle indicate in disegno MA- 205 D di qualche decimo di millimetro.

Queste variazioni praticamente non modificheranno i dati relativi al flusso disperso e all'alimentazione che sono stati determinati in relazione alla forma stessa del polo.

Un problema importante é l'assemblaggio dei lamierini dei poli e il loro fissaggio al C: si deve garantire ~~nel la misura indicata~~ ^{con precisione} nella misura indicata nel paragrafo 9, la posizione reciproca delle espansioni polari superiore e inferiore, e le loro posizioni rispetto al C del magnete.

Una soluzione al problema può essere quella di incollare lamierini in piccoli pacchetti e riferire l'espansione polare superiore a quella inferiore con colonnine di materiale non metallico stabile alla temperatura e agli sforzi meccanici, cioè che non si infletta né si deformi.

In tal caso mediante opportuni tubi di gomma si esercita sulla base del polo superiore una pressione (che può essere ^{nei tubi} dell'ordine di 20 Atmosfere) che tien fermo il polo stesso contro la base delle colonnine di sostegno: perché non si abbiano vibrazioni nei poli, ^{la} ^{media sui poli} questa pressione deve essere superiore a quella con cui i poli sono attratti magneticamente dalle ali del C.

Fra le espansioni polari e le ali del C si dispone un sottile strato di neoprene (1÷2 \neq decimi di mm.) per attenuare le vibrazioni. Oppure facendo assegnamento sulle precisioni di lavorazione delle superfici interne delle ali del C e delle superfici base dei poli, si fissano i poli contro il C premendoli o con riferimenti solidali alla carcassa ^{di sostegno del magnete} esterna o con elementi spingenti sistemati tra le espansioni polari stesse.

Fra le espansioni polari devono trovare sede delle bobine di correzione il cui compito é quello di correggere ~~esad~~ il campo magnetico nell'intraferro.

Comunque siano costruite e fissate, le espansioni polari debbono soddisfare alle condizioni di precisione meccaniche ed elettromagnetiche elencate nel paragrafo 9.

§ 6) Questioni relative alle testate.

Tra un quadrante del magnete e il successivo si ha una sezione diritta di circa 1,20 metri. In queste sezioni diritte devono trovare sede le wavit  risonanti, il dispositivo di iniezione e le prese per le pompe per il vuoto. Perci  alla testata di un quadrante viene lasciato uno spazio di circa 25 cm. a disposizione dei risvolti delle bobine, eventuali piastre frontali di ~~isolante~~ e di metallo, che si prevedono nella costruzione del magnete, e delle prese dell'acqua di raffreddamento dell'avvolgimento (prese che devono essere isolate per una tensione massima di 7000 Volt,).

Il flusso magnetico che sfugge lateralmente alle testate investe le bobine e il piastrone, ~~rispettamente~~ ^{e specie nel piastrone} se metallico; si inducono correnti parassite pericolose oltre che per il riscaldamento anche per la distorsione e ~~sfasamento~~ che possono provocare nel campo magnetico in maniera cos  sensibile da richiedere la presenza di circuiti di correzione.

Alle testate di quadranti deve essere possibile inserire o togliere alcuni ~~di~~ lamierini ^{a C} con una certa facilit : perci  gli ultimi lamierini di un quadrante per uno spessore di 15 cm. devono essere sciolti e cambiabili. Questo facilita la sistemazione delle bobine di eccitazione (si deve prevedere la possibilit  di montare e smontare le bobine complete) e permette di variare la lunghezza di un quadrante. Quest'ultima necessit  deriva dalla considerazione che (il campo magnetico che alle testate si prolunga anche esternamente nelle sezioni diritte) pu  essere necessario accorciare geometricamente il quadrante per renderlo equivalente ad un quadrante dal punto di vista magnetico.

§ 7) Banco di sostegno e incastellatura.

A sostenere e a rendere meccanicamente sicura la costruzione del magnete   necessaria una carcassa metallica nella quale i lamierini vengono fissati. Questa carcassa pu  essere costituita da un piastrone di sostegno e da una piastra superiore collegati con tiranti e dai piastroni frontali. Il piastrone di sostegno a forma ^{circolare / divisa in settori} di corona (banco circolare di sostegno) lavorato con precisione

vieno poggiate attraverso viti di aggiustaggio ad un basamento in ferro e cemento: è diviso in 4 quadranti.

Regolazione le viti si può eseguire, servendosi anche di spessori, la messa a punto definitiva del sistema di settori, la quale consiste nel disporre su uno stesso piano le loro superfici da lavorate. Sul banco di sostegno che così si è creato vengono fissate delle guide di materiale isolante o metallo ~~che~~ (non magnetiche), ricoperte o no con un sottile strato di neoprene, ^{a mezzo di una} sulle quali ~~con~~ opportuna scanalatura poggiano e vengono riferiti i lamierini. In modo analogo al precedente mediante guide viene sistemato sopra i lamierini l'altro piano metallico ^(piastrone superiore) che serve a dare maggiore solidità alla costruzione. Questa ~~protezione~~ che abbiamo sommariamente descritta è una delle **soluzioni** che si possono proporre per la carcassa che sostiene i lamierini. Essenziale è che ogni soluzione proposta soddisfi alle condizioni di precisione elencate nel paragrafo 9

§ 8) Dati elettrici derivati e sforzi elettromeccanici.

I dati elettromagnetici prefissati nel progetto del magnete sono il valore del campo magnetico nell'intraferro ^{nel tempo e nello spazio} e il suo andamento. Da questi dati, una volta fissate le caratteristiche del circuito magnetico, derivano gli altri dati elettrici che occorrono ^{al} ~~nel~~ l'esecuzione del progetto e che qui elenchiamo nell'ordine in cui vengono calcolati:

- 1) - Amperspire totali massime (positive) necessarie ad ottenere il campo massimo prefissato nell'intraferro:

$$A_{st\max} = 65600 \text{ Amper}$$

(già calcolate nel par. 3 pag. 7)

- 2) - Amperspire totali minime (negative) necessarie ad ottenere il campo minimo prefissato nell'intraferro:

$$A_{st\min} = -65600 \text{ Amper}$$

(già calcolate nel par. 3 pag. 8)

- 3) - Valore massimo (positivo) della corrente totale :

$$I_{t\max} = \frac{A_{st\max}}{N} = 5470 \text{ Amper}$$

(già calcolate nel par. 3 pag. 8)

- 4) - Valore minimo (negativo) della corrente totale.

$$I_{t \min} = \frac{4st_{\min}}{N} \approx -547 \text{ Amper}$$

(già calcolate nel par. 3 pag. 8)

- 5) - Valore massimo della componente alternata della corrente :

$$I_{ca \max} = \frac{|I_{t \max}| + |I_{t \min}|}{2} \approx 3000 \text{ Amper}$$

(già calcolate nel par. 3 pag. 8)

- 6) - Valore ~~massimo~~ della componente ~~alternata~~ continua della corrente.

$$I_{cc} = \frac{|I_{t \max}| - |I_{t \min}|}{2} \approx \frac{2460}{2} \text{ Amper}$$

(già calcolate nel par. 3 pag. 8)

- 7) - Induttanza della avvolgimento di eccitazione del magnete.-

Per il calcolo esatto dell'induttanza dell'avvolgimento di eccitazione del magnete sarebbe necessario conoscere l'andamento del campo magnetico entro le espansioni polari del magnete. Conoscendo la configurazione del ferro e della bobina di eccitazione, dalla corrente che in essa passa si risale al valore del campo magnetico in ogni punto dello spazio: di qui si giunge alla determinazione del flusso abbracciato da ogni singola spira e quindi dell'induttanza. (*)

Noi seguiremo un metodo meno preciso ma sufficientemente approssimato ai fini del nostro calcolo. In riferimento alla fig. ^{ed alla relazione 1198} ~~1197~~, possiamo dividere il flusso concatenato per unità di lunghezza di circonferenza, con la bobina di eccitazione in quattro parti.

Nota.- (*) Se la resistività del conduttore fosse nulla la corrente ^{che in essa circola} si raccoglierebbe lungo la linea della spira che abbraccia il maggior flusso e la definizione di flusso concatenato con una spira non darebbe luogo ad equivoci. Essendo invece la resistività diversa da zero per essere rigorosi bisognerebbe studiare la definizione di flusso concatenato, tenendo conto della distribuzione della corrente e delle cadute di tensione dovute alle correnti di Foucault.

- a) - Flusso compreso fra le circonferenze passanti per i punti M e P_∞ che é concatenato con tutte le spire della bobina: $\Phi'_{MP_{\infty}}$ (~~Valore massimo~~)
- b) - Flusso compreso fra le circonferenze passanti per i punti Q e P_∞ concatenato con le bobine esterne: $\Phi'_{QP_{\infty}}$ (~~Valore massimo~~)
- c) Flusso locale nella zona intorno alle bobine esterne superiore e inferiore che si concatena solo ^{con} ~~in~~ alcuni conduttori esterni: $\Delta \Phi'_e$ - (Con $n(\Delta \Phi'_e)$ si indicano il numero dei conduttori concatenati con $\Delta \Phi'_e$).
- d) - Flusso locale nella zona intorno alle bobine interne che si concatena solo con alcuni conduttori interni: $\Delta \Phi'_i$ (~~Valore massimo~~). (Con $n(\Delta \Phi'_i)$ si indicano il numero di conduttori concatenati con $\Delta \Phi'_i$).

Pertanto il valore massimo del flusso totale concatenato (per unità di lunghezza lungo l'azimut) con la bobina di eccitazione sarà:

$$\Phi'_{t_{max}} = N \Phi'_{MP_{\infty}} + N \Phi'_{QP_{\infty}} + \sum \Delta \Phi'_e n(\Delta \Phi'_e) + \sum \Delta \Phi'_i n(\Delta \Phi'_i) \quad (1)$$

Il flusso totale concatenato con l'intero avvolgimento del magnete sarà:

$$\Phi'_{t_{max}} = 2\pi R \Phi'_{t_{max}} \quad (2)$$

dove R é il raggio dell'orbita stabile degli elettroni. Se indicheremo con Φ'_{PS} il flusso compreso fra le circonferenze passanti per i punti P ed S (fig. 11) ^{e la relazione M 48} e per unità di lunghezza di circonferenza, essendo presumibilmente uniforme il campo nell'intraferro tra P ed S ed uguale a B₀, possiamo scrivere $\Phi'_{PS} = B_0 \times \overline{PS}$.-

Moltiplicando e dividendo il II membro della (2) per Φ'_{PS} si ha:

$$\Phi'_{t_{max}} = 2\pi R \left[N \frac{\Phi'_{P_{\infty}M}}{\Phi'_{PS}} \Phi'_{PS} + N \frac{\Phi'_{P_{\infty}Q}}{\Phi'_{PS}} \Phi'_{PS} + \frac{\sum \Delta \Phi'_e n(\Delta \Phi'_e)}{\Phi'_{PS}} \Phi'_{PS} + \frac{\sum \Delta \Phi'_i n(\Delta \Phi'_i)}{\Phi'_{PS}} \Phi'_{PS} \right]$$

da cui raccogliendo N e B₀ si ha:

$$\Phi'_{t_{max}} = 2\pi R \cdot N \cdot B_0 \left[\frac{\Phi'_{P_{\infty}M}}{\Phi'_{PS}} PS + \frac{\Phi'_{P_{\infty}Q}}{\Phi'_{PS}} PS + \frac{\sum \Delta \Phi'_e n(\Delta \Phi'_e)}{N} PS + \frac{\sum \Delta \Phi'_i n(\Delta \Phi'_i)}{N} PS \right] \quad (3)$$

Nella relazione n° 48 par. 2, pag. 9, possiamo trovare i valori che nel nostro caso assumono due della quattro grandezze scritte nella (3) entro parentesi quadra e cioè:

$$\frac{\Phi'_{R,M}}{\Phi'_{PS}} PS = 0,351 \text{ metri}$$

$$\sum \frac{\Delta \Phi'_L}{\Phi'_{PS}} \cdot \frac{n(\Delta \Phi'_L)}{N} PS < 0,023 \text{ metri}$$

Non avendo a disposizione rilievi di campo che ci permettano di calcolare gli altri due termini della (3) si assume per la loro somma il valore :

$$\sum \frac{\Delta \Phi'_L}{\Phi'_{PS}} \frac{n(\Delta \Phi'_L)}{N} + \frac{\Phi'_{R,Q}}{\Phi'_{PS}} PS + \sum \frac{\Delta \Phi'_e}{\Phi'_{PS}} \frac{n(\Delta \Phi'_e)}{N} PS = 0,049 \text{ mm.}$$

Essendo :

$$B_{\max} = 0,926 \text{ W/m}^2 \quad R = 3,6 \text{ m} \quad N = 12$$

sostituendo nella (3) si ottiene $\Phi'_{T \max} = 100,5$ Weber

Nel calcolo di $\Phi'_{T \max}$ si è trascurato il flusso disperso alle teste. =

L'induttanza dell'intero avvolgimento di eccitazione del magnete sarà:

$$L_i = \frac{\Phi'_{T \max}}{I_{T \max}} \approx \frac{100}{5470} = 0,0185 \text{ H}$$

8) - Il valore efficace della tensione alternata di alimentazione (~~componente svattata, cioè in quadratura con la corrente~~) vale:

$$V_{ca} = \omega L_i I_{ca} = 2\pi f 0,0185 \frac{3000}{\sqrt{2}} \approx 6200 \text{ Volt}$$

Questo è vero perché

Essendo il valore della componente della tensione alternata

in fase con la corrente, V''_{ca} è molto minore di V'_{ca} : si può così

assumere

$$V_{ca} \approx V'_{ca}$$

V'_{ca} = componente della tensione in quadratura con la corrente

9) - Il valore della tensione efficace fra le spire adiacenti è:

$$V_s = \frac{6200}{48} \approx 130 \text{ Volt}$$

10)-La potenza reattiva fornita al magnete dai condensatori è di:

$$P_a = V_{ca} \cdot I_{ca} = 6200 \frac{3000}{\sqrt{2}} \approx 13200 \text{ KVA}$$

11)-L'energia massima immagazzinata nel magnete (ferro+intraferro) ha il valore di:

$$E_{mtmax} \approx \frac{1}{2} 18.5 (5370)^2 \cdot 10^{-3} \text{ Jaule} \approx 275000 \text{ Jaule}$$

$$E_{mfemax} \approx 9600 \text{ Jaule}$$

$$E_{mamax} \approx 265400 \text{ Jaule}$$

12)-La capacità di risonanza (25p/sec) per il magnete è di:

$$C \approx \frac{1}{\omega^2 L_i} = \frac{1}{(157)^2} \cdot \frac{1}{18 \cdot 10^{-3}} = 2190 \mu F$$

13)-La forza massima che viene esercitata su un metro di bobina interna (in direzione della gamba del C) si calcola assumendo per il campo magnetico che investe in direzione verticale la bobina stessa, un valor medio pari a $B_{max}/2K$, si ha perciò (fig.12):

$$F_{bimax}/\text{metro} = \frac{B_{max}}{2K} \frac{NI}{9,8} \text{ kg} \approx 950 \text{ kg}$$

Verrà esercitata contro il ferro del magnete una pressione massima di circa $(950/28 \times 100) \text{ kg/cm}^2 \approx 0,34 \text{ kg/cm}^2$.

La forza massima che viene esercitata verso l'esterno su un metro di bobina esterna F_{bemax}/metro è circa la metà della forza che si esercita sulla bobina interna, cioè $F_{bimax}/\text{max} = 480 \text{ kg}$.

Per dimensionare l'ancoraggio della bobina si devono tenere presenti anche i momenti flettenti negli ultimi tratti della bobina interna in prossimità della testate.

Lo sforzo massimo di attrazione magnetica che si esercita sulle espansioni polari in direzione delle ali del C, su cui le espansioni appoggiano, è data dalla formula seguente^(°):

$$F_{pmax} = \int_{s_1} \frac{1}{2\mu_0} B_{smax}^2 ds_1 \cos \theta \quad (\text{fig.12})$$

(°) Per la validità della formula bisogna ammettere che i lamierini dei poli e delle ali del C non siano perfettamente affacciati.-

s_p = lunghezza del contorno della espansione polare.

B_{smax} valore massimo del campo magnetico (\perp alla espansione polare) *medi sul lamierino più isolante.*

θ = angolo tra le normali alle espansioni polari e alla superficie di appoggio del polo.

Con le dimensioni delle nostre espansioni polari sarà approssimativamente:

$$F_{pmax} = \left(\frac{1}{2\mu_0} B_{smax}^2 \cdot 0,308 - \frac{1}{2\mu_0} B_{max}^2 \cdot 0,25 \right) \frac{1}{98} \approx 5000 \text{ kg/ml}$$

$$\text{con } B_{smax} = 1,056 \text{ Wb/m}^2 \text{ e } B_{max} = 0,926 \text{ Weber/m}^2$$

Le colonnine di sostegno dei poli devono reggere 5000 Kg/ml.

Lo sforzo che tende a chiudere le ali del C approssimativamente è dato da:

$$F_{amax} = \frac{1}{98} \cdot \frac{1 \cdot (1,056)^2 \cdot 0,308 \cdot 12}{2 \cdot 4,256 \cdot 10^{-6}} = 16700 \text{ kg/ml.}$$

La risultante di tale sforzo è applicata in corrispondenza della circonferenza ~~media~~ dell'intraferro .

Un ulteriore sforzo F_r tende a smuovere i lamierini in senso radiale.

B_{smax}

(°) - Il valore di B_{smax} è ottenuto interpolando linearmente tra i valori 1,138 e 1,018 che si trovano nella quarta colonna della tabella III della relazione M-48 e moltiplicando per 0,926 . Il valore che si ottiene è \approx 1,056

§ 9) - Precisioni e tolleranze.

In questo paragrafo si riassumono le precisioni di lavorazione e le caratteristiche elettriche e meccaniche che si prevedono nella costruzione del magnete del sincrotrone.-

Le voci sotto cui cataloghiamo questi dati sono:

- 1) Precisioni di punzonatura dei lamierini dei C.
- 2) Precisioni di punzonatura dei lamierini dei poli
- 3) Precisioni nell'impacchettamento dei lamierini dei C.
- 4) Precisioni nell'impacchettamento dei lamierini dei poli.
- 5) Precisioni delle guide di riferimento su cui i blocchi di lamierini a C vengono montati.-
- 6) Precisioni del montaggio dei blocchi di lamierini a C.-
- 7) Precisioni del montaggio delle espansioni polari.-
- 8) Precisione meccanica durante il funzionamento
- 9) Garanzia sulle precisioni del magnete dopo un mese di funzionamento.
- 10) Raffreddamento del ferro.
- 11) Qualità elettriche dell'isolamento tra i lamierini.-
- 12) Qualità magnetiche dei lamierini.-
- 13) Precisione magnetica dei blocchi di lamierini dei poli e dei C.
- 14) Criteri e modalità del montaggio dei blocchi.-
- 15) Perdite nella bobina di eccitazione.
- 16) Temperatura della bobina di eccitazione.
- 17) Isolamento della bobina di eccitazione.
- 18) Garanzie sulla bobina di eccitazione.
- 19) Circuito di raffreddamento e prese di corrente.
- 20) Requisiti delle testate.-

1)- Precisioni di punzonatura dei lamierini dei C.

Nel disegno allegato MA 204 D é disegnato un lamierino a C: in fig. ~~12~~ ¹³ é disegnato un lamierino di forma rettangolare che verrà interposto tra le ali del C per ottenere la curvatura del magnete. Nei disegni sono segnate vicino alle dimensioni le tolleranze assolute e relative (queste ultime fra parentesi).-

Le deformazioni dovute alla rottura delle tensioni interne nella punzonatura, possono essere evviate con una ^{pre} punzonatura grossolana.-

Alcune piccole modifcazioni possono essere apportate alla forma del lamierino da noi proposta per permettere l'assemblaggi e fissare i riferimenti (per es: possono essere ricavate sedi per i bulloni, spostate le tacche di riferimento, tagliati gli angoli ecc...).

In ogni caso però le tolleranze devono essere equivalenti a quelle indicate nei disegni e le modificazioni devono essere approvate dalla Ns. sezione.-

2)- Precisione di punzonatura dei lamierini dei poli.-

Una forma approssimata del polo é disegnata nel dis. MA - 205D dove vicino alle dimensioni sono indicate le tolleranze assolute e relative (quest@ ultima fra parentesi).

Tale forma sarà cambiata certamente quando le informazioni del nostro gruppo di Misure Magnetiche saranno più precise e complete.

Tale disegno serve a fissare le precisioni di lavorazione che sono richieste nella punzonatura dei lamierini per i poli.-

3)- Precisione nell'impacchettamento dei lamierini a C.

I lamierini vanno impacchettati con notevole precisione: le superfici dei blocchi che servono di riferimento e di appoggio alle espansioni polari (superiori e inferiori) devono conservare le precisioni del punzonato.-

Il coefficiente di stipamento deve essere il più uguale possibile nei vari blocchi.

Per l'operazione di impacchettamento ci si dovrà servire di una apposita apparecchiatura per il riferimento preciso fra i vari lamierini.

4)- Precisione nell'impacchettamento dei lamierini dei poli.
Considerazioni analoghe a quelle svolte nel n°3 sull'impacchettamento dei lamierini dei C valgono per l'impacchettamento dei lamierini dei poli.

5)- Precisione delle superfici delle guide di riferimento su cui vengono montati i blocchi dei lamierini a C.

Le superfici individuate dalle guide di riferimento del magnete devono costituire un piano (riferimento verticale) e un cilindro (riferimento radiale) con le precisioni di $+ \overset{0,04}{\cancel{0,02}}$ mm: il raggio del cilindro deve differire al massimo di $\pm 0,5$ mm. dal valore nominale. La struttura non deve deformarsi troppo né sotto il peso del magnete né per gli sforzi elettromagnetici che si hanno durante il funzionamento.

Le deformazioni della struttura non devono provocare flessioni nelle guide di riferimento per i blocchi di lamierino, più di $+ \overset{0,04}{\cancel{0,02}}$ mm., rispetto alla posizione che avevano prima del montaggio e dell'eccitazione del magnete.-

6)- Precisioni di montaggio dei blocchi di lamierini a C;
Anche il montaggio dei blocchi di lamierini entro l'incastellatura deve essere fatta con la massima cura.

Si deve cioè verificare la precisione di allineamento dei blocchi adiacenti, si deve fare attenzione che tra le dimensioni di appoggio e le tacche di riferimento nei pacchetti di lamierini non vi siano corpi estranei.

In particolare per le superfici interne delle ali del C che servono di appoggio alle espansioni polari, si impone una precisione nella complanarità di $\pm 0,04$ mm.

7)- Precisioni di montaggio delle espansioni polari.
I riferimenti che fissano la posizioni reciproca delle espansioni polari devono essere tali che la distanza \overline{AB} e \overline{CD} (fig. 13)

abbiano una tolleranza rispetto al valore nominale di $\pm 0,1$ mm.
Le tolleranze della differenza $\overline{AB} - \overline{CD}$ è di $0,01$ mm.

8)- Precisioni meccaniche del magnete durante il funzionamento.

Le precisioni fin qui indicate devono essere verificate anche durante il funzionamento del magnete.

9-) Garanzia sulle precisioni del magnete ^{dopo un mese di} ~~durante il~~ funzionamento
Dopo un mese di funzionamento a pieno carico nella verifica delle dimensioni dei blocchi e della loro posizione reciproca, non si devono riscontrare deformazioni o spostamenti rispetto alle condizioni iniziali maggiori delle tolleranze già elencate.

10)- Raffreddamento del ferro.

Il sistema di raffreddamento del ferro del magnete, deve essere tale che le deformazioni che si hanno passando dalla temperatura ambiente ($15^\circ - 25^\circ$) a quella di regime durante il funzionamento non provochino variazioni nella forma dei lamierini a C e dei poli maggiori delle tolleranze già elencate. In particolare bisogna che lo spostamento Δ (ved. fig. 14) dei vertici R ed S sia minore di $0,01$ mm. quando la macchina raggiunge la temperatura di regime.

11)- Qualità elettriche dell'isolamento dei lamierini.

La resistenza tra un foglio di lamierino e quello adiacente nei blocchi a C, e nelle espansioni polari deve essere circa $10 \frac{\Omega}{\text{cm}^2}$
Tale resistenza potrà essere verificata anche per qualsiasi coppia di lamierini del blocco e dovrà conservarsi anche durante il funzionamento della macchina a pieno carico.

12)- Qualità magnetiche dei lamierini.

Durante la costruzione del magnete dovranno essere controllate le proprietà magnetiche dei lamierini. Per ogni tonnellata di lamierino punzonato, dovranno essere misurati, su campione toroidale, il ciclo di isteresi e la rimanenza. Se i pacchi di lamierini verranno ottenuti per incollature, il provino magnetico

dovrà essere formato da lamierini incollati con la stessa tecnica con cui ci si propone di eseguire l'impacchettamento.

Le modalità da seguire in queste prove, e la valutazione dei risultati, verranno precisate dal nostro Gruppo di Misure Magnetiche.

I3)- Precisione magnetica dei blocchi di lamierini dei poli e dei C.

La precisione magnetica dei blocchi è definita da una serie di prove alle quali detti blocchi devono ~~venire~~ ^{essere} ~~supposti~~ ^{ti}. Le modalità da seguirsi nelle prove, verranno maggiormente precisate dal nostro Gruppo di Misure Magnetiche nel capitolato d'appalto.

A) Precisione magnetica dei blocchi di lamierini dei poli.

I vari blocchi di lamierini dei poli, vengono successivamente fissati ad uno stesso blocco di lamierini a C: mediante un circuito di eccitazione opportunamente sistemato sul C, si può ottenere fra le espansioni polari un campo magnetico. Si fanno tre misure:

a) Si misura il campo magnetico quando l'eccitazione ha quel valore cui dovrebbe corrispondere (in un dato punto dell'intraferro) ~~il~~ campo di 12.000 ~~gauss~~ ^{gauss} le dimensioni del blocco fossero quelle nominali. e di 10.000 gauss.

b) Si misura in un dato punto dell'intraferro l'indice di campo $n = \frac{R}{4R} \frac{\Delta B}{B}$ in tre condizioni e cioè quando le amperspire di eccitazione sono 0,30000 e 65000 Amperes.

c) Si misura il campo residuo in un dato punto dell'intraferro quando si sia portato il campo ad un valore massimo pari a 10000 gauss nell'intraferro ~~si si toglie~~.

Si richiede che i valori ottenuti per ogni coppia di espansioni polari differiscano da quelli corrispondenti delle altre coppie il minimo ragionevolmente possibile:

I valori verranno precisati dal nostro Gruppo di Misure Magnetiche.

B)- Scelta una coppia di espansioni polari, essa viene fissata successivamente ai vari blocchi di lamierini a C. Si eseguono, in modo analogo, le prove elencate in A. Si richiede che i valori ottenuti per ogni blocco di lamierini a C, differiscano da quelli corrispondenti degli altri blocchi il minimo ragionevolmente possibile. I valori verranno precisati dal nostro Gruppo di Misure Magnetiche.

14)-Criteri e modalità del montaggio dei blocchi.

Eseguite le misure elencate nel n° 13 un certo numero di blocchi sarà scartato: quelli accettati saranno sistemati in modo da rendere il campo magnetico lungo l'azimut più uniforme possibile. Si cercherà di eliminare i componenti armonici a bassa frequenza delle variazioni azimutali del campo magnetico nell'intraferro in quanto essi sono dannosi al moto degli elettroni. Si spera di ottenere un campo abbastanza uniforme azimutalmente per cui non si debba intervenire con bobine di correzione per correggerne le disuniformità azimutali.

Maggiori dettagli verranno dati dal nostro Gruppo di Misure Magnetiche.

15)-Perdite nelle bobine di eccitazione.

Le perdite nella bobina di eccitazione (ohmiche e per correnti parassite) non devono superare i 250 KW (Le perdite nel ferro non devono essere maggiori di 35 KW).

16)-Temperatura della bobina di eccitazione.

La ~~temperatura~~ ^{sovratemperatura} nella bobina di eccitazione rispetto alla temperatura ambiente (definita secondo le norme CEI) non deve superare i 18°C. Nell'avvolgimento si devono prevedere coppie termoelettriche per la verifica della temperatura durante l'esercizio.

17)-Isolamento della bobina di eccitazione.

Le qualità e le quantità di isolamento della bobina di eccitazione vengono verificate dalle seguenti prove cui l'avvolgimento deve venire sottoposto:

- a) - misura di resistenza di isolamento
- b) - prove della rigidità dielettrica

Le modalità da seguirsi in queste prove sono sostanzialmente analoghe a quelle fissate nelle norme CEI per i trasformatori: esse verranno precisate maggiormente nel Capitolato d'appalto.

18)-Garanzie sulla bobina di eccitazione.

La bobina di eccitazione deve conservare dopo un anno di funzionamento immutate le sue caratteristiche elettriche e di isolamento. In particolare gli sforzi che sorgono nella bobina, non devono danneggiare in alcun modo l'isolamento e i circuiti di raffreddamento.

19)-Circuito di raffreddamento e prese di corrente.

Il raffreddamento deve essere sufficiente a smaltire le perdite mantenendo la sovratemperatura entro i limiti indicati al n°16. Le dilatazioni per cause termiche dei condotti di raffreddamento (diverse da quelle di conduttori) non devono nuocere all'isolamento dei conduttori. Le prese dell'acqua alle testate devono essere isolate verso massa per una tensione di 7000 volt di esercizio. Tra le prese dell'acqua non devono avvenire scariche

elettriche nè cortocircuiti. Inoltre deve essere consentita l'accessibilità ai distributori dell'acqua di raffreddamento.

20)-Requisiti delle testate.

Nelle sezioni diritte, cioè fra una testata e l'altra di due quadranti successivi (1,206 metri) devono trovare sede numerose apparecchiature (radiofrequenza, pompe per il vuoto, iniettore, ecc.) nonchè le testate delle bobine e le prese dell'acqua di raffreddamento. Deve essere garantita, con opportuna protezione, la sicurezza delle persone. Inoltre i supporti per la bobina e i piastroni frontali devono essere di materiale non magnetico; anche i supporti delle bobine esterne nonchè le parti metalliche adiacenti non devono essere di materiale magnetico e non devono avere una resistività troppo bassa. —

Alimentazione del magnete.

§ 1) Descrizione del tipo di alimentazione del magnete.

Come già abbiamo detto nell'introduzione a questa relazione ci si propone di realizzare un'andamento nel tempo del campo magnetico nell'intraferro del magnete come illustrato in fig. 6. Si può ottenere un tale andamento del campo magnetico con una corrente di eccitazione avente lo stesso andamento nel tempo del campo magnetico: cioè deve avere una componente continua ed una componente alternata. Il sistema di alimentazione del magnete deve quindi fornire una corrente con una componente continua ed una componente alternata.

Per potere variare con una certa libertà il valore negativo del campo magnetico, per lavare magneticamente più o meno il magnete, a secondo di quello che l'esperienza sul modello ci farà sapere, deve prevedersi la possibilità di variare la componente continua della corrente nel magnete almeno tra $\frac{100}{\sqrt{2}}$ Amperes e 2740 Amperes, e per la corrente alternata tra $3000/\sqrt{2}$ e $\frac{100}{\sqrt{2}}$ Amperes efficaci, variando l'eccitazione dei generatori che alimentano il magnete stesso.

Il circuito di alimentazione del magnete é riportato in fig. 15. I componenti di questo circuito sono i seguenti:

- 1) Banco di condensatori in parallelo al magnete (costituiti da C_1 e C_2)
- 2) Induttore di protezione (L_p)
- 3) Banco di condensatori in parallelo all'induttore di protezione. (C_3)
- 4) Generatore a corrente alternata.
- 5) Generatore a corrente continua.
- 6) Gruppo motore del generatore a corrente continua/che si allaccia e del generatore a corrente alternata (che si allaccia direttamente alla rete.)
- 7) Apparecchiatura di regolazione.

Il banco di condensatori in parallelo al magnete ha il compito di fornire a questi l'energia swattata. Il ^{generatore} a c.a. fornisce solo le perdite per corrente alternata al sistema. L'induttore di protezione posto in risonanza con un banco di condensatori blocca la corrente alternata che si riverserebbe nel generatore a.c.c. che costituisce ^{da solo un} l'impedenza troppo bassa alla corrente alternata. I generatori a c.c. e a c.a. forniscono la potenza dissipata nel sistema. Il gruppo motore ~~§~~ serve a muovere il generatore a c.c. e a c.a. L'apparecchiatura di regolazione serve a regolare la frequenza, la tensione di alimentazione del magnete (e quindi la corrente di eccitazione, che é in ultima analisi il parametro che ci interessa) nella misura che preciseremo nel paragrafo 3).

§2) Descrizione del macchinario.

In questo paragrafo si descrivono le caratteristiche elettriche del macchinario che si ricavano direttamente dalle caratteristiche del circuito e del magnete.

1) Condensatori in parallelo ^{all'avvolgimento di eccitazione del} al magnete. - La potenza dei banchi

C_1 e C_2 in serie posti in parallelo al magnete é di:
 $\sim 13.200 \text{ KVA a } 25 \text{ p/sec. } (V_{ca} \times I_{ca})$
($\sim 26.400 \text{ KVA se ridotti a } 50 \text{ p/sec.}$)

La capacit  dei due banchi in serie é di 2.290 MF .

Le perdite nei condensatori se $\frac{1}{2} \delta = 3\%$ (~~vedi norme C.E.I.~~) sono complessivamente di circa 40 K W .

2) Induttore di protezione.

Tale induttore affin  sia minimo il costo del circuito di blocco per la corrente alternata dovr  avere un'induttanza circa 3 volte il valore di quella del magnete pari a :

$$\simeq 0,056 \text{ henry.}$$

La componente continua della corrente é la stessa che circola nel-magnete/nell'avvolgimento di eccitazione del magnete cio :

$$I_{ca} \approx \frac{2740}{2733} \text{ Amperes.}$$

La tensione tra i morsetti é di circa 6.200 Volt efficaci

La frequenza di funzionamento 25 p/sec.

Le perdite elettriche per corrente continua ^{si} prevedono intorno a

ai ~~120~~ 120 KW

Le perdite per corrente alternata si prevedono intorno ai

~~P~~ 50 KW

Raffreddamento in olio.

3) Banco di condensatori in parallelo all'induttore di protezione.

Le caratteristiche di tale banco sono:

Capacità $\approx 730 \mu F$.

Potenza ≈ 4300 KVA (a 25 p/sec.)

Tensione di eccitazione = 6200 Volt. (valore efficace)

Frequenza di funzionamento = 25 p/sec.

Potenza dissipata ($\cos \phi = 3\%$) ≈ 13 KW.

4) Generatore a corrente continua.

Il generatore a c.c. deve fornire la potenza dissipata per corrente continua che si ha nei vari componenti il circuito in condizioni di regime (induttore e ^{avvolg. di eccit. del} magnete).

Per sicurezza sarà bene aumentare del 20% tale potenza.

Non essendosi ancora stabilito quale sarà il tipo di avvolgimento prescelto per il magnete né di preciso essendosi stabilite le perdite nell'induttore di protezione, i dati relativi al generatore a c.c. sono solo indicativi:

Potenza erogata 270 KW

Corrente erogata 2740 Amperes. (regolando l'eccitazione essa può scendere fino a ¹⁰⁰ ~~2500~~ Amperes.)

5) Generatore a c.a.

Il generatore a corrente alternata deve essere dimensionato per erogare la potenza attiva necessaria a supplire alle perdite nei vari componenti del sistema (induttore, avvolgimento del magnete, condensatori, ecc...) ed anche a supplire ai sovraccarichi di potenza dovuti agli shift di frequenza e alla variazione dell'induttanza del magnete nel tempo. (°)

Nota.- (°) Tale variazione di induttanza, dovuta alla variazione delle amperspire assorbite dal ferro, varia l'accordo fra ~~condensatori~~ l'induttanza stessa e i condensatori e se la forma d'onda del generatore non é opportuna questo generatore si sovraccarica.

Il circuito risonante anche con piccoli shift richiama dall'esterno notevoli quantità di energia reattiva (pari a Δf per la potenza reattiva assorbita dal magnete).

Bisognerà stare attenti che non si abbiano risonanze nel sistema per cui il rotore del generatore oscilli con effetti disastrosi. La responsabilità della stabilità del sistema sarà a carico della Ditta a cui sarà commissionata l'alimentazione.

Possiamo a titolo indicativo fornire i seguenti dati:

Tensione = 3100 Volt (se $C_1 = C_2$)

Potenza attiva = KW 290 (perdite ferro^{magneti}, + perdite rame^{magneti}, + perdite condensatori, + perdite choke coil). -

$\cos \varphi = 0,8$

Da i dati del circuito la Ditta deve ^{dimensionare} ~~però~~ ^{opportunitamente} commissionare questo generatore ed eventualmente sagomare le sue espansioni polari.

6) Gruppo convertitore di alimentazione .

Tale gruppo deve muovere i generatori a d.c. e a c.a.

Per es: un motore trifase sincrono viene alimentato dalla rete; questi muove una dinamo che eroga la corrente continua per muovere un motore a c.c. che muove il generatore a c.a.

Dalla dinamo viene prelevata la componente continua ^{della corrente} per il magnete (vedi fig. 5). Altre soluzioni soddisfacenti possono essere proposte. Come criterio generale si può dire che, con un numero maggiore di macchine di alimentazione, si può effettuare una regolazione più precisa di corrente e frequenza.

Inoltre con ~~maggiore~~ lentesza una perturbazione nella frequenza di rete si ripercuote meno rapidamente in una variazione nelle caratteristiche dell'alimentazione del magnete (frequenza, I_t max positivo e I_t max negativo) .

7) Apparecchiatura di regolazione.

Durante il funzionamento del sincrotrone , può essere che i parametri fondamentali dell'eccitazione (corrente massima, corrente minima e frequenza della componente alterata) si modifichino nel tempo per varie cause.

(Per es: aumento di temperatura, e quindi resistenza, dell'avvolgimento o del magnete o dell'induttore di protezione; variazione della frequenza di rete).

L'apparecchiatura di regolazione del macchinario deve impedire,

(vedremo in che misura e con che prontezza nel par. 3) le variazioni dei parametri fondamentali dell'eccitazione, ^{del magnete} intervenendo sulle eccitatrici delle macchine.

Le ragioni per cui si esigono precisioni forti negli elementi caratteristici dell'alimentazione sono le seguenti:

a) Dall'interno del magnete partono i segnali di comando per vari componenti del sincrotrone (per es: radiofrequenza per l'iniettore ecc...) e per le apparecchiature asservite al funzionamento del sincrotrone (ad es: camere di Wilson ecc...)

Questi segnali devono essere sincronizzati quando la macchina comincia a funzionare. Non si deve verificare l'inconveniente di dover intervenire sui comandi stessi di frequente durante il funzionamento della macchina, per ristabilire il sincronismo dei comandi. Dobbiamo prevedere che il ciclo di alimentazione del magnete si ripeta con la massima precisione nel tempo: infatti i segnali di comando sono sensibili al campo magnetico e alle sue derivate nel tempo.

b) La variazione della forma del campo magnetico nel tempo (quindi del valore di n) dipende anche dalle correnti parassite nei lamierini e nelle altre ^{parti} ~~parti~~ metalliche del sincrotrone:

se tali correnti si ripetono ad ogni ciclo identicamente, possiamo correggere le perturbazioni da esse apportate, opportunamente alimentando delle " bobine di correzione".

Affinché le correnti parassite non varino da ciclo a ciclo, è necessario che la corrente di eccitazione del magnete e la sua frequenza di eccitazione non varino.

c) Il rapporto ^{η_i} tra elettroni iniettati e elettroni che restano nella ciambella senza andare a sbattere contro le pareti dipende dalla "spiralizzazione del fascio all'iniezione" grandezza direttamente legata al valore che $\frac{dB}{dt}$ assume quando $B = B_i$.

Per mantenersi vicino a valori buoni di η_i ^{si} ~~si~~ bisogna che $\frac{dB}{dt}(B_i)$ si mantenga prossimo a certi valori e quindi ~~non~~ ^{non} bisogna che i parametri fondamentali dell'alimentazione, a cui è direttamente legata la grandezza $\frac{dB}{dt}(B_i)$ non varino.

d) Per non avere variazioni nell'energia degli elettroni di uscita

(per l'esigenza delle esperienze che con tale macchina si faranno

(*) ~~η_i = rendimento all'iniezione~~

bisogna che le A_{st} max abbiano ristrette variazioni nel tempo.

§ 3) Requisiti cui il macchinario e la sua regolazione devono soddisfare.

Non entreremo nei particolari delle prove di collaudo ecc... che verranno richieste per il macchinario: tale argomento sarà materia dei capitoli sul macchinario al momento dell'ordinazione dello stesso. Possiamo fin d'ora precisare che l'isolamento delle macchine deve essere di classe B e che ci riferiremo alle norme CEI nella precisazione delle prove e caratteristiche delle macchine e dei condensatori. Sulle caratteristiche di regolazione possiamo precisare quanto segue:

a) - Fissato il valore massimo della componente alternata di eccitazione del magnete (la componente continua della corrente essendo fissata entro $\pm 1\%$) la sua stabilità nel tempo deve essere garantita nella seguente misura:

1) - Per $3000 \text{ Amp.} \geq I_{cmax} \geq 1000 \text{ Amp.}$ al $\pm 0,1\%$

2) - Per $1000 \text{ Amp.} \geq I_{cmax} \geq 140 \text{ Amp.}$ al $\pm 0,5\%$

b) - Fissato il valore della componente continua di eccitazione, la sua stabilità nel tempo deve essere garantita nella misura che segue:

1) - Per $2740 \text{ Amp.} \geq I_{cc} \geq 1000 \text{ Amp.}$ al $\pm 0,1\%$

2) - Per $1000 \text{ Amp.} \geq I_{cc} \geq 100 \text{ Amp.}$ al $\pm 0,5\%$

c) - Il valore minimo ed il valore massimo della somma della corrente alternata e della corrente continua, fissato il valore delle due componenti, devono essere garantiti entro tolleranze uguali alla somma delle tolleranze stabilite in a) e in b) per le singoli componenti.

d) - La frequenza fondamentale della corrente alternata di eccitazione deve essere garantita al $\pm 0,1\%$.

e) - La prontezza con cui deve intervenire la regolazione è così definita:

Abbiasi il magnete eccitato in un certo stato; se la frequenza di rete varia di $\pm 5\%$ in modo impulsivo, il sistema di regolazione deve, entro un decimo di secondo, riportare l'eccitazione nello stato iniziale entro le tolleranze stabilite.

Lo stesso se la tensione di rete varia del $\pm 5\%$.

F) - Se la tensione e la frequenza di rete variano entro $\pm 1\%$ in modo impulsivo, le variazioni dei parametri iniziali devono essere contenute entro le tolleranze stabilite.-

TABELLA I. - In questa tabella vengono riportate tutte le notazioni usate nella relazioni e nei disegni allegati. gati ed il loro significato.

L_p	larghezza base polo
L_{cu}	larghezza finestra rame
H_{cu}	altezza finestra rame
L_a	larghezza intraferro
L_b	altezza intraferro
L_g	larghezza gamba di ritorno del C
H_p	altezza lamierino
L_r	larghezza lamierino
R	raggio orbita principale
R_i	raggio interno lamierino
R_{max}	raggio esterno lamierino
K	H_{cu} / L_b
l	lunghezza orbita principale
Δ	$l / 2\pi R$ fattore di allungamento
L_e	induttanza dell'avvolgimento di eccitazione
C	capacità di risonanza
I_t	corrente totale dell'avvolg. di eccitazione
I_{tmax}	valore massimo della corrente totale
I_{tmin}	valore minimo della corrente totale
I_{cc}	corrente continua
I_{ca}	corrente alternata (valore efficace)
I_{camax}	valore massimo della corrente alternata
A_{si}	amperspire assorbite nell'intraferro
A_{sfe}	amperspire assorbite nel ferro

A_{st}	amperspire assorbite nell'intero circuito magnetico
A_{stmax}	valore massimo delle amperspire assorbite nell'intero circuito magnetico
A_{stmin}	valore minimo delle amperspire assorbite nell'intero circuito magnetico
B_i	campo magnetico nell'intraferro all'iniezione
B_{max}	valore massimo del campo magnetico nell'intraferro
B_{min}	valore minimo del campo magnetico nell'intraferro
B_a	$(B_{max} - B_{min}) / 2$
B_b	$(B_{max} + B_{min}) / 2$
B_{fe}	campo magnetico nel ferro
μ_0	permeabilità magnetica dell'aria
μ_{fe}	permeabilità magnetica relativa del ferro
f_{fe}	coeff. di stipamento dei lamierini dei C
f_p	coeff. di stipamento dei lamierini del polo
V_{ca}	valore efficace della tensione alternata di alimentazione
V'_{ca}	componente della V_{ca} in quadratura con la corrente
V''_{ca}	componente della V_{ca} in fase con la corrente
V_s	valore efficace della tensione fra spire adiacenti
Φ_t	flusso concatenato con l'avvolgimento di eccitazione del magnete
E_{mt}	energia immagazzinata nel magnete (ferro + intraferro)
E_{mfe}	energia immagazzinata nel ferro del magnete

E_{ma}	energia immagazzinata nel intraferro del magnete
F_{bi}	forza elettrodinamica esercitata sulla bobina interna
F_p	forza di attrazione magnetica sui poli
η_1	rendimento all'iniezione
n	indice di campo magnetico
f	frequenza di eccitazione del magnete
τ_1	istante di iniezione degli elettroni
τ_u	istante in cui $B_o(t) = B_{max}$
λ	pendenza superficie laterale dei poli
P_a	potenza reattiva fornita al magnete
ω	$2\pi f$
P_Ω	perdite ohmiche <i>nell'avvolgimento di eccitazione</i>
P_{cp}	perdite per correnti parassite <i>nell'avvolgimento di eccitazione</i>
ρ	resistività del rame
N	numero spire dell'avvolgimento di un quadrante
F_{be}	forza elettrodinamica esercitata sulla bobina esterna
F_a	sforzo che tende a chiudere le ali del C
F_r	sforzo che tende a smuovere i lamierini in direzione radiale
L	lunghezza sezioni diritte
$B_o(t)$	campo magnetico nell'intraferro

APPENDICE ALLA RELAZIONE M 49

Il recente progresso nello studio del ns. progetto, ci indica che probabilmente una frequenza di eccitazione del magnete di 20 p/sec sia preferibile alla frequenza di 25 p/sec da noi data nella relazione M 49. Poichè d'altra parte non siamo ancora in grado di fare una scelta definitiva e considerando che le varianti da 25 p/sec a 20 p/sec sono di lieve entità preferiamo chiedere alle Ditte costruttrici un'offerta separata per l'eccitazione a 25 p/sec e per l'eccitazione a 20 p/sec.

Diamo nel seguito l'elenco dei dati numerici corrispondenti ad una eccitazione di 20 p/sec che sostituiscono i corrispondenti valori calcolati nella relazione M 49; calcolati per una eccitazione di 25 p/sec. Noi riteniamo che tutti gli argomenti svolti nella relazione M 49 per il caso di eccitazione a 25 p/sec restino validi anche per l'eccitazione a 20 p/sec. Riteniamo anche che una eccitazione a 20 p/sec costituisca un'economia sia nei riguardi dell'isolamento che delle perdite.

Elenco dei dati della relazione M 49 modificati a seguito il cambiamento di frequenza:

Frequenza di eccitazione del magnete	20 p/sec	invece di	25 p/sec
Tensione massima ai capi del magnete (e quindi al capo dell'induttore di protezione e banco dei condensatori)	5600 Volt	invece di	7000 Volt
Tensione efficace ai capi del magnete	4960 Volt	invece di	6200 Volt
Tensione efficace tra le spire	104 Volt	invece di	130 Volt
Potenza reattiva fornita al magnete	10560 kVA	invece di	13200 kVA
Capacità di risonanza da mettere in parallelo al magnete	3420 μ F	invece di	2190 μ F

La Capacità da mettere in
parallelo all'induttore
di protezione

1140 μ F invece di 730 μ F

Tensione efficace del ge-
neratore a c.a.

2480 Volt " " 3100 Volt

Non è il caso di dare i dati modificati in seguito al cambiamento di frequenza relativi alle perdite nel ferro, nel rame e nei condensatori: le cifre calcolate per 25 p/sec forniscono un valore per eccesso delle perdite nel caso di eccitazione a 20 p/sec. Questi dati nella relazione N° 49 sono solo indicativi; p.es. nel caso delle perdite nel magnete sono serviti solamente a stabilire un limite massimo.

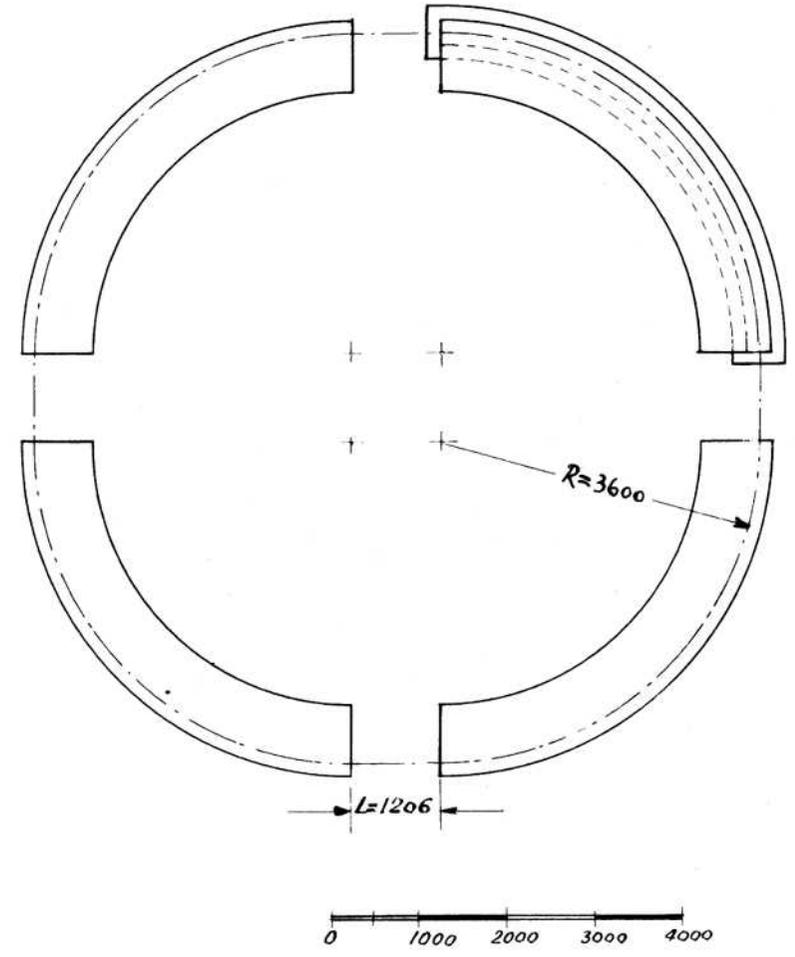
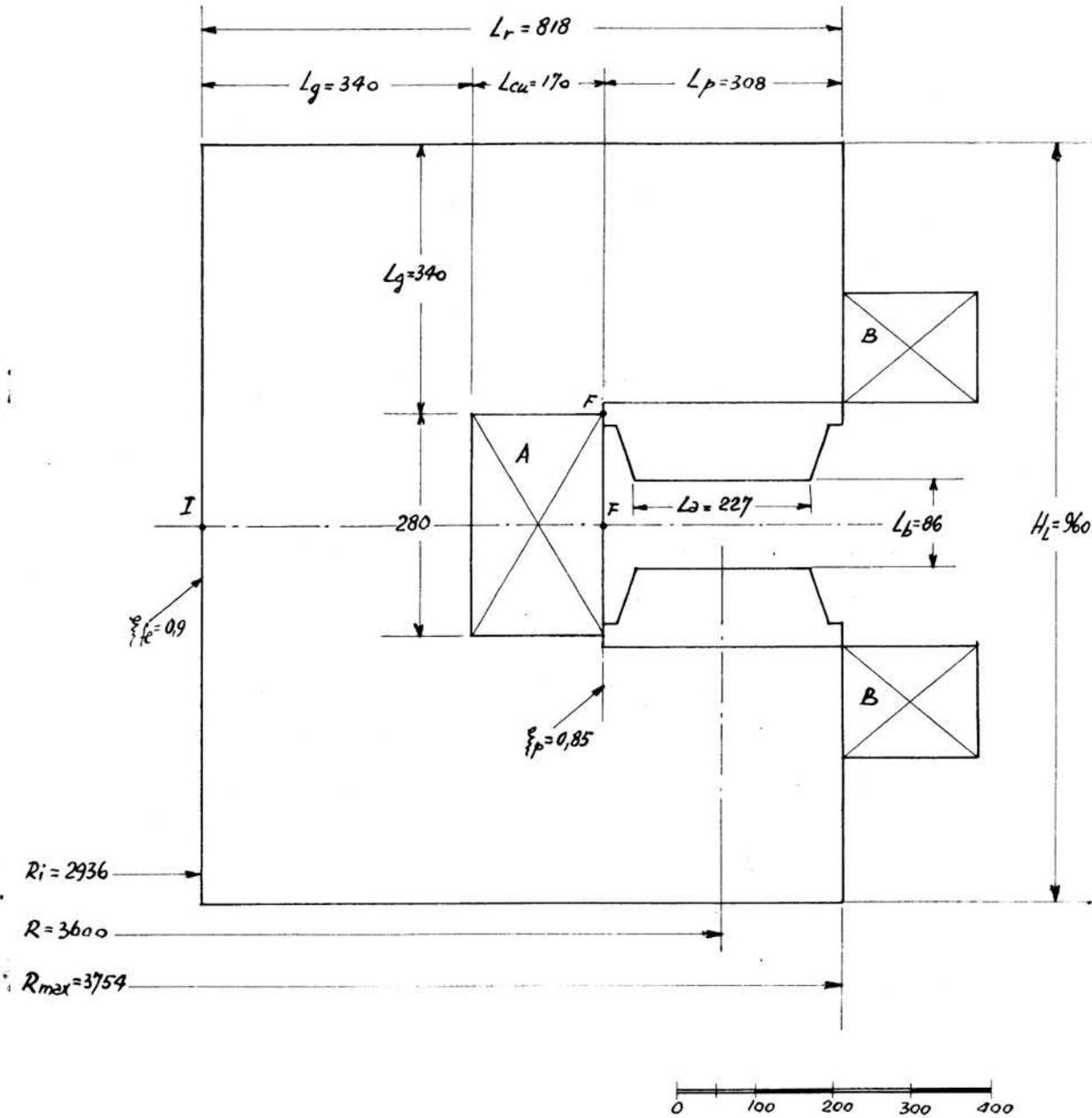


FIGURA I. SEZIONE VERTICALE ED ORIZZONTALE DEL MAGNETE "DAVID".

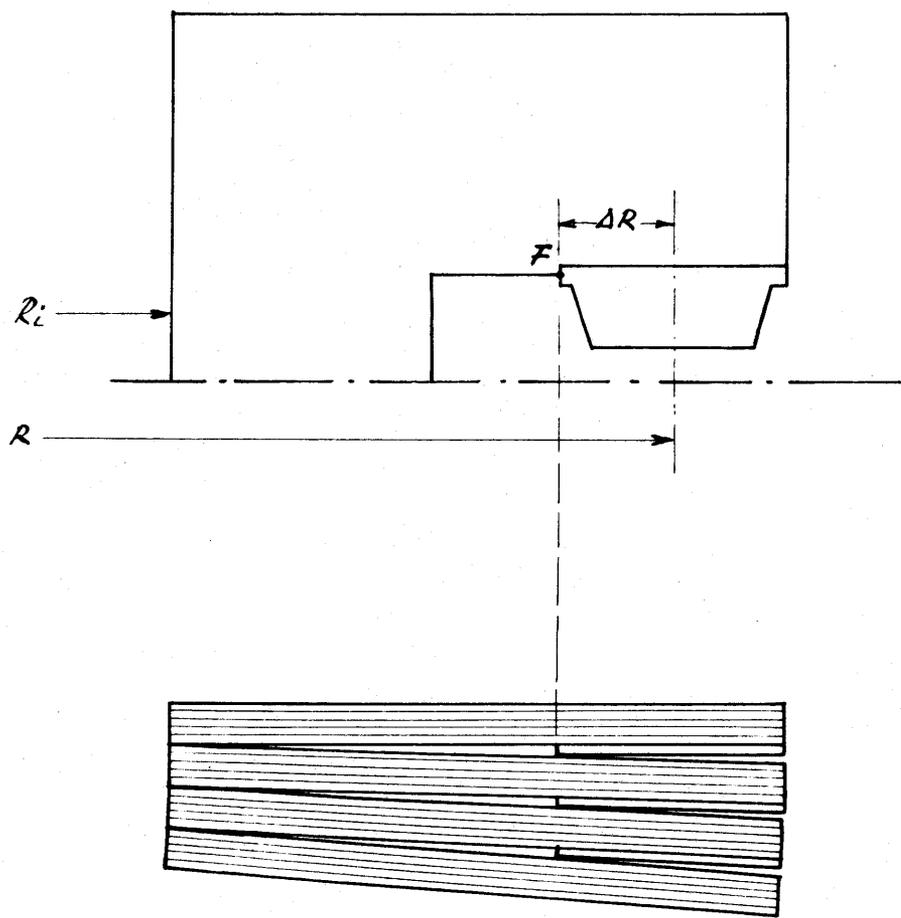
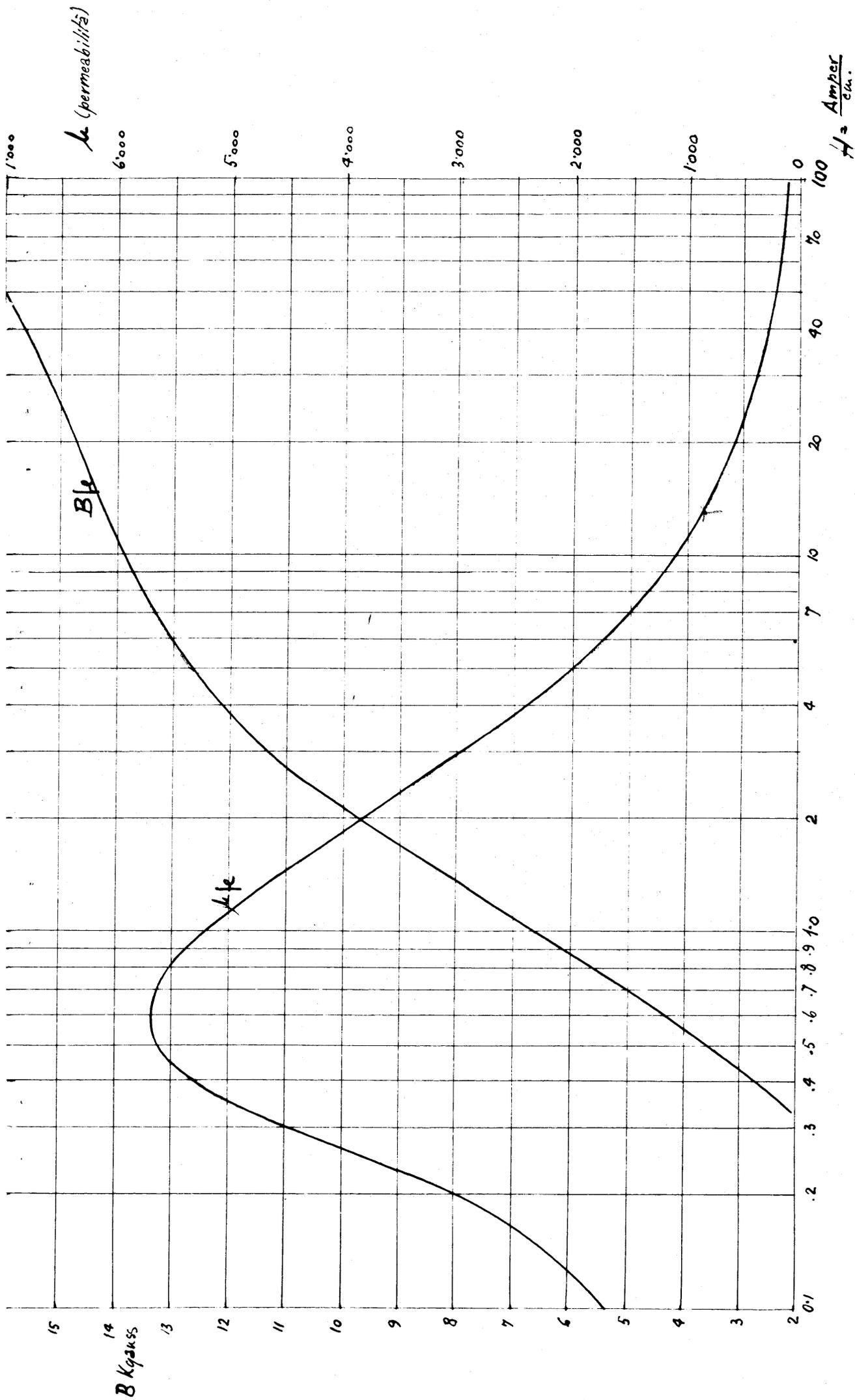


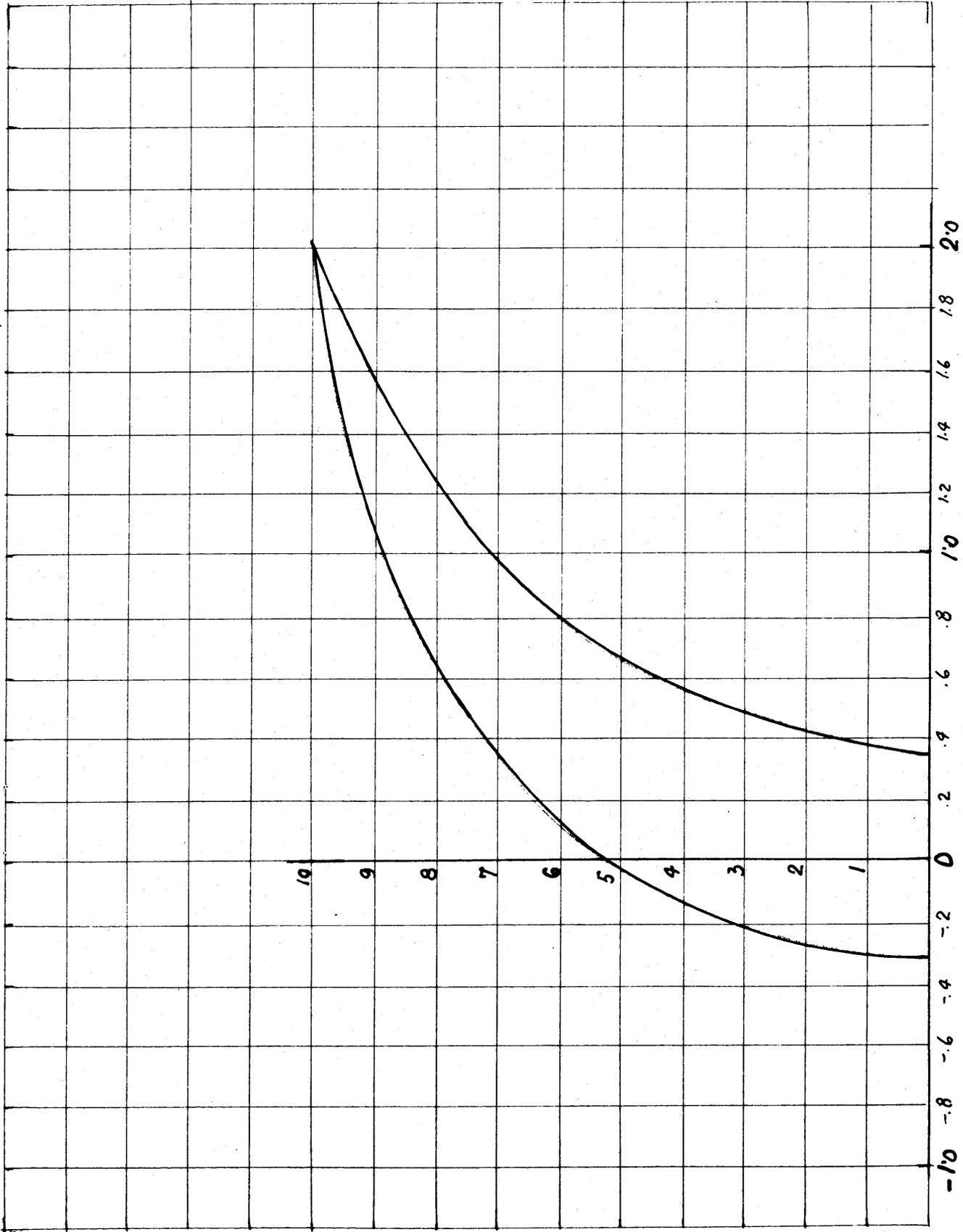
FIG. 2 - SCHEMA ASSEMBLAGGIO LAMIERINI



CURVA DI MAGNETIZZAZIONE C.C. E CURVA DELLA PERMEABILITA' DELL' ARMCO TRAN-COR 2

FIGURA 3

Bkgwms



Hz Angolo / mm.

FIGURA 4

CICLO DI ISTERESI DEL TRANCORRE
DELL'ARMICO PER Bmax = 10000 fowm

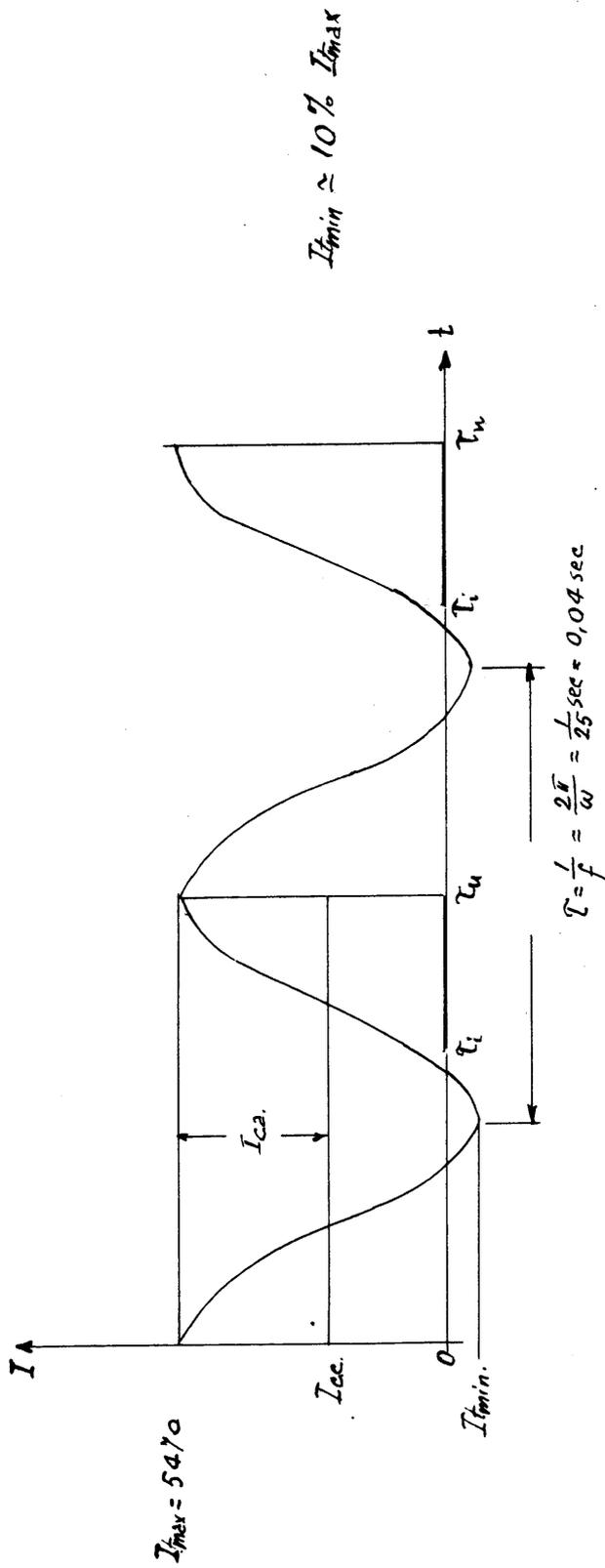


FIGURA 5 - Diagramma di I in funzione del tempo. -

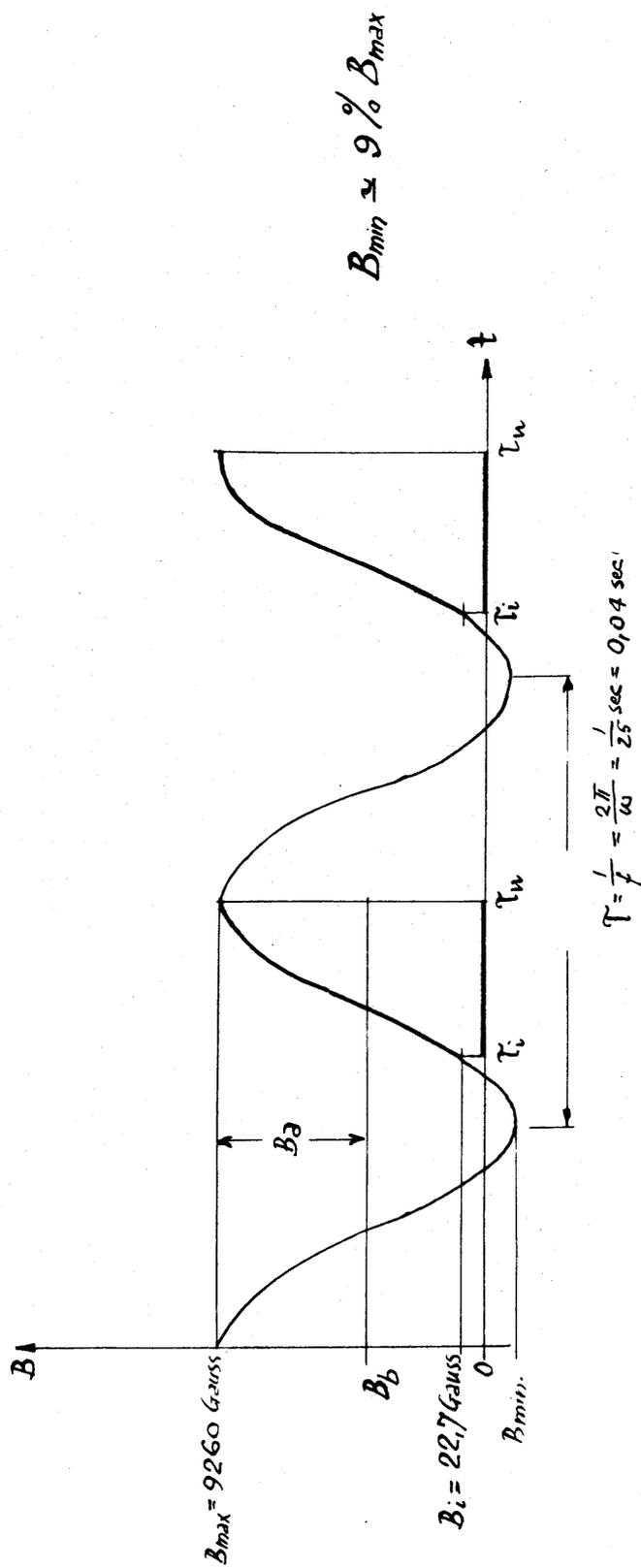


FIGURA 6 - Diagramma di B_0 in funzione del tempo. -

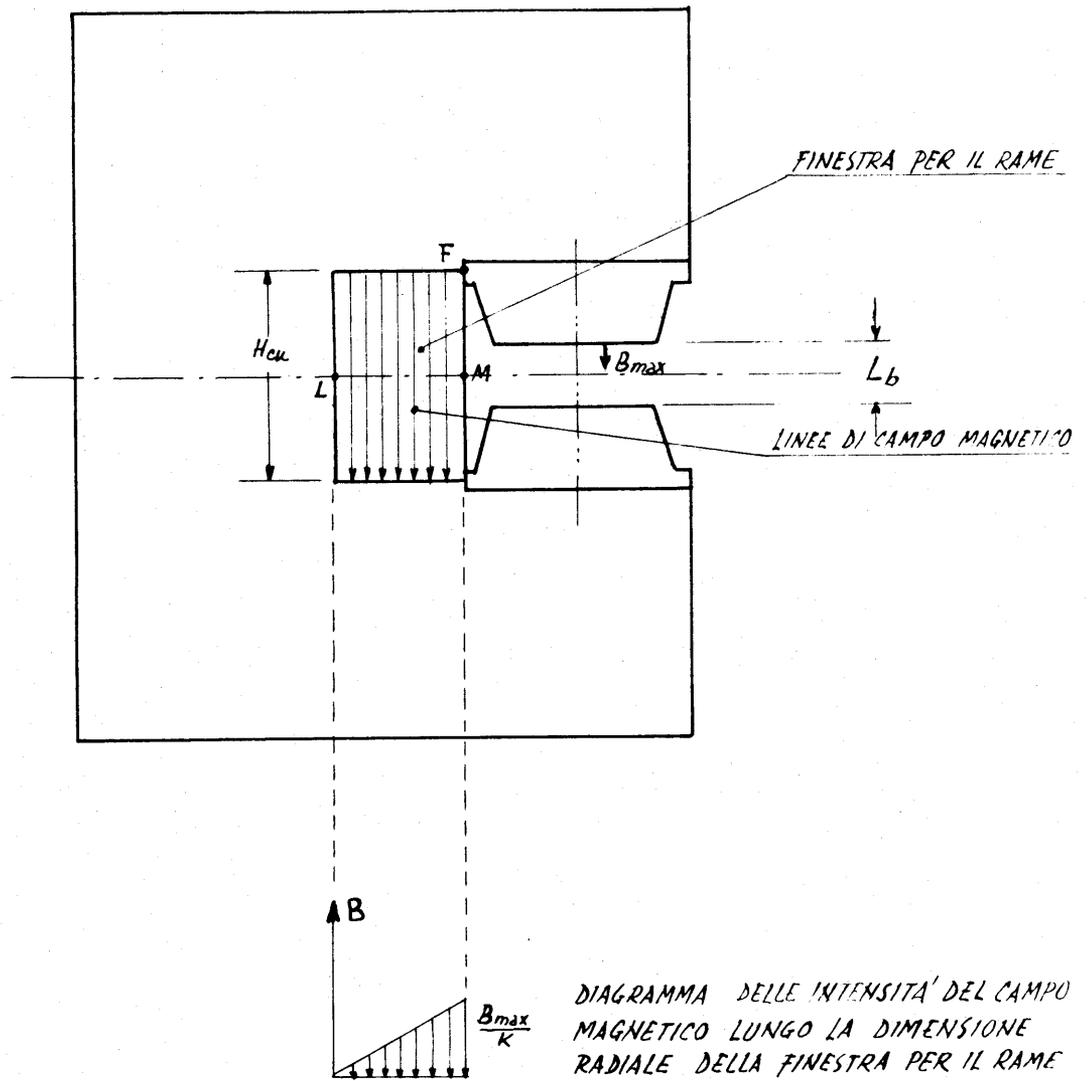


FIG. 7 - ANDAMENTO DEL CAMPO MAGNETICO NELLA FINESTRA PER IL RAME.

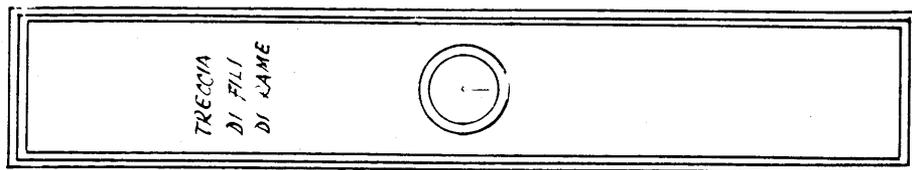
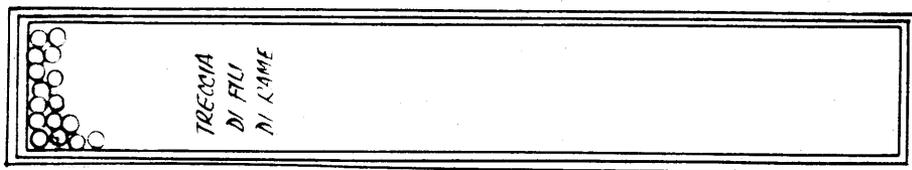
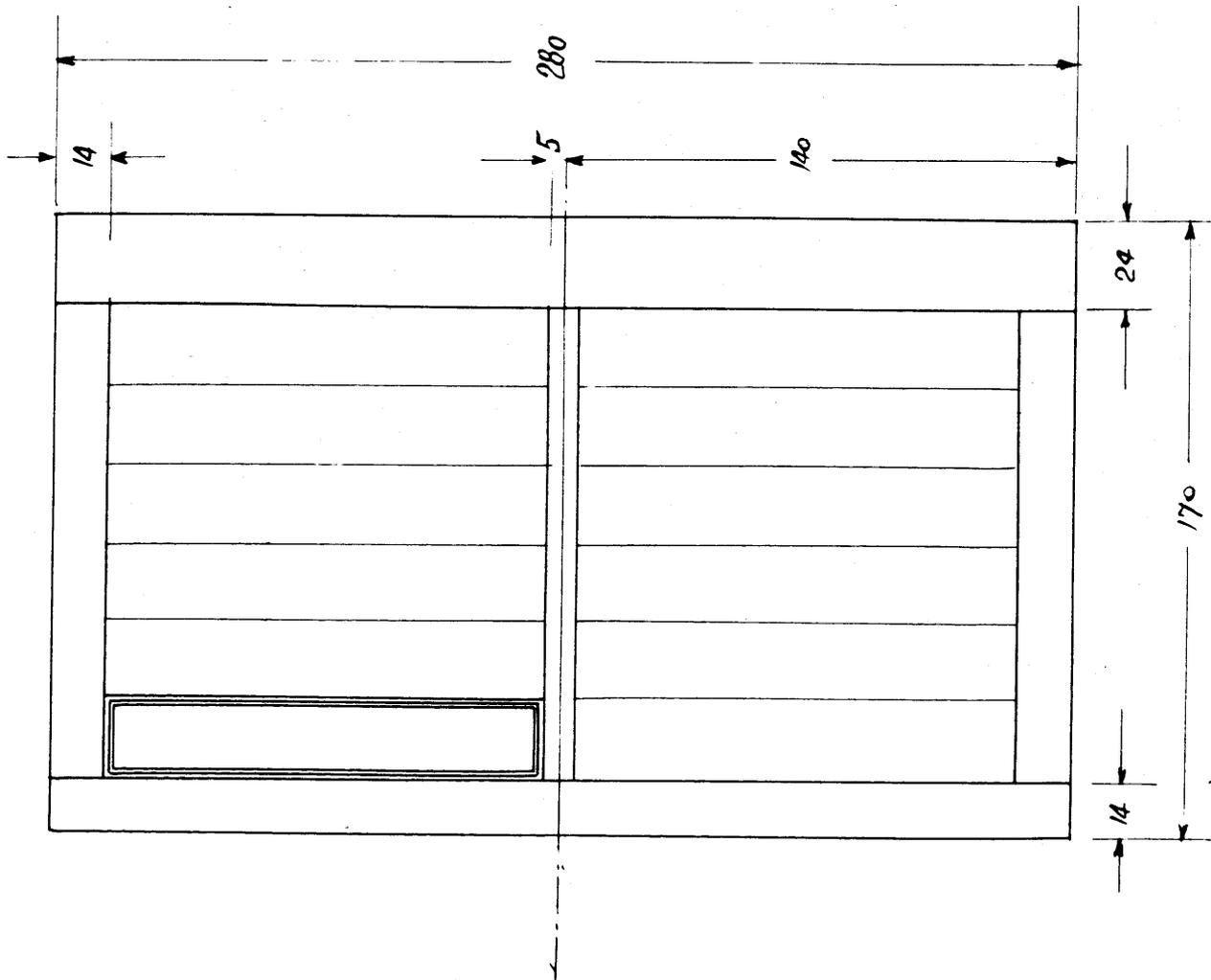


Fig. 8.a) - PARTICOLARE

Fig. 8.b) - PARTICOLARE

FIG. 8.a) - SEZIONE DELLA BOBINA INTERNA (SOLUZIONE I)

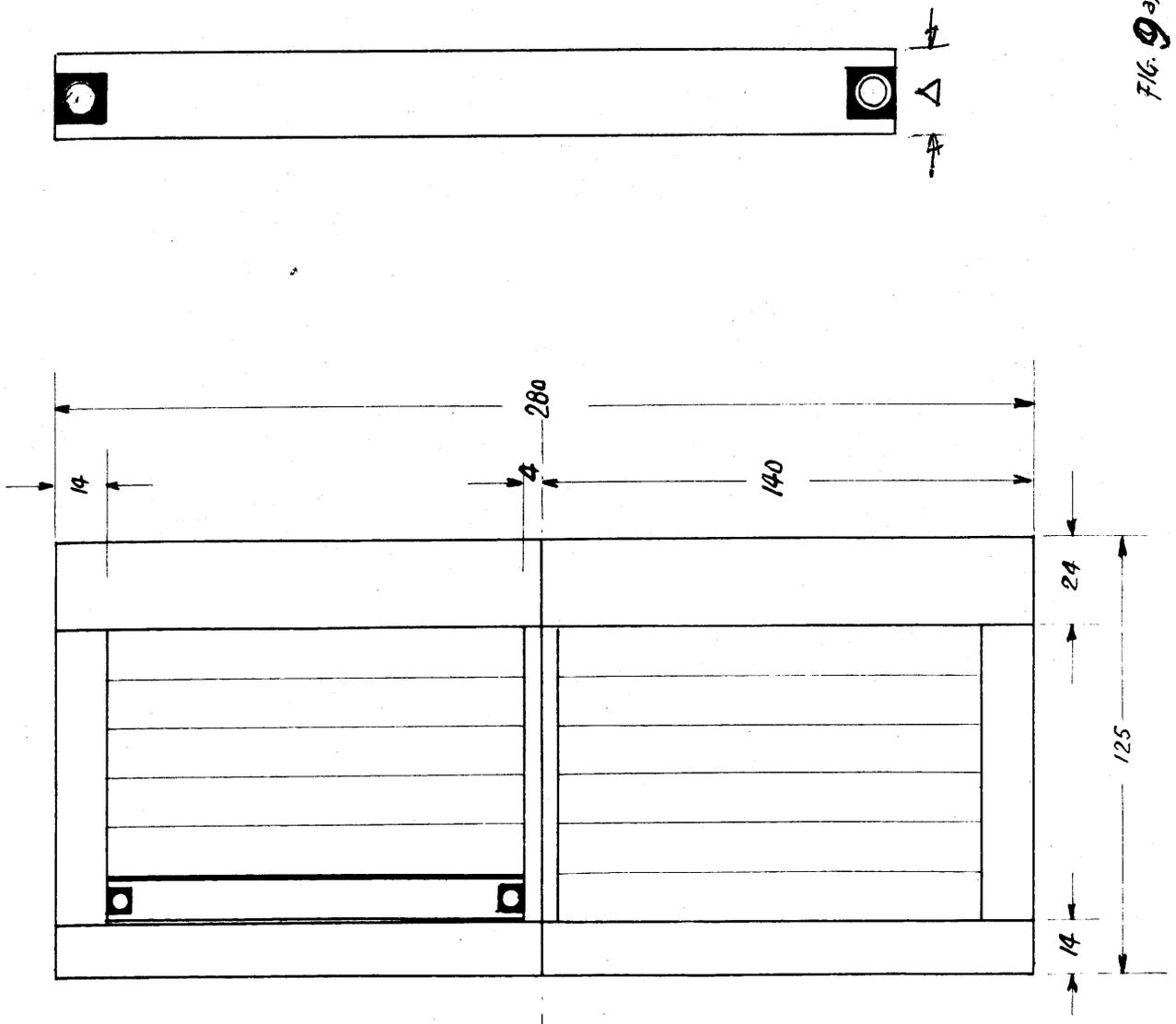
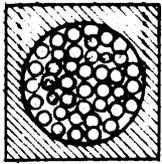
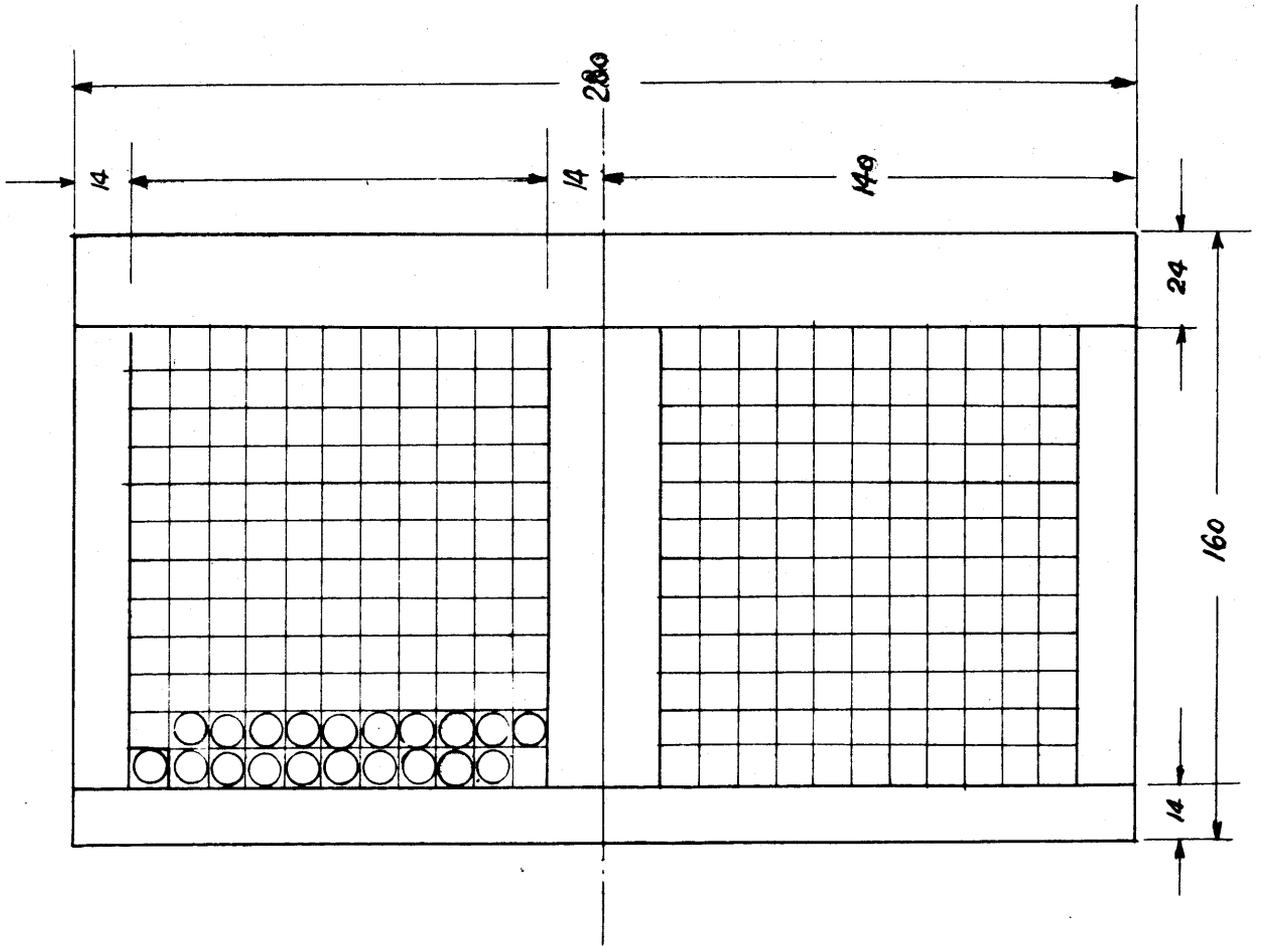


FIG. 9b) - PARTICOLARE (PIATTINA DI RAME) -

FIG. 9a) - SEZIONE DELLA BOBINA INTERNA (SOLUZIONE 3)



106) - PARTICOLARE : TRECCIA DI FILI DI
RAME RIVESTITA IN NYLON. -



108) - SEZIONE DELLA BOBINA INTERNA (SOLUZIONE 2)

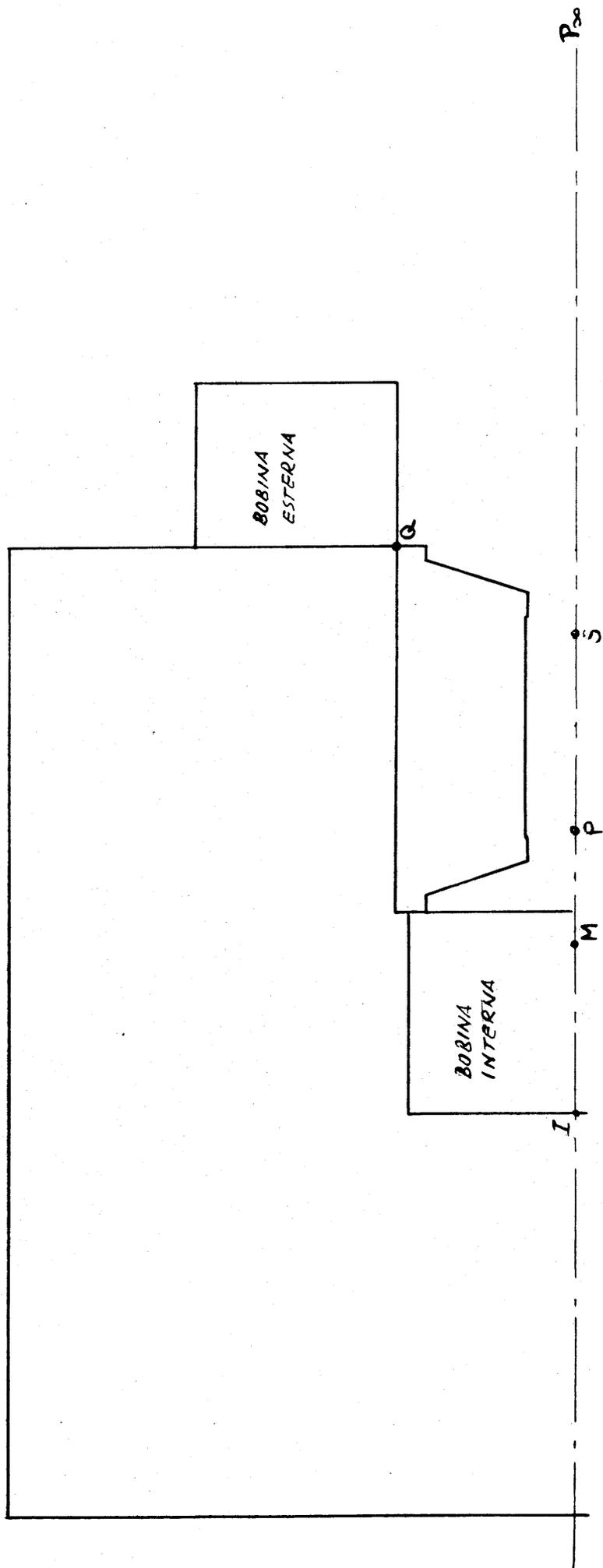


FIGURA II

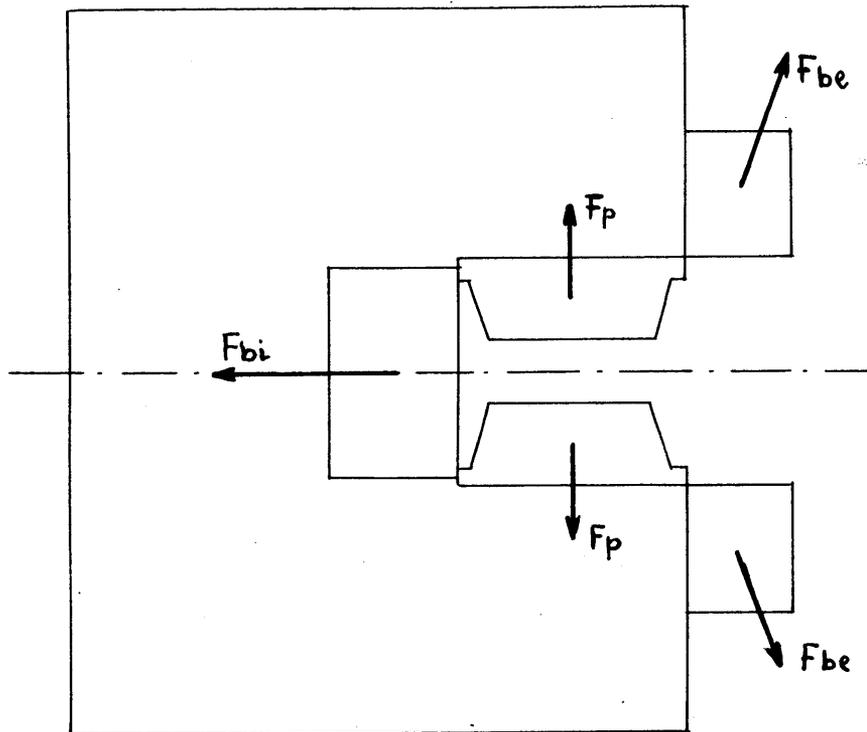


FIGURA 12 - ANDAMENTO QUALITATIVO DELLE FORZE SULLE BOBINE E SUI POLI. -

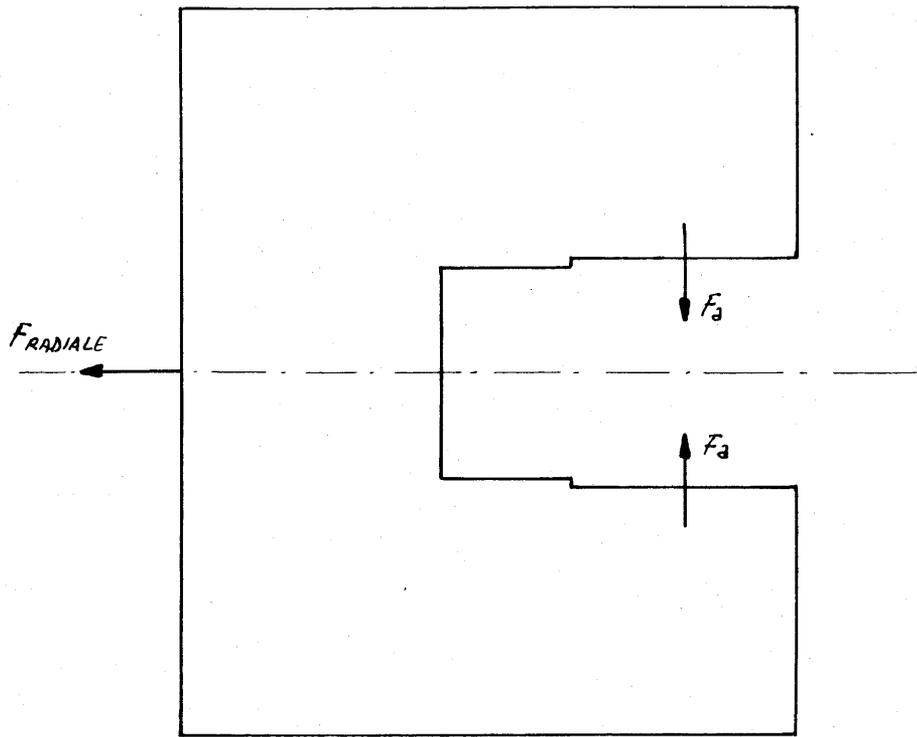
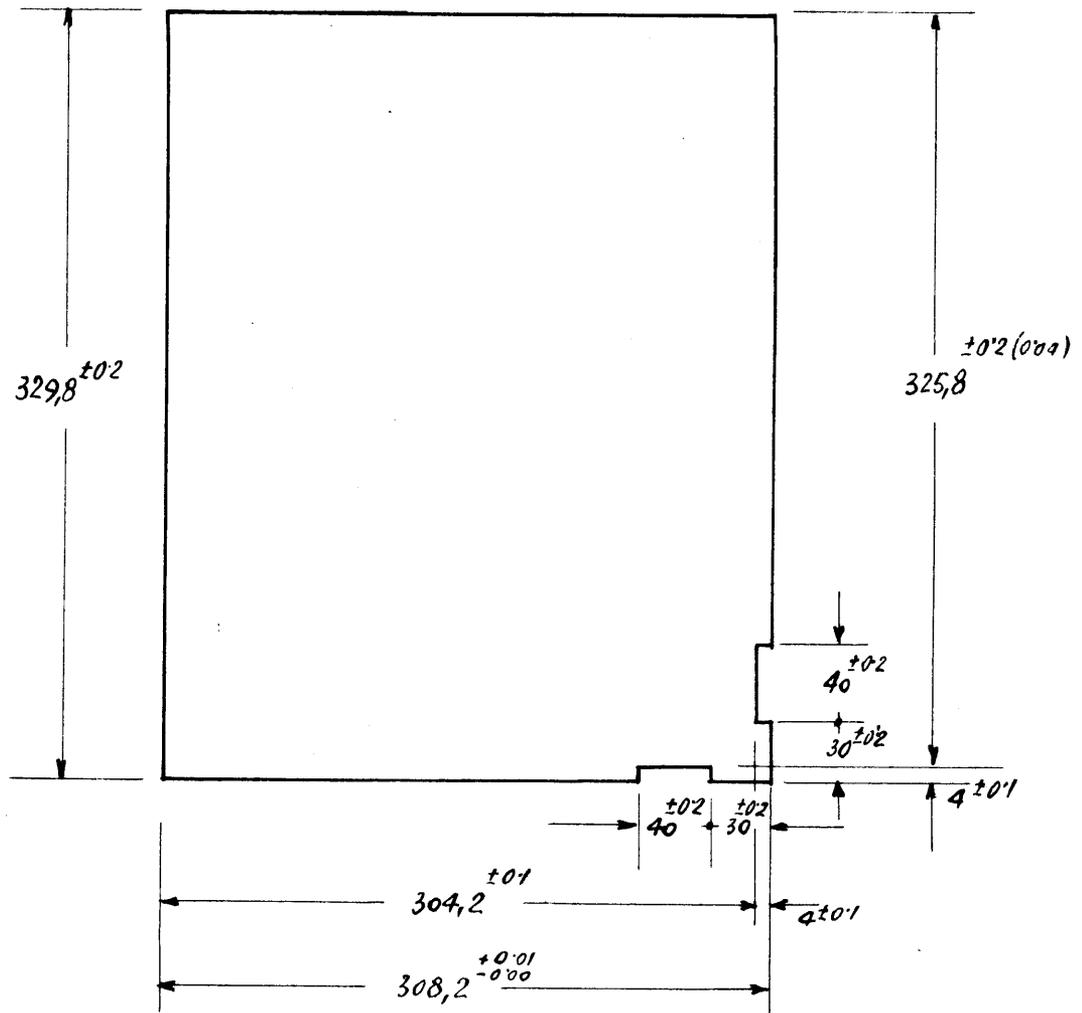


FIGURA # 12 bis)



NOTA: ACCANTO ALLE DIMENSIONI SONO INDICATE LE TOLLERANZE ASSOLUTE, CIOE' GLI SCARTI MASSIMI CONSENTITI RISPETTO LE DIMENSIONI NOMINALI. - TRA PARENTESI SONO LE TOLLERANZE RELATIVE, CIOE' I LIMITI ENTRO I QUALI DEVONO ESSERE COMPRESSE LE DIFFERENZE TRA LE DIMENSIONI CORRISPONDENTI DEI VARI LAMIERINI E DELLE ALI DEL C. - (VEDI DISEGNO MA 204-D).

FIG. 12 c) - LAMIERINO CHE VIENE INTERPOSTO TRA LE ALI DEL C

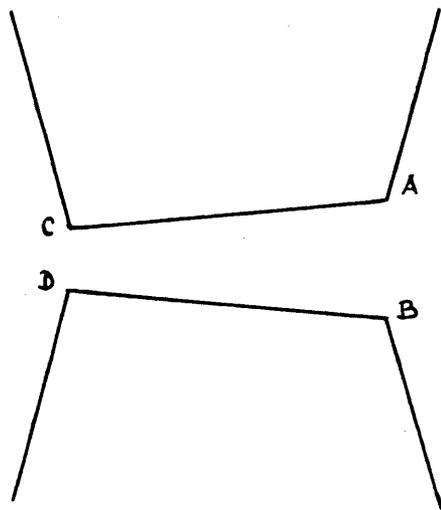


FIGURA 13

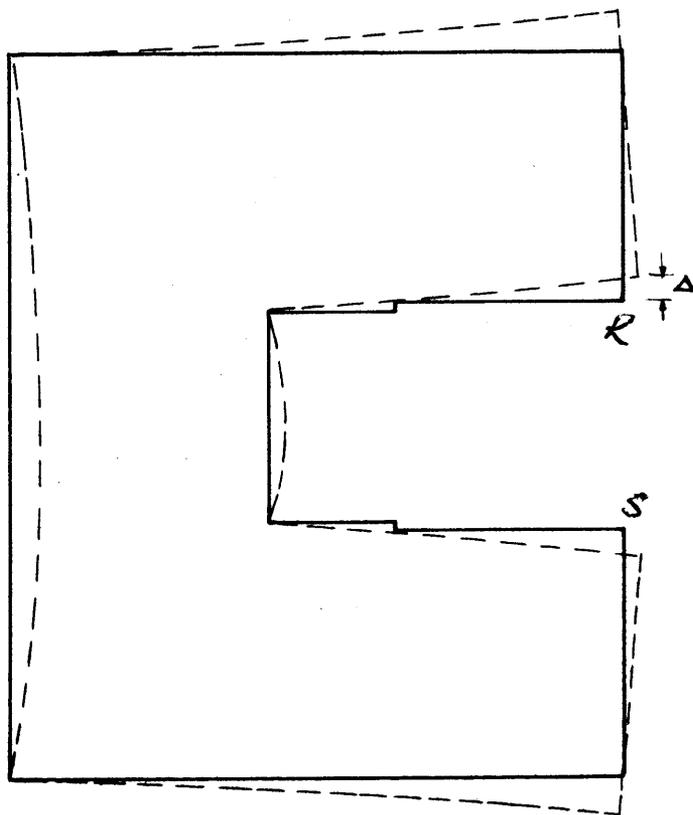


FIGURA 14

ANDAMENTO DELLA DEFORMAZIONE DEL LAMIERINO
PER LA DISUNIFORMITÀ DELLA TEMPERATURA DI REGIME

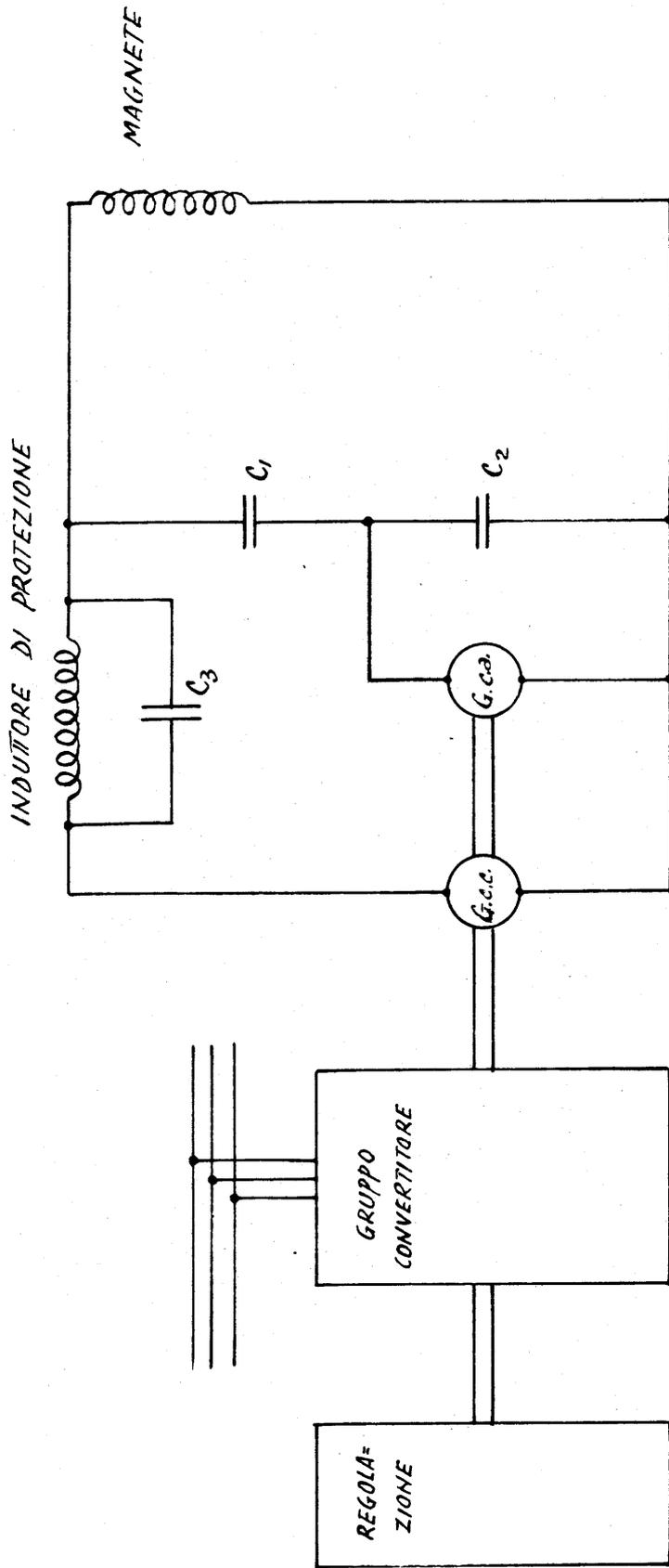
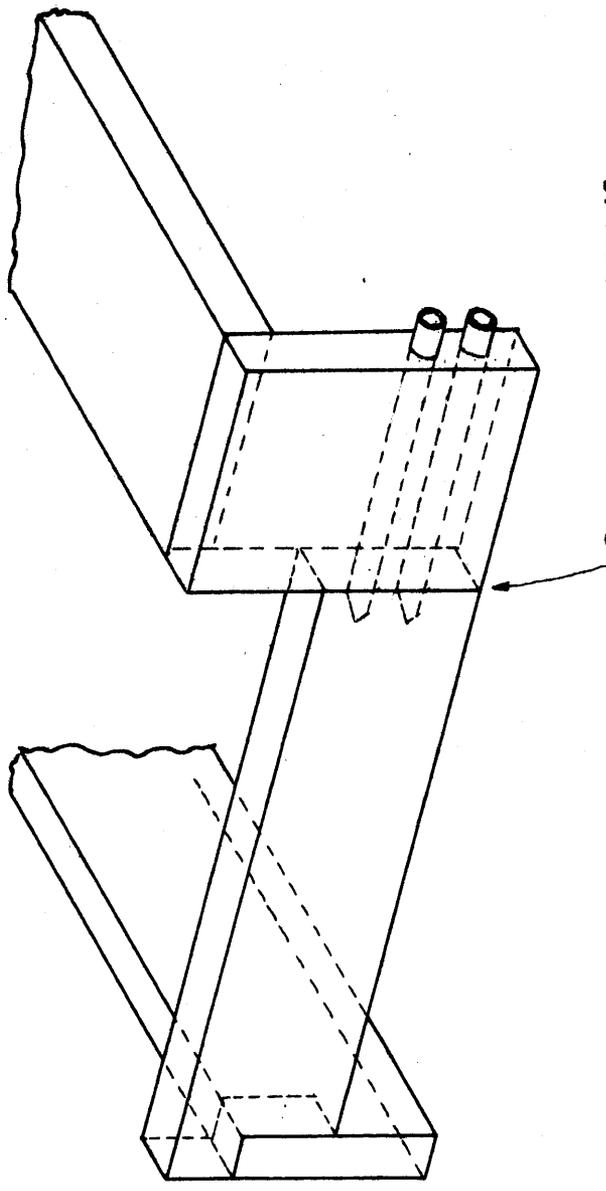
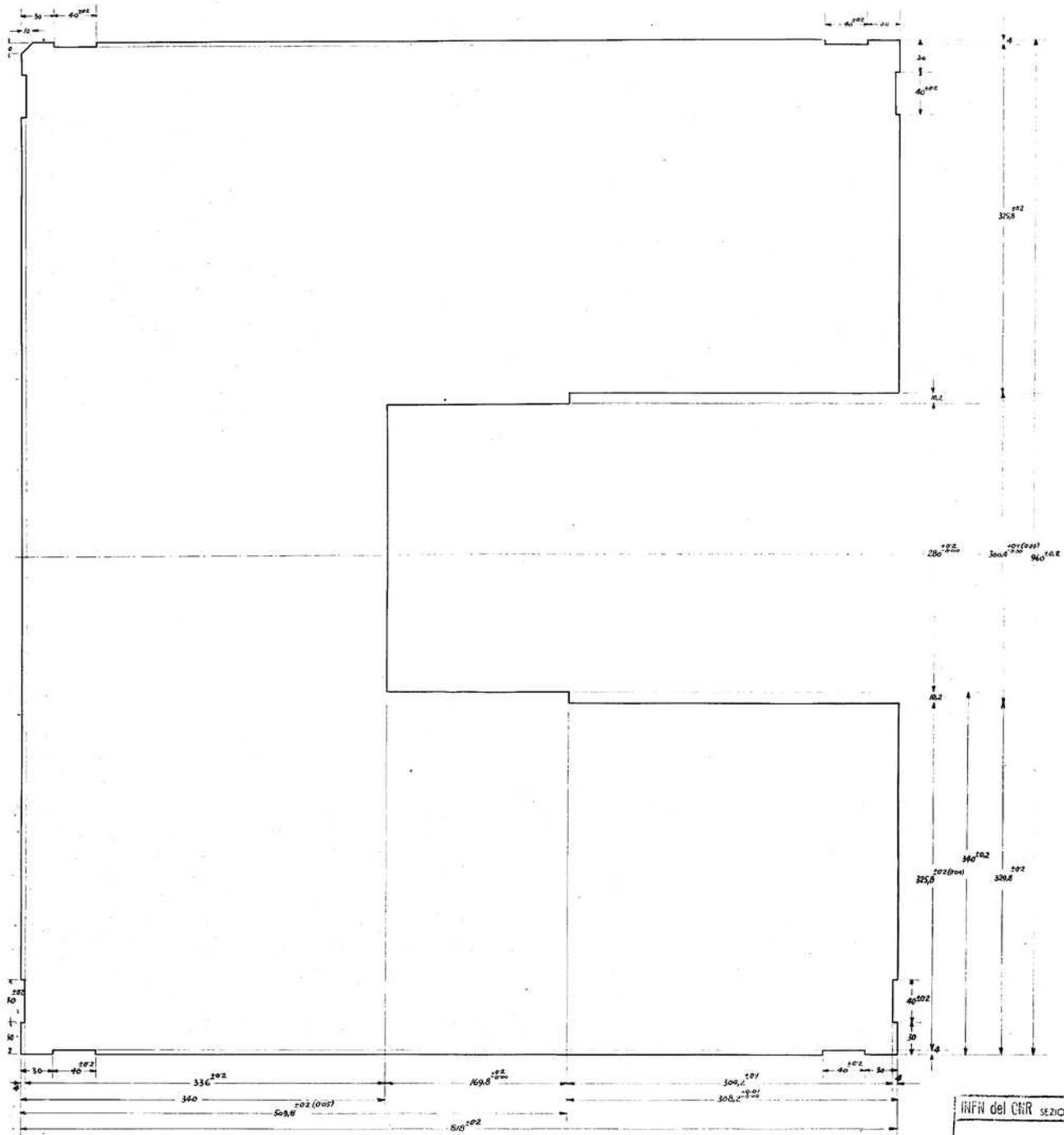


FIGURA 15



POLVERE D'ARGENTO TRA LE
SUPERFICI DI CONTATTO

INFN DEL CNR - SEZ. ACCELERATORE			
<i>SCHEMA COLLEGAMENTI BOBINE DELLE TESTATE - PROPOSTA</i>			
PROG. SARACENOTTI	DATA 2.7.1954.	SCALA —	
DIS. STRIPACIAN	N° MA 168-C	RIF.	



NOTA: ALUNTO ALLE DIMENSIONI SONO INDICATE LE TOLLERANZE ASSOLUTE, CHE' GLI SCARTI MASSIMI CONSENTITI RISPETTO LE DIMENSIONI NOMINALI. TRA PARENTESI SONO LE TOLLERANZE RELATIVE, CHE' I LIMITI ENTRO I QUALI DEVONO ESSERE COMPRESI LE DIFFERENZE TRA LE DIMENSIONI CORRISPONDENTI DEI VARI LAMIERINI. -

IRFM del CNR SEZIONE ACCELERATORI		1/2
LAMERINO "MVB" - SCHERM TOLLERANZE		MA 204-D
PROJ. SL	TITOLI. SACERDOTTI	DATA 6/12/1954.