

COMITATO NAZIONALE PER L'ENERGIA NUCLEARE
Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-71/24
24 Maggio 1971

R. Bruzzese, A. Catitti, G. Sacerdoti e L. L. Soglia: CRITERI
DI PROGETTO DI UNA SOSPENSIONE MAGNETICA PER ULTRA
CENTRIFUGA.

R. Bruzzese^(x), A. Catitti, G. Sacerdoti, L. L. Soglia: CRITERI DI PROGETTO DI UNA SOSPENSIONE MAGNETICA PER ULTRACENTRIFUGA. -

1. - INTRODUZIONE. -

Le caratteristiche di funzionamento della parte rotante di una ultracentrifuga per la separazione di isotopi devono essere comprese entro i seguenti limiti:

- a) velocità periferica di rotazione compresa tra 300 e 600 m. s. ;
- b) peso compreso tra 2 e 8 Kg;
- c) forma cilindrica con diametro tra 8 e 16 cm;
- d) altezza compresa tra 80 e 160 cm;
- e) accesso per il gas di diametro compreso tra 1 e 2 cm;
- f) potenza di esercizio inferiore a 2 KW;
- g) temperatura dovuta al riscaldamento contenuta entro 80°C.

Per valutare il riscaldamento delle varie parti dell'ultracentrifuga, bisogna tener conto che la girante funziona sotto vuoto, e per assicurare un periodo di funzionamento a regime più lungo possibile si deve ricorrere a sospensioni senza attriti meccanici. Per realizzare le condizioni suddette si è dovuto ricorrere a sospensioni magnetiche mediante l'utilizzazione di elettromagneti o magneti permanenti.

Il complesso rotante è soggetto alle seguenti forze:

- peso proprio;
- forze fra statore e rotore del motore elettrico di trascinamento;
- forze del dispositivo di sospensione;
- eventuali forze centrifughe che nascono da dissimetrie meccaniche provocate da difetti di costruzione o da deformazioni dinamiche.

(x) - Per la soluzione superconduttrice.

2.

Il dispositivo di sospensione deve rispondere ai seguenti requisiti:

- 1) - Equilibrare le forze che agiscono sulla girante e in particolare il peso e le forze che si hanno sul rotore del motore di trascinamento.
- 2) - Rendere stabile l'equilibrio assiale della parte sospesa ed ottenere un efficace centraggio radiale.
- 3) - Smorzare le eventuali vibrazioni sulla girante.
- 4) - Non causare riscaldamenti che possano portare la temperatura oltre i limiti consentiti.

La prima condizione può essere soddisfatta ricorrendo a magneti permanenti (v. Fig. 1) o ad elettromagneti alimentati in corrente continua (v. Fig. 2) con l'asse di simmetria coincidente con l'asse di rotazione della girante. Il campo magnetico prodotto dai magneti o dagli elettromagneti si chiude su un'ancora in ferro o acciaio magnetico solidale con il corpo rotante.

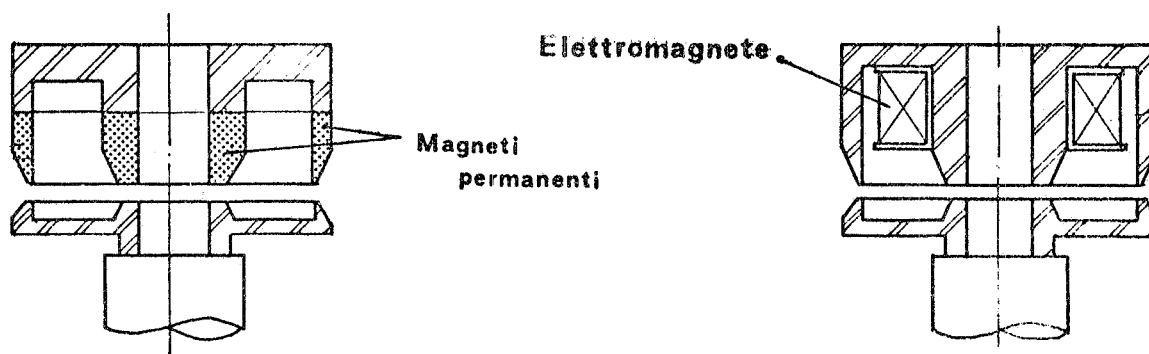


FIG. 1

FIG. 2

Con questo sistema, oltre che equilibrare il peso proprio e le forze suddette, si può ottenere anche un efficace centraggio radiale rastremando fortemente le superfici affacciate del magnete permanente, o del nucleo dell'elettromagnete, e dell'ancora sottostante. La rastrematura delle superfici affacciate fa sì che ad ogni spostamento radiale dell'ancora sospesa, si producano delle forze di richiamo che tendono a mantenerla centrata rispetto al magnete fisso.

Usando i magneti permanenti come generatori di flusso opportunamente sistemati come in Fig. 1, si ottiene un centraggio radiale migliore che usando elettromagneti.

Per ottenere l'equilibrio assiale si può ricorrere ad una delle seguenti soluzioni:

- a) Elettromagnete in alternata alimentato a frequenze acustiche od industriali in cui la corrente varia in modulo al variare della po

sizione del corpo rotante.

Questa variazione può essere ottenuta con sistemi di controreazione in modo che la forza di attrazione diminuisca al diminuire della distanza tra la girante e l'elettromagnete e viceversa. Un sistema di controreazione studiato in letteratura consiste nell'alimentare la bobina dell'elettromagnete attraverso un condensatore con un generatore di tensione (v. Fig. 3).

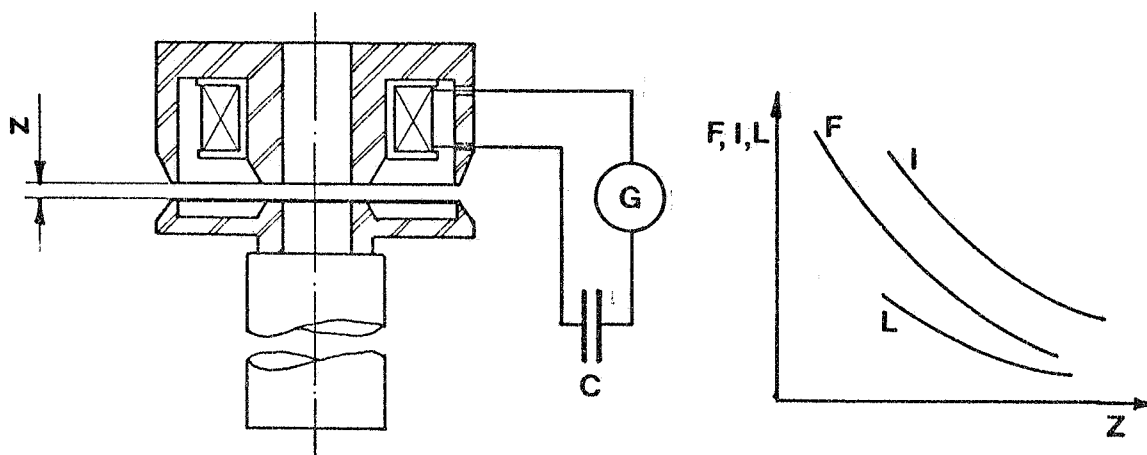


FIG. 3

Con opportuno dimensionamento dei componenti del sistema, si può rendere stabile la sospensione anche nel caso in cui la parte sospesa non ruoti. In Fig. 3 è riportato lo schema di questa sospensione, nonché l'andamento qualitativo dell'induttanza, della corrente assorbita e delle forze attrattive al variare della posizione assiale del complesso sospeso.

b) Bobine in corrente alternata che generano sulle superfici affacciate di un disco costruito in materiale conduttore, per es. rame, alluminio ecc., delle correnti parassite (v. Fig. 4). Tra le correnti della bobina e le correnti indotte, si creano forze elettrodinamiche, che se lo spessore del disco metallico è superiore alla penetrazione pelle, (skin depth) sono forze repulsive. Naturalmente, queste forze variano con il variare della distanza tra le superfici del disco e le bobine, diminuendo all'aumentare della distanza.

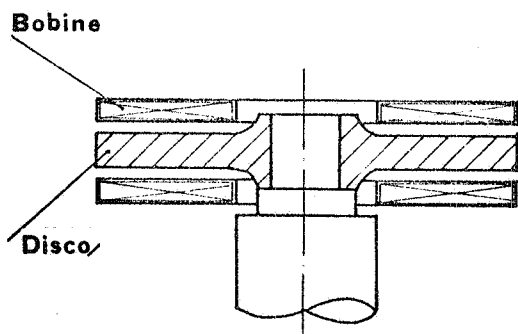


FIG. 4

Il materiale conduttore del disco impedisce che il campo magnetico penetri come se fosse un materiale diamagnetico.

4.

L'inconveniente di questo sistema è che per ottenere forze sufficienti a stabilizzare la sospensione è necessario ricorrere a forti correnti di eccitazione; ciò comporta, notevoli dissipazioni sia nelle bobine, che nelle superfici affacciate del disco, dando luogo anche ad assorbimento di potenze reattive.

c) Utilizzando un sistema composto da magneti permanenti e due o più bobine eccitate in c. a. che sfrutta i vantaggi dei punti a) e b). Con il magnete permanente si ottiene il centraggio radiale e nello stesso tempo si equilibra il peso del complesso rotante, mentre le bobine alimentate in c. a. hanno il solo scopo di rendere stabile la posizione di equilibrio assiale intorno ad un punto (v. Fig. 5).

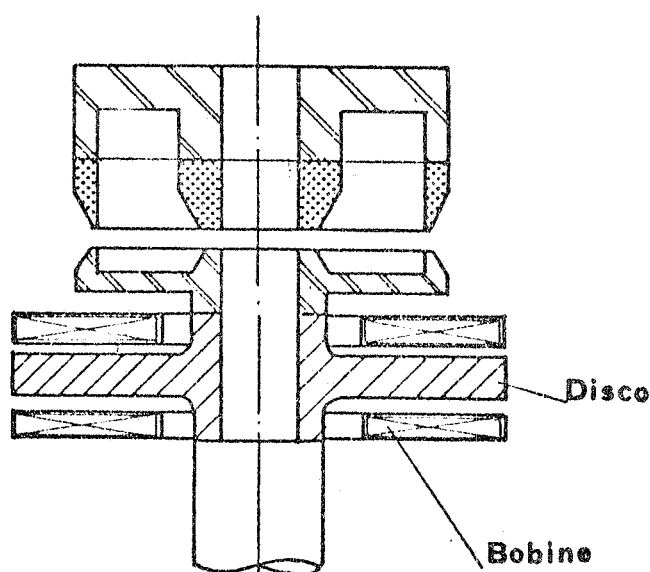


FIG. 5

Con il suddetto sistema si può pensare di ridurre sia la potenza dissipata in c. a. sia la potenza reattiva assorbita, diminuendo la corrente di eccitazione delle bobine stabilizzanti. Queste bobine, opportunamente predisposte come in Fig. 6 alimentate con un circuito trifase, possono, se il disco ad alta conducibilità elettrica è di spessore opportuno, costituire lo statore di un motore asincrono trifase, di cui il disco costituisce il rotore. Teoricamente si può affidare al motore asincrono di trascinamento il compito di stabilizzare l'equilibrio as-

siale; in tal modo l'azione di centraggio è affidata alle armoniche azimutali del campo magnetico di ordine superiore che non si muovono sincrono con il disco.

d) Fermo restando per il sostentamento e il centraggio radiale il sistema adottato nel punto c) sostituire le bobine alimentate in c. a. con due corone di magneti permanenti disposti su una circonferenza, con polarità alterne (v. Fig. 7) in modo da formare una serie di circuiti magnetici concatenati, affacciati al disco metallico rotante. A causa del movimento relativo tra i circuiti magnetici concatenati ed il disco metallico, si indurranno delle correnti parassite circolanti nel disco che tendono a penetrare nel suo interno tanto più profondamente quanto più bassa sarà la velocità di rotazione, essendo la profondità di penetrazione h legata a:

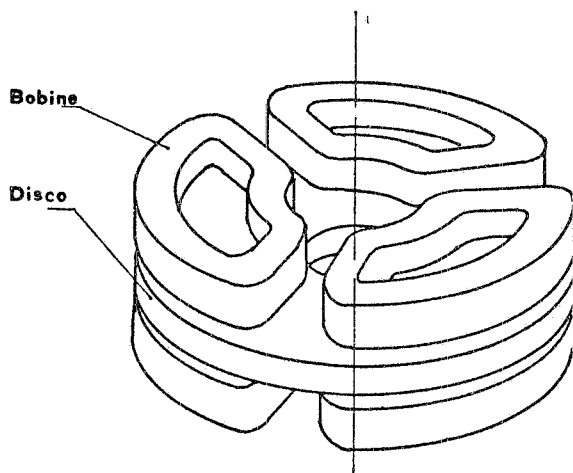


FIG. 6

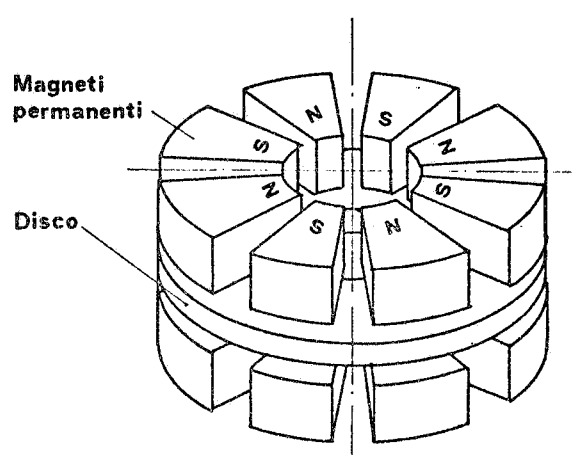


FIG. 7

$$(1) \quad h = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}$$

dove ρ = resistività del metallo costituente il disco

μ_r = permeabilità relativa

f = frequenza corrente in KHz.

Quando la velocità di rotazione raggiungerà il valore per il quale le correnti parassite hanno una profondità di penetrazione h inferiore allo spessore H del disco (v. Fig. 8) si creeranno delle forze repulsive che

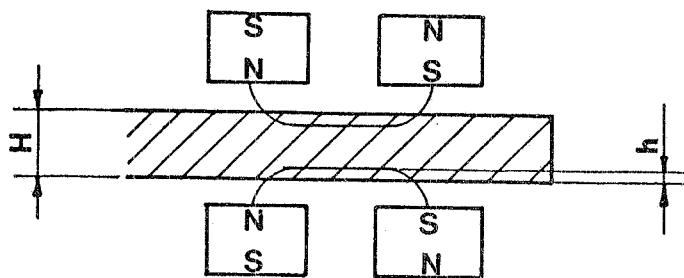


FIG. 8

tenderanno a respingere il disco dalla corona di magneti permanenti, forze che aumenteranno al diminuire della loro distanza. In tal modo il disco finisce per galleggiare tra i campi magnetici prodotti dalle due corone di magneti.

Disponendo i magneti permanenti come in Fig. 9

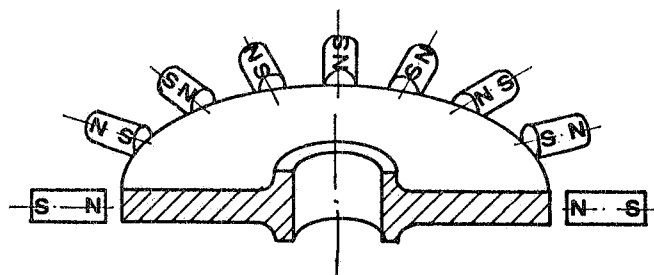


FIG. 9

6.

si realizza una stabilizzazione radiale, peraltro ottenibile più economicamente con un solo magnete permanente (v. Fig. 1) a simmetria cilindrica che agisce su un'ancora di acciaio magnetica.

Adottando la soluzione con corone di magneti permanenti e disco metallico, si può avere l'inconveniente di eccessivi riscaldamenti sulle superfici metalliche del disco.

Per valutare l'ordine di grandezza delle dissipazioni P_W sul disco possiamo procedere ad un calcolo di massima:

$$(2) \quad \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} S \simeq P$$

$$(3) \quad \frac{B_{\text{eff}}}{\mu_0} 2\pi R \simeq I_{\text{eff.}}$$

$$(4) \quad P = \Delta R 2\pi R \frac{1}{2} \mu_0 B^2 = \frac{I^2}{2\pi R} \mu_0^2 \frac{1}{2} \Delta R$$

$$(5) \quad P_W = I^2 R_e = \frac{2I^2 \varrho \Delta R}{2\pi R h} = \frac{2I^2 \varrho \Delta R}{2\pi R \sqrt{\frac{\varrho}{2\omega \mu_0}}}$$

ove:

- B = induzione nell'intraferro
- p = peso da sostenere (Newton)
- ϱ = resistività del metallo costituente il disco
- ω_d = pulsazione della girante
- ω = pulsazione della corrente = $\omega_d n_p$
- $2n_d$ = numero dei poli disposti sulla corona circolare
- I_{eff} = corrente "efficace" radiale sulla corona circolare
- R = raggio medio della corona circolare
- R_e = resistenza elettrica della corrente
- ΔR = larghezza radiale della parte del disco percorsa da corrente
- S = $2\pi R R$ (superficie di sostentamento)
- h = profondità di penetrazione.

Dalle espressioni (1), (2), (3), (4) si ottiene:

$$(6) \quad P_W = 4p \sqrt{\frac{2\omega \varrho}{\mu_0}}$$

La (6) ci dice che per es. per sostenere 3 Kg con $\omega = 6280$ $\varrho = (1/55) 10^{-6}$ usando il materiale migliore (rame) dal punto di vista della conducibilità e la frequenza $\omega/2\pi$ minore possibile, si ha una potenza dissipata P_W pari a 1680 Watt.

Questa potenza è al limite dal punto di vista spese di esercizio, ma è inammissibile se si pensa che la dissipazione avviene su un disco che ruota sotto vuoto e che non può essere di conseguenza efficacemente raffreddato. Prima di esaminare come si può ovviare a questo inconveniente prendiamo in considerazione la variazione della forza assiale al variare del traferro, riferendoci al caso di una corona circolare di magneti affacciati ad un disco. Naturalmente questa variazione dipende essenzialmente dai seguenti fattori:

- 1) il materiale con cui si realizzano i magneti permanenti della corona;
- 2) la geometria, cioè la dimensione azimuthale del magnete permanente dm e il passo con cui sono distanziati $dpp/2$ (v. Fig. 10);
- 3) la profondità di penetrazione pelle del campo magnetico nel disco metallico.

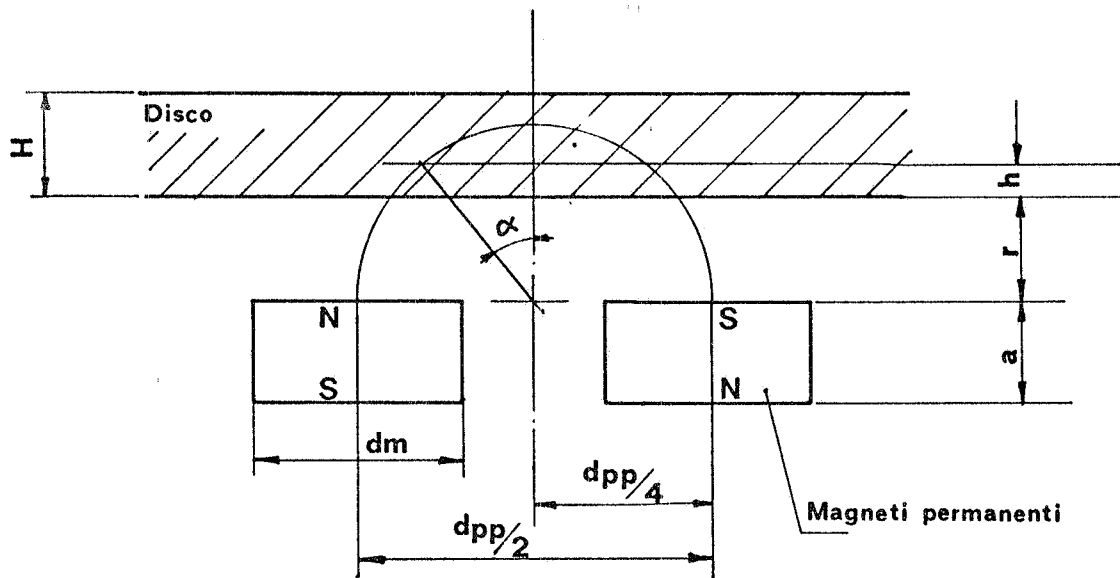


FIG. 10

In sede di progetto una esatta valutazione della forza assiale al variare del traferro è molto laboriosa, mentre è possibile, con calcoli di massima valutare l'influenza dei fattori 1) e 2). Finché la distanza fra il disco e la corona di magneti, sommata alla profondità di penetrazione h è superiore al semipasso azimuthale $dpp/4$ della corona di magneti permanenti non si hanno praticamente forze di sostentamento.

Non appena questa distanza diventa inferiore, si generano forze repulsive proporzionali a

$$(7) \quad F = \frac{B^2}{2 \mu_0} \Delta R 2 \pi R K$$

ove

$$K = \sin \alpha = \frac{4}{dpp} \sqrt{\left(\frac{dpp}{4}\right)^2 - (r+h)^2}$$

8.

r = distanza tra disco e superficie affacciata dei magneti.

Per una valutazione in prima approssimazione essendo B^2 funzione sia di r , che delle dimensioni e delle caratteristiche dei magneti permanenti, possiamo ricavare il valore di b dalle relazioni:

$$(8) \quad B_{Fe} = f(H_{Fe})$$

$$(9) \quad Ba = \frac{B_{Fe} S_{Fe}}{Sa}$$

$$(10) \quad \frac{B_{Fe}}{Ba} \frac{S_{Fe}}{Sa} \frac{la}{l_{Fe}} + H_{Fe} = 0$$

dove

Ba = componente dell'induzione parallela al disco di sostentamento

la = $(dpp/4) \sin \alpha$

l_{Fe} = altezza del magnete permanente

Sa = $(dpp/4) \cos \alpha \Delta R$ (sezione del tubo di flusso in aria)

S_{Fe} = sezione del magnete permanente = $(dm/2) \Delta R$

dm = dimensione azimutale del magnete permanente.

Utilizzando magneti permanenti disposti su una circonferenza media di 0,314 m ($\phi = 10$ cm) in numero di 8 e di altezza 1,7 e 3,4 cm si ottengono le curve di Fig. 11.

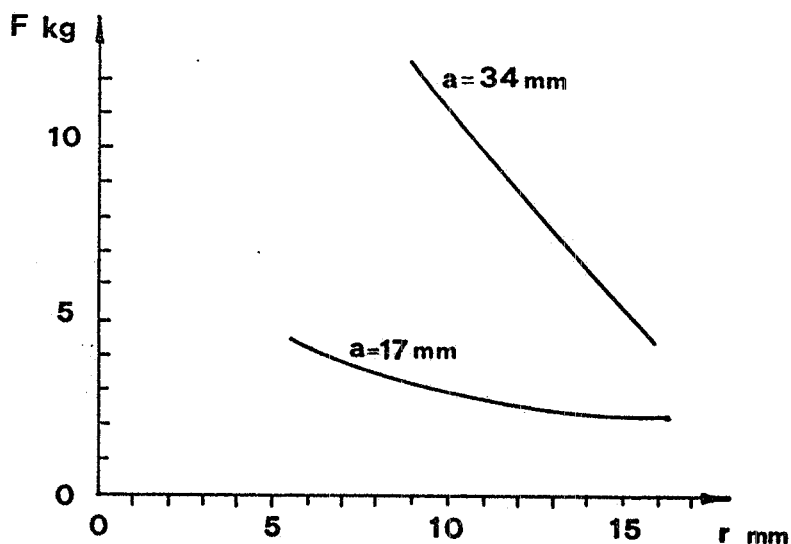


FIG. 11

Per diminuire il riscaldamento del disco si può ricorrere ai seguenti metodi:

1) Montare una corona di magneti permanenti al posto del disco conduttore calettata sull'asse della girante mentre al posto delle corone di magneti, verranno montati due dischi in materiale conduttore fissi, ottenendo così un montaggio complementare rispetto al precedente (Fig. 12);

2) Affidare una parte del sostentamento ad un magnete permanente a simmetria cilindrica;

3) Cercare di ottenere profondità di penetrazione più alte nel disco per diminuire la resistenza elettrica delle correnti;

4) Soluzione d completata da un servomeccanismo pneumatico che garantisca una forza costante di sostentamento sul cuscinetto "magneti permanenti-superfici ad alta conducibilità".

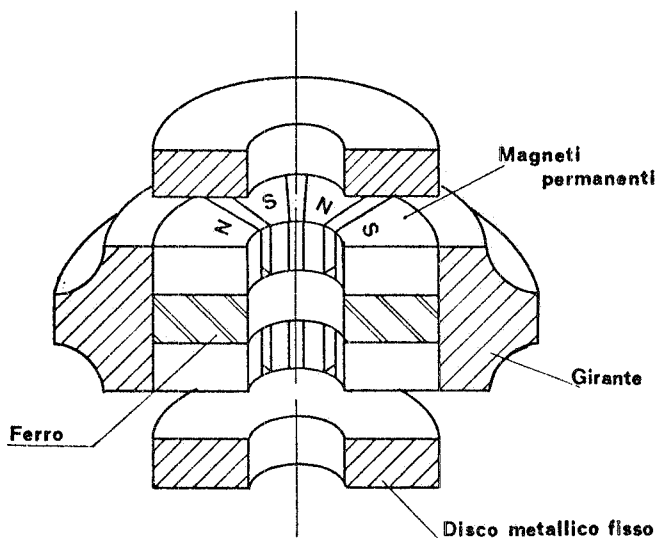


FIG. 12

Se adottiamo la soluzione al punto 1 del caso d) otteniamo i seguenti vantaggi:

1) Le perdite elettriche per effetto Joule si hanno su parti facilmente raffreddabili in quanto fisse.

2) La scelta del materiale dei dischi non è vincolata al problema di reperire materiali che resistono alle sollecitazioni meccaniche del complesso sospeso.

A questi vantaggi fa riscontro lo svantaggio di dover montare materiale magnetico, fragile, sulla girante.

Per contenere le sollecitazioni a cui andrebbero sottoposti i magneti permanenti per effetto della forza centrifuga, bisognerà limitare la loro presenza entro un raggio relativamente piccolo. Valgono anche in questo caso le considerazioni fatte nel caso d) sulle forze, sulle dissipazioni e sui gradienti.

Usando il cuscinetto reggispinta magnetico descritto nel caso d) come elemento sensibile alla posizione x della girante. L'informazione ricevuta può essere usata per "comandare" la posizione y del magnete permanente di centraggio radiale e di sostentamento principale.

10.

2. - CALCOLI DELLE FORZE DI SOSTENTAMENTO DI UNA CORONA DI MAGNETI PERMANENTI CON POLARITA' ALTERNATE. -

I calcoli svolti nel seguente paragrafo riguardano una soluzione del tipo d) del paragrafo precedente indicato in Fig. 7. Sono stati eseguiti calcoli approssimati della forza di sostentamento e della dissipazione nel disco conduttore dovuti alle due corone di magneti per un disco di rame ruotante ad una velocità angolare $\omega = 6280$ al variare della distanza tra il disco e la superficie affacciata dei magneti.

Le formule usate sono quelle indicate nel primo paragrafo.

Le geometrie scelte sono le seguenti:

numero magneti = 6
raggio interno corona = 20 mm
raggio esterno corona = 70 mm
altezza magneti = 34 mm
dimensione azimutale magneti permanenti = 34,66 mm
materiale magnetico usato = Sinterox III
il gradiente massimo è di 100 g per decimo
la potenza dissipata sul disco di rame è di 30.000 W.

Le forze varieranno da 17,64 Kg con traferro 1 mm a 14,58 Kg con traferro 4 mm, i risultati sono riportati in Fig. 13, curva 1.

Numero magneti = 8
raggio interno corona = 5 mm
raggio esterno corona = 40 mm
altezza magneti = 17 mm
dimensione azimutale magneti = 12 mm
materiale usato = Sinterox III
il gradiente massimo è di 180 g per decimo
la potenza dissipata sul disco di rame è di 6500 W alla forza massima.

Le forze varieranno da 7,97 Kg con 1 mm traferro a 1,4 Kg con 6 mm di traferro, i risultati sono riportati in Fig. 13, curva 2.

Numero magneti = 16
raggio interno corona = 20 mm
raggio esterno corona = 70 mm
altezza magneti = 17 mm
dimensione azimutale magneti = 13,5 mm
materiale usato = Sinterox III
il gradiente massimo è di 600 g per decimo
la potenza dissipata sul disco di rame è di 40.000 W.

Le forze varieranno da 20,8 Kg con traferro 1 mm a 3 Kg con traferro 7 mm, i risultati sono riportati in Fig. 13, curva 3.

Il peso della parte rotante escluso il rotore è intorno ai due Kg e il costo del sistema di sospensione in una produzione di serie è contenu

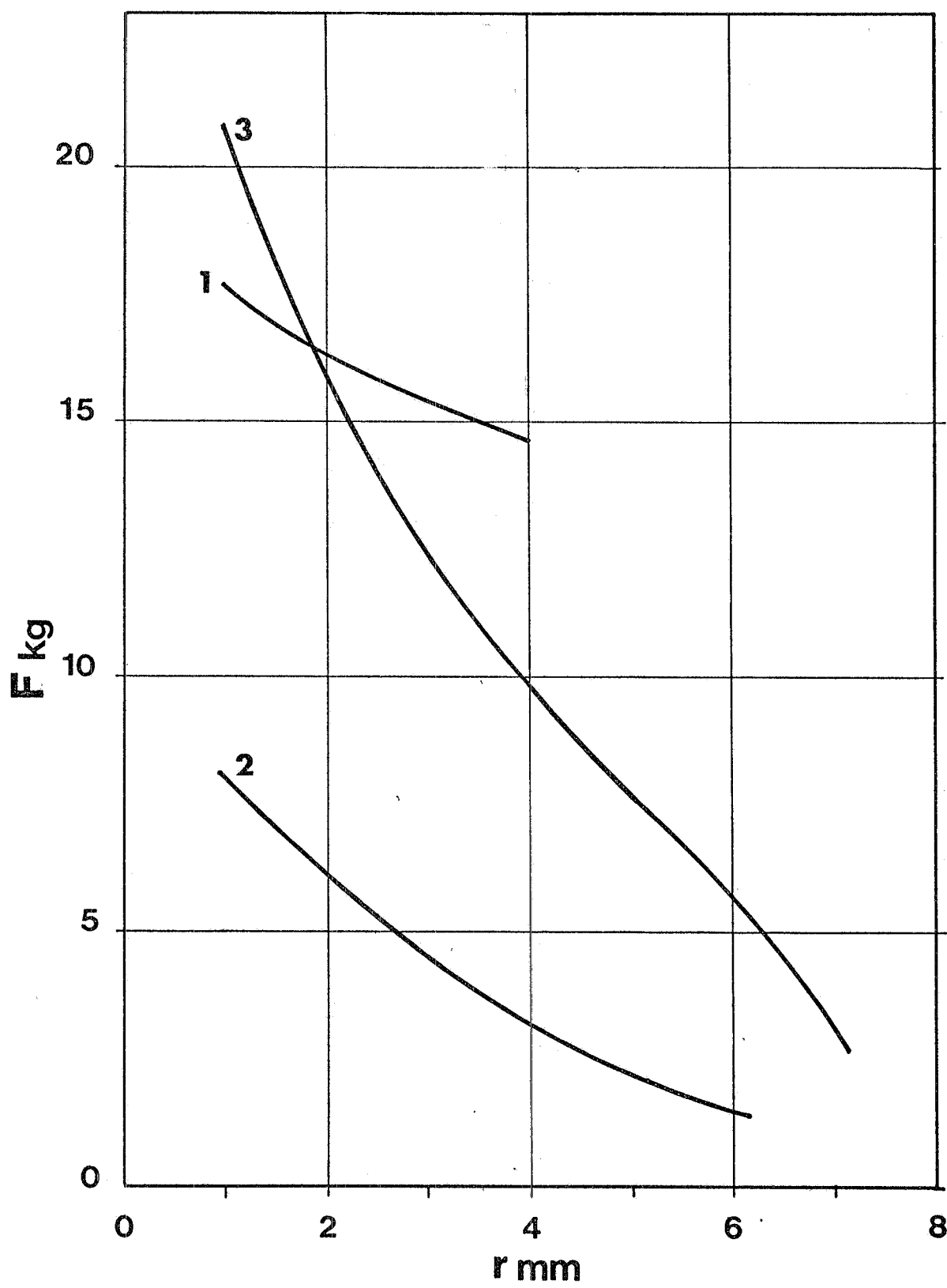


FIG. 13

12.

to entro qualche decina di migliaia di lire.

3. - CONSIDERAZIONI SUI MOTORI. -

I motori devono avere la potenza necessaria per garantire il moto della girante compresa l'eventuale potenza spesa per il sostentamento della stessa. La potenza dei motori a regime sarà compresa tra 200 e 2000 W.

Si dovranno però soddisfare i seguenti requisiti:

a) La dissipazione elettrica sulle parti rotanti del motore dovrà essere praticamente ridotta a zero. Però bisogna tener conto che durante la fase di avviamento la girante non dovrà essere necessariamente tenuta sotto vuoto quindi potranno essere tollerate perdite più elevate sul rotore.

b) La potenza del motore dovrà essere sufficiente a portare a regime la girante in 20 min. La potenza necessaria al motore, per poter realizzare ciò sarà proporzionale al peso della girante

$$W = \frac{1}{20} \frac{P}{60} \frac{1}{2} r^2 \omega^2 \approx 40 P \quad (P \text{ in Kg})$$

ove $r = 5 \cdot 10^{-2}$
 $\omega = 6280$

Se ammettiamo un rendimento all'avviamento di 0,4 otterremo

$$W_{\text{watt}} = 100 P$$

- c) Le forze assiali nella girante devono essere ridotte al minimo.
- d) L'energia reattiva deve essere piccola.

Tenendo conto dei requisiti indicati è stato previsto un motore piano bipolare trifase con lo statore in due pezzi e il rotore costituito da un disco di duralluminio di 8 cm di diametro (Fig. 14). Nel disco sono annegati due magnetini permanenti per cui il motore funzionerà come asincrono all'avviamento e successivamente il funzionamento diventerà sincrono quando il campo usato potrà penetrare nel disco.

4. - PROVE SPERIMENTALI. -

Si è cercato di provare sperimentalmente, per quanto consentito dalla scarsa attrezzatura a disposizione, quanto esposto nei paragrafi precedenti.

Le prove, effettuate a livello qualitativo, sono state di tre tipi:

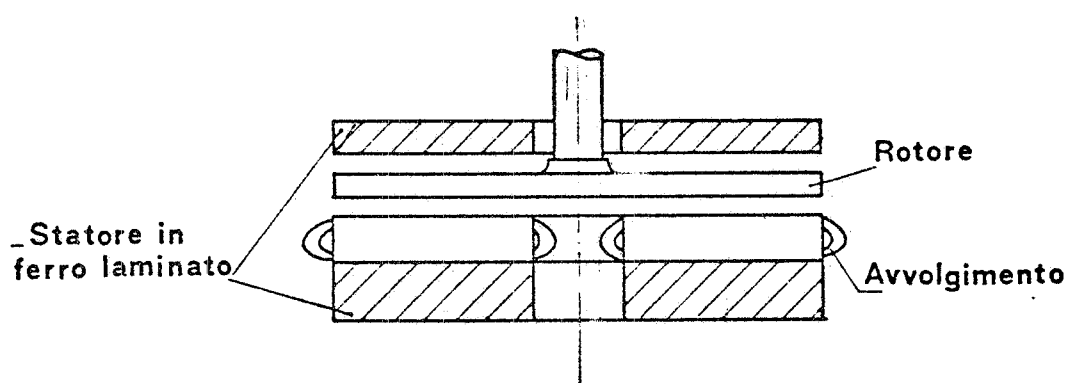


FIG. 14

1) Si è determinata la variazione della forza di sostentamento dei magneti permanenti usati in funzione del traferro. Queste prove sono state effettuate variando la forma, l'altezza e la disposizione dei magneti permanenti, come elencato nella Tabella I. I risultati delle prove sono riportate nel grafico di Fig. 15 mentre l'apparato sperimentale è visibile in Fig. 16.

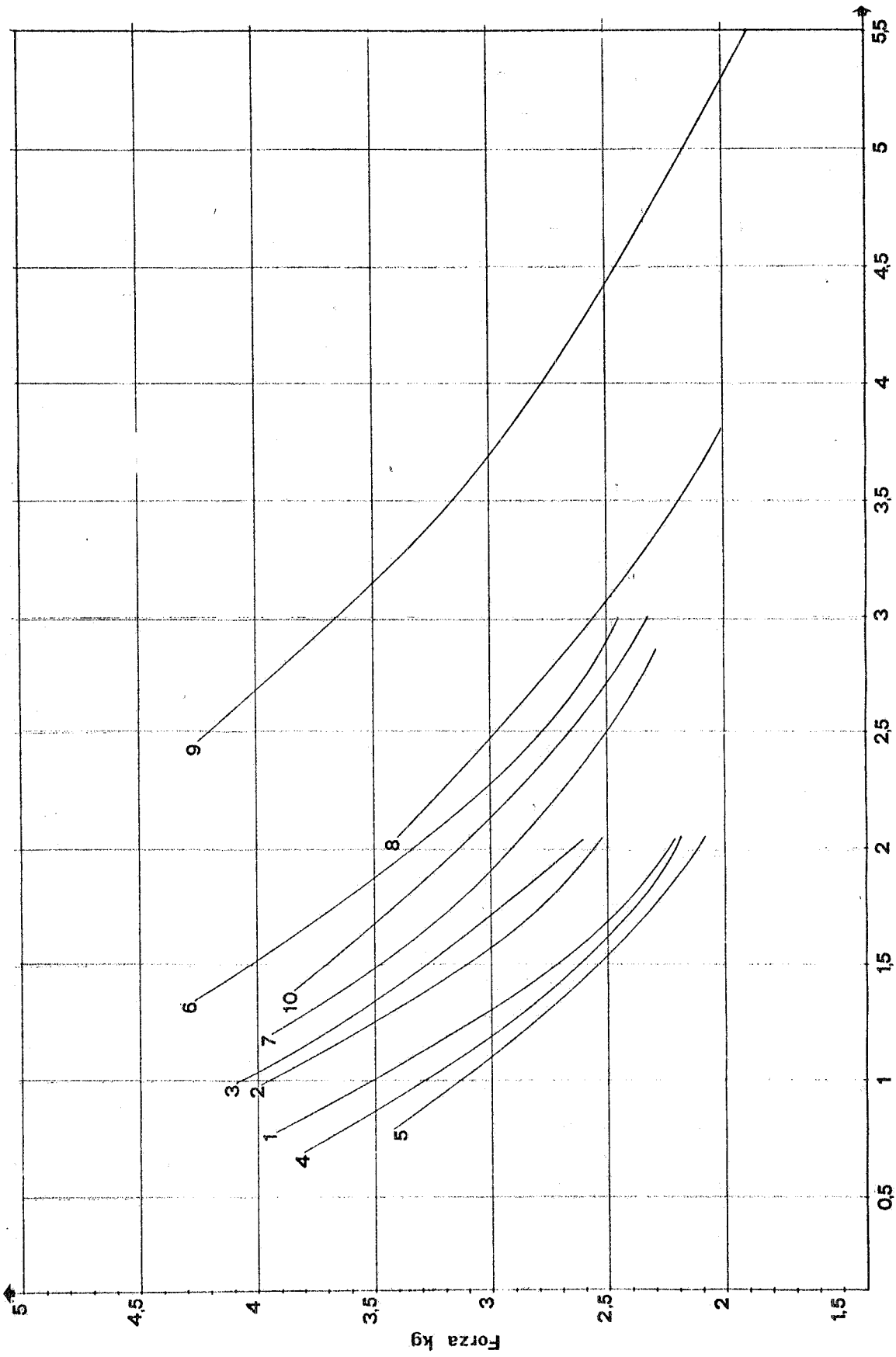
2) Si è verificata l'esistenza delle forze di sostentamento previste nel 1, d). Queste prove sono state eseguite facendo ruotare un disco di alluminio fra due corone di magneti permanenti. Il disco faceva parte di un rotore pesante circa 2 Kg, mosso da un motore elettrico bipolare alimentato a 50 Hz del tipo descritto nel par. 3).

3) Si è constatata l'efficacia del centraggio radiale, ottenuto nel modo descritto nel par. 1), facendo ruotare un equipaggio oscillante, e variando l'ampiezza del traferro esistente tra l'ancora ruotante ed il magnete permanente fisso. I risultati ottenuti sono da considerarsi soddisfacenti con distanze di traferro non più grandi di 1 mm.

Per mancanza di tempo e di attrezzature non sono state eseguite misure sui gradienti delle forze di sostentamento e di centraggio, misure che saranno effettuate nel proseguio delle prove.

L'attrezzatura usata per le prove esposte in 2) e 3) è visibile in Fig. 17.

Sono state eseguite alcune misure delle forze di richiamo radiali esercitate dai magneti permanenti sull'ancora in ferro, i risultati di queste misure sono riportati in Tabella II.



Traferro mm
FIG. 15

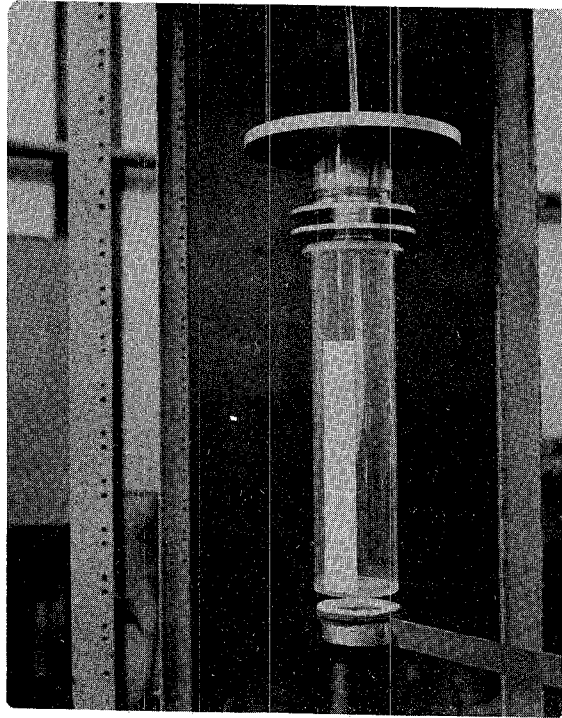


Fig. 16

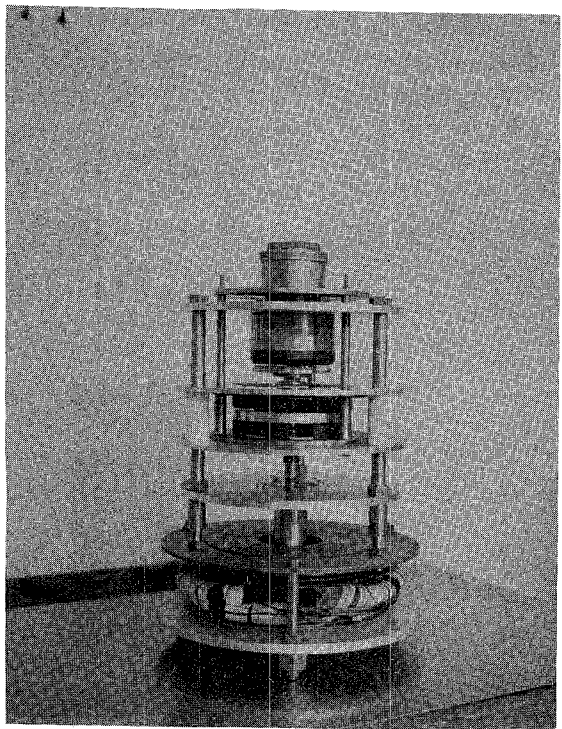


Fig. 17

TABELLA I

Altezza magnete perm. interno, mm	Sagoma magnete permanente interno	Sfalsamento traferro interno- -esterno, mm	Materiale bordo esterno	Nucleo int. con interpos. di permalloy	Curva di fig. 15 n.
24		0	Ferro	no	1
24	"	0	Ferro	no	2
24	"	0	Ferro	si	3
24	"	0,8	Ferro	si	4
24	"	1,6	Ferro	no	5
36	"	0	Ferro	no	6
36	"	1,6	Ferro	no	7
24	"	0	Sinterox III	no	8
12		0	Sinterox III	no	9
12		0	Sinterox III	no	10

TABELLA II

POSIZIONE MAGNETI	TRAFERRO	FORZA RADIALE	FORZA ASSIALE CORRISPON.
Solo Magnete Interno	0,5 mm	615 gr.	5 Kg
"	1 mm	600 gr.	4 Kg
Magneti Interno ed Esterno	0,5 mm	1400 gr.	6,3 Kg
"	1 mm	730 gr.	4,8 Kg

16.

5. - INDICAZIONI PER UNA SOSPENSIONE FACENTE USO DI MATERIALI SUPERCONDUTTORI. -

Abbiamo visto nell'introduzione della (5) come la dissipazione per sostenere un determinato peso dipenda in modo crescente dalla reci dività del materiale su cui i magneti permanenti inducono le correnti dia magnetiche (che impedendo la penetrazione del flusso magnetico provoca no la forza di sostentamento). Per diminuire queste perdite rispetto a quelle che si hanno con materiali a temperatura ambiente, anche tenendo conto del rendimento termodinamico, si può o ricorrere ad alluminio mol to puro mantenuto a 20°K , oppure a superconduttori di I^a specie; pratica mente solo il Nb si presta per questa ultima soluzione, dato l'alto campo critico ($B_c = 0.250 - 0.3$ Tesla).

Possibili soluzioni sono indicate nelle Figg. 18, 19, 20, 21. In queste è previsto che un magnete permanente con l'eventuale circuito ma gnético di ferro costituisca la parte rotante della sospensione mentre il superconduttore, che necessita di un sistema di raffreddamento con elio liquido, costituisce la parte fissa.

La scelta di una soluzione piuttosto che di un'altra dipenderà:

1) Dal valore del campo magnetico utilizzabile. Infatti il campo critico dello strato di Nb dipenderà dalla tecnica con cui verrà realizzato. Poiché la forza di sostentamento dipende dal quadrato del campo, ne consegue che se questo sarà alto (≈ 3 KGs) sarà possibile utilizzare supporti con piccole aree di sostentamento (Fig. 18) con cui si possono realizzare variazioni sensibili della forza di sostentamento con lo spostamento assia le del corpo sospeso. Per campi bassi, si dovrà ripiegare su soluzioni del tipo di Figg. 19 e 20 con aree maggiori della superficie di sostentamen to.

2) Dalla possibilità di realizzare un isolamento termico fra la parte rotante, che è circa a temperatura ambiente, ed il Nb, che per essere superconduttore deve essere alla temperatura dell'elio liquido. Ciò comporta che l'intercapedine tra la parte fissa e quella rotante del cusci netto non può scendere sotto a certi valori, in quanto bisognerà lasciare lo spazio per lo schermo a temperatura dell'azoto liquido e per le inter capedini sotto vuoto.

Una difficoltà che nasce è quella di raffreddare il niobio. Questo dovrà trovarsi necessariamente al di sopra del bagno d'elio. Una pos sibile soluzione è un pezzo in rame che "peschi" nell'elio e sia in contat to termico con il niobio. Quest'ultimo è un cattivo conduttore, ed inoltre è difficile realizzare un buon contatto termico tra Nb e rame. Bisognerà perciò perciò perciò adattare una soluzione del tipo di Fig. 21, in cui il Nb è o saldato oppure evaporato sottovuoto sul rame. Quest'ultima scelta è lega ta ad un'altra serie di problemi, sulla tecnologia del niobio.

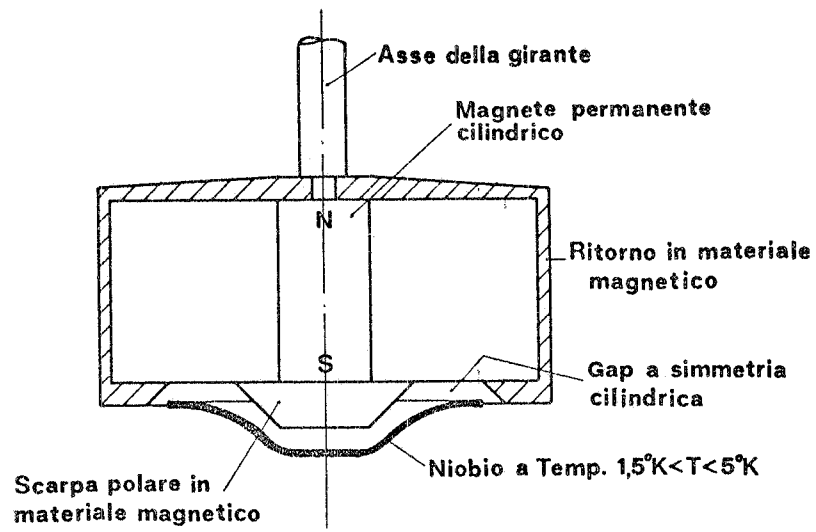


FIG. 18

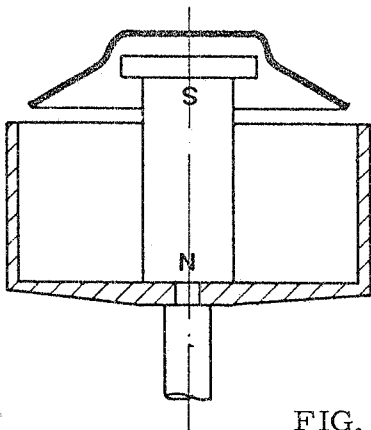


FIG. 19

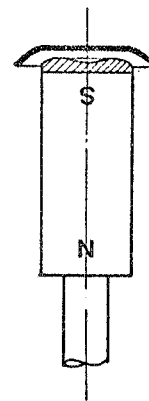


FIG. 20

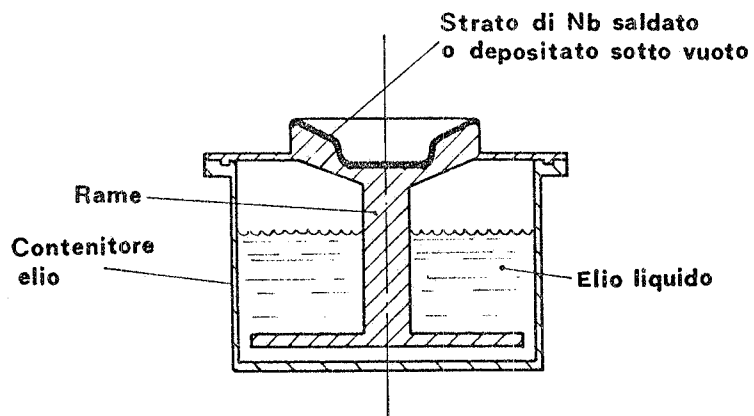


FIG. 21

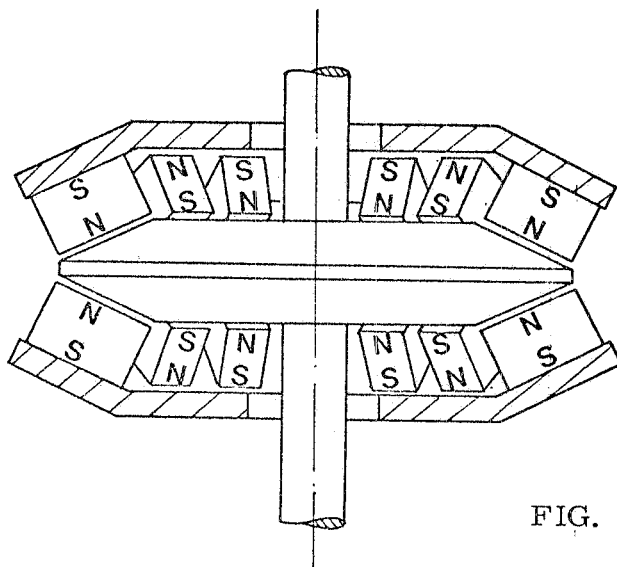


FIG. 22

6. - CONSIDERAZIONI GENERALI. -

In una sospensione in cui il centraggio radiale della girante si ottiene vincolando rigidamente l'asse della girante stessa, si ha una usura molto rapida dei vincoli, mentre se l'asse della girante non è rigidamente vincolato, ma ha la possibilità di assecondare i moti giroscopici della girante l'usura dei vincoli della sospensione è notevolmente ridotta.

Quindi la soluzione migliore è quella di utilizzare sospensioni che non vincolino rigidamente l'asse di rotazione. A tale scopo si è rivelato idoneo un centraggio radiale, ottenuto con magneti permanenti. Inoltre si può ricorrere, con egual successo, a soluzioni meccanico magnetiche che saranno oggetto di un prossimo brevetto.

Rimane da svolgere un'ampia sperimentazione ed eseguire calcoli più accurati.

Riteniamo utile indicare i temi delle prossime ricerche:

- 1) Calcolo della sospensione magnetica permanente;
- 2) Prove con magneti permanenti come da Fig. 22;
- 3) Prove con magneti permanenti e cinematismi vari;
- 4) Diagnostica vibrazioni;
- 5) Prove con sospensione superconduttrice.

CONCLUSIONE. -

Queste prime considerazioni ci dicono che dovrebbe essere possibile realizzare delle sospensioni a superconduttori capaci di lavorare nelle condizioni richieste.

Per procedere a questa ricerca, bisognerebbe:

- 1) Realizzare un primo prototipo, per prendere contatto con le difficoltà pratiche, non sempre tutte prevedibili;
- 2) Effettuare una serie di calcoli più precisi di quelli finora fatti, sull'andamento del campo magnetico.