

# ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE

Sezione di Genova

---

**INFN/TC-87/6**

4 Maggio 1987

P. Fabbricatore:

**ESTENSIONE DELLA FACILITY MARISA DA 6 A 10 TESLA STUDIO DI  
FATTIBILITA' - PRIMA PARTE: IL MAGNETE**

ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE  
Sezione di Genova

INFN/TC-87/6  
22 Maggio 1987

ESTENSIONE DELLA FACILITY MARISA DA 6 A 10 TESLA

STUDIO DI FATTIBILITA'

PRIMA PARTE : IL MAGNETE

PASQUALE FABBRICATORE

ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE, Via Dodecaneso 33 Genova

#### COMMENTI GENERALI

La facility MARISA (Magnete Ricerca Superconduttivita' Applicata) sita nei laboratori INFN di Genova (presso il Dipartimento di Fisica) e' attualmente strutturata intorno a un magnete che fornisce un campo di circa 6 Tesla in un foro accessibile di 500 mm.

La facility e' stata realizzata per poter condurre una serie di esperimenti su cavi superconduttori quali corrente critica e

magnetizzazione. Il suo limite attuale e' il campo magnetico relativamente basso per le misure che si intendono effettuare (prove di conduttori in Nb Ti in elio superfluido a 10 Tesla ed oltre), per cui ne e' prevista una estensione. Tale estensione passa attraverso due steps.

Il primo prevede che all'interno del solenoide attuale denominato MARISA 1 (Le cui caratteristiche sono riassunte nella tabella T1), venga inserito un secondo solenoide (MARISA 2) in modo da incrementare il campo magnetico dal valore attuale di 6 T a 8 T (i valori si riferiscono al campo al centro dei solenoidi). Questo secondo magnete e', come il primo, avvolto con un cavo s.c. in Cu Nb-Ti.

Il secondo step prevede che entrambi i solenoidi vengano raffreddati con elio liquido superfluido (HE II) a 1.8 K, in modo da poter sfruttare le caratteristiche del Nb-Ti a questa temperatura (a parita' di corrente i campi critici aumentano di circa 3 T rispetto alla situazione a 4.2 K) e portare il campo al centro fino a 10 T, riservandosi comunque la possibilita' di aumentare il campo fino ai limiti consentiti dalle caratteristiche fisiche del conduttore.

Le condizioni al contorno relative a questo potenziamento della facility sono essenzialmente 2 :

- Nessuna operazione di alcun tipo deve essere effettuata sulla struttura di base di MARISA 1 (avvolgimento, flange isolanti, uscite elettriche).
- Entrambi i magneti, con incluse le strutture meccaniche e criogeniche per poter utilizzare HE II, dovranno essere

contenuti nell'attuale criostato di cui in Fig.1.1 si allega uno schizzo con le quote principali

Allo scopo di facilitare il lavoro di interfaccia tra INFN e le ditte che saranno incaricate dei lavori di progettazione e costruzione dei vari componenti [Nota @1] (magnete, criostato, sistemi di pompaggio, etc.), e' stato effettuato dalla Sezione di Genova gr. 5 uno studio di fattibilita' generale, qui riportato, a cui fare riferimento durante le fasi progettuali dei componenti.

NOTA @1

Attualmente l'inserito MARISA 2 e' stato gia' ordinato alla societa' "ANSALDO COMPONENTI" di Genova, fermo restando la possibilita' di interventi in sede progettuale, quale questo studio si configura.

TABELLA T1

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DI MARISA 1

RAGGIO INTERNO AVV. ....	255.0	MM
RAGGIO ESTERNO AVV. ....	371.0	MM
LUNGHEZZA AVV. ....	604.0	MM
RAGGIO INTERNO ISOL. ....	252.0	MM
RAGGIO ESTERNO ISOL. ....	375.9	MM
LUNGHEZZA ISOL. ....	622.9	MM
NUMERO STRATI .....	36	
SPIRE PER STR .....	116	
SPIRE TOTALI .....	4176	
CONDUTTORE .....	3.2 x5.2 (isol)	
LUNGH. CAVO .....	8212 M	
PESO TOTALE .....	1100 Kg	
INDUTTANZA .....	6.4	HENRY
CORRENTE NOMINALE .....	1000.0	A
CAMPO NOMINALE .....	6.0	TESLA
CAMPO MAX.CONDUTTORE .....	6.8	TESLA
ENERGIA IMMAGAZZ. ....	3.2	MJOULE

1. - L'INSERTO MARISA 2 - PRIMA DEFINIZIONE

Il solenoide MARISA 2 e' stato configurato in base ad alcune considerazioni di carattere generale che riportiamo:

a) Premettendo che le considerazioni sui campi magnetici sono state effettuate sui campi massimi (sul conduttore) e considerando quindi i campi al centro dei solenoidi una

conseguenza, si puo' osservare nella Fig.2.1 (la caratteristica campo-corrente di MARISA 1 con le curve critiche a 4.2k 1.8 K) che MARISA 1 puo' lavorare a 4.2 K con una corrente massima di 1060 A avendo sul conduttore circa 7 T. Passando a 1.8 K la corrente critica sale a 1360 A con un campo massimo di 9.0 T. Per avere una struttura magnetica affidabile e' stato stabilito che MARISA 1 deve lavorare con qualche margine rispetto alla corrente critica (come anche il successivo solenoide MARISA 2). Tale margine e' stato orientativamente fissato intorno al 30% ottenendo di conseguenza il risultato che la corrente di alimentazione di MARISA 1 e' di circa 900 A e quindi il suo contributo al campo centrale e' poco piu' di 5 Tesla.

b) Per non avere un sistema complesso con conseguente appesantimento della strumentazione accessoria, risulta conveniente avere i due magneti collegati elettricamente in serie. Avendo fissato la corrente ne consegue che l'inserito dovra' fornire un incremento di campo di circa il 50% rispetto al primo, per cui ad esempio ad 8 Tesla 5.5 sono forniti da MARISA 1 e 2.5 dall'inserito.

c) Volendo avere per MARISA 2 lo stesso margine rispetto alla corrente critica sono state tracciate le desiderabili curve  $I_c(B)$  per il conduttore da utilizzare (Fig.2.2). Da notare che le pendenze diverse tra i conduttori dei due magneti sono dovute al fatto che le caratteristiche del cavo di MARISA 1 sono state misurate ed il cavo stesso e' industrialmente 'vecchio' dal punto di vista della lega. Mentre le caratteristiche per il cavo di MARISA 2 sono state desunte dai comportamenti dei cavi

# MARISA 1

## CRITICAL $I_c(B)$ AND LOAD LINES

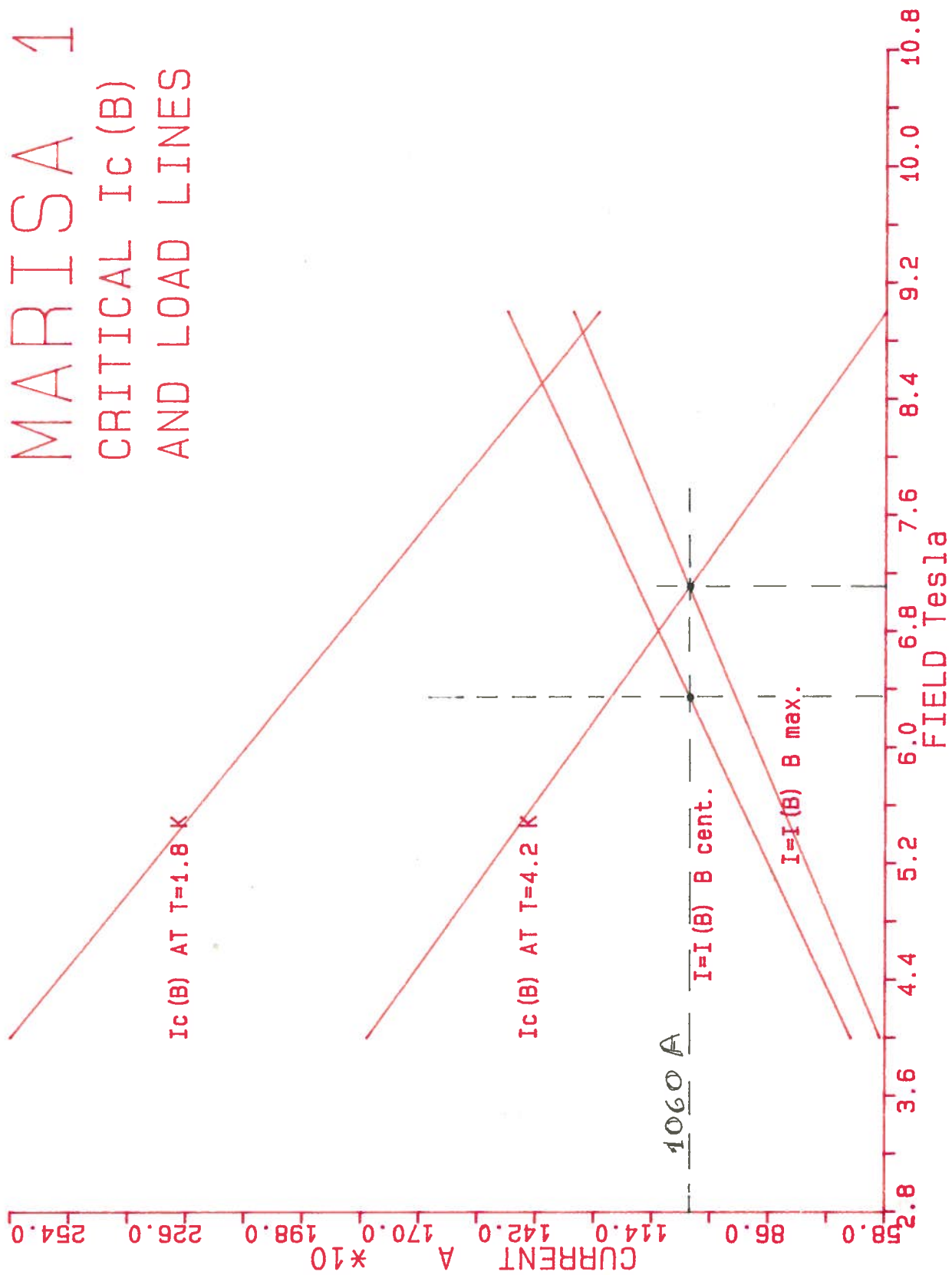


Fig 2.1

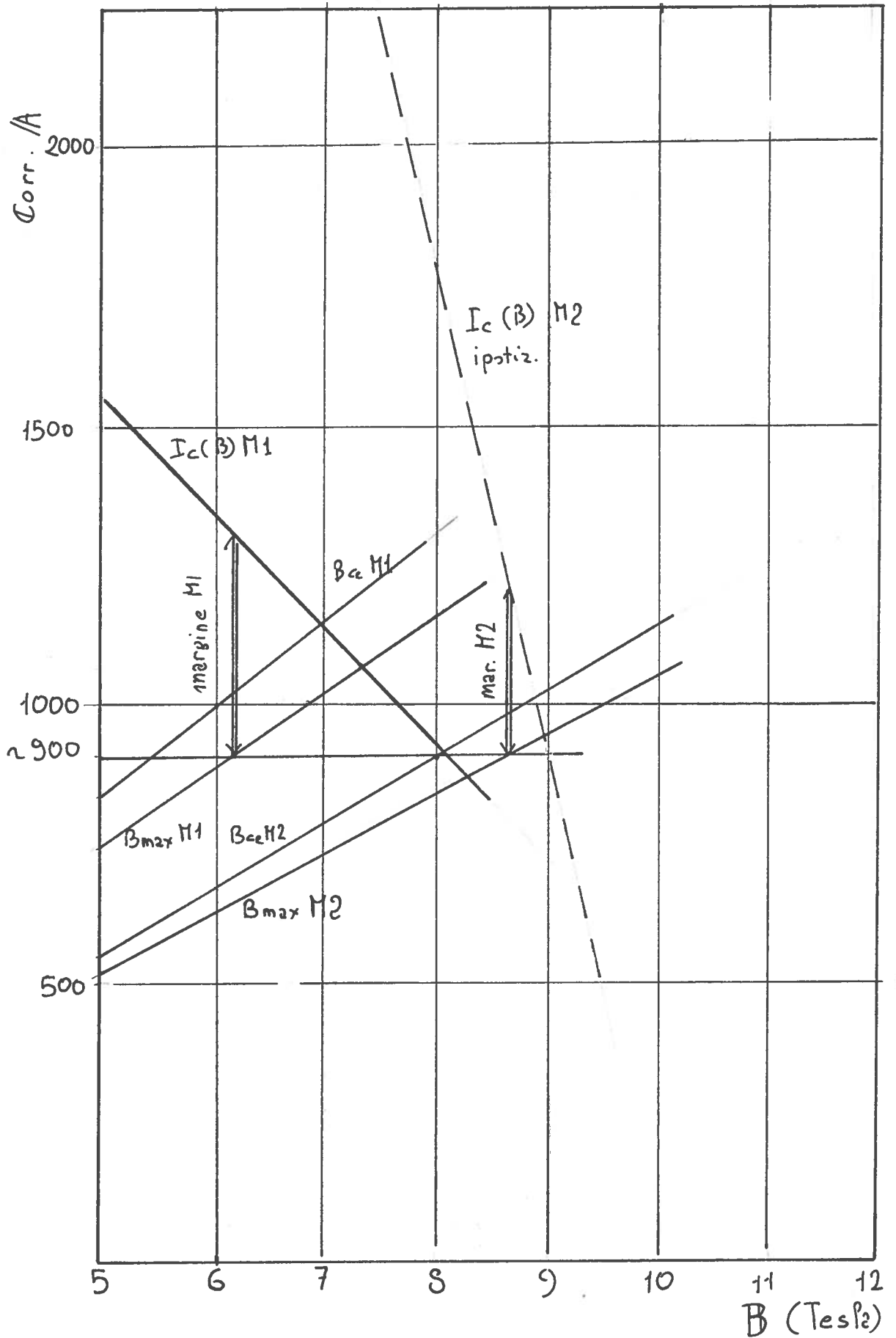


Fig 2.2 Campi Marisa 1+2 e curve  $I_c(B)$



commerciali attuali.

In base alle caratteristiche desiderate, si evince che il conduttore dovrà avere un contenuto di Nb Ti corrispondente a una sezione di 2.4 mm<sup>2</sup>. Altre considerazioni legate al quench hanno condotto ad aggiungere al superconduttore rame per circa 9 mm<sup>2</sup>.

In base a queste considerazioni e' stata effettuata una ricerca di mercato per un cavo superconduttore, trovando come prodotto commerciale piu' vicino alle esigenze emerse, il conduttore descritto nella tabella T2. La scelta del conduttore ha permesso di ridisegnare le caratteristiche magnetiche complessive (Fig.2.3) e di fissare quelle geometriche dell'inserto (tabella T3).

Nella definizione dei raggi interni ed esterni sono intervenute considerazioni di carattere meccanico descritte nel paragrafo seguente, per cui e' stato necessario aggiungere un contenimento in acciaio esternamente all'inserto .

La tabella T4 mostra le caratteristiche elettriche complessive dei due magneti.

# MARISA 1+2

## CRITICAL $I_c(B)$ AND LOAD LINES

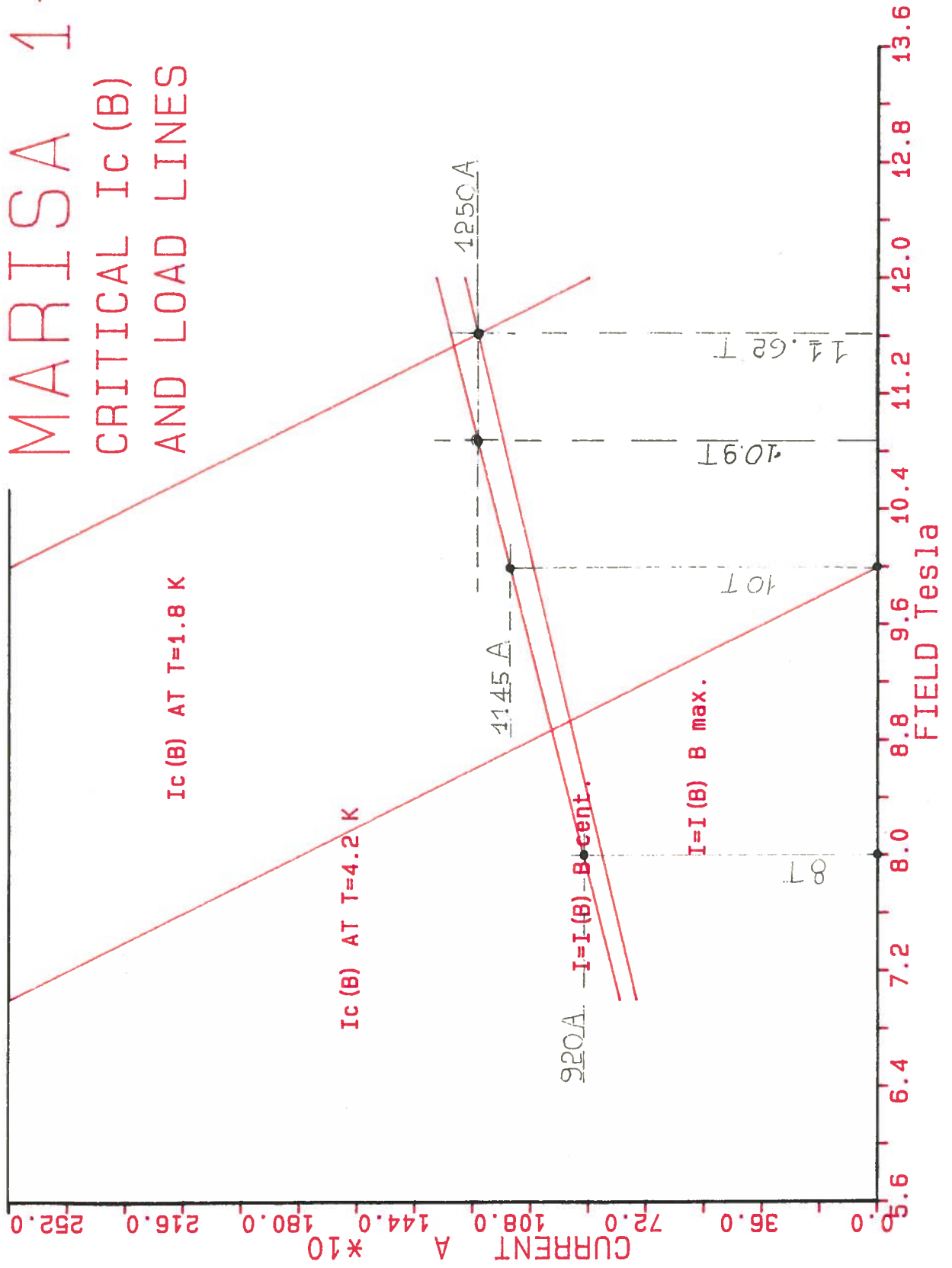


Fig 2.3

TABELLA T2

CARATTERISTICHE CONDUTTORE (\*)

TALE CONDUTTORE E' FORMATO DA 13 TREFOLI S.C. DI DIAMETRO 4 MM  
TWISTATI INTORNO AD UN'ANIMA DI RAME.

DIMENSIONI NON ISOLATO	.....	3.6 X 3.6 MM2
DIMENSIONI CON ISOLAMENTO	.....	3.8 X 3.8 MM2 (**)
ISOLAMENTO	.....	ELETTROVETRO
FILAMENTI IN Nb Ti DI DIAM.....		16 uM
RAPPORTO CU/S.C.	.....	4/1
CORRENTE CRITICA A 8 Tesla e 4.2 K	.....	1800 A

Note

\* Tale conduttore e' prodotto dalla LMI di Firenze. I trefoli sono quelli con cui sono realizzati i conduttori dei dipoli di HERA.

\*\* Il conduttore e' fornito non isolato, per cui i dati relativi all'isolamento vanno considerati provvisori.

TABELLA T3

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELL'INSERTO

RAGGIO INTERNO AVV. ....	192.0	MM
RAGGIO ESTERNO AVV. ....	230.0	MM
LUNGHEZZA AVV. ....	600.0	MM
RAGGIO INTERNO ISOL. ....	190.0	MM
RAGGIO ESTERNO ISOL. ....	233.0	MM
LUNGHEZZA ISOL. ....	622.9	MM
NUMERO STRATI .....	10	
SPIRE PER STR .....	158	
SPIRE TOTALI .....	1580	
LUNGH. CAVO .....	2125	M
PESO TOTALE .....	276	Kg

TABELLA T4

- CARATTERISTICHE ELETTRICHE MARISA 1+2

INDUTTANZA MARISA 1	.....	6.4	HENRY
INDUTTANZA MARISA 2	.....	.525	HENRY
INDUTTANZA MARISA 1+2	.....	9.0	HENRY
A 4.2 K			
CORRENTE NOMINALE	.....	920.0	A
CAMPO NOMINALE	.....	8.0	TESLA
CAMPO MAX.CONDUTTORE	.....	8.6	TESLA
ENERGIA IMMAGAZZ.	.....	3.8	MJOULE
A 1.8 K			
CORRENTE NOMINALE	.....	1150.0	A
CAMPO NOMINALE	.....	10.0	TESLA
CAMPO MAX.CONDUTTORE	.....	10.8	TESLA
ENERGIA IMMAGAZZ.	.....	5.95	MJOULE

2. - COMPORTAMENTO MECCANICO

Una volta determinato il conduttore, ne e' stata fatta un'analisi meccanica volta a prevederne le caratteristiche, quali il modulo di elasticita', lo snervamento (yeld), lo sforzo di rottura (tensile), la contrazione termica.

I risultati di questa analisi sono mostrati in tabella T6.

Il passo successivo e' stato di osservare il comportamento meccanico dell'inserito e in primo luogo gli effetti dovuti al

campo magnetico.

Poiche' la filosofia con cui e' stata condotta la progettazione di MARISA 2 prevede che il magnete complessivo sia capace si' di produrre un campo al centro intorno ai 10 Tesla, ma niente vieta, se non limiti dovuti a degradazione e non prevedibili, di portare il magnete al limite delle sue possibilita', si e' stabilito che il livello di forza magnetica sia quello determinato dall'averne 11.7 Tesla di campo sul conduttore e 1250 A di corrente.

Sotto queste ipotesi e considerando inoltre che MARISA 2 non sia spalleggiato meccanicamente da MARISA 1, risulta un livello di sforzi tangenziale dell'ordine di 20 Kg/mm<sup>2</sup>, un valore considerato eccessivo.

Al fine di ridurre il livello di sforzi a un valore piu' accettabile, fissato intorno a 13 Kg/mm<sup>2</sup>, e' stata introdotta una struttura meccanica di contenimento che pero' ha tali ripercussioni sul magnete da poter essere considerata il punto nodale su cui verte tutta la progettazione.

Il problema fondamentale e' costituito dalle forze assiali sull'inserito, dovute ai campi magnetici radiali. Seguendo l'ipotesi sviluppata di un inserto di lunghezza pari a quella di MARISA1 si ottiene una forza assiale complessiva di compressione sull'inserito di circa 370 ton.

Se questa forza fosse concentrata sulle estremita' del solenoide si avrebbe per tutta la lunghezza una deformazione costante:

$$\text{def} = 370000 / 50380 / 10300 = 713 \text{ u mm/mm}$$

Forza area E Young

TABELLA T6

PROPRIETA' MECCANICHE

*MAT. o STRUTT	* YOUNG	* YIELD	* TENSILE	* CONTRAC	*
*	*10 Kg/mm2	* Kg/mm2	* Kg/mm2	* u mm/mm	*
* RAME	* 13-14	* 6-6.5	* 22-41	* 3240	*
* ACCIAIO 312	* 21-22	* 28-46	* 64-172	* 3060	*
* NbTi (Typ)	* 8.2-8.3	* 90-160	* 106-196	* 1880	*
* Vetr G10 //	* 2.7-3.3	*	* 25-49	* 2400	*
* Vetr G10	* 1.2-1.8	*	* 41-86	* 7060	*
* CONDUTT (circ)*	* 11.4-13	* 17 (?)	*	* 2990	*
* CONDUTT (rad)	* 8.95-10.3*	*	*	* 3360	*
* BANDAGG (cir)	* 17.-18.	*	*	* 3100	*
* BANDAGG (rad)	* 6.40-6.96*	*	*	* 3360 (?)	*

Invece la forza e' distribuita (In fig.2.4 ne e' mostrato l'integrale sul solo MARISA2) e quindi le deformazioni assiali relative non sono costanti, ma variano come mostrato nella figura 2.5. Al centro, dove e' presente tutta la forza c'e il massimo della deformazione relativa mentre alla periferia e' nulla. Gli spostamenti assiali della bobina sono cumulativi delle deformazioni spostandosi dal centro alla periferia (fig.2.6). Lo spostamento massimo e di .157 mm sulla estremita' corrispondente a 523 u mm/mm.

Non sono questi gli unici movimenti assiali della bobina rispetto alla struttura di acciaio di contenimento dovendo includere quelli dovuti alle contrazioni termiche relative tra acciaio e struttura assiale del magnete. Dalla tabella T6 emerge che tale differenza e' di  $(3360-3060) = 300$  u mm/mm e si somma a quella dovuta alle forze ottenendo 800 u mm/mm sulla periferia (fig.2.7).

Questo spostamento relativo puo' essere causa di gravi disfunzionamenti del magnete in quanto possono aver luogo rilasci di energia all'interfaccia magnete-struttura meccanica con conseguenti transizioni del magnete complessivo.

Per evitare che tali spostamenti abbiano luogo bisognerebbe precaricare in compressione l'avvolgimento in modo da deformarlo per il movimento relativo complessivo. Come deformazione da compensare va scelto non il valore sulla periferia ma quello della zona centrale che e' maggiore ( $713$  umm/mm magnetici +  $300$  termici =  $1013$  umm/mm). Essendo il modulo di elasticita' assiale, nel nostro caso, di  $10300$  Kg/mm<sup>2</sup>, ne risulta un precarico di 520 tonnellate, che ci sembra di difficoltosa



MARISA 1+2  
AXIAL DEFORMAT

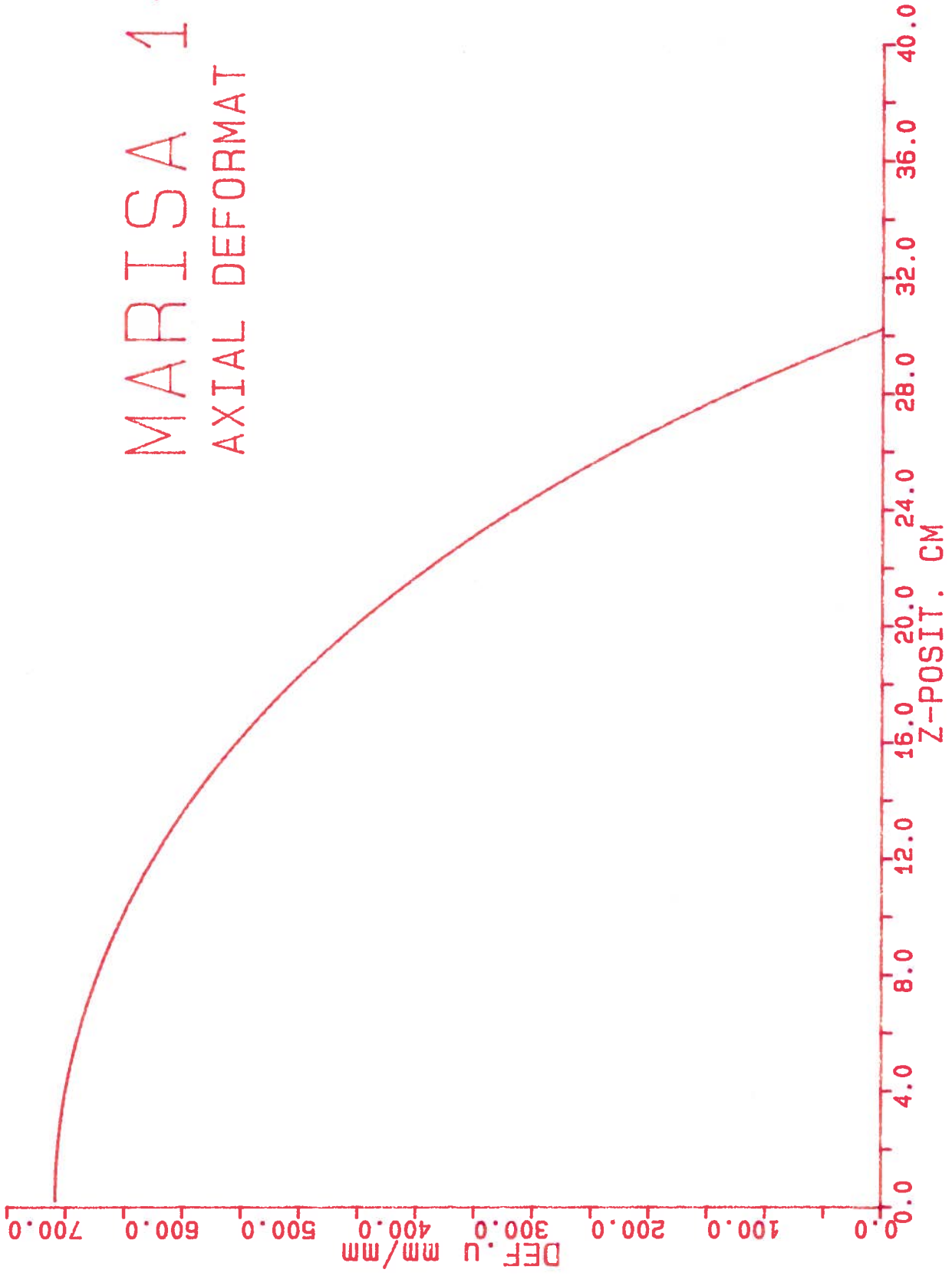


Fig 2.4

MARISA 1+2  
INT. AXIAL FORC

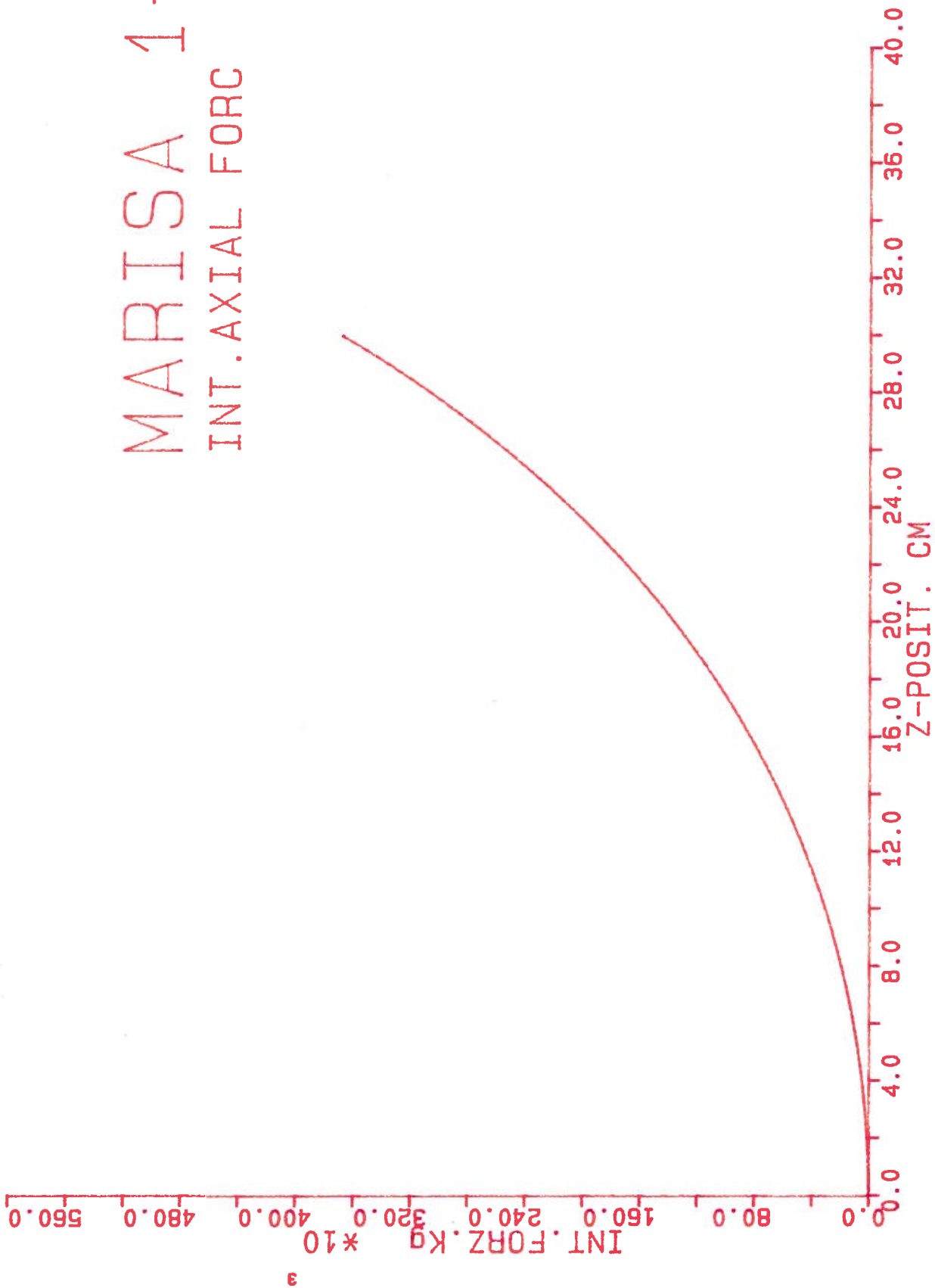


Fig 2.5

# MARISA 1+2

## AXIAL MOVEMENT

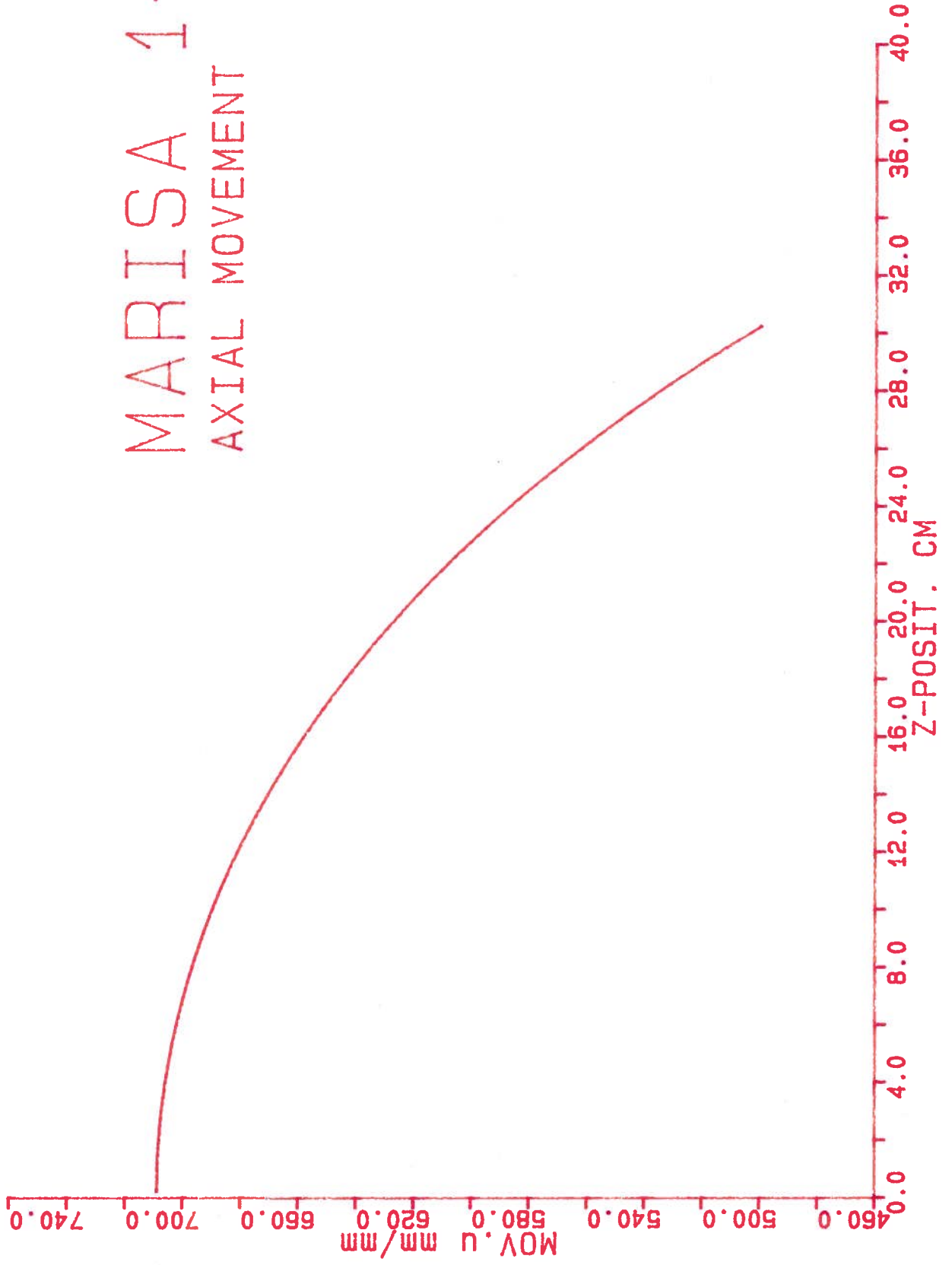


Fig 2.6

MARISA 1+2

AXIAL MOVEMENT

MAGNET. + THERM

MAX MOV. = 723 u

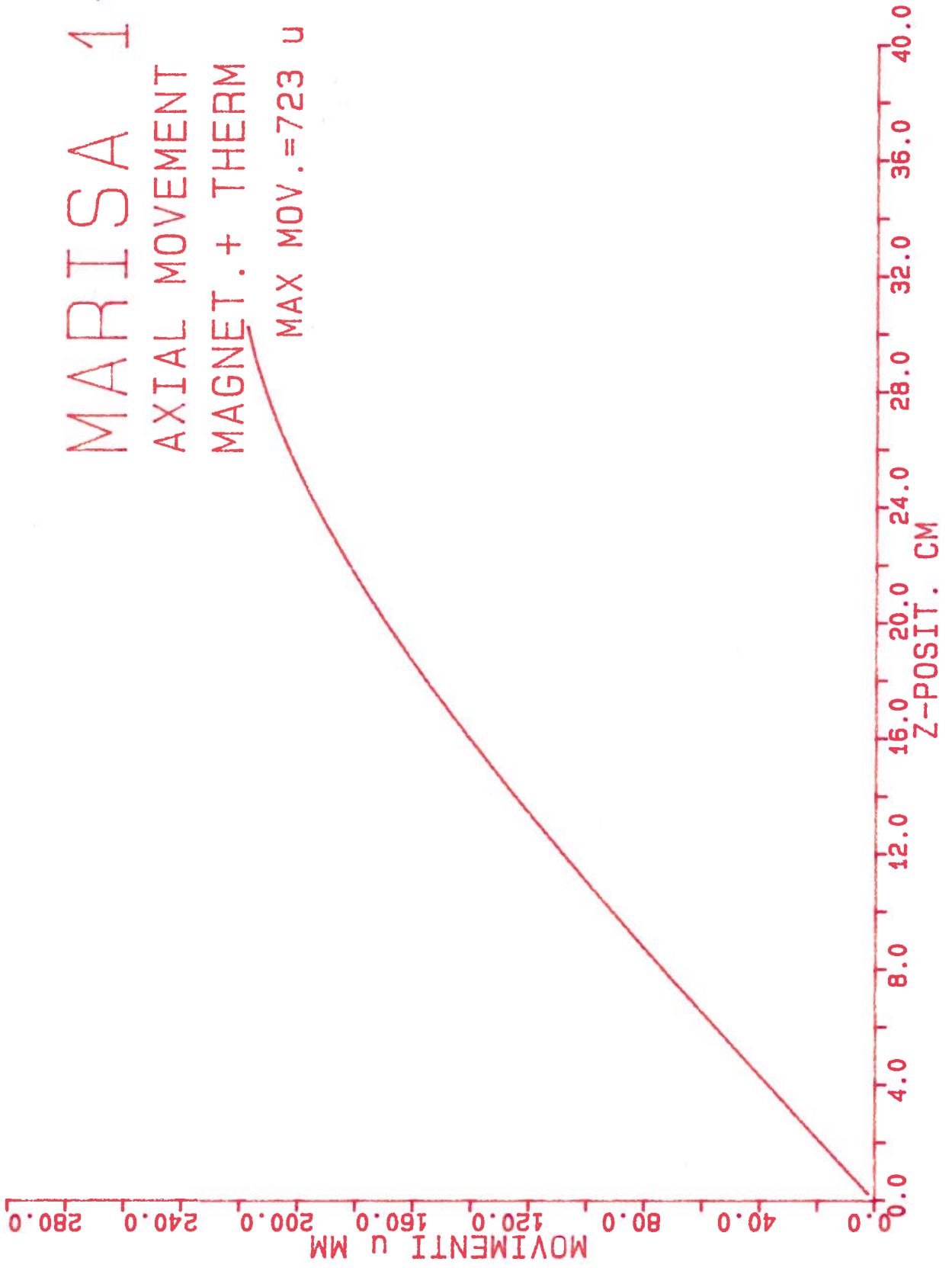


Fig 2.7

attuazione.

Per superare questo empasse, sono possibili 3 strade differenti:

- I - Poiche' il problema e' dovuto ai forti campi radiali presenti su MARISA2 dovuti solo in parte a questo magnete, ma principalmente a MARISA1, si puo' cercare di risolvere questo problema accorciando il solenoide interno cosi' da esporlo solo a una parte del campo radiale. Da verifiche effettuate emerge che al massimo MARISA2 puo' essere portato a 456 mm di lunghezza, con una riduzione complessiva del precarico da 520 a 400 ton. Il guadagno e' relativamente modesto, comunque va giusto al limite di una struttura meccanica di contenimento formata da : (a) un cilindro di acciaio inossidabile di spessore 10 mm da infilare senza interferenze e senza gap esternamente su MARISA 2. Quando il magnete viene energizzato esso si carica per 20 Kg/mm<sup>2</sup> equivalente a una pressione radiale dall'interno di 80 atm.(b). Due molle a tazza di spessore 45 mm poste agli estremi, usate per precaricare MARISA2, collegate da (c) 70 tiranti assiali di diametro 16 mm.

Questa soluzione dovrebbe essere presa in considerazione come ultima analisi, nel caso che le successive o eventuali altre vengano tecnicamente censurate.

- II - Poiche' i problemi emergono sia per il comportamento passivo in campo magnetico del cilindro di contenimento, sia per la differenza in contrazione termica tra cilindro e magnete si puo' risolvere il problema sostituendo lo spalleggiamento in acciaio con MARISA1 stesso, cioe' procedendo a una realizzazione del tipo: (a) Si avvolge MARISA2, (b) lo si impregna, (c) si

effettua una tornitura sull'esterno e si estrae il mandrino di avvolgimento, (d) si lavora leggermente di macchina la superficie interna di MARISA1, (e) si inserisce MARISA2 in MARISA1 con un leggero calettamento, (f) eventualmente si procede a un'altra impregnazione per avere garantito un buon legame all'interfaccia tra i due magneti.

Questa ipotesi e' in contrasto con la decisione di non operare pesantemente sul magnete gia' esistente e dovrebbe essere perseguita solo se l'ipotesi successiva si dimostrasse inapplicabile.

- III - Poiche' i problemi nascono dal comportamento assiale del contenimento meccanico, se questo avesse un comportamento anisotropo e piu' esattamente se si comportasse circonferenzialmente come l'acciaio, ma radialmente come il magnete e fosse a questi vincolato, la pressione assiale pur continuando ad esistere inalterata non avrebbe conseguenze.

Cio' puo essere realizzato in vari modi. Quello che ci sembra piu' interessante e' di avvolgere sopra il magnete non ancora impregnato un cavetto di acciaio per uno spessore di circa 15mm con un impacchettamento tale da avere assialmente lo stesso comportamento termico del magnete, quindi impregnare tutto insieme. Il magnete risulta bandato ma non ci sono due strutture interagenti.

Abbiamo valutato che per avere un bandaggio con il comportamento desiderato bisognerebbe avvolgere un cavo da 1 mm di acciaio lasciando che le spire siano mediamente distanziate di .03 mm, ovvero uno strato di lunghezza 600 mm deve essere formato da 580 spire.

Questo studio si e' basato sulla ipotesi III

Nella Fig.2.8 e' mostrata la storia meccanica del magnete dall'avvolgimento alla energizzazione:

a) Il magnete dopo l'avvolgimento, ancora posto sul mandrino. E' da considerare che il tiro di avvolgimento e' stato fissato a 84 Kg cosi' da avere un pretensionamento massimo di 6 Kg/mm<sup>2</sup>.

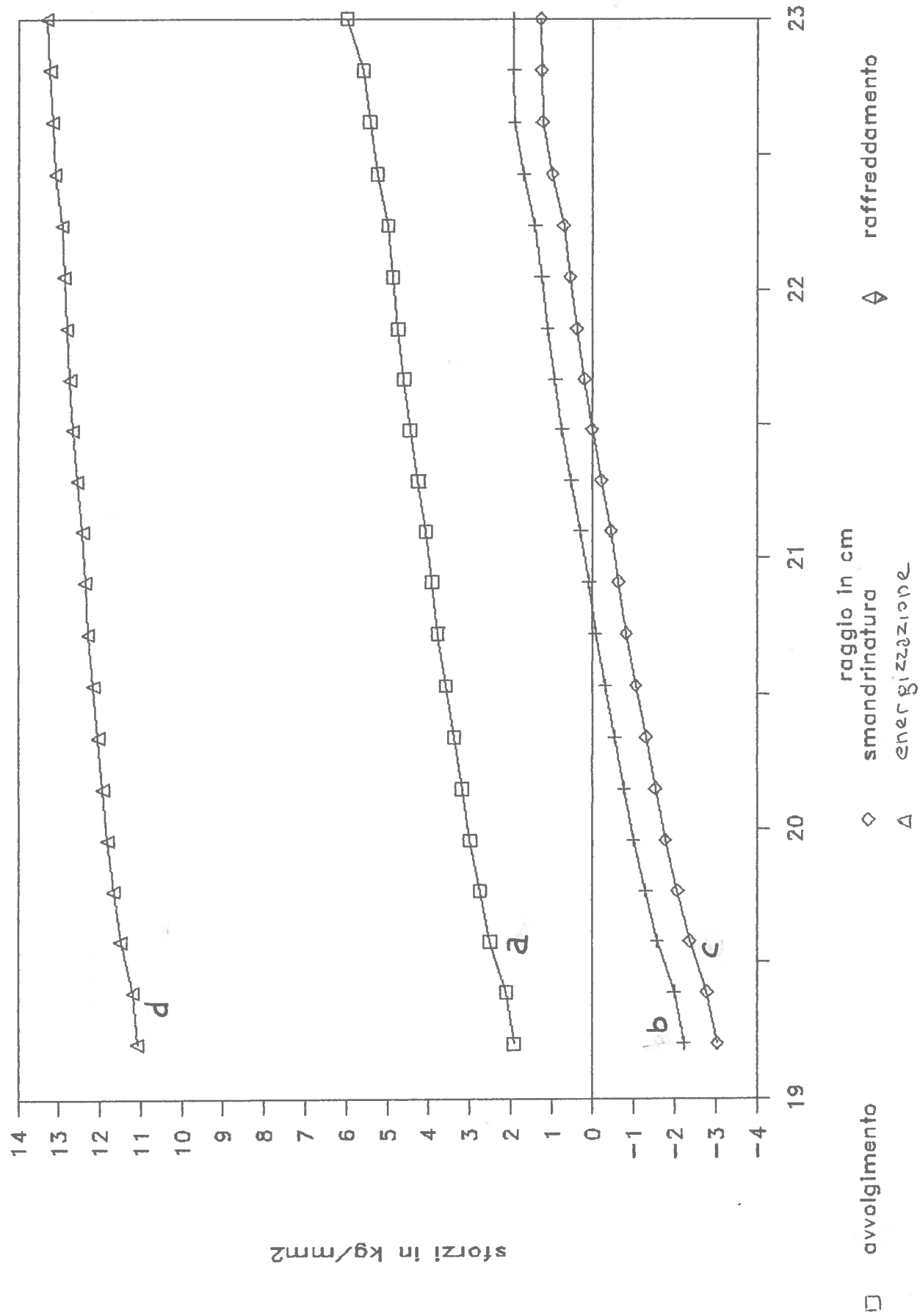
Lo spessore del mandrino e' stato fissato a 20 mm.

b) Il magnete estratto dal mandrino, con gli sforzi che si ridistribuiscono.

c) Il magnete raffreddato a 4.2K. Si puo' notare come il livello di sforzi in compressione aumenti, in seguito alla presenza della virola. In realta' i calcoli effettuati non hanno tenuto conto della leggera anisotropia tra direzione circonferenziale e radiale del magnete, per cui e' probabile che la virola abbia un effetto piu' moderato.

d) Il magnete energizzato

# sforzi su marisa2





### 3. - IPOTESI DI ESECUZIONE

Una possibile esecuzione e' mostrata nell'allegato disegno 587.001/0. La realizzazione di MARISA 2 e' gia' stata delineata nel paragrafo precedente percorrendo la storia degli sforzi. Piu' precisamente:

- 1- Si avvolge il magnete su un mandrino estraibile con un tiro di 84 Kg. A fine avvolgimento si lascia sull'esterno uno spessore di nastro di vetro di alcuni mm. Ai lati del magnete devono essere poste 2 flange di vetroresina di spessore tale che la lunghezza totale di MARISA 1 coincida con quella di MARISA 2.
- 2- Si avvolge un cavo di acciaio, eventualmente isolato, con il tiro necessario per ottenere l'impacchettamento richiesto. Si avvolge per uno spessore complessivo di 15 mm.
- 3- Si impregna sottovuoto con una resina epossidica (ARALDITE) e si fa reagire.  
A questo punto si procede con la realizzazione complessiva
- 4- Si preparano due nuove flange di acciaio atte a contenere i due magneti come mostrato nel disegno di studio.
- 5- Si procede al montaggio posizionando su una flangia prima MARISA 2 quindi MARISA 1. Si posiziona l'altra flangia e si serra utilizzando 12 tiranti laterali (10 mm di spessore)
- 6- Si effettuano i collegamenti elettrici