

ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE

Sezione di Napoli

INFN/TC-96/05

24 Aprile 1996

F. Cevenini, G. Passeggio:

**LA MECCANICA DELLA CAVITA' OTTICA DEL LASER AD ELETTRONI
LIBERI SUL LINAC S.C. LISA**

LA MECCANICA DELLA CAVITA' OTTICA DEL LASER AD ELETTRONI LIBERI SUL LINAC SUPERCONDUTTORE LISA

F. Cevenini

Dipartimento di Scienze Fisiche dell'Università "Federico II" di Napoli e INFN - Sezione di Napoli, Mostra d'Oltremare Pad. 20, 80125 Napoli (Italy)

G. Passeggio

INFN - Sezione di Napoli, Mostra d'Oltremare Pad. 20, 80125 Napoli (Italy)

Sommario

Vengono descritte le caratteristiche della struttura meccanica per l'allineamento e la sincronizzazione degli specchi della cavità ottica sotto vuoto, progettata per l'esperimento di laser ad elettroni liberi nell'IR "SURF". Il sistema doveva essere utilizzato sul fascio di elettroni del linac superconduttore da 25 MeV "LISA" dei Laboratori Nazionali di Frascati ma è ora in procinto di essere impiegato nella fase iniziale del progetto di laser ad elettroni liberi "FERMI" sul fascio della prima sezione (100 MeV) del linac iniettore del Sincrotrone di Trieste.

Partendo dalle specifiche ottiche della cavità, viene descritto il progetto meccanico della struttura che consente i movimenti di pre-allineamento delle teste portaspecchi e quelli, di precisione sub-micrometrica, degli specchi.

Vengono, anche, illustrate le caratteristiche degli attuatori utilizzati e le potenzialità del sistema elettronico per il controllo remoto, e coordinato, dei movimenti dei due specchi per la regolazione dei parametri ottici della cavità.

Abstract

The mechanical structure for mirrors alignment and tuning in IR Free Electron Laser "SURF" optical cavity is presented. The system was designed for the electron beam of the 25 MeV Superconducting linac "LISA" in Frascati National Laboratory, but will be used in first stage of "FERMI" FEL project on the 100 MeV electron beam extracted from the first section of the linac injector at the Trieste Synchrotron machine.

The mechanical design of system that allows pre-alignment movements of mirror's vacuum vassels and sub-micrometric precision movements of mirrors are described.

Specifications of used actuators and mirror's remote control electronic system for cavity optical parameters optimization are presented.

1 - INTRODUZIONE

Il laser ad elettroni liberi nell'IR, finanziato dalla Commissione V dell'INFN sotto la sigla "SURF"⁽¹⁾ avrebbe dovuto costituire la prima utilizzazione del fascio del linac superconduttore da 25 MeV "LISA"⁽²⁾ dei Laboratori Nazionali di Frascati. La struttura della macchina e la disposizione dell'ondulatore e della cavità rispetto ad essa sono mostrati in Figura 1.

La scelta di un esperimento di laser ad elettroni liberi come prima utilizzazione di una macchina, che nasceva come banco di prova sperimentale di tecnologie avanzate in Fisica degli Acceleratori, è del tutto naturale, anzi, in un certo senso, un FEL, più che rappresentare una utilizzazione del fascio, può considerarsi parte dell'acceleratore. Il sistema ottico, infatti, può essere visto come un fondamentale elemento diagnostico della macchina, tanto forti sono le correlazioni tra caratteristiche del fascio di elettroni e radiazione estratta. Il laser ad elettroni liberi avrebbe dovuto, quindi, essere un potente mezzo di accelerazione della fase di ottimizzazione delle caratteristiche del fascio di elettroni, appena questo avesse raggiunto il livello qualitativo minimo per sostenere l'oscillazione laser.

E' noto che il progetto SURF è stato ormai accantonato e lo stesso progetto LISA vive momenti difficili perché in competizione temporale con programmi di rilievo internazionale a più alta priorità. Può sembrare, pertanto, strano che proprio ora veda la luce questo rapporto su uno strumento che non troverà la sua naturale utilizzazione.

Il fatto nuovo che ci ha spinto a scrivere questa nota è che la meccanica della cavità ottica sotto vuoto, poiché può essere facilmente spostata, ha oggi, insieme all'ondulatore, una prospettiva di utilizzazione in un diverso contesto. Cavità ed ondulatore "SURF" sono, infatti, gli elementi su cui si basa la fase iniziale del progetto di laser ad elettroni liberi "FERMI"⁽³⁾ che utilizzerà la prima sezione (da 100 MeV) del linac per l'iniezione dell'anello per produzione di radiazione di sincrotrone ELETTRA della Sincrotrone Trieste S.c.p.A.

In realtà l'impegno del gruppo della Sezione di Napoli nel progetto SURF è stato più ampio di quanto si discute in questo rapporto. Ha riguardato, anche, alcuni aspetti del posizionamento degli elementi dell'ottica di trasporto del fascio di elettroni, soprattutto in relazione alla loro compatibilità con gli elementi del sistema da vuoto, ed il progetto del tubo di volo degli elettroni all'interno del campo magnetico dell'ondulatore. Quest'ultimo progetto ha richiesto un particolare studio per conciliare le limitazioni di spazio con l'esigenza di una efficiente ottica del sistema di diagnostica, che prevedeva ben 3 targhette per la misura della sezione del fascio di elettroni nella zona dell'ondulatore.

Il progetto delle teste portaspecchi SURF è nato dall'esperienza fatta dal gruppo nella progettazione, realizzazione ed operazione della cavità ottica sotto vuoto di 17,5 metri per l'esperimento di laser ad elettroni liberi su Adone, LELA⁽⁴⁾.

In quell'apparato erano stati utilizzati per i movimenti di 'tilt' degli specchi capsule piezoelettriche poste direttamente nel contenitore sotto vuoto.

L'esperimento, che era molto difficile, non ha raggiunto il regime di auto-oscillazione della cavità, per tutta una serie di problemi connessi con le caratteristiche dell'acceleratore, ma le capsule piezoelettriche hanno dimostrato di essere uno strumento insostituibile per la remotizzazione di micro-movimenti. L'esperienza fatta in quegli anni ci ha convinti che, tenendo adeguatamente conto della loro isteresi e del fenomeno del rilassamento, gli attuatori

piezoelettrici danno garanzia di alta precisione ed eccellente ripetibilità con tempi di risposta molto rapidi.

Anche nel progetto SURF si è fatto, dunque, uso di capsule piezoelettriche, ma poste all'esterno del contenitore da vuoto. Questa scelta ha reso necessario integrarle con viti micrometriche per ottenere la corsa richiesta per i movimenti di tilt.

2 - PARAMETRI OTTICI DELLA CAVITA'

I parametri di progetto del linac sono riassunti in Tabella I

Tabella I

Fascio:			
	energia	25	MeV
	emittanza normalizzata	$< 10^{-5}$	m rad
	$\Delta E/E$ (@ 25 MeV)	$2 \cdot 10^3$	
macroimpulso			
	durata	> 1	ms
	frequenza massima	10	Hz
	corrente media	2	mA
	fattore di utilizzo	$< 0,1$	
microimpulso			
	frequenza	50	MHz
	lunghezza	2,5	mm
	fattore di utilizzo	$4 \cdot 10^4$	
	corrente di picco	5	A

Il magnete onduttore è un altro degli elementi fondamentali del progetto di un laser ad elettroni liberi. Nella collaborazione SURF il progetto del magnete⁽⁵⁾ è stato curato dal gruppo del Dipartimento di Tecnologie Intersettoriali di Base dell'ENEA e realizzato dall'Ansaldo Ricerche di Genova.

Si tratta di un magnete onduttore "ibrido" costituito cioè da magneti permanenti e materiale ferromagnetico. Questa tecnologia si è, negli anni, progressivamente affermata come quella standard nella costruzione degli ondulatori, soppiantando completamente la tecnologia basata sull'uso dei soli magneti permanenti, che, a sua volta, aveva sostituito gli elettromagneti, con i loro problemi di potenza e di raffreddamento.

La tecnologia "ibrida" ha in comune con quella a magneti permanenti la possibilità di realizzare periodi magnetici molto corti, ma è, rispetto a questa, più duttile, perché consente di correggere a posteriori, attraverso una accurata messa a punto della mappa di campo, eventuali imperfezioni del posizionamento dei magneti permanenti.

L'onduttore del progetto SURF è stato costruito utilizzando magneti permanenti in NdFeB con campo residuo B_r di 1,2 Tesla, correttori di flusso in materiale ferromagnetico e bobine di correzione sul primo ed ultimo periodo, per facilitare l'annullamento dell'integrale di campo.

Le caratteristiche dell'ondulatore sono riassunte nella seguente Tabella II.

Tabella II

Periodo magnetico (λ_m)	44	mm
scarpa polare	55	mm
numero di periodi	50	
lunghezza dell'ondulatore	220	cm
dimensione magneti permanenti	10x30x50	mm
gap utile	20	mm
B_{max}	0,4	T
K_{rms}	≤ 1	

K_{rms} è il cosiddetto parametro di campo dell'ondulatore che ha un ruolo determinante in un laser ad elettroni liberi e che, quando il campo è generato da magneti permanenti, si regola allontanando od avvicinando tra loro le espansioni polari. Il valore massimo ($K_{rms}=1$) corrisponde alla gap minima, 2 cm.

La sincronizzazione dell'impulso di radiazione, in una cavità ottica in cui gli impulsi di elettroni si susseguono ad una frequenza di 50 MHz, può avvenire se la lunghezza della cavità è un multiplo di 3 m. Con un ondulatore di 2,2 m la cavità ottica non può essere di lunghezza inferiore a 3 m, ma, la necessità di interporre tra ondulatore e specchi gli elementi di ottica magnetica per portare il fascio di elettroni sull'asse della cavità ottica e per defletterlo fuori dallo specchio a valle (vedi Fig. 1), porta la lunghezza minima della cavità ad almeno 6 metri.

Se si scegliesse una lunghezza maggiore, la divergenza del fascio di radiazione farebbe aumentare le dimensioni dello spot sugli specchi e ciò ridurrebbe i problemi termici connessi alla alta potenza di picco della radiazione incidente, prevista nell'ordine delle decine di KW. Ma, viceversa, oltre ad aumentare gli ingombri del sistema, renderebbe molto più critici i problemi ottici connessi con l'allineamento e la sincronizzazione dei pacchetti di elettroni con quelli di radiazione. Il prevalere di quest'ultimo aspetto ha indotto a fissare la lunghezza della cavità SURF a 6 m.

I parametri del fascio del linac LISA di Tabella I e quelli dell'ondulatore in Tabella II, supponendo di lavorare con valori del parametro di campo dell'ondulatore (K_{rms}) tra 0,5 ed 1, consentono di dedurre che la lunghezza d'onda della radiazione laser ottenibile in prima armonica dal laser sarebbe stata compresa tra 11 e 18 μm .

Alla lunghezza d'onda media di $\lambda = 15 \mu m$, tenendo conto dei parametri di progetto del fascio, per quanto riguarda la lunghezza del pacchetto di elettroni, la dispersione in energia e l'emittanza, ed, ipotizzando livelli di perdite realistici, si ottiene⁽⁶⁾ un valore del guadagno in prima armonica di circa il 10 %.

In assenza di vincoli geometrici particolari è stato deciso di costruire una cavità simmetrica di 6 metri con, quindi, due specchi di uguale dimensione a 3 metri dal centro dell'ondulatore.

Come è tipico con gli ondulatori ibridi, il vincolo più stringente per fissare le dimensioni del modo gaussiano di propagazione della radiazione in cavità è il diametro del tubo di volo degli elettroni nell'ondulatore. La distanza minima tra le espansioni polari del sistema magnetico deve essere necessariamente piccola perché l'intensità del campo sull'asse decresce rapidamente quando le espansioni si allontanano. D'altra parte appena fuori dall'ondulatore il tubo di volo del fascio di elettroni può essere opportunamente maggiorato e, quindi, il pericolo di diaframmare la radiazione, introducendo perdite per diffrazione, è massimo in corrispondenza dei bordi dell'ondulatore.

Imponendo la minimizzazione di queste perdite, condizione che corrisponde a scegliere un modo a bassa divergenza, si ottiene che, con $\lambda = 15 \mu\text{m}$, il waist del modo gaussiano deve essere: $w_0 = 0,2 \text{ mm}$ e gli specchi sferici debbono avere un raggio di curvatura di 3,3 m.

La dimensione del fascio di radiazione su di essi sarà, $w = 0,7 \text{ cm}$.

E' evidente che utilizzando specchi di 5 cm di diametro si introducono perdite per diffrazione del tutto trascurabili.

Con questi specchi la divergenza del fascio risulta di circa 2,5 mrad.

3 - LA MECCANICA DELLA CAVITA'

Limiteremo il discorso alle due teste portaspecchi. perché l'altro elemento della meccanica della cavità, il tubo di volo del fascio nell'ondulatore, pur essendo stato completamente progettato, non è stato realizzato.

La nostra esperienza in anni di lavoro nell'allineamento della cavità ottica sotto vuoto dell'esperimento LELA, lunga 17,5 m ed asimmetrica, ci aveva insegnato quanto è importante che i movimenti di precisione per il 'tilt' di ciascuno specchio, pur potendo in teoria essere molto piccoli, abbiano una escursione sufficiente a far percorrere allo spot del laser di allineamento, riflesso da uno specchio, l'intero diametro dell'altro. Questo significa che ciascuno dei due movimenti ortogonali deve consentire una rotazione totale di almeno $5/600 = 8 \text{ mrad}$, ovvero di $\pm 4 \text{ mrad}$.

Per rispondere a questo requisito, ed evitare le complicazioni implicite nella presenza delle capsule piezoelettriche all'interno del contenitore da vuoto degli specchi, è stato necessario compensare la diminuita escursione angolare conseguente all'allontanamento degli attuatori dall'asse, accoppiando alle capsule delle viti micrometriche, in modo che le prime determinassero la risoluzione e le seconde la corsa.

Il trasferimento del sistema di movimentazione degli specchi fuori dal contenitore sotto vuoto impone la deformabilità di quest'ultimo e richiede una attenta valutazione degli sforzi che il sistema di attuatori deve esercitare. Il problema può essere brillantemente risolto agendo sia sulla struttura che sulla scelta degli attuatori.

Si può adottare una struttura che compensi automaticamente le sollecitazioni che il vuoto determina sugli elementi deformabili che la testa deve necessariamente avere per permettere il movimento dello specchio. In altri termini, basta che il portaspecchi sia in mezzo a due soffiotti ad alta deformabilità ed identici (vedi Figura 2), perché la componente longitudinale delle tensioni esercitate dal vuoto sia virtualmente soppressa. A questo punto, sono sufficienti attuatori in grado di esercitare spinte relativamente modeste per avere la coppia necessaria ai

movimenti di tilt. Nel nostro caso le viti micrometriche potevano esercitare spinte largamente superiori alle necessità ma le capsule piezoelettriche a bassa tensione hanno, per loro natura, una elongazione che è funzione del carico meccanico.

E' stato necessario adottare capsule del tipo "meccanicamente precaricate" che hanno elongazioni modeste per forti variazioni di tensione, ma, sono praticamente insensibili al carico meccanico entro ampi margini (3 Kg).

E' evidente che per evitare inutili complicazioni i due movimenti di tilt del portaspecchi debbono essere, nel limite del possibile, "puri", avvenire, cioè, rispetto ad assi che passano per il centro degli specchi sferici in corrispondenza della superficie riflettente.

Ciò è teoricamente impossibile per specchi dielettrici multistrato, in cui la superficie riflettente non è geometricamente determinabile, ma è del tutto ovvio che la precisione ottenibile dalle lavorazioni meccaniche (decine di micron) sovrascrive le considerazioni teoriche ed autorizza a considerare la superficie anteriore del substrato come superficie riflettente dello specchio.

Un'altra caratteristica che l'esperienza pregressa ci ha consigliato di non trascurare è la possibilità di poter effettuare movimenti di 'tilt' delle finestre ottiche che chiudono il contenitore da vuoto dietro gli specchi. La possibilità di auto-collimazione delle finestre rispetto al fondo (piano) degli specchi consente, infatti, di eliminare le fastidiosissime riflessioni multiple del laser esterno nelle operazioni di preallineamento della cavità e facilita le misure della radiazione accumulata. Le non piccolissime complicazioni meccaniche che questa scelta comporta sono abbondantemente giustificate dai vantaggi operativi che si conseguono.

La due teste portaspecchi sono assolutamente identiche, nel senso che entrambe sono fornite del movimento di traslazione manuale lungo l'asse della cavità ed entrambi gli specchi hanno la traslazione ad alta risoluzione ed a controllo remoto, nonostante ciò non sia, evidentemente, indispensabile per l'operazione di sincronizzazione della cavità ottica.

Le due teste sono costituite da un sistema di quattro guide cilindriche calibrate, fissate all'estremità a due piastre che, a loro volta, poggiano su due carrelli impegnati su un banco ottico a trave. La trave è a basso profilo e graduata.

Sulle quattro guide scorre per mezzo di cuscinetti a sfere cilindrici una terza piastra, alla quale è fissato, per mezzo di una doppia sospensione (gimbal) il disco portaspecchio. Gli assi di rotazione di quest'ultimo sono normali tra loro ed entrambi contenuti in un piano ortogonale all'asse del fascio. Ciascuno dei due movimenti di 'tilt' dello specchio è controllato da una vite micrometrica con una corsa di 25 mm (solidale al telaio mobile) che opera in contrapposizione con una capsula piezoelettrica. La capsula ha una contrazione totale di 40 μm ed è fissata sul telaio di riferimento. Entrambi i movimenti sono contrastati da molle che, costringendo le parti mobili a seguire gli elementi attivi, consentono di avere movimenti bidirezionali con recupero dei giochi meccanici delle viti.

Le viti micrometriche sono mosse da motori in continua e sono dotate di encoder di posizione assoluti che garantiscono la perfetta corrispondenza, entro la precisione meccanica, tra la reale elongazione della vite e quella indicata dal controllo elettronico.

Gli attuatori elettromeccanici sono collegati attraverso cavi multifilari a controllori basati su microprocessori, ciascuno dei quali comanda due movimenti lineari e può essere, a sua volta, controllato in remoto attraverso una porta standard RS232. E' previsto che un primo sistema

controlli i movimenti di 'tilt' di uno specchio, un secondo controlli l'altro specchio mentre il terzo controlla i due movimenti longitudinali. I tre sottosistemi sono, ovviamente, gestiti, in modo coordinato, da un programma che gira su un qualsiasi computer con tre porte RS232.

Le capsule piezoelettriche danno la contrazione massima con una tensione applicata di 1000 V. Se vengono comandate da alimentatori regolabili da 0 a +1000 V attraverso un ingresso di bassa tensione da 0 a +10V, e, se si suppone che questa sia generata da un DAC a 10 bit, allora, 1 bit corrisponde ad una variazione della tensione applicata alle capsule di circa 1V e la risoluzione media del movimento fine risulta di circa 40 nm.

Il sistema costituito da una vite micrometrica ed una capsula contrapposta opera con un braccio di leva di 75 mm rispetto al fulcro (vedi Figura 3) e, pertanto, la corsa angolare totale di ciascun movimento di tilt è di $\pm 16,6$ mrad. La corsa angolare di aggiustamento fine è ± 266 μ rad, il che corrisponde a traslazioni parallele dell'asse ottico della cavità di $\pm 0,9$ mm e movimenti di tilt dello stesso di $\pm 0,65$ μ m.

Il disco portaspecchi è stato ricavato da una flangia da vuoto a doppia tenuta sulle due facce in modo che il posizionamento dello specchio al centro del sistema di sospensione fosse garantito dalla precisione della lavorazione (Figura 2). Il portaspecchi chiude la cavità solo dal punto di vista ottico perché, la flangia da cui è ricavato è abbondantemente traforata per non sezionare il vuoto. La flangia portaspecchio è collegata al tubo da vuoto della cavità, avanti, ed alla finestra ottica da vuoto, dietro, da due identici soffietti a lamelle saldate ad alta deformabilità che consentono al portaspecchi i movimenti di 'tilt' imposti dagli attuatori a controllo remoto.

La presenza del vuoto anche nel soffietto posteriore ed il fatto che esso sia identico a quello anteriore è fondamentale per equilibrare le sollecitazioni sui soffietti e ridurre gli sforzi a carico degli attuatori, quando questi sono chiamati a spostare il portaspecchi dalla sua posizione di simmetria. L'ampiezza delle aperture nella flangia è importante, invece, soprattutto per consentire alle pompe da vuoto, il cui collegamento al tubo della cavità era previsto davanti alle teste, un efficace degassamento del volume dietro allo specchio.

Se l'alta impedenza sul tubo da vuoto costituita dal portaspecchi, dovesse portare ad un insufficiente degassamento delle due estremità posteriori delle teste, queste, che sotto radiazione certamente subiranno una certa sovrappressione di temperatura, potrebbero determinare un netto peggioramento locale delle condizioni di vuoto. La cosa in una macchina a fascio estratto, come è un linac, non avrebbe avuto particolare rilevanza se non ci fosse stata la complicazione costituita dalle cavità superconduttive. Queste, infatti, non possono lavorare se non in condizioni di ultra alto vuoto e subiscono danni irreversibili se interessate da rialzi di pressione anche modesti in termini assoluti. Le loro pareti sono, infatti, danneggiate dagli ioni dell'atmosfera residua che vengono fortemente accelerati dall'elevato campo elettrico presente.

Per fortuna il fenomeno del degassamento per riscaldamento sotto radiazione è maggiore nella testa portaspecchi che si trova a valle dell'ondulatore nel senso di circolazione del fascio di elettroni, che viene investita da tutto lo spettro della radiazione spontanea dell'ondulatore. Il lungo e sottile tubo di volo del fascio nella gap dell'ondulatore costituisce, infatti, una naturale ed efficace protezione contro la risalita dei prodotti del degassamento della testa a valle verso le cavità superconduttive.

Dei due soffietti fissati alla flangia portaspecchi, quello anteriore termina su una flangia che è rigidamente connessa alla struttura fissa della testa, quello posteriore, invece, termina su una flangia portafinestra connessa alla struttura della testa con lo stesso tipo di sospensione doppia (tipo ginbal) del portaspecchio. In questo caso, però, la sospensione non è controllata da

attuatori, ma da due semplici viti a passo ottico che operano, anch'esse, contro molle e sono dotate di fermi, per poter essere bloccate nella posizione desiderata (condizione di auto collimazione della radiazione riflessa).

La testa è dotata di movimenti manuali (vedi Figure 4 e 5) ad elevata risoluzione con ripristino dei giochi meccanici per poter supplire a qualunque tipo di errore nel preallineamento delle teste, anche se la possibilità di allineare le teste rispetto all'asse geometrico dell'ondulatore in condizioni di visibilità diretta rende l'operazione particolarmente semplice e priva di rischi.

Sono previsti, oltre alle possibilità consentite dai piedi calanti del sostegno, movimenti di rotazione orizzontale e verticale dell'intera struttura di ciascuna testa, sempre rispetto al centro della faccia riflettente dello specchio. La rotazione nel piano orizzontale è consentita da un fulcro sferico centrale inserito tra due piastre di anticorodal di grande spessore collegate in periferia da una vite orizzontale bloccabile in posizione. La piastra inferiore è solidale al basamento mentre quella superiore sostiene la testa attraverso due coppie di piastre fissate in posizione verticale parallelamente all'asse del fascio. In queste piastre sono state praticate delle asole ad arco di circonferenza e ciascuna delle due coppie impegna un asse orizzontale di acciaio. I due assi sono fissati anteriormente e posteriormente alla trave ottica della testa, in modo che questa, sotto la spinta di una vite azionata a mano, sia costretta ad effettuare rotazioni rigide nel piano verticale rispetto ad un fulcro virtuale posizionato al centro dello specchio.

Sono altresì possibili, la traslazione parallela della struttura, lungo una coppia di guide cilindriche su cui scorrono cuscinetti a rulli e la regolazione in quota, con un gioco di asole inclinate e viti.

In conclusione possiamo legittimamente sostenere che, in sede di progettazione della meccanica della cavità ottica SURF, nessuno aspetto, non solo fondamentale, ma anche semplicemente di comodità di operazione, è stato trascurato. Naturalmente, non intendiamo affermare che le soluzioni adottate siano le migliori possibili o, su un piano più modesto, che esse siano semplicemente adeguate ai problemi, perché questo si può soltanto dedurre da un lungo periodo di uso dello strumento in condizioni operative. E' proprio per questo motivo che saremo felici di vedere il sistema in funzione su un fascio e speriamo che il suo buon funzionamento dimostri che le scelte operate in sede di progetto erano quelle giuste.

4 - RINGRAZIAMENTI

Gi autori desiderano ringraziare i tecnici dell'Officina Meccanica della Sezione INFN di Napoli per la impeccabile realizzazione del sistema ed in particolare il Sig. Raffaele Rocco che, oltre ad aver dato un contributo fondamentale alla realizzazione di molti pezzi, ha curato l'aggiustaggio delle parti più delicate, contribuendo coi suoi suggerimenti all'affinamento del progetto.

5 - BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Castellano et al., SURF: an IR FEL with the SC linac LISA, Proceedings of 3rd European Particle Accelerator Conference, EPAC 92, Editions Frontieres (1992), p. 611
- [2] A.Aragona et al., The linear superconducting accelerator project LISA, Proceedings of 1st European Particle Accelerator Conf., EPAC, World Scientific, Singapore, 1989, p. 52.
- [3] D. Bulfone et al., FERMI (Free-Electron Radiation and Matching Instrumentation) Conceptual Design Report, Sincrotrone Trieste internal report, Aprile 1995.
- [4] R. Barbini et al., J. Phys. (Paris) 44, C1 (1983) 1.
- [5] F. Rosatelli et al., Proceedings of 1991 US Particle Accelerator Conference, p. 2760.
- [6] M. Castellano et al., Nuclear Instrum. and Meth. in Phys. Res. A296 (1990) p.161.

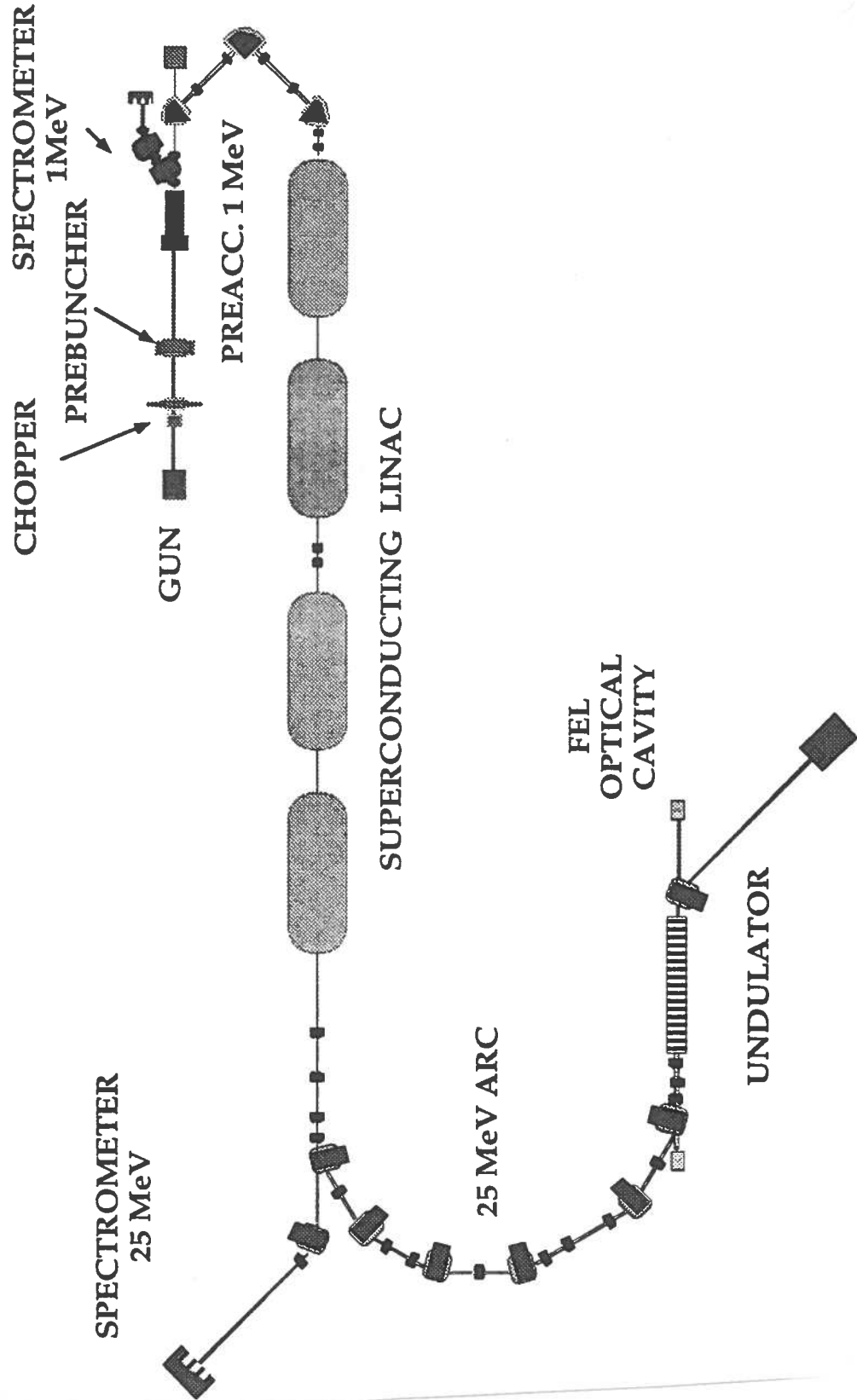


Figura 1

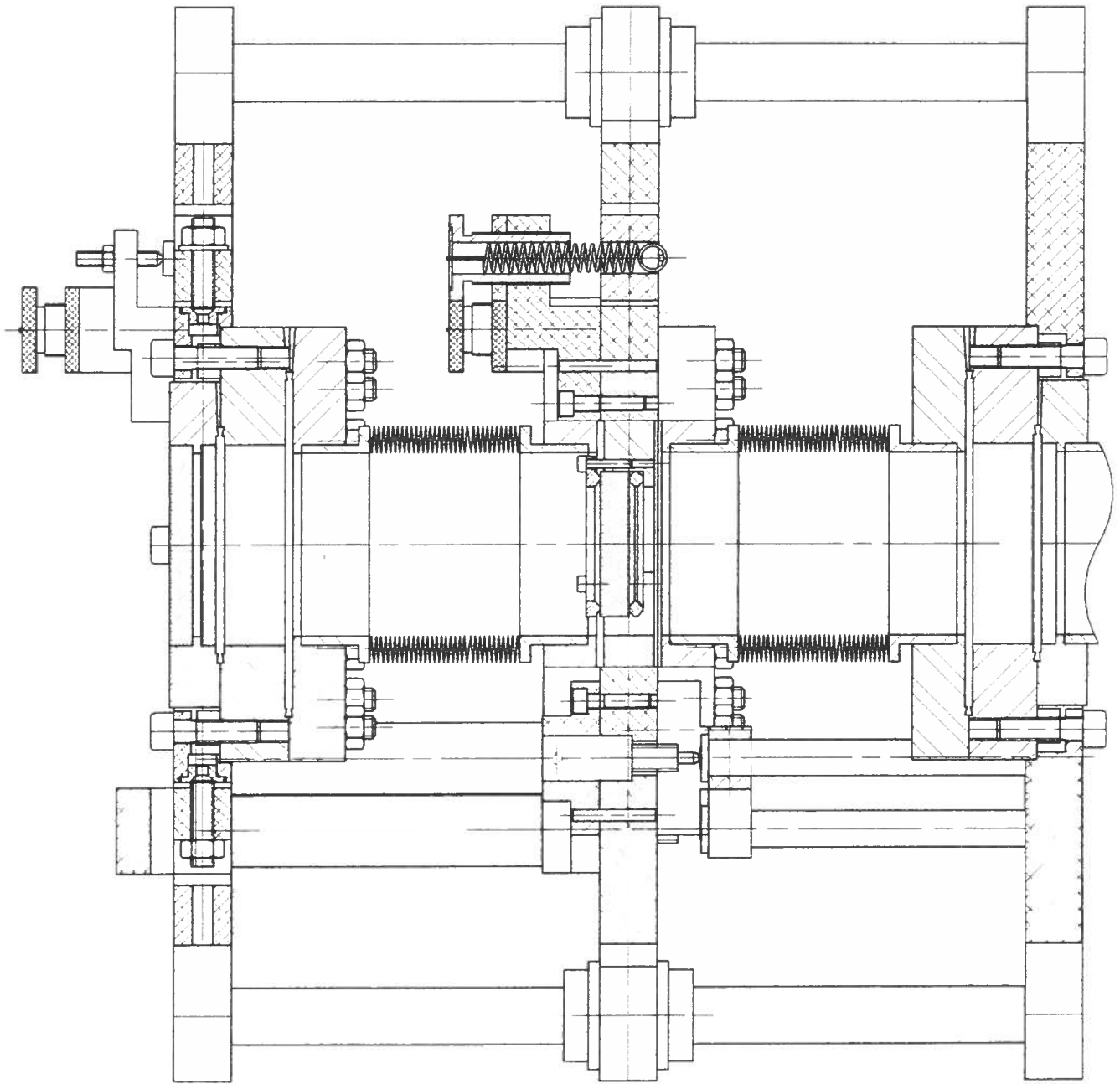


Figura 2

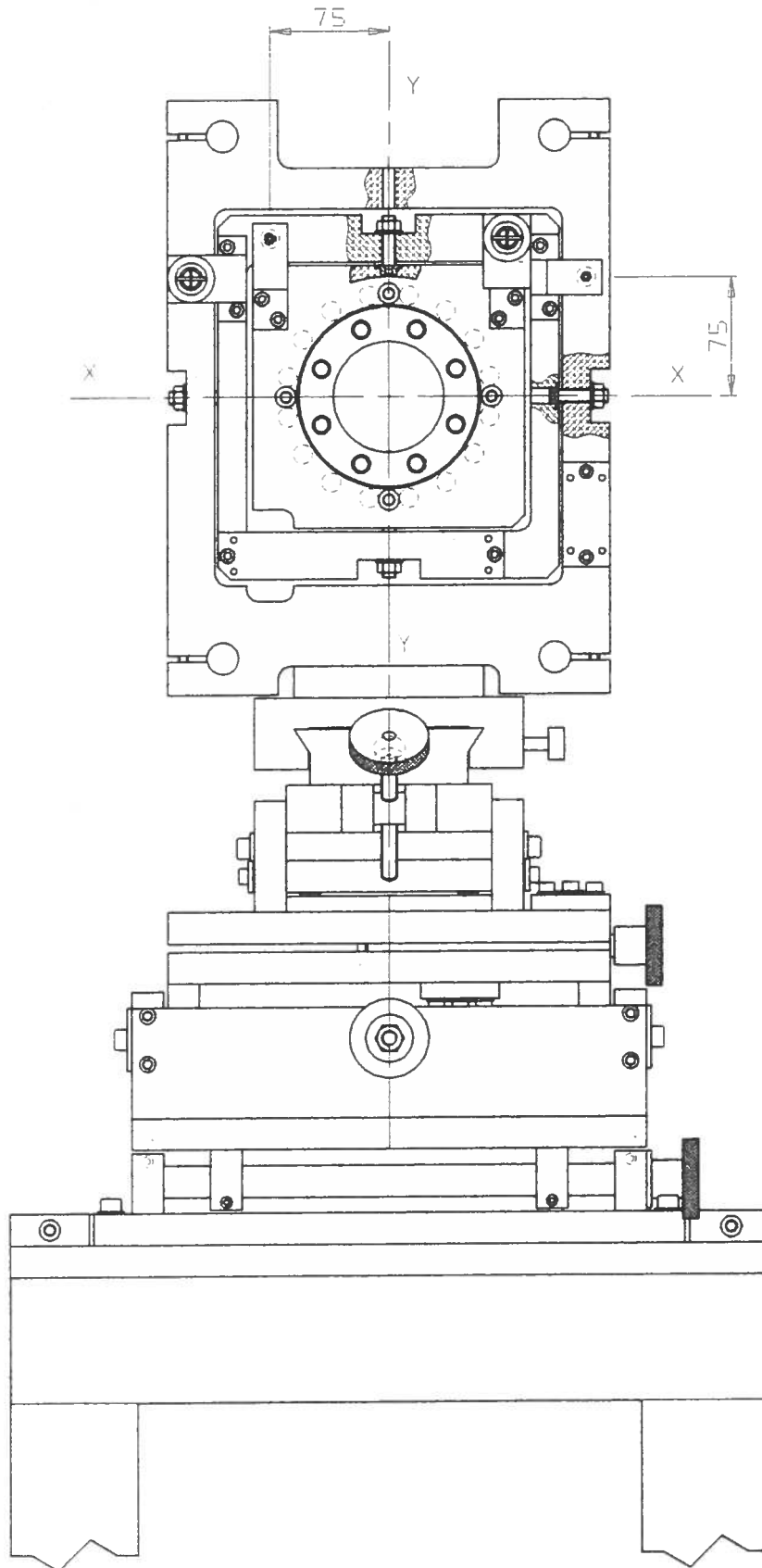


Figura 3

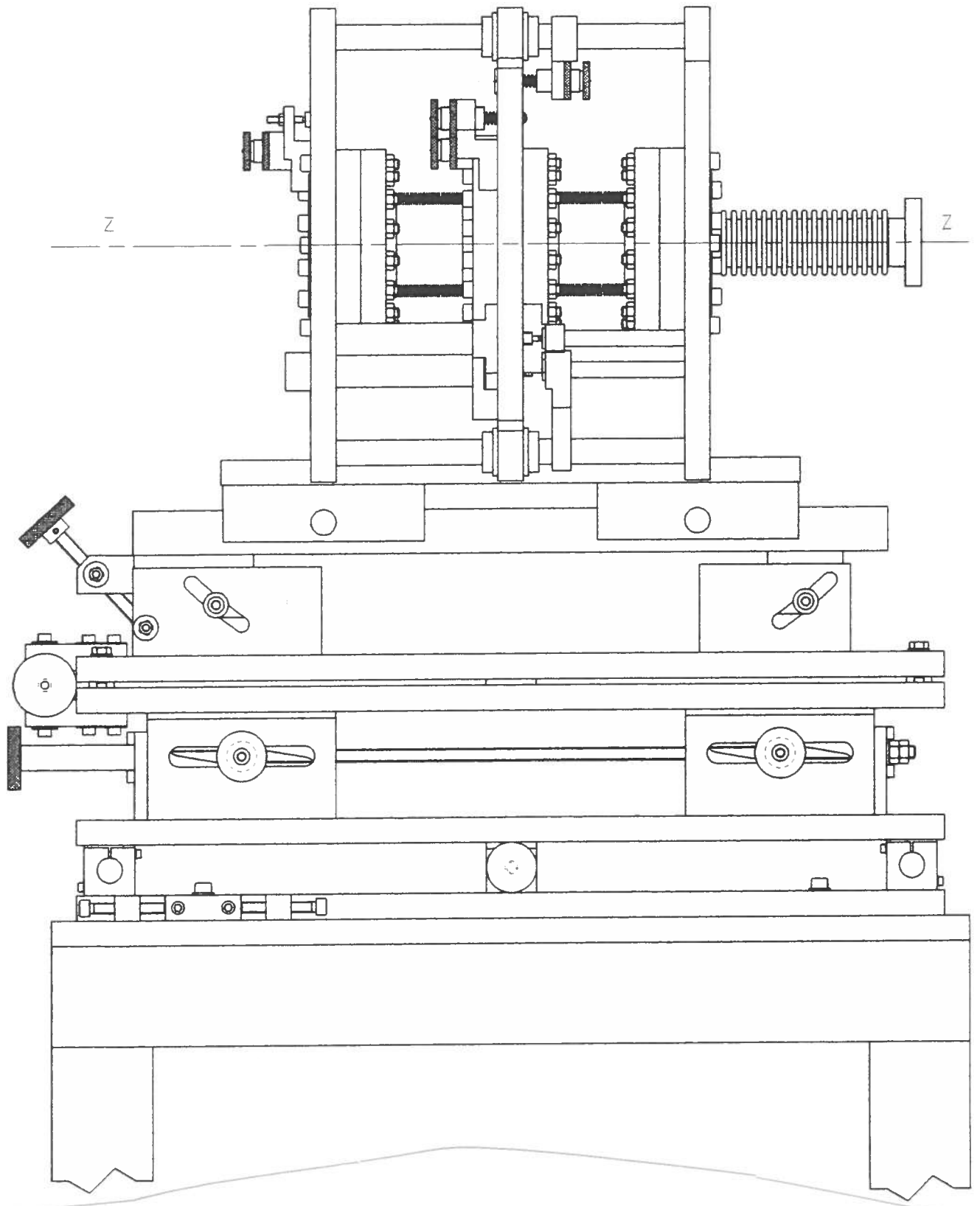


Figura 4

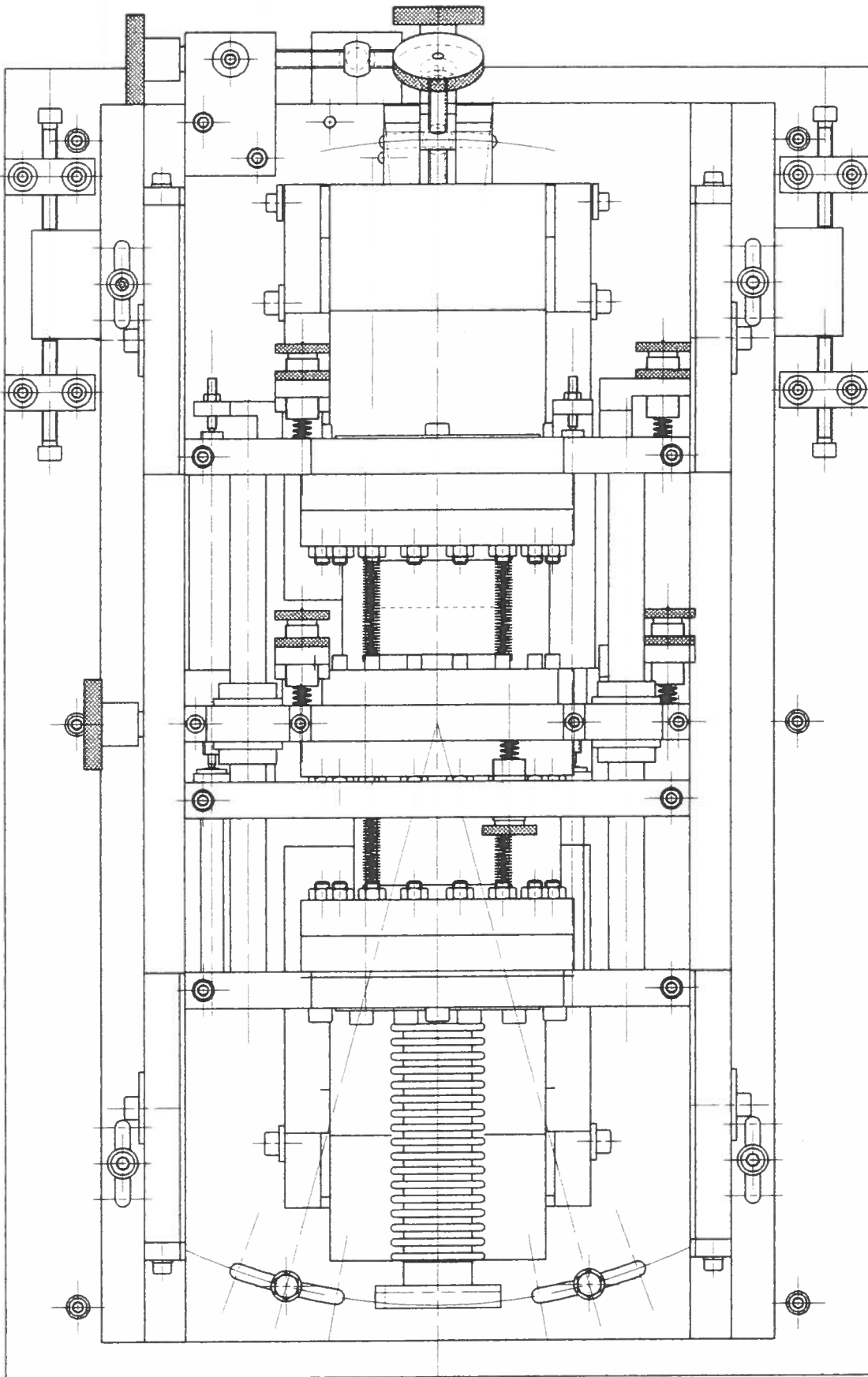


Figura 5