

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA LINHA DE LUZ COM UM
MONOCROMADOR DE GRADE TOROIDAL
PARA O LNLS

por

Paulo de Tarso Fonseca 1993

Orientador: Prof. Dr. Antonio Rubens Britto de Castro, 1993-

Este exemplar corresponde à redação final da Tese defendida pelo aluno Paulo de Tarso Fonseca e aprovada pela Comissão Julgadora.

A. Rubens B. de Castro
01 Julho 1993

Tese apresentada ao Instituto de Física Gleb Wataghin da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciências.
Campinas, 06 de Junho de 1993.

RESUMO

Uma linha de luz TGM para a faixa espectral de 12-310 eV foi construída no Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), em Campinas/SP, Brasil. Essa linha de luz é composta de dispositivos de segurança, um espelho pré-focalizador, um monocromador de grade toroidal (TGM, do inglês "Toroidal Grating Monochromator") e um espelho pós-focalizador. A linha TGM foi levada ao Center for Advanced Microstructures and Devices (CAMD), em Baton Rouge/LA, E.U.A. e recebeu luz síncrotron pela primeira vez em 19 de Outubro de 1992.

Foi feito o comissionamento da linha de luz TGM. Mediu-se o fluxo de fótons na amostra. Estimou-se a resolução espectral, a calibração absoluta em energia e a contaminação harmônica para vários comprimentos de onda, obtidos a partir de medidas de absorção em um filme fino de Alumínio.

ABSTRACT

A TGM beamline for the spectral range 12-310 eV was built at Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), Campinas SP, Brasil. This beamline consists of safety devices, a condensing mirror, a toroidal grating monochromator (TGM), and a refocussing mirror. This beamline has been assembled at Center for Advanced Microstructures and Devices (CAMD), Baton Rouge LA, U.S.A., and saw first synchrotron light on 19 October 1992.

The TGM beamline was commissioned. The photon flux at the sample was measured. TGM spectral resolution estimates, absolute energy calibration and harmonic content, at selected wavelenghts, were obtained from absorption measurements on a thin Aluminun film.

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Rubens, pelo "companheirismo" e evolução profissional e pessoal que me proporcionou.

Ao Grupo de Instrumentação VUV do LNLS (ao qual pertenço):

- Márcia Sirlene Zardin Graeff
- José Geraldo Pacheco
- José Eduardo de Andrade Verdugo
- Guilherme Bueno Fraguas.

Aos Grupos de Vácuo e Oficina Mecânica do LNLS.

Ao LNLS e ao CAMD pela oportunidade de executar plenamente este projeto.

A todos que, diretamente ou indiretamente, contribuíram para que a linha de luz TGM se transformasse em uma realidade.

À minha família

ÍNDICE

I - LUZ SÍNCROTRON	
1. Introdução:	1
2. Teoria:	3
3. Projeto LNLs:	15
II - LINHAS DE LUZ	
1. Definição:	18
2. Engenharia:	20
3. Exemplos:	
3.1. Linhas TGMs (LURE)	25
3.2. Linha de Litografia de Raios-X (CAMD)	30
III - LINHA DE LUZ TGM/LNLs	
1. Introdução:	31
2. Características Óticas:	
2.1. Monocromador TGM	33
2.2. Espelhos Focalizadores	37
3. Engenharia e Montagem:	
3.1. Front-End	42
3.1.1. Bloqueio Primário:	
- Montagem Mecânica e Atuação	45
- Vácuo	47

3.1.2. Linha de Retardo Acústico:	
- Montagem Mecânica	47
- Vácuo	49
3.1.3. Testes:	
- Vácuo	52
- Funcionamento do Front-End	52
3.2. Monocromador TGM	
3.2.1. Mecanismo:	
- Montagem	57
- Testes Preliminares	57
- Vácuo	58
3.2.2. Câmara:	
- Montagem	58
- Vácuo	60
3.2.3. Acionamento do TGM:	
- Troca das Grades	62
- Selecionando a energia	63
3.3. Espelhos Focalizadores	
3.3.1. Câmaras:	
- Montagem	67
- Vácuo	67
3.3.2. Acionadores:	
- Eixo z	68
- Ângulos ϕ e z	68
3.4. Estação de Bombeamento	72

3.5. Câmara de Amostras	
3.5.1. Projeto e Montagem:	73
3.5.2. Vácuo:	73
IV - CARACTERIZAÇÃO DA LINHA DE LUZ TGM	
1. Projeto CAMD/LNLS:	75
2. Montagem e Condicionamento:	
2.1. Posicionamento dos Componentes	79
2.2. Vácuo	82
3. Comissionamento da linha de luz TGM:	83
V - CONCLUSÕES	95
REFERÊNCIAS	97

I - LUZ SÍNCROTRON

1. Introdução:

A luz síncrotron é definida como a radiação emitida por cargas relativísticas descrevendo trajetórias circulares. (1),(2)

As principais características da radiação síncrotron (RS) já eram conhecidas desde 1912, quando G. A. Schott sistematizou-as no trabalho " Eletromagnetic Radiation and the Mechanical Reactions from it".

Na década de 40, J. Schwinger, Ivanenko e Pomeranchuk estabeleceram, de modo independente e definitivo, a teoria sobre RS.

Experimentalmente, a RS foi observada pela primeira vez, em 1946, por J. Blewett em um acelerador do laboratório da General Eletric, usado para acelerar partículas para pesquisas em física nuclear (física de altas energias). Em 1947, G. Elder observou a radiação visualmente e, após um ano de estudos, verificou as previsões teóricas em relação ao espectro e polarização da RS.(3)

Em 1956, D. Tombouliau e P. Hartman demonstraram a grande eficácia do acelerador de 320 MeV de Cornell como fonte de RS na região de ultra-violeta (UV). Em 1961, R.

Madden e K. Codling mediram as características espectrais na região de 10 - 100 eV dos gases nobres, usando o síncrotron do National Bureau of Standards, E. U. A..

Em 1962, T. Sasaki iniciou no Japão, próximo à Tóquio, pesquisas utilizando RS no Institute for Nuclear Studies, levando à criação do Grupo de Radiação Síncrotron em 1965.

Enquanto isso, em DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron), em Hamburgo, o grupo de R. Haensen iniciou pesquisas em Física de Sólidos com RS. Inúmeros grupos foram criados daí para a frente.

Nos anos 70, foram propostos os primeiros laboratórios de RS, não mais como subprodutos de aceleradores de elétrons já existentes, mas especificamente para o uso da RS em ciência e tecnologia. Houve um grande avanço no desenvolvimento de anéis de armazenamento de elétrons, motivado pelas necessidades experimentais das pesquisas pura e aplicada. Atualmente, pode-se armazenar feixes de elétrons (ou pósitrons) com energia da ordem de GeV, por várias horas.

2. Teoria: (1),(2),(4),(5),(6)

Os principais componentes de um anel de armazenamento são mostrados na figura I.2.1. Os elétrons são mantidos em uma órbita fechada através de ímãs defletores, dentro dos quais descrevem uma trajetória aproximadamente circular. Nos trechos curvos, os elétrons são acelerados e emitem a RS, perdendo assim energia. Essa energia é repostada por um campo elétrico acelerador na cavidade de rádio-frequência (RF).

Devido à grande velocidade dos elétrons (velocidade próxima à da luz), os efeitos relativísticos se tornam relevantes. Para se ter uma idéia, elétrons com energia de aproximadamente 1 GeV possuem velocidades que diferem da velocidade da luz no vácuo em apenas 0,13 ppm. Deste modo, a RS é emitida em um cone muito estreito, sendo que o eixo é a direção da velocidade instantânea do elétron.

O movimento dos elétrons dá-se no interior de uma câmara de vácuo. Isto é necessário, pois as colisões dos elétrons com os átomos do ar fazem com que o feixe de elétrons seja espalhado para fora da órbita estável, definida pela rede magnética do anel, reduzindo assim o tempo de vida (tempo necessário para que a corrente do anel caia a 1/e do valor inicial) da corrente do anel. Para um anel de armazenamento com pressão típica de funcionamento da ordem de 10^{-9} mbar (a pressão no anel sem feixe de

elétrons é usualmente duas ordens de grandeza menor), o tempo de vida é da ordem de 1 a 10 horas.

A equação que define o tempo de vida τ é:

$$[I(t_0)]/[I(t_1)] = e^{-(t_0-t_1)/\tau}$$

o que resulta:

$$\tau = (t_1-t_0)/\{\ln[I(t_0)]/[I(t_1)]\} \quad (\text{I.2.1})$$

onde:

$(t_1-t_0) \Rightarrow$ intervalo de tempo, sendo t_0 o tempo inicial e t_1 o tempo final.

$I(t_0) \Rightarrow$ corrente no anel de armazenamento no tempo t_0

$I(t_1) \Rightarrow$ corrente no anel de armazenamento no tempo t_1

Conforme mencionado anteriormente, quando elétrons relativísticos entram em um campo magnético uniforme, os mesmos descrevem uma trajetória curvilínea e emitem RS, na direção do movimento. Esta radiação fica contida em um cone com abertura bastante pequena, da ordem de aproximadamente $1/\gamma$ rad, onde:

$$\gamma = E/(m_0 \cdot c^2) \cong 1957 \cdot E(\text{GeV}) \quad (\text{I.2.2})$$

sendo E a energia do elétron, m_0 a massa de repouso do elétron e c a velocidade da luz no vácuo. Pode-se perceber que a divergência horizontal (no plano da órbita do feixe dos elétrons) fica determinada pelo trecho da órbita que o experimento consegue coletar. Isso está relacionado com os equipamentos que fazem a interface entre o anel de armazenamento e os experimentos, as chamadas linhas de luz, descritas no capítulo II.

Para um elétron relativístico em uma trajetória circular de raio ρ , a potência total média perdida é dada por:

$$P_0 = [1/(6 \cdot \pi \cdot \epsilon_0)] \cdot [(e^2 \cdot \gamma^4)/\rho^2] \quad (I.2.3)$$

sendo e a carga do elétrons, ϵ_0 a constante dielétrica do meio, e a curvatura ρ produzida por uma indução magnética uniforme B definida pela equação:

$$\rho(m) = E/(e \cdot c \cdot B) \cong 3,336 \cdot E(\text{GeV})/B(\text{T}) \quad (I.2.4)$$

Se a corrente no anel de armazenamento é I , a potência total perdida sob forma de RS é dada por:

$$\begin{aligned} P_{\text{total}}(\text{kW}) &\cong [88,47 \cdot E^4(\text{GeV}) \cdot I(\text{A})]/\rho(m) \\ &\cong 26,52 \cdot E^3(\text{GeV}) \cdot B(\text{T}) \cdot I(\text{A}) \end{aligned} \quad (I.2.5)$$

O espectro eletromagnético da RS emitida por um anel de armazenamento é caracterizado basicamente pela potência total radiada, definida pela equação (I.2.5), e pelo comprimento de onda (ou energia) crítico. A figura I.2.2 mostra os espectros de radiação emitidos por vários anéis de armazenamento em funcionamento na Europa.

O comprimento de onda crítico é o valor que divide o espectro em dois lados de igual energia, ou seja, integrando-se a energia de todos os fótons emitidos com comprimentos de onda maior que o comprimento de onda crítico (λ_C), chega-se ao mesmo resultado se integrarmos a energia para todos os comprimentos de onda menores que λ_C .

A equação que define λ_C é:

$$\begin{aligned} \lambda_C &= 12,40/E_C(\text{keV}) = [5,591 \cdot \rho(\text{m})]/E^3(\text{GeV}) \\ &= 18,65/[E^2(\text{GeV}) \cdot B(\text{T})] \end{aligned} \quad (\text{I.2.6})$$

Ainda na figura I.2.1 são indicados dois outros tipos de dispositivos para produzir RS: onduladores de alta deflexão ("wiguers") e onduladores de baixa deflexão ("undulators"). Conforme o próprio nome indica, tais dispositivos produzem uma ondulação localizada da trajetória das partículas.

"Wiguers" e "Undulators" são chamados de dispositivos de inserção e são instalados nas seções retas do anel de armazenamento de elétrons. Os dispositivos de inserção

consistem geralmente de um arranjo linear de magnetos que produzem campos magnéticos verticais constantes e alternados, fazendo com que o elétron tenha um movimento senoidal, com várias curvas "bruscas", onde uma radiação muito intensa é emitida. Há duas vantagens básicas com relação aos ímãs dipolares ("bending magnets"):

(i) Qualquer campo magnético pode ser utilizado no dispositivo de inserção, independente do campo magnético nos ímãs dipolares do anel;

(ii) Desde que se possa colocar um arranjo magnético linear extenso, para que vários "wiggles" sejam produzidos, o fluxo radiado é aumentado.

Os dispositivos de inserção são caracterizados pelo parâmetro

$$K = 0,934 \cdot B_0 \cdot \lambda_0 \quad (\text{I.2.7})$$

onde B_0 (Tesla) é o valor de pico do campo magnético senoidal e λ_0 é o período (centímetro). Mostra-se que esse parâmetro pode ser expresso como $K = \alpha \cdot \gamma$, onde α é o ângulo máximo de deflexão das partículas e γ é o inverso do ângulo característico do cone de radiação síncrotron (vide equação I.2.2).

"Undulators":

São dispositivos com campo magnético baixo (baixa deflexão), com $K \ll 1$, portanto produzindo desvios angulares

pequenos na trajetória do elétron. Os cones de radiação dos sucessivos desvios na trajetória do elétron se superpõem, produzindo, através do fenômeno de interferência, um espectro de linhas com $\Delta E/E \cong 1/N$, onde N é o número de períodos magnéticos do dispositivo. Essas linhas espectrais são localizadas em torno de uma energia fundamental e seus harmônicos. O comprimento da onda do harmônico fundamental é dado por:

$$\lambda = [\lambda_0 / (2 \cdot \gamma^2)] \cdot [1 + (K^2/2)] \quad (\text{I.2.8})$$

A partir das equações (I.2.7) e (I.2.8) vê-se que há possibilidade de sintonizar λ mudando apenas o valor de K. Na prática, muda-se K alterando-se as distâncias entre os pólos, portanto alterando-se B_0 .

"Wigglers":

Semelhantes aos "undulators", são de grande importância para altas energias, na região de raios-X duros. O campo magnético é quase 10 vezes maior do que nos onduladores de baixa deflexão, com $K \gg 1$ (alta deflexão). O movimento oscilatório provocado na trajetória dos elétrons produz um cone de radiação com λ_c maior que o do "bending magnet".

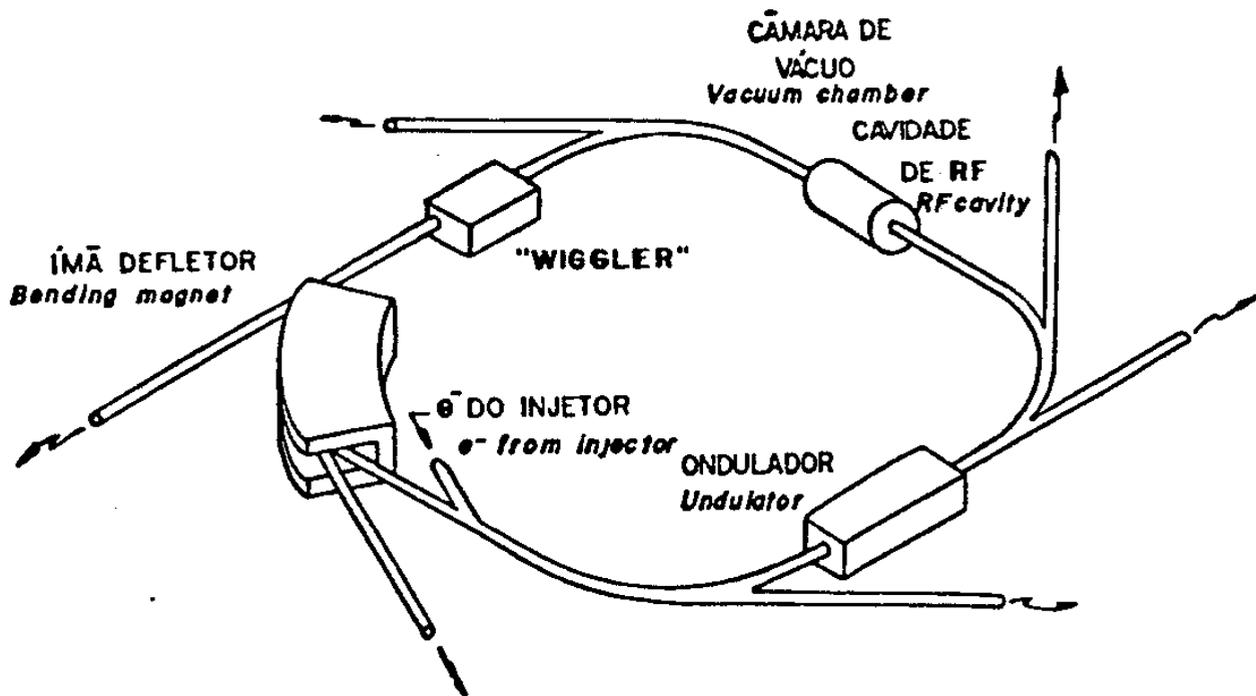


FIGURA I.2.1 - Principais componentes de um anel de armazenamento para produção de RS. Somente um dos quatro ímãs defletores é mostrado.

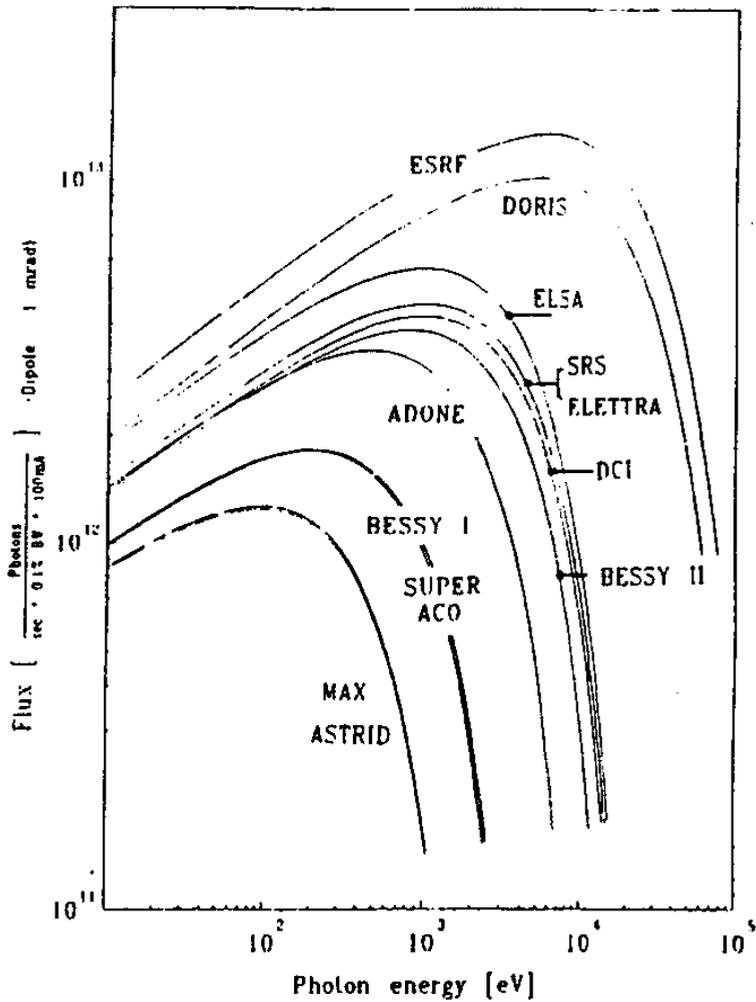


FIGURA I.2.2 - Espectro de radiação de vários anéis de armazenamento em funcionamento.

As características mais importantes da RS são:

a) Emissão focalizada no plano da órbita:

Considerando-se a órbita do feixe de elétrons no plano horizontal, tem-se radiação gerada em todas as tangentes, sendo a divergência vertical da ordem de miliradianos, ou seja, da ordem da divergência da emissão do laser.

b) Radiação branca:

O espectro de emissão é contínuo com um máximo para um comprimento de onda proporcional a ρ/E^3 , onde ρ é o raio da órbita e E é a energia do elétron (vide equação I.2.6). Para máquinas práticas, tal espectro se estende do infravermelho ($\lambda \cong 10^{-2}\text{mm}$) até os raios-X ($\lambda \cong 10^{-7}\text{mm}$).

c) Radiação de alta intensidade:

Quantitativamente, um elétron de 500 MeV em uma órbita de 1 metro irradia aproximadamente 14 keV por volta. Para um elétron de 1,8 GeV, com órbita de 4 metros, a energia irradiada é de 250 keV. Esta característica, mais a característica (a), permitem a obtenção de feixes colimados de intensidade da ordem de 10^3 vezes a intensidade das fontes convencionais na região dos raios-X e de ultravioleta.

d) Radiação polarizada:

A radiação emitida pelo elétron no plano da órbita é 100% polarizada, com vetor campo elétrico paralelo ao plano da órbita. Acima e abaixo deste plano, a radiação é elipticamente polarizada, sendo que o grau de polarização é determinado pelo ângulo de observação a partir do plano do feixe.

e) Possibilidade de ampliação do espectro:

Na equação (I.2.4), tem-se que ρ corresponde ao raio de curvatura local da órbita. Os "wigglers" podem ser incluídos nos anéis de armazenamento para produzirem ondulações localizadas na trajetória dos elétrons em uma região da órbita. Com isso, o espectro para comprimentos de onda menores (energias maiores) é aumentado. Trata-se de um método relativamente simples que permite obter um espectro bem mais amplo, atingindo-se a faixa dos raios-X duros.

f) Estrutura temporal:

Os elétrons circulam em pacotes "compactos" ("bunches") no anel de armazenamento, em sincronismo com a RF aplicada para repor a energia perdida na emissão de RS. O comprimento do "bunch" é tipicamente de 50ps à 1ns. A radiação é emitida em "flashes" curtos, que duram o tempo de passagem do "bunch" e tem uma intensidade bem estável para todos os pacotes. Para alguns experimentos, tal frequência é um fator importante.

Dentre as inúmeras aplicações da RS, pode-se mencionar: (2),(3),(7)

- Espectroscopia de raios-X:(Cristalografia,EXAFS,etc)

O conjunto de características da RS permitem estudos que são impossíveis com outras técnicas. Fenômenos estruturais cinéticos que ocorrem em tempos da ordem de segundos podem ser estudados com RS, já que se pode obter diagramas de difração de até 10^{-3} segundos.

A diminuição dos tempos necessários para a obtenção de diagramas de proteínas cristalizadas permite o estudo de muitos tipos que não resistem aos tempos envolvidos em experiências utilizando-se fontes convencionais.

Grande ênfase deve ser dada à técnica de EXAFS ("Extended X-Ray Absorption Fine Structure"), a qual permite o estudo preciso do número de coordenação, natureza e distância dos primeiros vizinhos de átomos de impurezas em sólidos cristalinos e amorfos. Pode-se fazer este mesmo estudo na superfície dos materiais.

- Espectroscopia de ultra-violeta:

Devido ao caráter contínuo e intenso do espectro de UV, muitas pesquisas podem ser desenvolvidas para o estudo de átomos e moléculas para as quais não existiam fontes de radiação com energias correspondentes à energias de excitação. O estudo da evolução de átomos e moléculas em função do tipo de excitação dá informações importantes e

impossíveis, em muitos casos, de se obter sem este tipo de fonte.

A excitação de um sólido mediante RS conduz à emissão de fótons, elétrons e íons ou átomos. O estudo dos diferentes produtos corresponde à espectroscopia ótica, de fotoemissão e dessorção iônica ou atômica fotoestimulada, respectivamente.

- Tecnologia: (Litografia, etc)

A técnica de litografia de raios-X consiste em produzir uma figura de relevo em um filme fino de polímero, após expô-lo à radiação através de uma máscara. Os componentes básicos consistem de uma fonte de raios-X (moles) que incidem em uma máscara feita de um substrato semi-transparente para esta radiação, sendo que a figura desejada existe em um filme fino altamente absorvente aos raios-X.

A grande vantagem do uso da RS neste processo está na sua grande intensidade e paralelismo do feixe, além de que o espectro branco da RS permite a seletividade do comprimento de onda mais adequado às propriedades específicas da máscara. Existe uma série de outras vantagens, como a área de seção reta do feixe, que é muito maior que na fonte convencional.

3. Projeto LNLS:

O Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) tem como objetivo construir uma fonte de luz síncrotron, que será aberta à comunidade científica, para aplicações em Física, Química, Ciência dos Materiais, etc⁽⁸⁾. O projeto inclui a construção de um anel de armazenamento de elétrons, um sistema de injeção e a instrumentação para as diversas aplicações (linhas de luz e estações experimentais).

O anel de armazenamento do LNLS têm os seguintes parâmetros: $E = 1,15$ GeV, $B = 1,4$ Tesla, $I = 100$ mA, $\lambda_C = 10$ Angstroms e $P = 5.65$ kW, sendo o espectro distribuído na região do ultra-violeta de vácuo e raios-X moles. ⁽⁹⁾

Ao contrário de várias fontes síncrotron já existentes, o LNLS optou por aumentar a energia dos elétrons no próprio anel de armazenamento. Com isso, eliminou-se o anel intermediário ("Booster") e a energia dos elétrons será elevada de 100 MeV (quando entram no anel de armazenamento, provenientes do sistema de injeção) para 1,15 GeV.

A figura I.3.1 mostra o espectro de radiação síncrotron que será emitido pelo anel de armazenamento do LNLS.

A figura I.3.2 mostra a rede magnética do anel que está sendo construído pelo LNLS. Também pode-se observar a linha de luz que contém o monocromador de grade toroidal, o

TGM (do inglês, "Toroidal Grating Monochromator"), cujo projeto e execução é o tema central deste trabalho. Os detalhes desta linha de luz são discutidos no capítulo III.

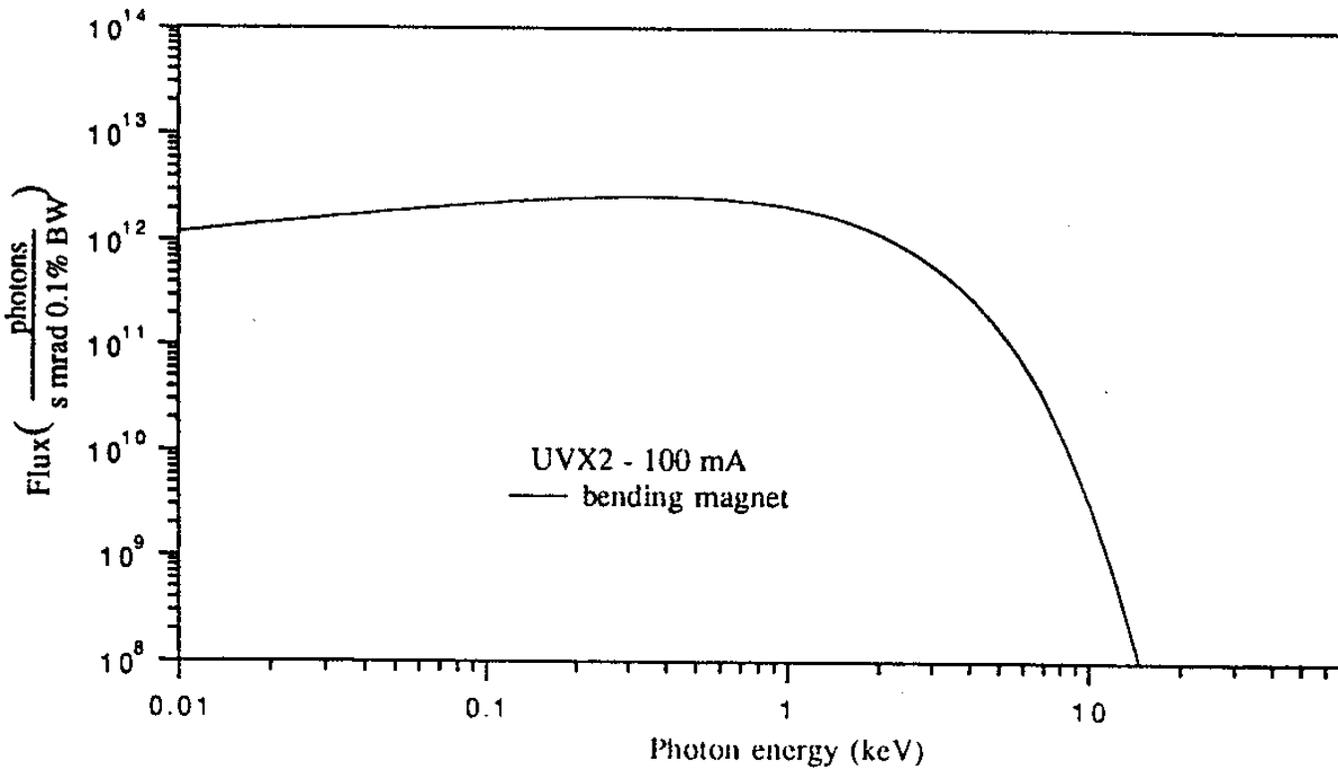


FIGURA I.3.1 - Espectro de radiação emitido pelo anel de armazenamento do LNLS.

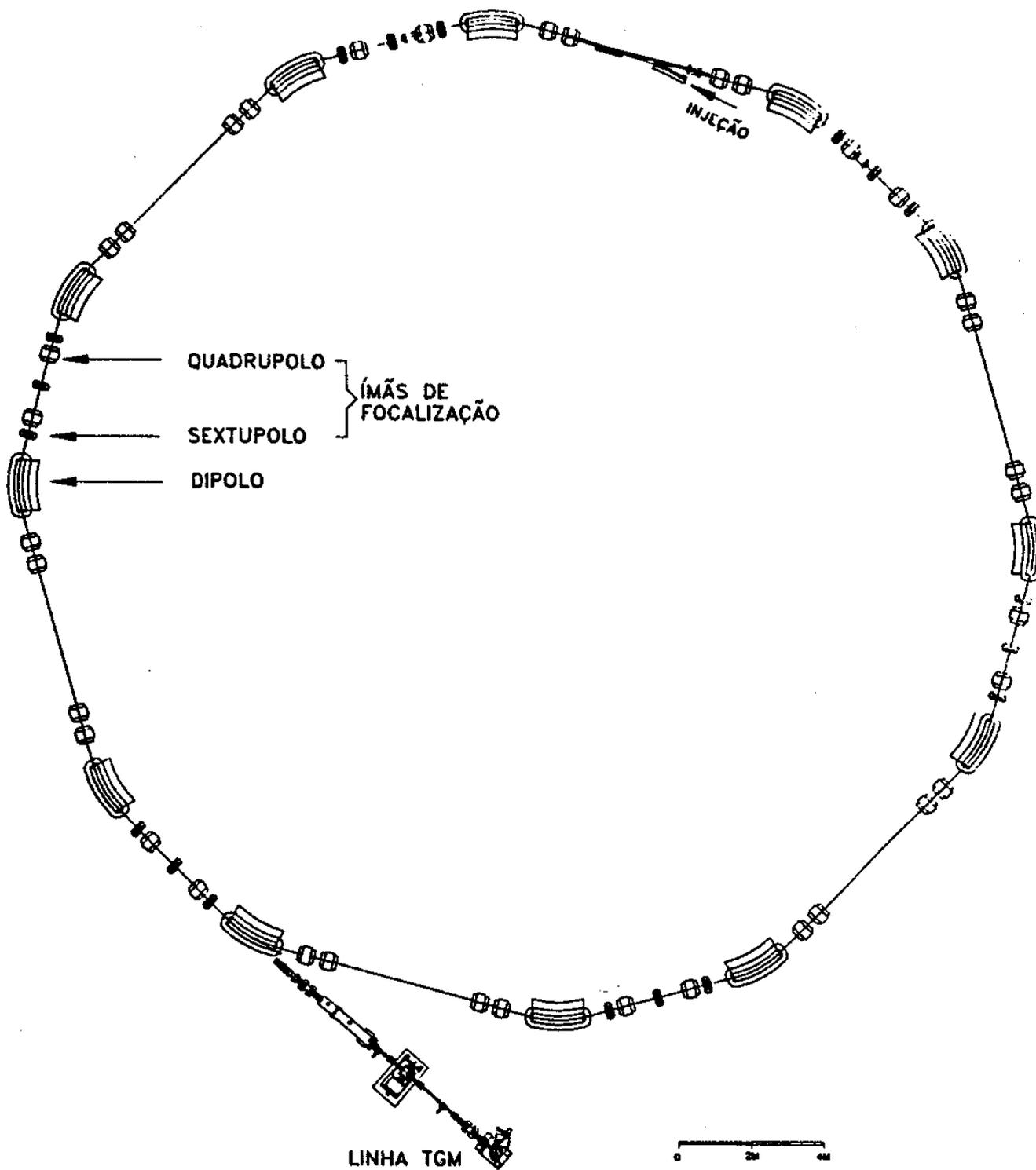


FIGURA I.3.2 - Rede magnética do anel do LNSL, com a linha de luz TGM.

II - LINHAS DE LUZ

1. Definição:

De acordo com o que foi descrito no capítulo I, a RS é produzida por elétrons que percorrem uma trajetória circular. A órbita corre perto do centro de uma câmara de vácuo de formato "toroidal". Os elétrons são mantidos nessa órbita por campos magnéticos. A energia perdida por radiação é reposta por campos elétricos oscilantes de rádio-frequência. Esse conjunto constitui o anel de armazenamento.

Sabe-se que não há materiais sólidos apropriados para janelas de ultra-alto vácuo (UHV), transparentes para fótons na faixa de 12 eV a 4000 eV (faixa espectral chamada de ultravioleta de vácuo e raios-X moles)⁽¹⁰⁾. Portanto, os dispositivos óticos e a câmara onde o usuário fará as suas experiências devem ser um prolongamento da câmara de vácuo do anel de armazenamento de elétrons. Tal prolongamento é chamado de linha de luz.

Uma linha de luz compreende os equipamentos necessários para:

- a) Conduzir o feixe de fótons do anel de armazenamento de elétrons até a câmara experimental do usuário;
- b) Monocromatizar e colimar essa radiação;

c) Preservar as condições de UHV no anel em caso de ruptura do vácuo na câmara experimental;

d) Proteger o usuário da radiação ionizante, caso haja problemas acidentais.

2. Engenharia:

Dependendo da região espectral de interesse, uma linha de luz pode ser de maior ou menor complexidade.

Basicamente, os dispositivos de uma linha de luz podem ser agrupados em três conjuntos:

1) "Front-end":

De maneira geral, o "front-end" é composto por um bloqueio primário de radiação, proteção (blindagem) contra os raios gamas produzidos por impacto acidental de elétrons no bloqueio primário de fótons, válvulas de vácuo com acionamento rápido para o caso de perda de vácuo na estação experimental, sensores rápidos de aumento de pressão e uma linha de retardo acústico, para retardar a onda de pressão em caso de acidente.

2) Componentes óticos:

Podendo ser da forma mais variada possível, tal conjunto consiste basicamente de monocromadores, fendas e espelhos. O "modelo" ótico da linha é determinado pela finalidade de utilização. Todos os componentes necessitam estar em UHV (pressão melhor que 1.10^{-8} mbar), principalmente para experimentos envolvendo UV. Para experiências com raios-X, o vácuo na linha de luz pode estar na faixa de alto vácuo (pressão entre 1.10^{-4} mbar a

1.10^{-8} mbar). Pode-se usar janelas (por exemplo, de Berílio) que isolam o UHV do anel do vácuo da linha.

Para selecionar uma faixa estreita no espectro branco de luz síncrotron (ou monocromatizar a luz síncrotron) podem ser usadas grades de difração nos modos de reflexão ou de transmissão (11). As grades de transmissão não se tornaram populares devido à dificuldade de sustentar, no espaço livre, um conjunto suficientemente grande de filamentos com diâmetros nanométricos e espaçamentos submicrométricos.

A figura I.2.1 mostra a geometria para o uso de uma grade de difração no modo de reflexão. A equação da grade é:

$$\text{sen } \alpha + \text{sen } \beta = n.\lambda/d \quad (\text{II.2.1})$$

com $n = \dots -2, -1, 0, +1, +2 \dots$ onde:

λ => comprimento de onda difratado;

d => espaçamento entre sulcos;

α => ângulo de incidência;

β => ângulo de difração;

n => ordem de espectro.

A equação (II.2.1) pode ser expressa também da seguinte maneira:

$$\text{sen } \alpha + \text{sen } \beta = n.\lambda.N \quad (\text{II.2.2})$$

onde $N = 1/d$ é o número de sulcos por unidade de comprimento.

Pela equação (II.2.2) percebe-se que para α fixo, β depende de λ e, conseqüentemente, a luz é dispersa pela grade. Para cada valor possível de n obtém-se um espectro.

Quando $n = 0$, obtém-se todos os comprimentos de onda na mesma direção, pois não há dispersão em ordem zero.

A resolução espectral, quando α e d são mantidos fixos, é calculada diferenciando-se a equação da grade. O resultado é:

$$d\lambda/d\beta = (d \cdot \cos\beta)/n \quad (\text{II.2.3})$$

A difração de Bragg em monocristais de Si, SiO₂, Ge, e alguns outros compostos orgânicos ou inorgânicos é rotineiramente usada para selecionar comprimentos de onda menores do que 3 Angstroms (energias maiores do que 4 keV). É interessante destacar que uma grade de difração ideal reflete (em diferentes direções) todas as componentes espectrais do feixe incidente. Mas, na reflexão de Bragg por um cristal ideal, ao contrário da grade, todas as componentes espectrais são absorvidas, exceto aquelas dentro de uma estreita faixa ("curva de Darwin-Prins") (12) aproximadamente centrada no comprimento de onda que satisfaz a equação de Bragg:

$$2.d.\text{sen}\theta = n.\lambda$$

(II.2.4)

onde: $n \Rightarrow$ ordem de reflexão;

$\theta \Rightarrow$ ângulo de incidência;

$d' \Rightarrow$ distância entre planos adjacentes no cristal;

$\lambda \Rightarrow$ comprimento de onda difratado.

Isso significa que o cristal tem uma carga térmica aproximadamente igual à potência do feixe incidente.

c) Estação Experimental:

Geralmente confeccionada pelo usuário, a estação inclui a câmara de amostra e os aparatos de manipulação do material a ser analisado, mais o sistema de detecção. Dependendo da experiência a ser realizada, as estações experimentais dos diversos usuários são intercambiáveis, ou seja, há uma válvula de vácuo antes da câmara de amostra. Fechando-se tal válvula, pode-se trocar as câmaras dos usuários sem maiores perturbações no vácuo do restante da linha de luz. A válvula somente é reaberta após a garantia de que não haverá aumento da pressão na seção ótica.

A maior dificuldade no projeto e construção de uma linha de luz está em manter a qualidade do vácuo, que deve permanecer abaixo de 1.10^{-9} mbar. Passantes elétricos e manipuladores dos mecanismos internos da linha de luz devem

ter confiabilidade em UHV e precisão mecânica suficiente para o propósito de utilização.

Maiores detalhes na engenharia de uma linha de luz são dados no capítulo III, onde é descrito uma linha de luz construída no LNLS.

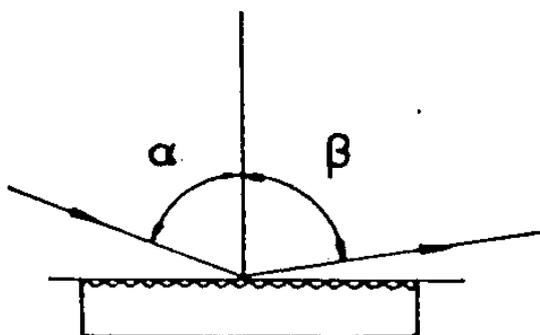


FIGURA II.2.1 - Geometria para a grade de difração.

3. Exemplos:

Existem mais de 20 laboratórios para produção de RS em todo o mundo. Obviamente, cada anel de armazenamento comporta inúmeras linhas de luz, entre as quais estão as citadas a seguir:

3.1. Linhas TGMS, no LURE (13),(14)

O Laboratoire pour l'Utilisation du Rayonnement Electromagnétique (LURE), em Orsay, França, possui dois anéis de armazenamento: Super ACO e DCI, com energias de 800 MeV e 1,85 GeV, respectivamente.

Atualmente, existem seis linhas TGMS montadas e em funcionamento no Super ACO. As faixas espectrais destas linhas de luz compreendem de 8 eV (1500 Angstroms) à 400 eV (30 Angstroms), sendo que algumas delas apresentam superposição. Cada linha de luz possui um monocromador de grade toroidal, que contém até três grades, intercambiáveis em UHV. Basicamente, o que muda em cada linha é o domínio espectral e a resolução.

A figura II.3.1 mostra o TGM 2,5m montado e em funcionamento no Super ACO. 2,5m é a distância entre as

fendas de entrada e saída (1m da fenda de entrada ao monocromador e 1,5m do monocromador à fenda de saída).

A figura II.3.2 mostra uma estação experimental para realização de espectroscopia de fotoelétrons, montada na linha TGM 2,5m. Essa estação é removível.

Na figura II.3.3 tem-se o monocromador da linha TGM 10m.

Tanto a linha TGM 2,5m quanto a TGM 10m possuem três grades de difração (por reflexão) intercambiáveis em UHV.

A tabela II.3.1 mostra algumas características óticas destas linhas.

LINHA DE LUZ:	GRADES (sulcos/mm)	DOMÍNIO ESPECTRAL(eV)	DISPERSÃO MÉDIA(Å/mm)
TGM 2,5m	2400	100-40	0,85
	1200	50-20	1,70
	600	25-10	3,40
TGM 10m	1800	700-460	0,08
	1200	460-310	0,12
	800	310-200	0,18

TABELA II.3.1 - Algumas características óticas das linhas TGM 2,5m e TGM 10m no LURE.

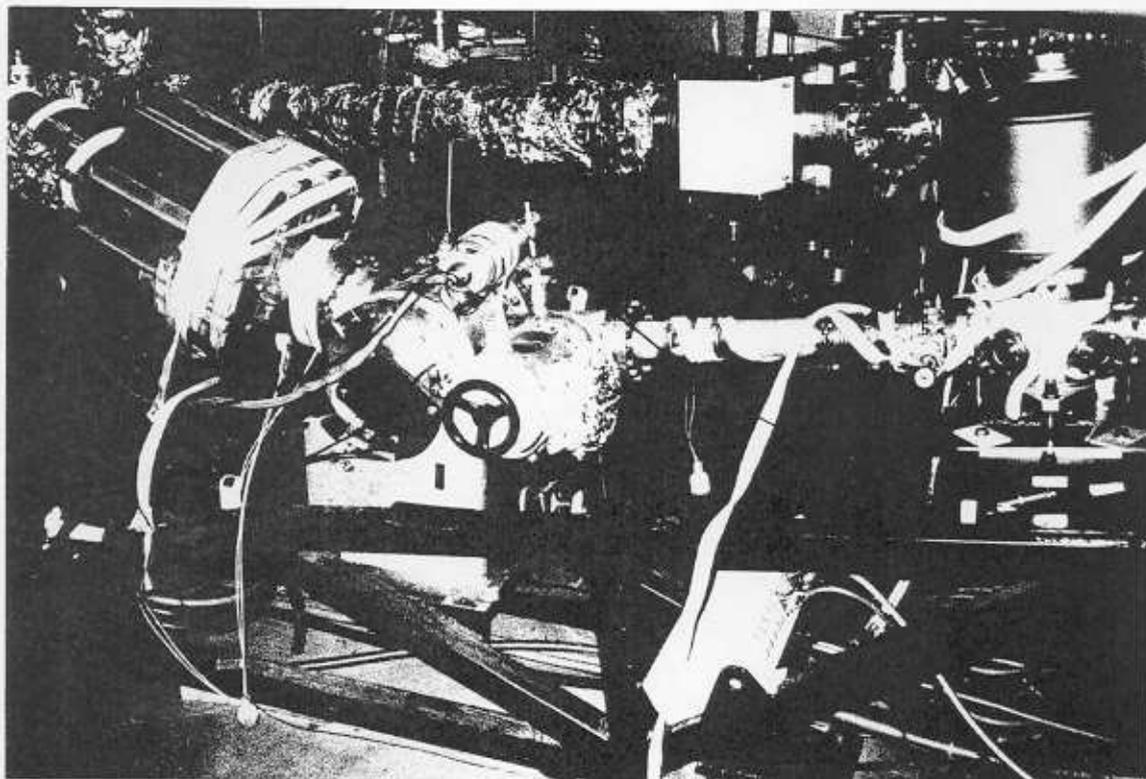


FIGURA II.3.1 - Monocromador TGM 2,5m montado no Super
ACO, LURE.

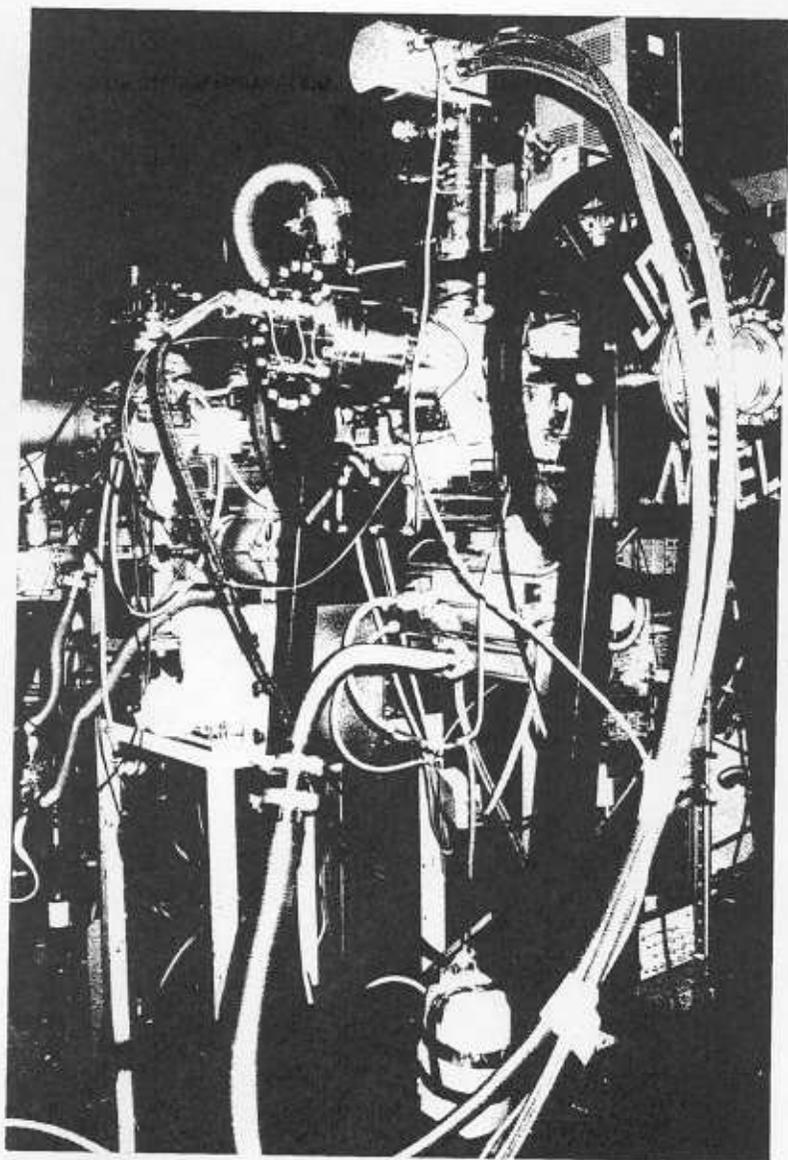


FIGURA II.3.2 - Estação experimental montada na linha
TGM 2,5m, LURE.

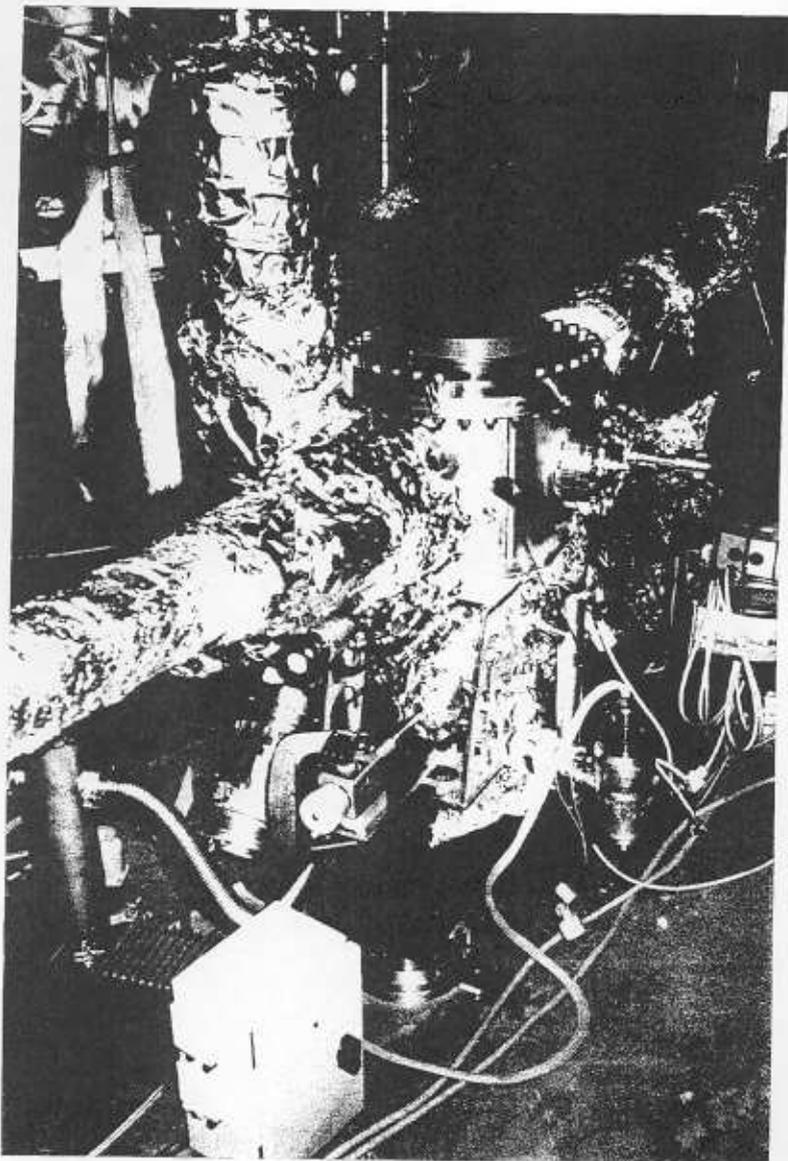


FIGURA II.3.3 - Monocromador TGM 10m, no LURE.

3.2. Linha de Litografia de Raios-X, no CAMD (15)

No Center for Advanced Microstructures and Devices (CAMD), laboratório síncrotron pertencente à Universidade do Estado de Louisiana, na cidade de Baton Rouge, Estados Unidos, encontra-se em fase avançada de montagem uma linha de luz para realização de litografia de raios-X (vide capítulo I). A linha de luz, incluindo o front-end, é mostrada na figura II.3.4.

O domínio espectral desta linha de luz é de 800 eV à 1800 eV. A área iluminada para a realização do trabalho litográfico é 65mm x 25mm, sendo a uniformidade de iluminação da ordem de mais ou menos 1,3%.

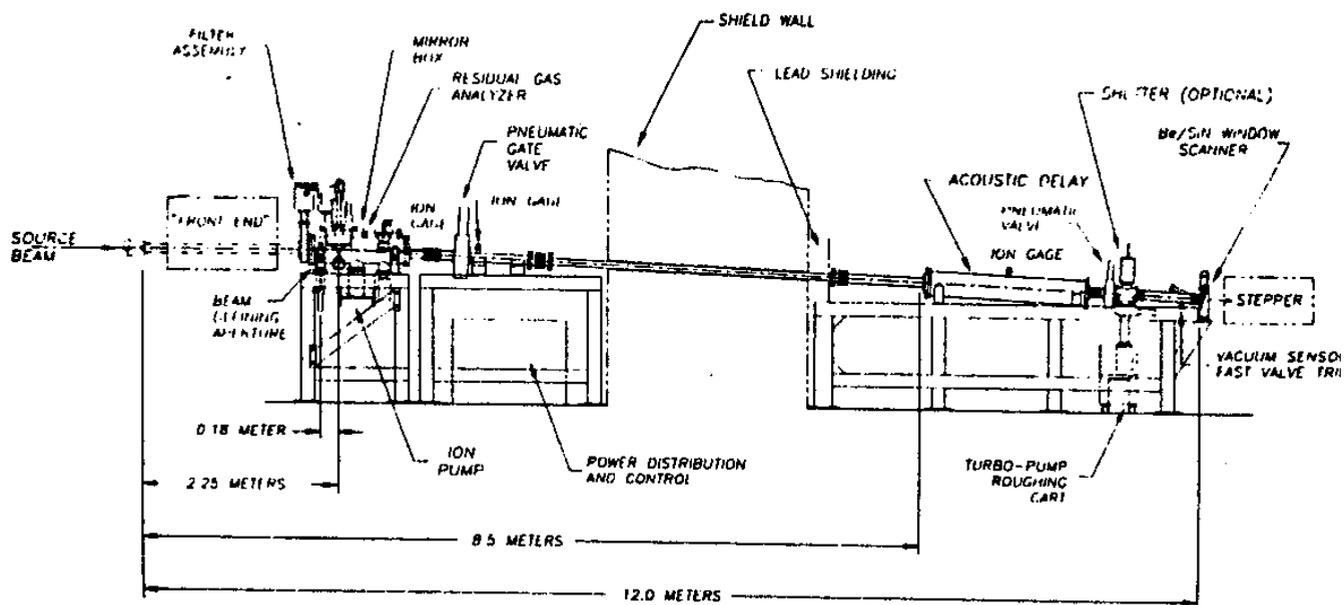


FIGURA II.3.4 - Linha de Litografia de Raios-X, no CAMD.

III - LINHA DE LUZ TGM/LNLS:

1. Introdução:

No Laboratório Nacional de Luz Síncrotron foi projetada e construída uma linha de luz para ultra-violeta de vácuo, na faixa de 12eV - 310eV, com um TGM ("Toroidal Grating Monochromator") e espelhos toroidais⁽¹⁶⁾. A escolha de um TGM deveu-se aos seguintes parâmetros⁽⁷⁾:

a) Os primeiros propósitos científicos enviados pelos usuários ao LNLS, requerendo alto fluxo e média resolução;

b) Disponibilidade de grades de difração com razoável performance ótica, apesar de resolução limitada;

c) Simplicidade mecânica para sintonizar a energia desejada na câmara de amostra, além do fato das direções de entrada e saída do feixe de luz no monocromador serem fixas.

A figura III.1.1 mostra a linha de luz TGM montada no LNLS, com os dispositivos de segurança, espelhos focalizadores, monocromador TGM, fendas e câmara de amostra.

Não há janelas entre a fonte síncrotron e a amostra, pois nenhum material sólido conhecido é transparente na faixa espectral de interesse. Toda a linha de luz fica sob

vácuo de 10^{-10} mbar⁽¹⁷⁾. Procedimentos de limpeza padrão⁽¹⁸⁾ e montagem para UHV foram adotados para que toda a linha TGM ficasse livre de hidrocarbonetos.

O fluxo de fótons esperado ($2 \cdot 10^{12}$ fótons/seg, 0,1% de banda passante @ 1,15GeV, 0,1A), faixa espectral (12eV - 310eV) e resolução ($E/\Delta E \cong 500$ a 1000) são adequados à vários experimentos nas áreas da Química (reações foto-induzidas em fase gasosa, fotoemissão em sólidos e em gases) e da Física (fotoemissão, fluorescência de raios-X, etc).

Já que o equipamento em questão é bastante complexo e dispendioso, deveria se óbvio que ele é resultado do trabalho de um grupo de pessoas e não apenas do autor da tese. Mais ainda, contribuíram decisivamente outros grupos do LNSL, alguns deles mencionados nos "Agradecimentos", e toda a infra-estrutura do LNSL, sem a qual não haveria hoje resultados a mostrar.

Sendo assim, cabe esclarecer o papel do autor neste trabalho:

Ele participou do projeto de vários componentes; tomou iniciativas para detalhar e testar a maioria desses componentes, escrevendo, quando necessário, pacotes de software para acionamento de dispositivos e aquisição de dados; integrou todos os componentes, certificando-se que exigências mecânicas, de UHV, de controle digital e de alinhamento ótico fossem satisfeitas.

Finalmente, participou ativamente de todas as medidas feitas nessa linha de luz pela equipe brasileira, e de algumas medidas feitas pela equipe de Física de Superfícies da Louisiana State University.

2. Características Óticas:

2.1. Monocromador TGM

As grades toroidais foram inicialmente propostas por Haber⁽¹⁹⁾. Grades toroidais confeccionadas holograficamente são estudadas com grande interesse, pois os parâmetros de gravação podem ser otimizados para minimizar as aberrações dentro da faixa espectral de interesse⁽²⁰⁾.

Para a utilização no monocromador TGM foram compradas, da Jobin Yvon (França), três grades toroidais com sulcos retangulares confeccionadas holograficamente. Tal formato dos sulcos diminui a difração de segunda ordem e atenua fortemente a difração de terceira ordem. O custo disso é a pequena perda na eficiência de primeira ordem.

As especificações óticas do monocromador TGM são mostradas na tabela III.2.1.

Conforme se pode ver na figura III.1.1, o monocromador TGM é precedido e seguido por espelhos focalizadores. O feixe "branco" de luz síncrotron é colimado pelo espelho M1

na fenda de entrada e chega ao TGM, onde sofre dispersão espectral. Uma banda espectral de largura ΔE passa pela fenda de saída e é refocalizada pelo espelho M2 sobre uma amostra situada no centro da câmara experimental.

A linha TGM foi projetada para ter uma aceitação angular de entrada de 21 mrad horizontal x 3 mrad vertical.

A figura III.2.2 mostra a ótica da linha de luz TGM.

DOMÍNIO	40- 120 Å (310-100eV)
ESPECTRAL:	120- 360 Å (100- 35eV)
	360-1000 Å (35- 12eV)
DISTÂNCIA	Entrada: 1001.6 mm
FOCAL:	Saída: 1414.3 mm
DESVIO DO FEIXE:	162 graus
GRADES:	Jobin Yvon 540.00.200 (1800s/mm)
	Jobin Yvon 540.00.210 (600s/mm)
	Jobin Yvon 540.00.220 (200s/mm)
RESOLUÇÃO	melhor que 0,1 Å (40-120 Å)
ESPECTRAL:	melhor que 0,3 Å (120-360 Å)
	melhor que 1,1 Å (360-1000 Å)
ACEITAÇÃO ANGULAR:	30 mrad horiz x 14 mrad vert
DISPERSÃO:	30,2 Å/grau (grade 1800s/mm)

TABELA III.2.1 - Especificações óticas do monocromador TGM.

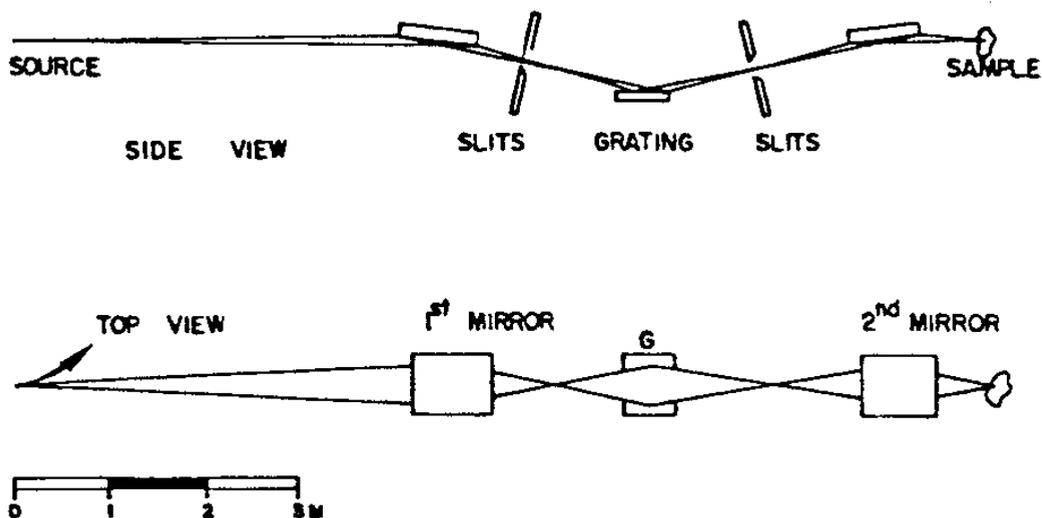


FIGURA III.2.2 - Ótica da linha TGM.

De acordo com as informações fornecidas pela Jobin yvon(21), a resolução espectral mostrada na tabela III.2.1 pode ser obtida se ajustarmos as fendas de entrada e saída com uma largura passante de 200 micra, sendo que há perda substancial do fluxo. Para as fendas ajustadas em 600 micra, a perda de fluxo é desprezível, porém a banda passante aumenta para 0,5 Angstrom (grade com 1800s/mm) e 1,5 Angstrom (grade com 600s/mm).

2.2. Espelhos Focalizadores

Os espelhos são utilizados para colimar a luz síncrotron. O espelho pré-focalizador, utilizado na linha TGM, colima o feixe na fenda de entrada do monocromador, enquanto o espelho pós-focalizador colima o feixe na amostra.

Para energias acima de algumas dezenas de eV, ocorre a diminuição significativa da refletividade quando a incidência aproxima-se da normal, qualquer que seja o material que recubra o espelho. Daí, surge a necessidade de se trabalhar com ângulos de incidência rasante. A figura III.2.3 mostra a refletividade do ouro para a faixa espectral de interesse em função dos ângulos de incidência. Esse gráfico foi computado pelo programa SHADOW(22) (software de traçados de raios). Pode-se observar claramente a diminuição da refletividade para altas energias e ângulos (entre o feixe e o plano do espelho) maiores.

Reflectivity of Gold 18.85 g/cm³

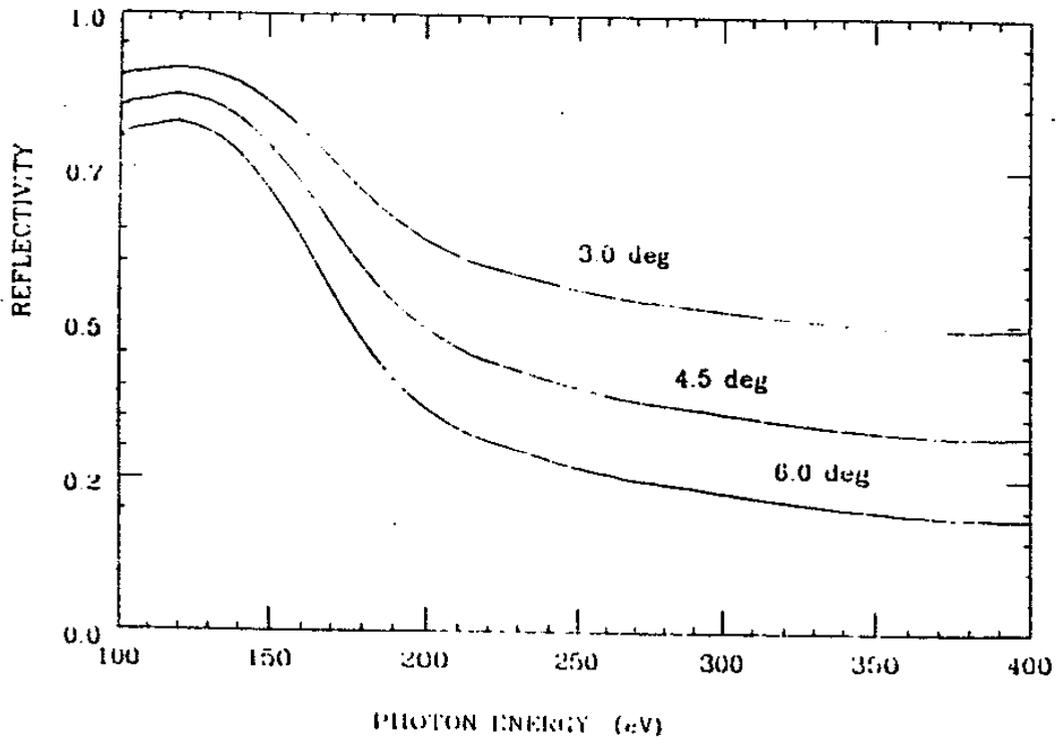


FIGURA III.2.3 - Refletividade do ouro em função da energia e ângulo de incidência.

O acabamento da superfície dos espelhos também influi na refletividade. Chamando-se θ o ângulo de incidência, λ o comprimento de onda, z a rugosidade RMS e R_0 a refletividade de uma superfície ideal coberta por um material recobridor, a refletividade é dada por:

$$R = R_0 \cdot e^{-[(4 \cdot \pi \cdot z \cdot \cos\theta)/\lambda]^2} \quad (\text{III.2.1})$$

Para a ótica de incidência rasante, desprezando-se as aberrações, a superfície ideal para colimar uma fonte pontual é um elipsóide com focos F_1 e F_2 , na fonte e na imagem, respectivamente (vide figura III.2.4). Os semi-eixos deste elipsóide são:

$$2a = r_1 + r_2 \quad (\text{eixo maior})$$

$$2b = 2 \cdot \text{sen}\phi \cdot (r_1 \cdot r_2)^{1/2} \quad (\text{eixo menor})$$

que definem o espelho.

A confecção e aferição de uma superfície elipsoidal são difíceis de se realizar, pois os dois raios principais⁽⁴²⁾ de curvatura tem valores que mudam ponto a ponto sobre toda a superfície. Após a realização de cálculos, chega-se aos seguintes raios para o elipsóide:

$$R = (1/a \cdot b) \cdot (r_1 \cdot r_2)^{3/2} \quad (\text{III.2.2a})$$

$$r_0 = (b/a) \cdot (r_1 \cdot r_2)^{1/2} \quad (\text{III.2.2b})$$

onde R é o raio maior e r_0 é o raio menor.

Sabendo-se que a fonte de luz síncrotron não é puntiforme (isso implica que a imagem não será puntiforme mesmo que a superfície refletora seja ideal), torna-se razoável substituir a superfície ideal por uma prática. Obviamente, estudos devem ser feitos para verificar se as aberrações decorrentes da mudança não excedem os limites do projeto.

A solução mais comum é substituir a superfície elipsoidal por uma toroidal que tenha os mesmos raios de curvatura principal (no centro da superfície). Os semi-eixos podem ser eliminados das equações anteriores, obtendo-se os seguintes raios:

$$R = (2/\cos\theta) \cdot [(1/r_1) + (1/r_2)]^{-1} \quad (\text{III.2.3a})$$

$$r_0 = (2 \cdot \cos\theta) \cdot [(1/r_1) + (1/r_2)]^{-1} \quad (\text{III.2.3b})$$

onde θ é o ângulo de incidência para o raio que passa através do pólo do espelho.

Os raios de curvatura obtidos para o toróide são familiares com relação à teoria de aberrações (23).

Tal solução foi adotada para a linha TGM. Após estudos considerando-se toda a ótica da linha de luz, obteve-se os parâmetros para os espelhos pré e pós focalizadores, mostrados na tabela III.2.2.

Os espelhos foram comprados da Zeiss (Alemanha) e são de substrato de cobre-níquel recoberto por ouro. O

substrato metálico foi preferido a um de sílica fundida devido a alta condutividade térmica do primeiro.

	PRÉ-FOCALIZADOR:	PÓS-FOCALIZADOR:
r1 (mm)	2600	1000
r2 (mm)	2600	1000
ϕ (graus)	4,5	4,5
R (mm)	33138,3	12746
ro (mm)	204	78,46

TABELA III.2.2 - Parâmetros óticos dos espelhos da linha TGM.

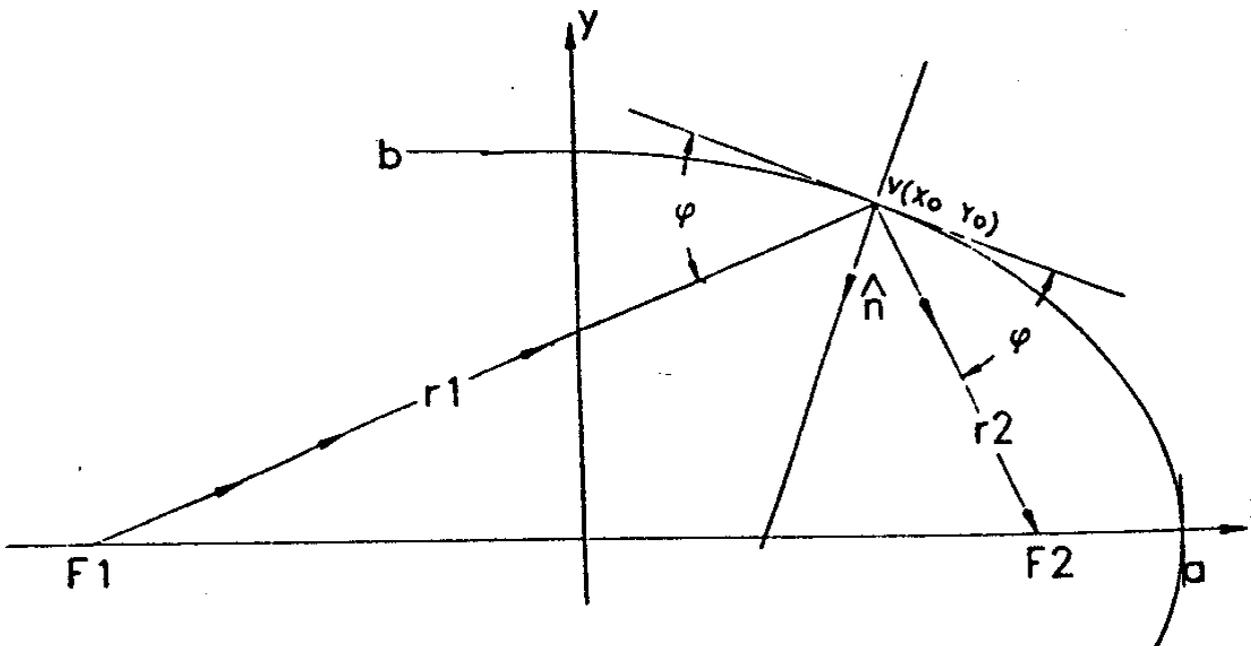


FIGURA III.2.4 - Geometria de um espelho elipsoidal.

3. Engenharia e Montagem:

Baseado na filosofia de se ter quase todos os componentes utilizados neste projeto desenvolvidos e produzidos no próprio LNLS, seja pelos técnicos ou através de convênios com indústrias nacionais, procurou-se sempre ter o maior domínio tecnológico possível de toda a linha de luz TGM. A grande maioria dos componentes foi projetada e construída "em casa".

3.1. Front-End

O front-end padrão a ser utilizado nas "saídas" do anel de armazenamento do LNLS foi projetado, construído e testado.

A figura III.3.1 mostra o front-end, que tem uma aceitação angular de 40 mrad horizontal x 3 mrad vertical.

As partes componentes do front-end são(24):

(1)(5): Foles de aço (tubos flexíveis) para aliviar esforços mecânicos.

(2): Câmara do bloqueio primário. O bloqueio consiste de uma placa de cobre com 80 x 50 x 10 mm³, refrigerada à água, que pode ser deslocada sobre um curso vertical de 30mm para permitir obstruir ou não o caminho ótico. Atrás dessa placa está montado um bloco de chumbo revestido de aço inoxidável, pois o chumbo (por ser um material poroso)

não é compatível com o UHV. A finalidade do bloco de chumbo é atenuar a radiação γ que poderia ser produzida durante a fase de injeção de elétrons no anel, quando é possível haver perdas contínuas de elétrons a 100 MeV.

(3): Válvula de vácuo de acionamento pneumático remoto, utilizada para isolar a linha de luz do anel de armazenamento de elétrons durante manutenção, troca de amostras, etc.

(4): Válvula rápida. Caso haja subida brusca da pressão na câmara experimental, seja por falha em componentes ou erro humano, uma onda de pressão vai se propagar ao longo da linha de luz em direção ao anel de armazenamento de elétrons, podendo causar efeitos desastrosos. Para evitar isso, a válvula rápida será acionada, criando em cerca de 10mseg uma barreira de alta impedância ao fluxo gasoso. A válvula (3) é acionada simultaneamente, fechando hermeticamente o acesso ao anel em alguns segundos.

(6): Linha de retardo acústico. Consiste de um conjunto de vários diafragmas com aberturas apenas suficientes para a passagem do feixe ótico, distribuídos ao longo de um tubo de diâmetro grande. Esse dispositivo retarda o avanço de uma frente de pressão por algumas dezenas de milisegundos, suficientes para o fechamento da válvula rápida.

(7) Sensor rápido de pressão. Esse sensor detecta o aumento brusco de pressão e aciona a eletrônica para o fechamento das válvulas de vácuo.

Os itens (1), (3), (4), (5) e (7) foram comprados, sendo que os itens (3), (4) e (7) foram importados.

O bloqueio primário, item (2), e a linha de retardo acústico, item (6), foram projetados e construídos no próprio LNLS.

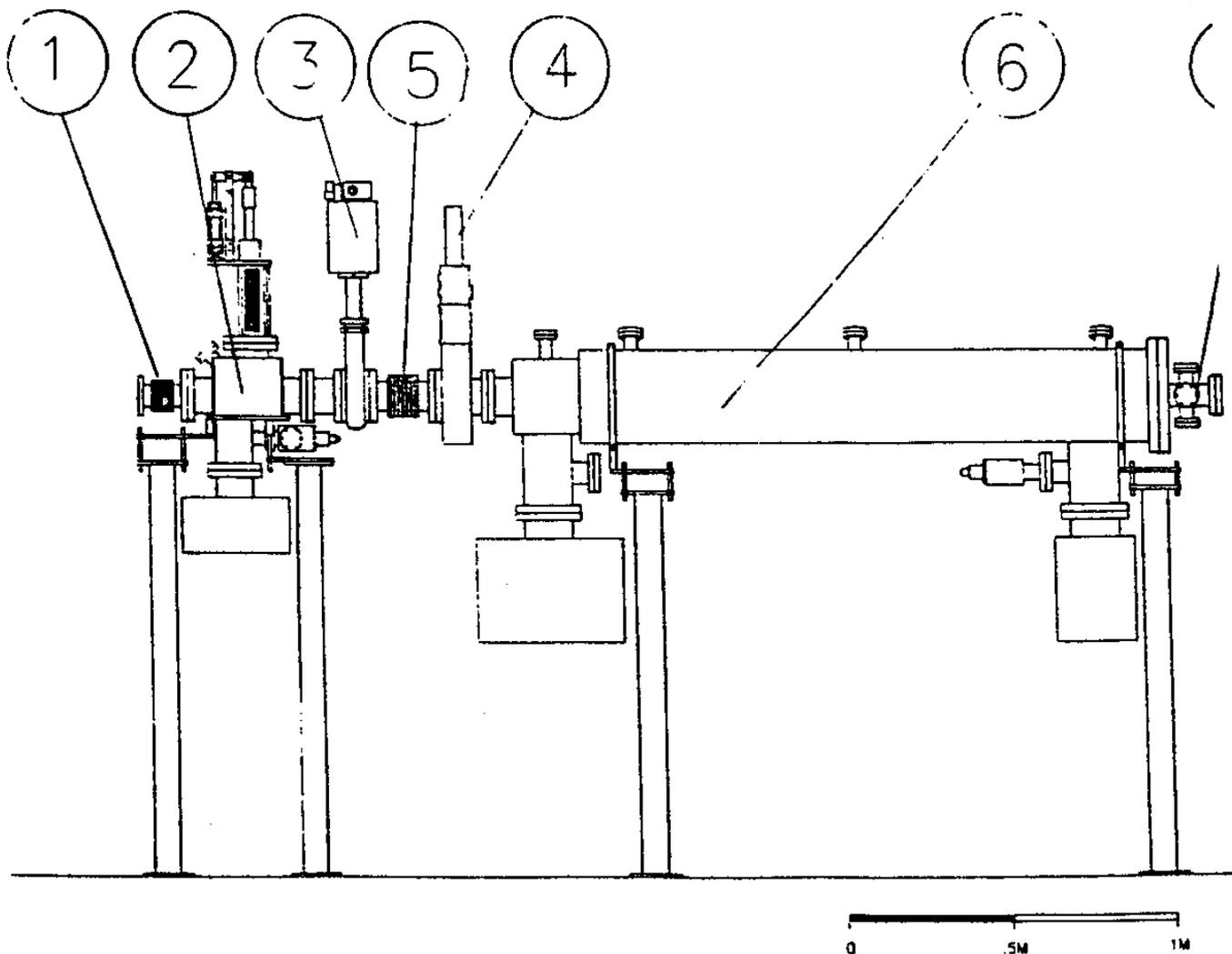


FIGURA III.3.1 - Front-end padrão do LNLS.

3.1.1. Bloqueio Primário:

- Montagem Mecânica e Atuação

A figura III.3.2 mostra a montagem mecânica do bloqueio primário.

Uma haste oca é utilizada para subir e descer a placa de cobre mais o tijolo de chumbo. Essa haste é soldada a um tubo flexível ("bellows"), que por sua vez é soldado a uma flange padrão conflats CF100. No interior da haste, são instalados os tubos de cobre OFHC ("Oxygen Free High Conductivity") que conduzem o fluxo de água resfriada até o absorvedor de cobre.

Todos os componentes de UHV foram confeccionados com aço inox 304⁽²⁵⁾. Os demais foram feitos de aço carbono. A bucha centralizadora da haste foi feita de bronze fosforoso.

A câmara do bloqueio possui 4 flanges CF100. Na flange superior, é instalado o mecanismo do bloqueio. Na flange inferior, conecta-se a bomba de vácuo. As flanges anterior e posterior conectam a câmara no front-end. Nas flanges CF35 na parte superior da câmara foram instalados uma janela ótica ("viewport") e um medidor de pressão. A flange CF35 na parte inferior da câmara serve para a conexão de uma válvula, usada para a realização de pré-vácuo no sistema.

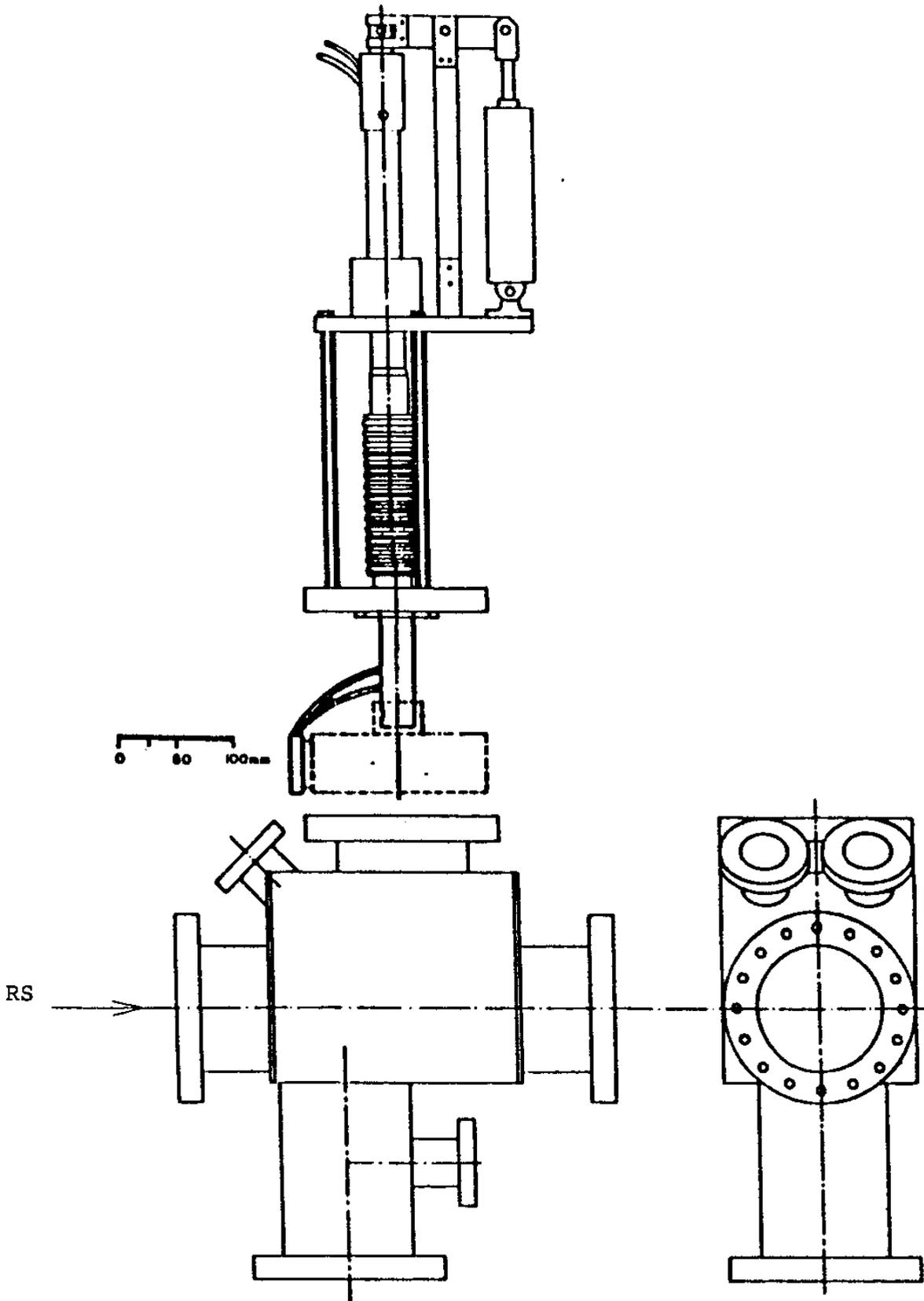


FIGURA III.3.2 - Bloqueio primário com a câmara de vácuo.

A atuação do bloqueio é pneumática. Os componentes principais são o cilindro e a válvula solenóide. A força do cilindro é cerca de 45 kgf, para uma pressão pneumática de 7bar. Chaves de fim de curso foram instaladas para monitorar a posição do bloqueio.

- Vácuo

Levando-se em conta os vários fatores (área total interna, taxa de degaseificação do cobre e do aço inox, etc), sem incluir a dessorção provocada pela incidência de RS, chegou-se à conclusão que uma bomba iônica de 60 l/s seria suficiente para manter a pressão da câmara na faixa de 10^{-10} mbar.

3.1.2. Linha de retardo acústico:

- Montagem mecânica

Consiste de um conjunto de 7 diafragmas com aberturas apenas suficientes para passagem do feixe de luz síncrotron, distribuídos ao longo de um tubo de 2m e diâmetro aproximado de 275mm.

Caso a pressão na câmara experimental suba bruscamente, seja por falha em componentes ou erro humano, uma onda de pressão vai se propagar ao longo da linha de

luz e "vazar" para o anel de armazenamento de elétrons, onde teria efeitos catastróficos. Antes que isso ocorra, a válvula rápida é acionada pelo sensor rápido de pressão, situado entre a linha de retardo e a fenda de entrada, para criar em cerca de 10mseg uma barreira de alta impedância ao fluxo gasoso. A válvula pneumática situada entre a válvula rápida e o bloqueio primário é acionada simultaneamente, fechando hermeticamente o acesso ao anel em alguns segundos.

De acordo com a literatura⁽²⁶⁾, diafragmas na forma cônica são os que retardam de forma mais eficiente a frente de onda. Em termos práticos, a velocidade da frente de onda na linha de retardo acústico é:

$$v_{\text{LINHA}} = (K_B \cdot T)^{1/2} \cdot (s/S)^{1/2} \quad (\text{III.3.1})$$

onde:

K_B => constante de Boltzmann

T => temperatura (ambiente)

m => massa do gás (aproximação para N_2)

s => área média das aberturas

S => diâmetro da linha de retardo acústico.

Sendo $(K_B \cdot T)^{1/2} \cong 300 \text{ m/s}$ e $(s/S) \cong 5 \times 10^{-2}$ resulta:

$$v_{\text{LINHA}} \cong 67 \text{ m/s}$$

Como a linha de retardo acústico tem 2m de comprimento, o tempo que a frente de onda gastará para percorrê-la será:

$$t = 2/67 \Rightarrow t \cong 30 \text{ mseg,}$$

havendo tempo suficiente para que a válvula rápida se feche, e provendo uma margem de segurança para cobrir efeitos não incluídos no cálculo simplificado que resulta em (III.3.1).

A figura III.3.3 esboça a linha de retardo acústico.

- Vácuo

Na prática, considerou-se a linha de retardo acústico como um tubo de condutância pequena. Com isso, dividindo-se a linha de retardo ao meio e fazendo-se $x=0$ no extremo esquerdo, onde é instalada uma bomba de vácuo, chega-se à seguinte equação para a metade esquerda(27):

$$P(x) = a.l.[L/S_b + x/C + x^2/(2.C.L)] \quad (\text{III.3.2})$$

onde: L => comprimento do tubo (cm)

l => perímetro do tubo (cm)

C => condutância do tubo (l/s)

a => taxa de degaseificação

(para o aço inox é 10^{-11} Torr.l/(s.cm²))

$S_b \Rightarrow$ velocidade de bombeamento, em $x=0$ (l/s).

A condutância C é dada por(28):

$$C = (12,3.D^3)/L \quad (\text{III.3.3})$$

onde D é o diâmetro do tubo.

$$\text{Daí: } C = (12,3.5,3^3)/100 \Rightarrow C \cong 18 \text{ l/s}$$

Para $x=0$, (III.3.2) fica:

$$P(0) = (a.l.L)/S_b$$

onde $(l.L)$ é a área interna do tubo.

A área interna para a metade da linha de retardo acústico é: 14218 cm^2 .

Para $P(0) = 9.10^{-10} \text{ mbar} \cong 7.10^{-10} \text{ Torr}$, tem-se:

$$S_b = (a.l.L)/P(0) = (10^{-11}.14218)/(7.10^{-10})$$

$$S_b \cong 200 \text{ l/s}$$

Com isso, decidiu-se utilizar duas bombas iônicas de 230 l/s, sendo uma em cada extremidade da linha de retardo.

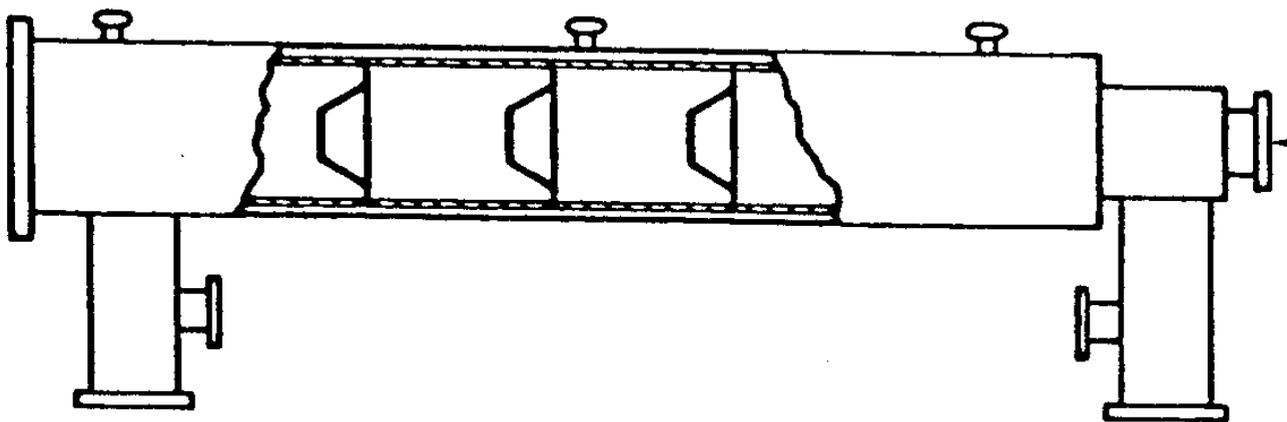


FIGURA III.3.3 - Linha de retardo acústico.

3.1.3. Testes:

- Vácuo(17)

Após a montagem do bloqueio primário e da linha de retardo acústico, a pressão obtida foi da ordem de $1 \cdot 10^{-8}$ mbar. Para que a pressão desejada, na faixa de 10^{-10} mbar fosse conseguida, realizou-se o recozimento ("baking"), durante aproximadamente 48 horas à temperatura de $- 180$ graus Celsius.

A figura III.3.4 mostra os gráficos de condicionamento dos referidos componentes, realizados separadamente.

- Funcionamento do Front-End

Foi feita uma "montagem de ensaio" no LNLS. Tal montagem consistiu de 1/12 do anel de armazenamento, sob condições de operação, mais a linha de luz TGM.

Além de ter sido útil para inúmeros estudos sobre a montagem do anel e da linha de luz TGM, aproveitou-se para testar a eficiência do front-end, ou seja, se realmente o anel estaria protegido caso houvesse quebra de vácuo na linha de luz.

Selou-se o front-end com uma janela de mylar metalizado.

Todo o front-end foi colocado sob condições de vácuo, com uma pressão de 10^{-7} mbar. O circuito mostrado na figura III.3.5 foi utilizado.

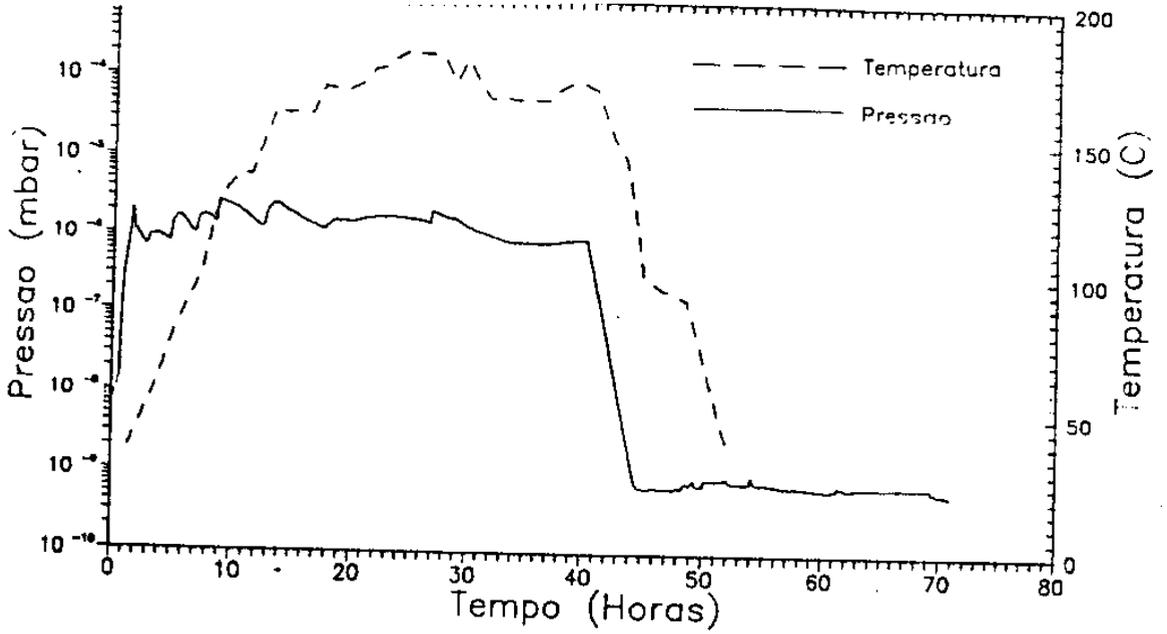
O teste consistiu em perfurar a película de mylar, acompanhando a evolução da pressão em pontos adequados do sistema. Na linha de retardo propriamente dita, a pressão sobe até a pressão atmosférica em algumas dezenas de milisegundos, o que estabelece a escala de tempo das observações.

As saídas analógicas das eletrônicas de controle dos medidores de pressão da câmara dipolar do anel e do bloqueio primário foram conectadas aos canais A e B do osciloscópio.

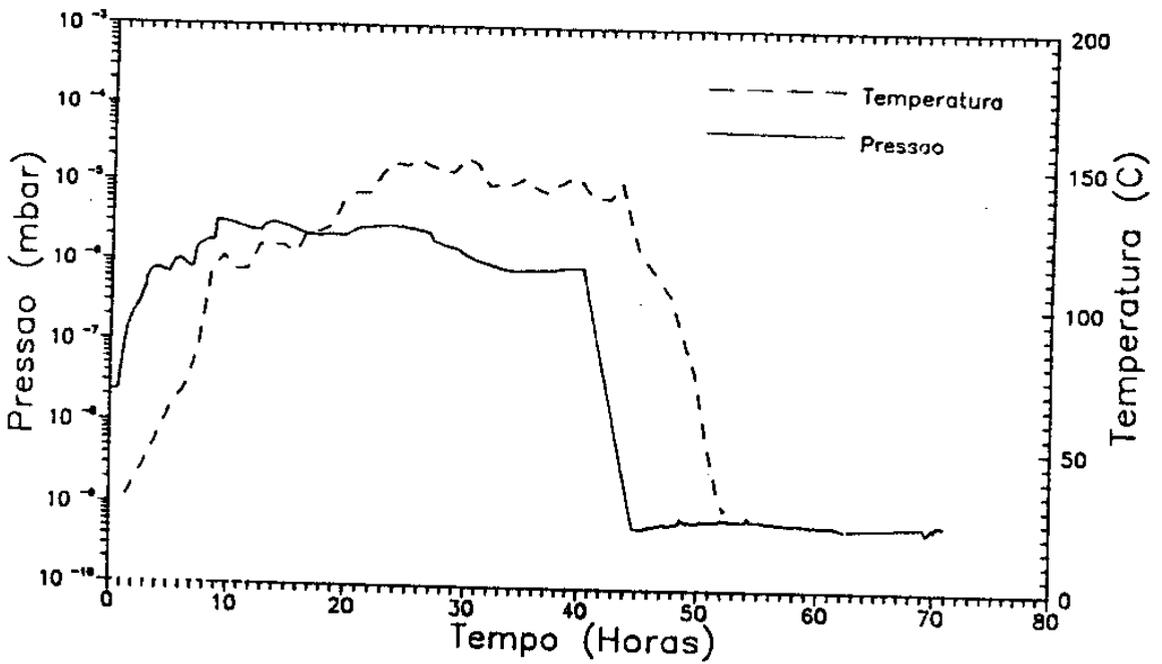
O disparo para varredura única se deu no momento em que se perfurou a janela de mylar. No ato da perfuração, fechou-se o circuito entre o terra e o "trigger externo" do osciloscópio, disparando-o.

A figura III.3.6 mostra a variação de pressão na câmara dipolar do anel e no bloqueio primário.

Percebe-se claramente que em 5 seg a pressão do bloqueio voltou ao estado inicial. A variação da pressão na câmara do dipolo pode ser considerada desprezível.



(a)



(b)

FIGURA III.3.4 - "Pump-down" do bloqueio primário (a) e da linha de retardo acústico (b).

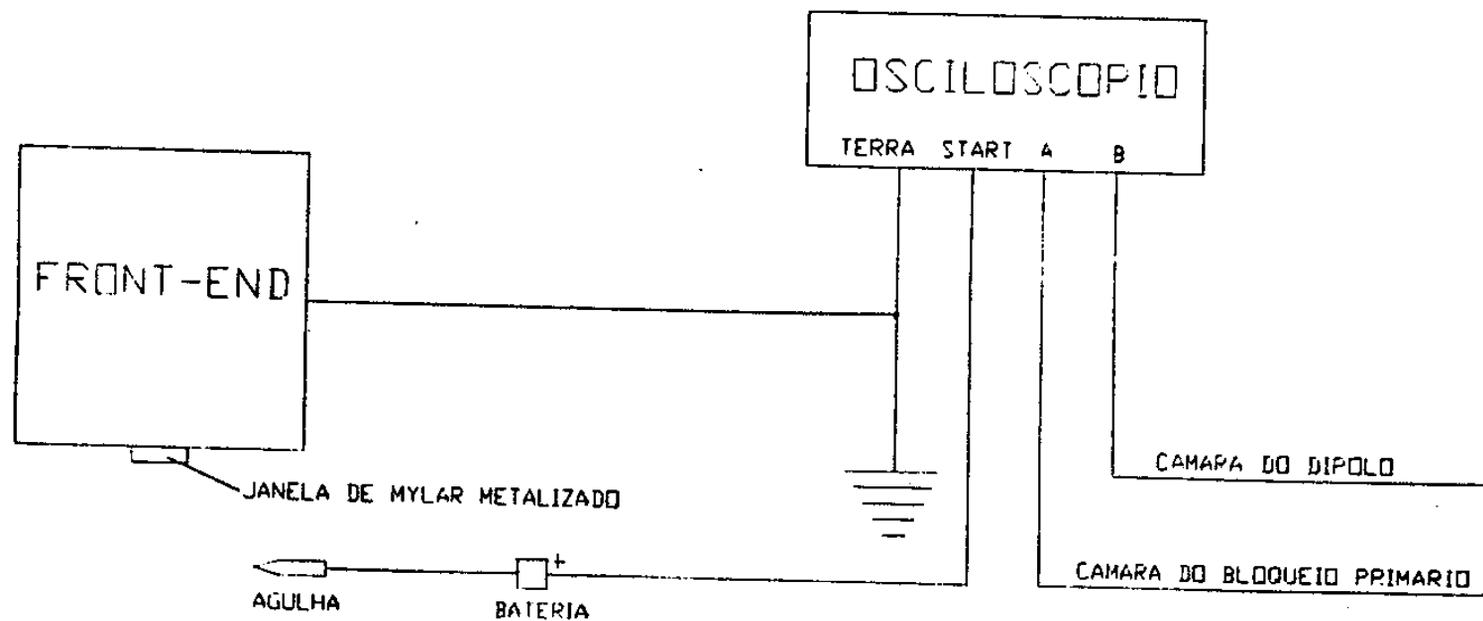
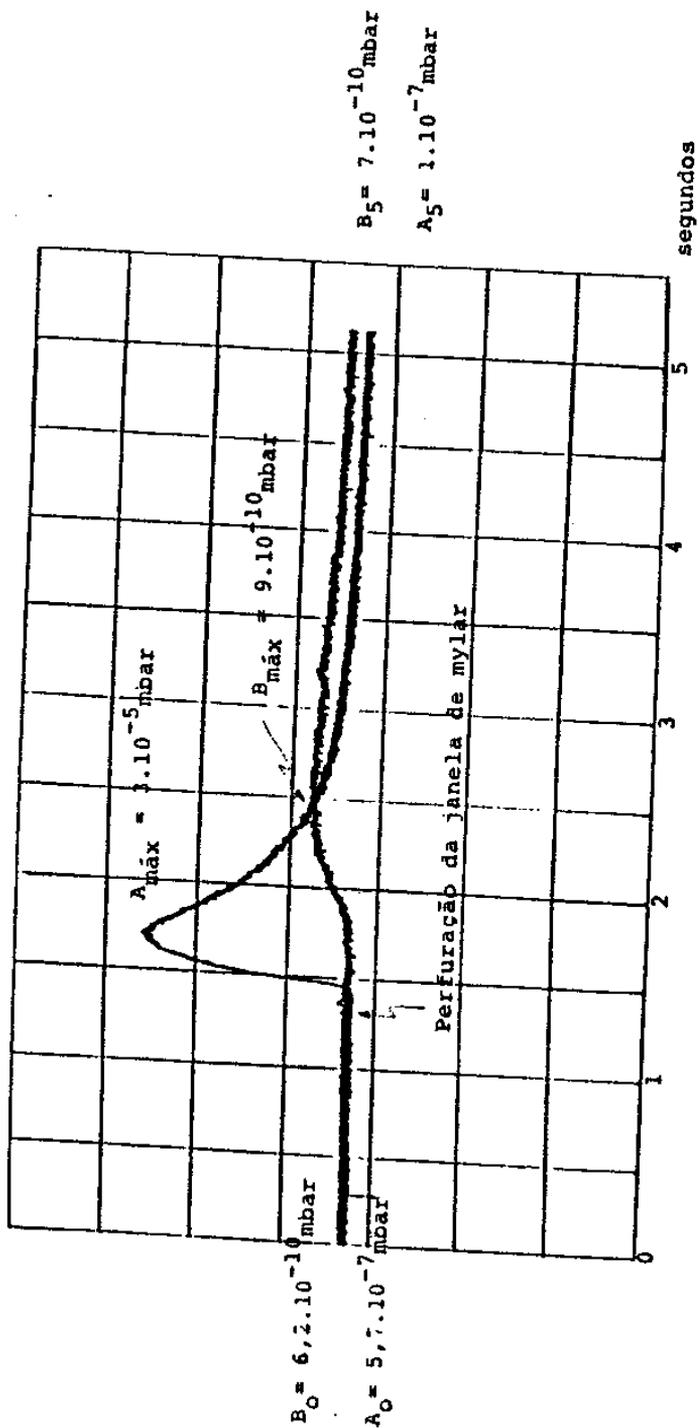


FIGURA III.3.5 - Circuito para teste de operação do front-end.



A = Câmara do bloqueio primário.
 B = Câmara do dipolo.

FIGURA III.3.6 - Variações das pressões na câmara do dipolo e no bloqueio primário.

3.2. Monocromador TGM

3.2.1. Mecanismo:

- Montagem

O mecanismo para a rotação das grades toroidais do monocromador é mostrado na figura III.3.7.

A rotação da grade é feita por motor de passo, através de um traslador compatível com UHV. A troca das grades é manual, através de um manipulador que empurra/puxa, sobre esferas de safira, a base móvel onde repousam as grades. Esse movimento é perpendicular ao sentido do feixe de luz, sendo executado em UHV.

- Testes Preliminares

Este mecanismo foi acoplado a um parafuso micrométrico acionado por motor de passo sob controle de um microcomputador. Uma bancada de medidas do ângulo de rotação do mecanismo foi confeccionada. Utilizando-se um laser de HeNe de alinhamento ótico e um detetor de posição Reticon RL1024S⁽²⁹⁾ com resolução de 3 micra, projetou-se um sistema automatizado, controlado pelo mesmo computador acima.

Foi medido o erro no ângulo de rotação do mecanismo, sendo verificado que esse erro foi inferior a 30

microradianos, um resultado satisfatório, já que o projeto especifica erro não superior a 50 microradianos(30).

A figura III.3.8 mostra o esquema utilizado para a realização das medidas.

- Vácuo

Devido à complexidade do mecanismo, além da "limpeza padrão" (vide referências) para equipamentos de UHV, fez-se um recozimento em forno a vácuo de todas as peças a 800 graus Celsius durante - 48 horas, a uma pressão de 1.10^{-5} mbar.

3.2.2. Câmara(17):

- Montagem

A câmara do TGM, mostrada na figura III.3.9 possui duas flanges CF275 nas laterais (esse padrão CF foi desenvolvido para o projeto do TGM). O mecanismo do TGM é preso internamente em uma dessas flanges. Por se tratar do primeiro protótipo, colocou-se um grande número de flanges para a colocação de vários "viewports" (janelas óticas) com o objetivo de se observar o comportamento do mecanismo do TGM.

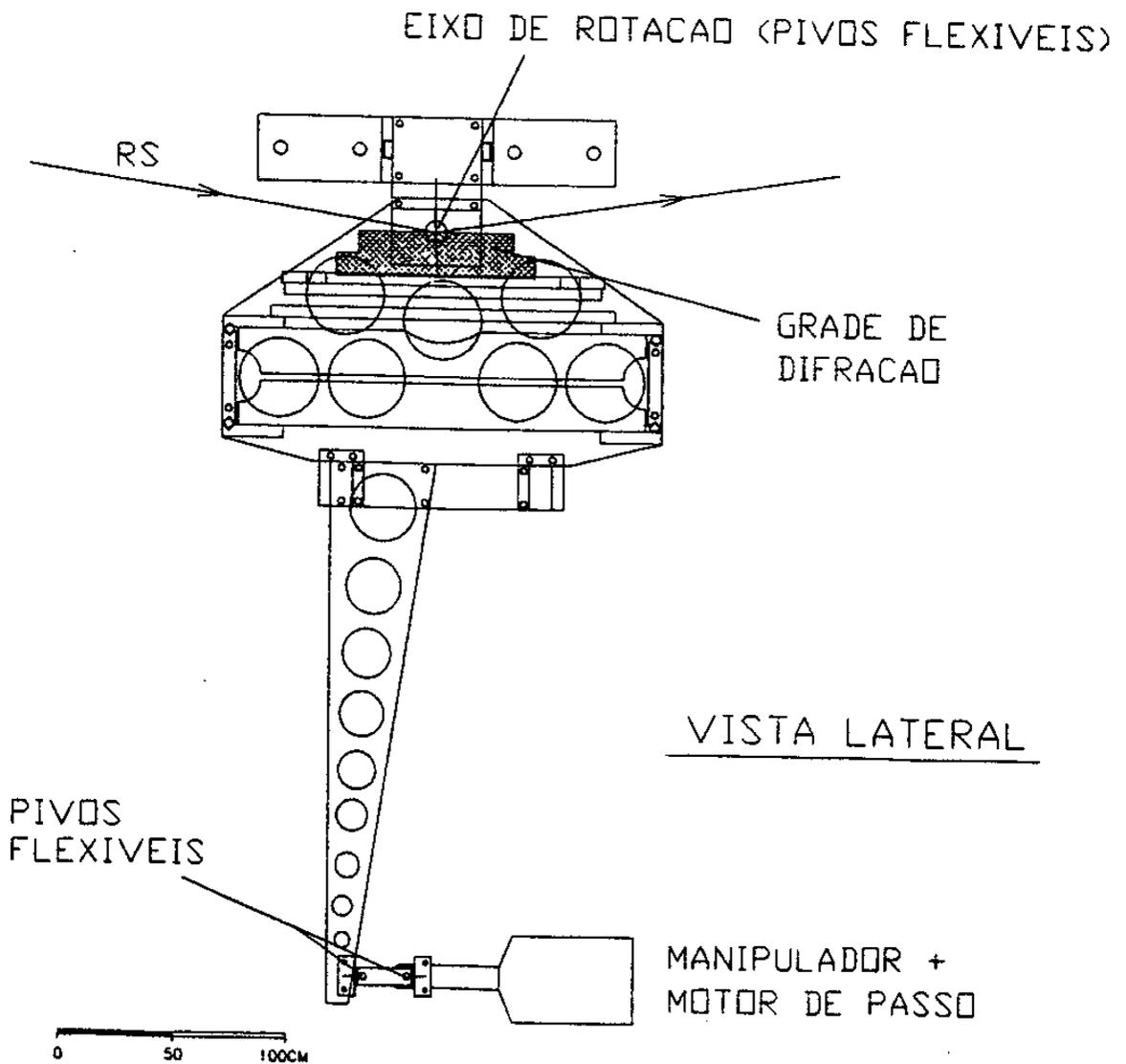
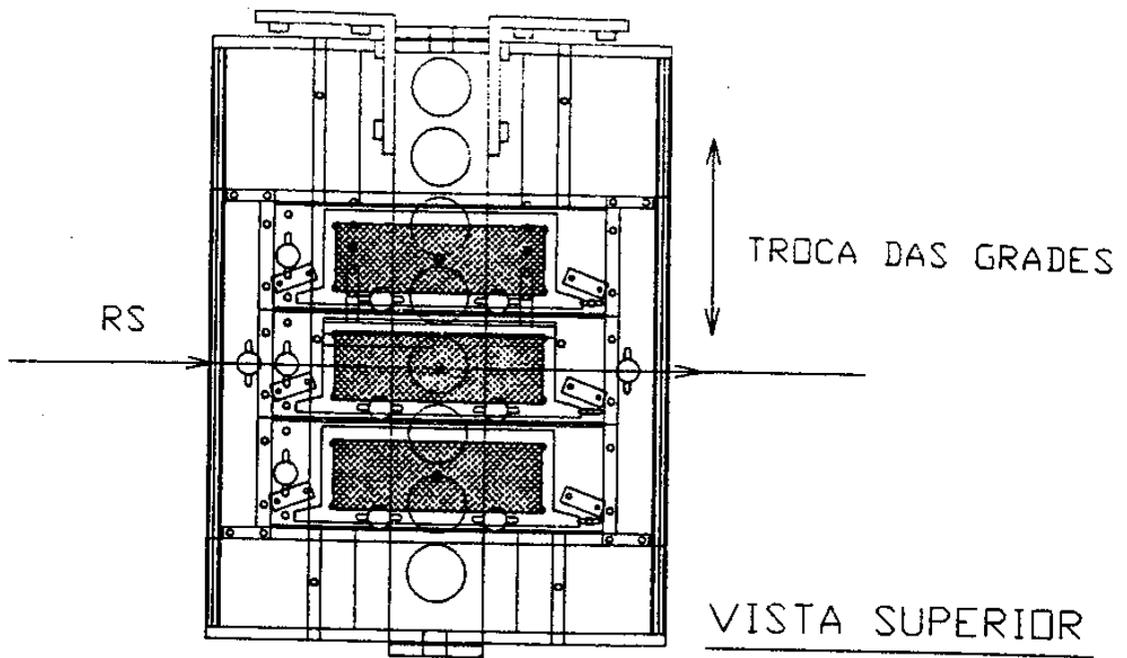


FIGURA III.3.7 - Mecanismo do TGM.

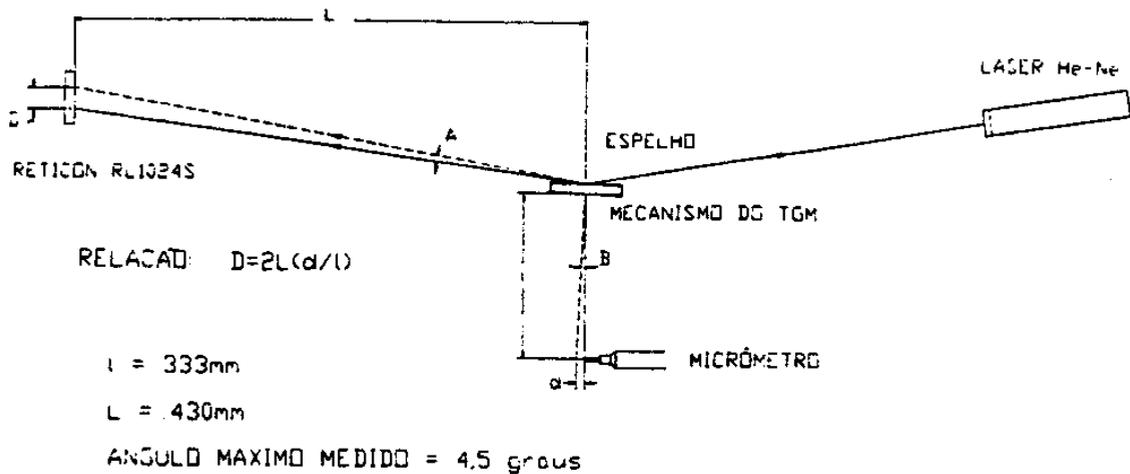


FIGURA III.3.8 - Testes preliminares do desempenho do mecanismo do TGM.

- Vácuo

Realizados os cálculos, chegou-se à conclusão que uma bomba iônica de 230 l/s seria suficiente para fazer com que a pressão da câmara chegasse a 10^{-10} mbar.

Após a montagem da câmara do TGM e instalação do mecanismo, realizou-se o recozimento ("baking"), durante 48 horas.

O gráfico de condicionamento é mostrado na figura III.3.10.

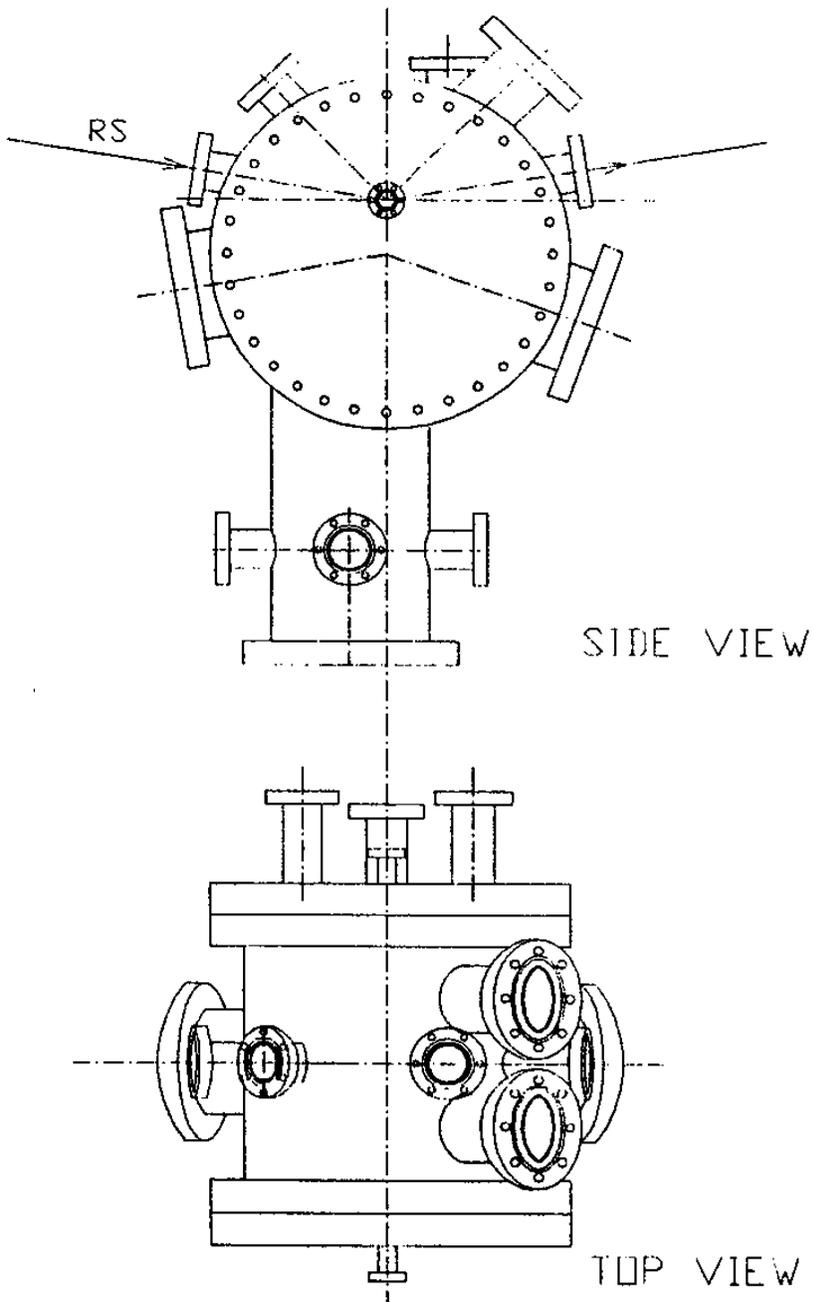


FIGURA III.3.9 - Câmara do TGM.

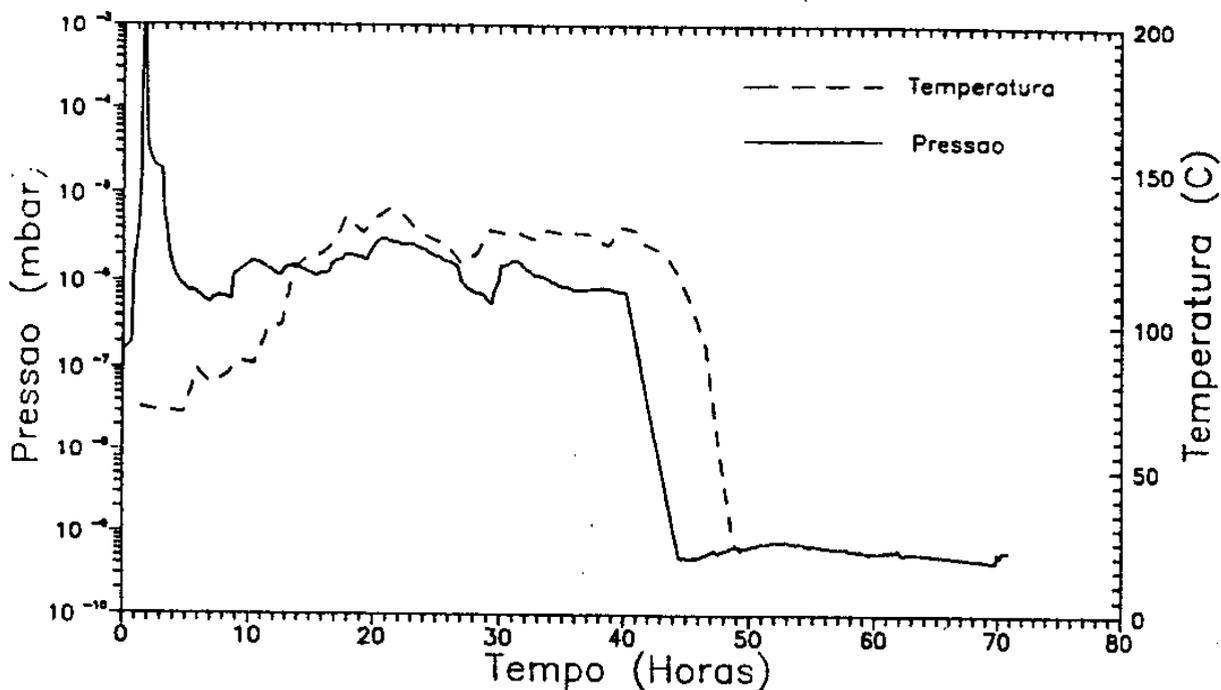


FIGURA III.3.10 - "Pump-down" do TGM, com o mecanismo instalado.

3.2.3. Acionamento do TGM:

- Troca das grades

A troca das grades é manual, através de um manipulador que empurra/puxa, sobre esferas de safira, a base móvel onde repousam as grades. Esse movimento é perpendicular ao sentido do feixe de luz, sendo executado em UHV.

- Selecionando a energia

Selecionada a grade, necessita-se "sintonizar" a energia (ou comprimento de onda). A figura III.3.11 mostra a geometria envolvida.

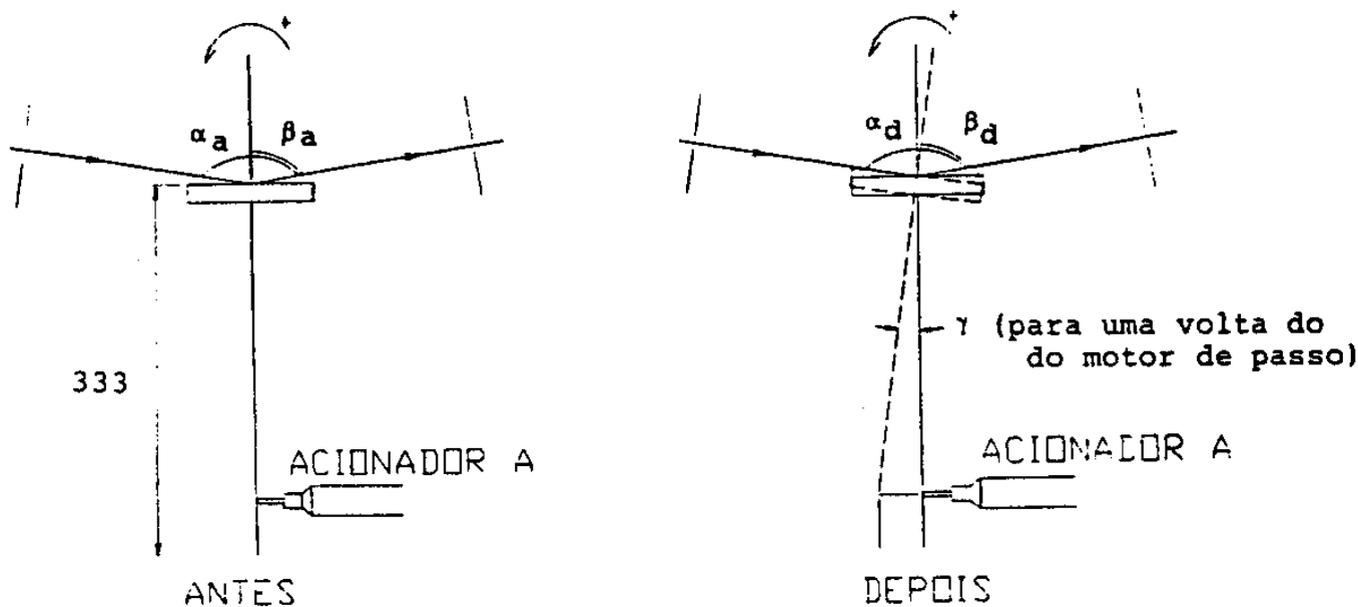


FIGURA III.3.11 - Geometria para selecionar a energia do TGM.

Sabendo-se que a equação da grade é:

$$\text{sen } \alpha + \text{sen } \beta = n.\lambda/d \quad (\text{III.3.4})$$

e que o acionador A dá 40 voltas com um percurso total de 25.4mm (1 polegada), tem-se que para uma volta o acionador A percorrerá 0,635mm.

De acordo com a geometria da figura III.3.11, tem-se:

$$\tan \gamma = 0,635/333$$

$$\text{Para } N \text{ voltas } \Rightarrow \tan \gamma_N = N.(0,635/333)$$

$$\gamma_N = \arctan(N.1,9069 \times 10^{-3}) \quad (\text{III.3.5})$$

Para $n=1$, no caso da primeira ordem, e sabendo-se que para ordem ZERO tem-se $\alpha_{N=0} = -\beta_{N=0} = 81$ graus, pode-se escrever: (Se $N=0 \Rightarrow \lambda=0$)

$$d.(\text{sen } \alpha_N + \text{sen } \beta_N) = \lambda_N$$

onde: $\alpha_N = \alpha_0 + \gamma_N$ e $\beta_N = \beta_0 + \gamma_N$, com $\gamma_N > 0$.

Portanto:

$$d.[\text{sen}(81+\gamma_N) + \text{sen}(\gamma_N-81)] = \lambda_N \quad (\text{III.3.6})$$

Utilizando-se a equação (III.3.6), tem-se:

$$d. [\text{sen}(81+\gamma_N) = [\text{sen}(81)] \cdot [\text{cos}(\gamma_N)] + [\text{sen}(\gamma_N)] \cdot [\text{cos}(81)]$$

$$d. [\text{sen}(\gamma_N-81) = [\text{cos}(81)] \cdot [\text{sen}(\gamma_N)] - [\text{cos}(\gamma_N)] \cdot [\text{sen}(81)]$$

Chamando:

$$a = \text{sen}(81) \text{ e } b = \text{cos}(81)$$

a equação (III.3.3) fica:

$$2 \cdot b \cdot d \cdot [\text{sen}(\gamma_N)] = \lambda_N$$

$$[\text{sen}(\gamma_N)] = \lambda_N / (2 \cdot b \cdot d) \quad (\text{III.3.7})$$

Utilizando-se a relação trigonométrica:

$$1 + [1/(\tan^2 \gamma_N)] = [1/(\text{sen}^2 \gamma_N)]$$

e a equação (III.3.7), resulta:

$$N = [(2,7500527 \cdot 10^5 \cdot \lambda_N^2) / (9,7886967 \cdot 10^{-2} \cdot d^2 - \lambda_N^2)]^{1/2}$$

(III.3.5)

A equação (III.3.5) fornece o número de passos (=1000.N) a serem dados pelo motor de passos a partir de N = 0 (ordem zero) para cada λ (ou E) escolhido pelo usuário.

De acordo com a geometria do monocromador, tem-se que a resolução linear do acionador deve ser 17 micra, o que

corresponde a 26 passos do motor. A utilização de um motor de maior resolução deveu-se à filosofia de uniformização de todo o sistema de "drivers" de 4 e 5 fases para motores de passo no LNLS⁽³¹⁾.

O "backlash" (jogo entre as roscas do acionador linear) foi eliminado convencendo-se uma direção de atuação do acionador. Para aumentar a energia, o acionador simplesmente gira no sentido convencional indo diretamente a energia E_2 , com $E_2 > E_1$ (E_1 é a energia inicial). No caso de $E_2 < E_1$, o acionador gira até a energia E_0 ($E_0 < E_2$), e então retorna a E_2 .

Até o presente momento, não foi utilizado "encoder" (dispositivo para saber a posição do TGM e informar ao microcomputador). Com isso, adotou-se o seguinte procedimento:

- 1) Após o usuário fornecer a energia desejada ao microcomputador, o mesmo calcula o número de passos que o motor dever rodar a partir da ordem zero. O número de passos tem que ser um inteiro.

- 2) No caso do número calculado pelo computador ser um número não inteiro, o software desenvolvido arredonda para o inteiro mais próximo e a energia é recalculada a partir deste novo número, sendo devolvido o resultado ao usuário.

- 3) Após o monocromador atingir a energia escolhida pelo usuário, a posição em número de passos é salva no disco rígido. Salva-se o número de passos devido à

existência de três grades. Cabe ao usuário informar ao computador qual é a grade em uso.

4) Foram feitos cálculos para saber o número máximo de passos permitidos tal que o final da rosca do acionador linear não seja atingido.

O software para controle do TGM foi escrito em PASCAL e a interface entre o computador e o drive é feita pelo LOCO (equipamento de controle digital)⁽³²⁾.

3.3. Espelhos focalizadores

3.3.1. Câmaras:

- Montagem

As câmaras utilizadas para alojar os espelhos pré e pós focalizadores são idênticas. A figura III.3.12 mostra a câmara projetada e construída no LNLS.

Os foles flexíveis permitem movimentos angulares em torno do eixo z e do eixo y, e movimento linear na direção do eixo z.

- Vácuo

Ambas as câmaras sofreram os processos padrões de condicionamento utilizados no LNLS⁽¹⁸⁾. O vácuo é garantido

por bombas iônicas instaladas em estações de bombeamento estrategicamente posicionadas.

3.3.2. Acionadores:

- Eixo z

O motor de passo dá 1000 passos/volta. Há uma redução de 30. Portanto, sendo o passo da rosca quadrada da haste de atuação vertical de 3mm, para que a mesma suba uma volta tem-se que o motor precisa girar 3 voltas (3000 passos). A resolução teórica é então de 0,1 micron, desprezados os problemas de folga mecânica dos componentes. O acionador é mostrado na figura III.3.13.

- Ângulo ϕ e z

Foi desenvolvido o acionador mostrado na figura III.3.14.

O passo da rosca quadrada é 2mm. Os braços (vide figura III.3.12) tem comprimento de 300mm. Usando-se os mesmos motores, tem-se que a resolução angular teórica é de ~ 10 μ rad.

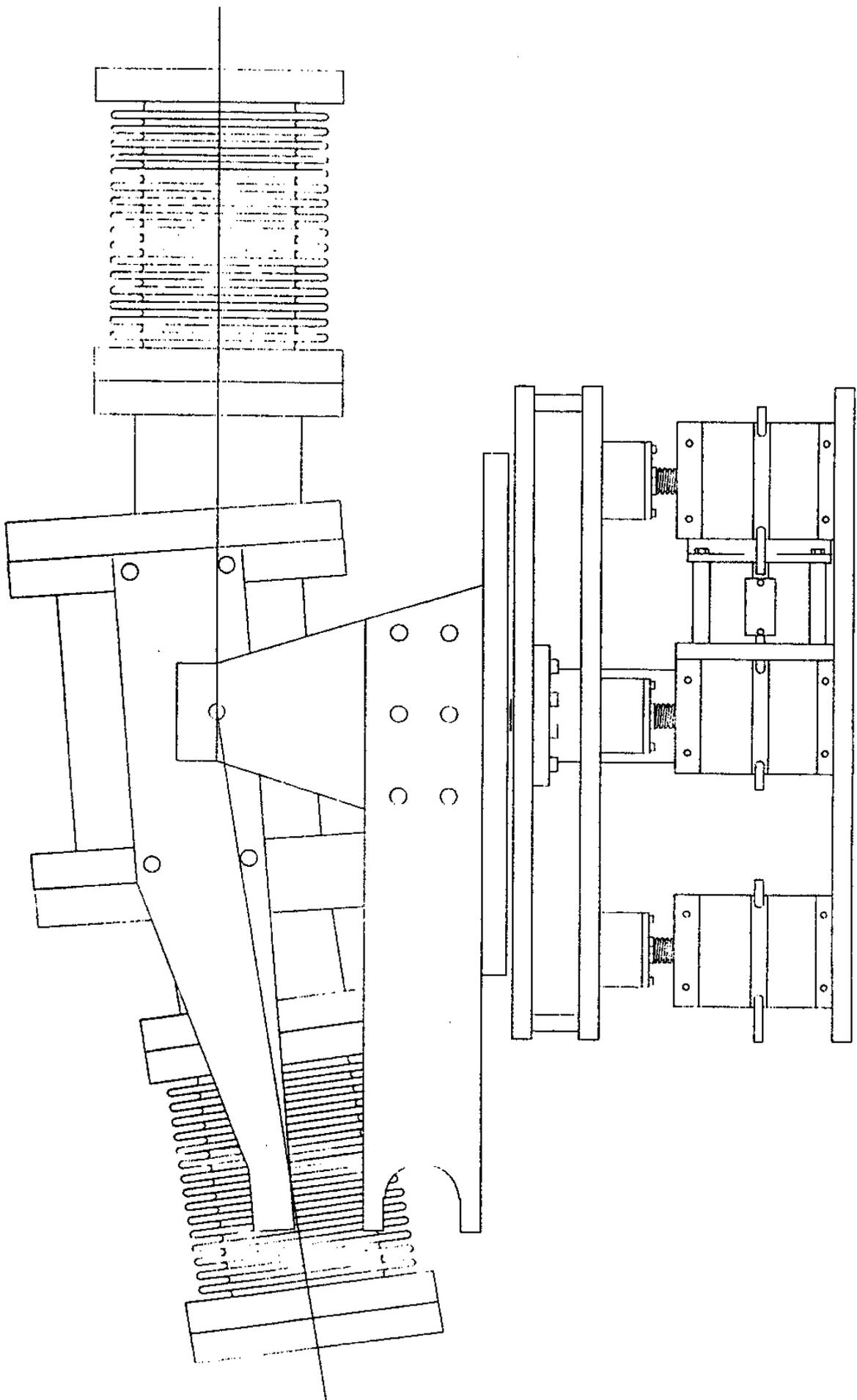


FIGURA III.3.12 - Câmara dos espelhos da linha TGM.

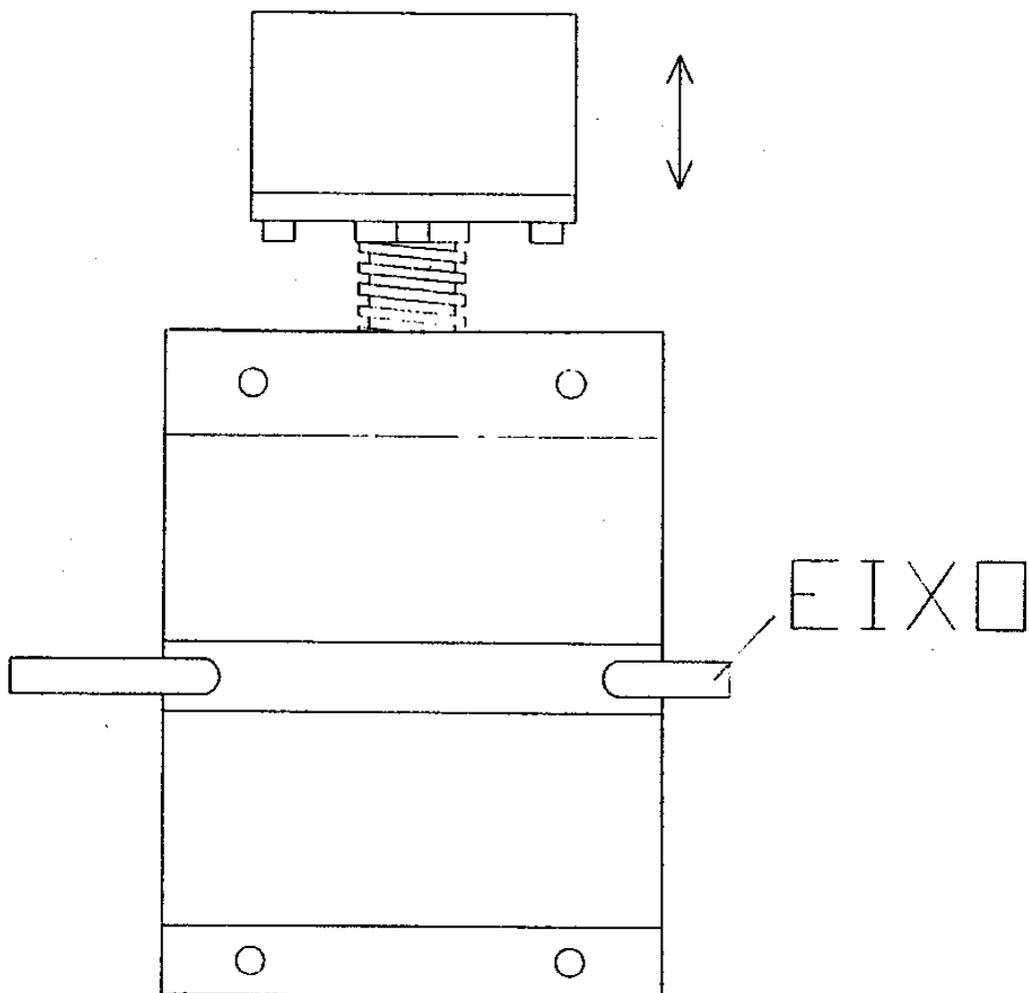


FIGURA III.3.13 - Acionador linear.

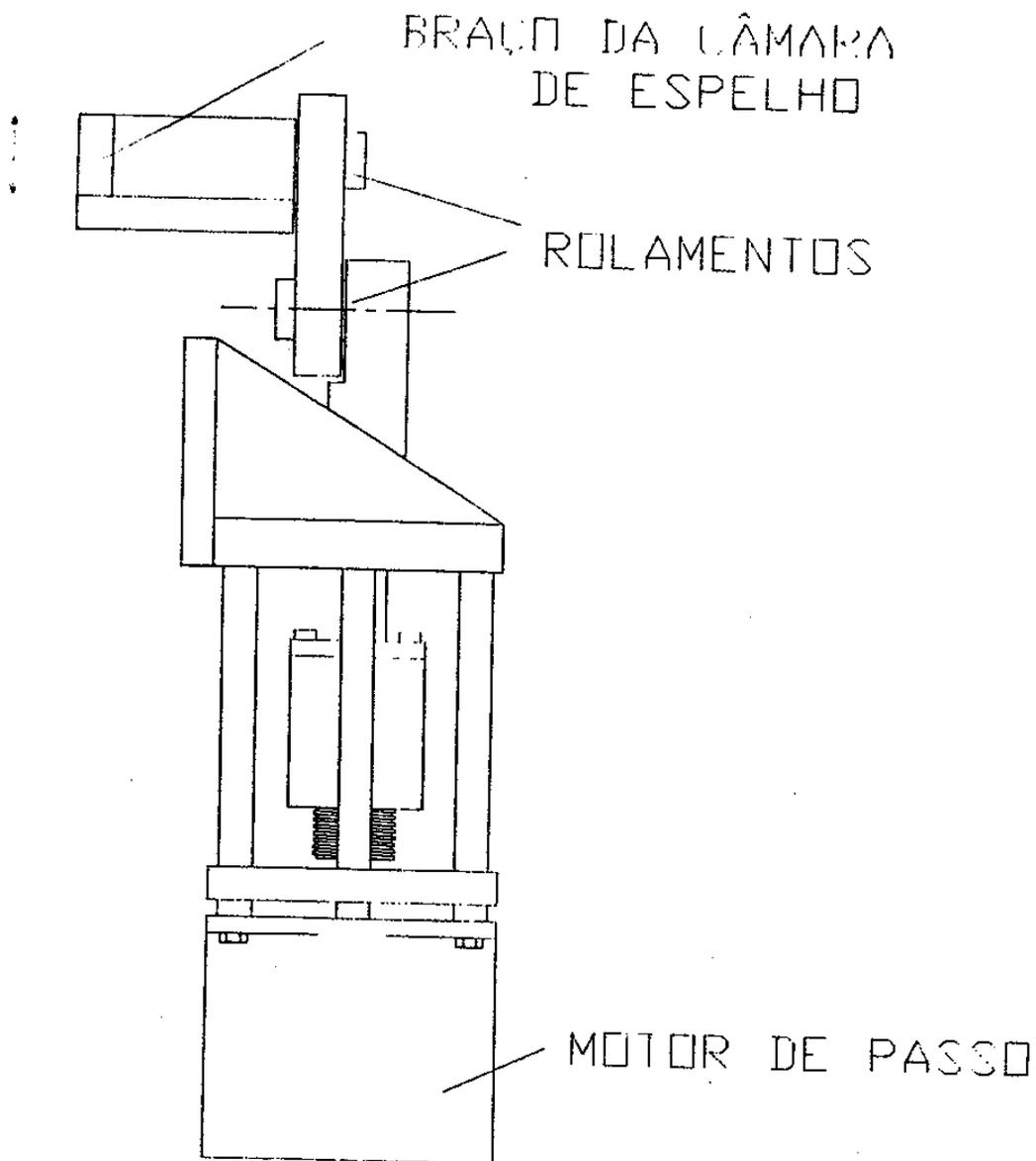


FIGURA III.3.14 - Acionador angular para a câmara de espelho.

3.4. Estação de bombeamento

Mostrada na figura III.3.15, essa estação de bombeamento foi dimensionada de tal modo a conter uma bomba iônica de 120 l/s, suficiente para manter o vácuo entre a fenda de saída e a câmara de amostra na faixa de 10^{-10} mbar. Após a estação, há uma válvula que a separa da câmara de amostras, para a possibilidade de intercâmbio das câmaras de amostra dos diversos usuários.

Flanges CF35 foram inseridas na parte superior da câmara. Essas flanges podem ser usadas para a instalação de filtros, fotodiodos, etc, para monitorar a intensidade do feixe que chega à amostra.

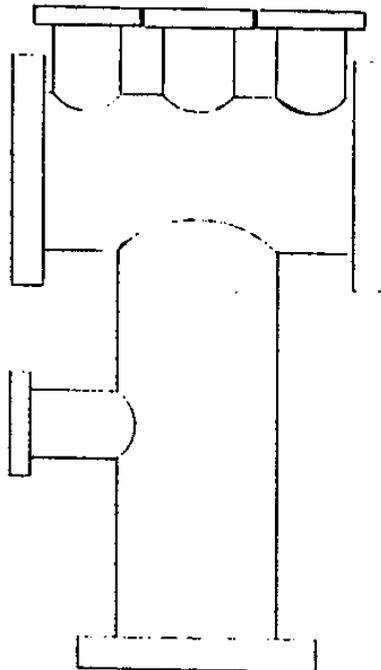


FIGURA III.3.15 - Estação de bombeamento.

3.5. Câmara de Amostras

3.5.1. Projeto e montagem:

Com a idéia de se ter uma câmara simples e versátil, o projeto foi feito para que se tivesse algo facilmente adaptável aos vários tipos de experiência na área de espectroscopia. Para se garantir os ângulos corretos entre as flanges, projetou e construiu-se um "gabarito" de alumínio, onde todas as flanges foram presas juntamente com os respectivos tubos. Após a checagem dos alinhamentos, as soldas foram efetuadas.

A câmara de amostras é mostrada na figura III.3.16.

3.5.2. Vácuo:

Um bomba iônica de 120 l/s com saída para sublimador de titânio (que bombeia muito bem hidrogênio)⁽³³⁾ foi instalada para garantir o vácuo da câmara de amostra. O sistema de bombeamento pode ser alterado dependendo do tipo de experiência que se deseje efetuar. Por exemplo, para realizar espectroscopia com gases, pode-se usar uma bomba difusora ou criogênica. Neste caso, deve haver um bombeamento diferencial na estação de bombeamento para se garantir o UHV no restante da linha de luz.

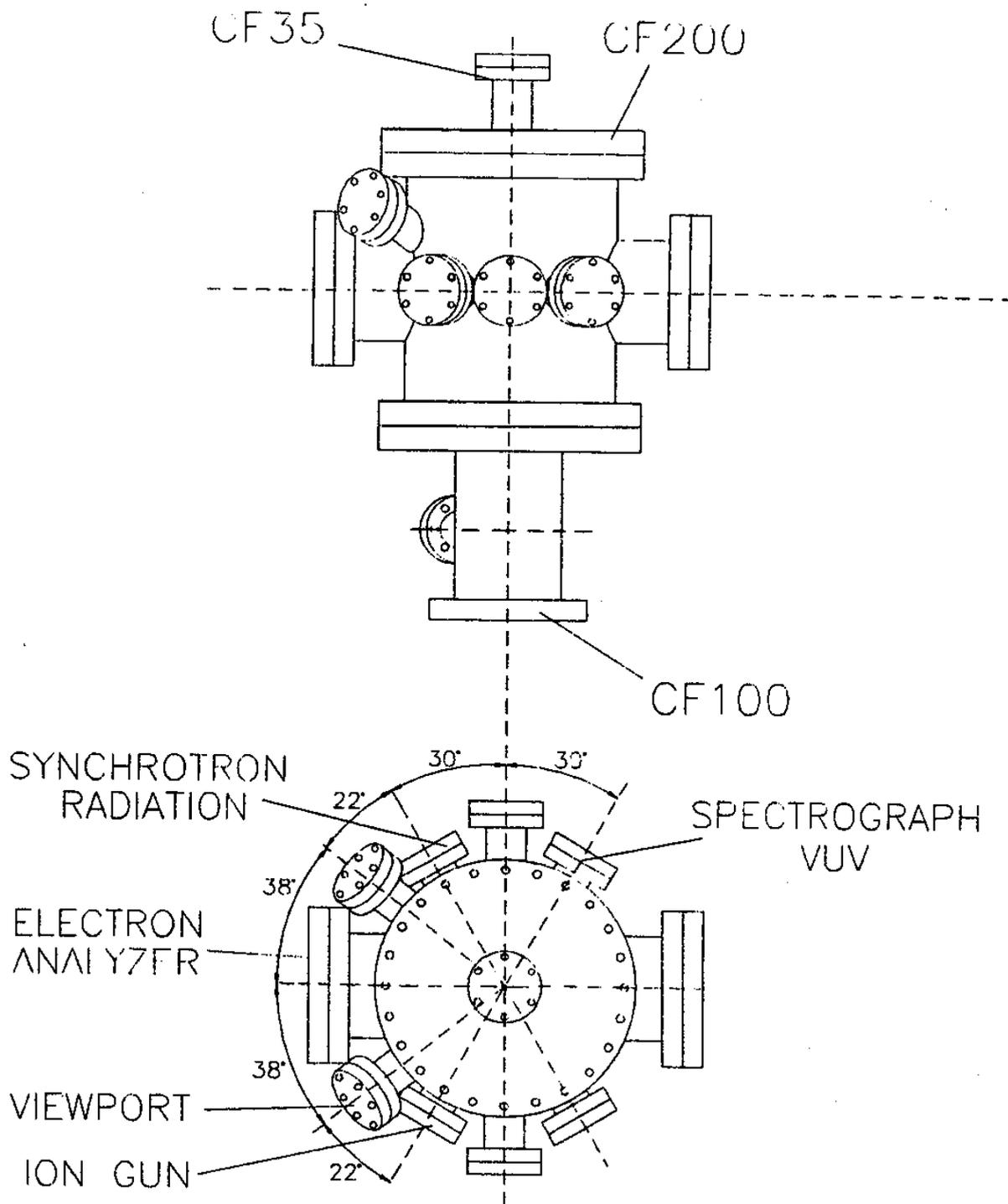


FIGURA III.3.16 - Câmara de amostras.

IV - CARACTERIZAÇÃO DA LINHA DE LUZ TGM

1. Projeto CAMD/LNLS:

Em abril de 1992, foi firmado um acordo de cooperação entre o Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) e o Center for Advanced Microstructure and Devices (CAMD)⁽³⁴⁾, pertencente à Louisiana State University (LSU), situada na cidade de Baton Rouge, nos Estados Unidos, para que a linha de luz TGM fosse instalada ao redor do anel de armazenamento americano.

No acordo foi estabelecido a permanência da linha TGM por dois anos em CAMD. Trabalhos de pesquisa entre brasileiros e norte-americanos também fazem parte do acordo.

Em Julho de 1992 iniciou-se a instalação da linha de luz brasileira em CAMD. Por questão de padronização do anel, foi instalado o front-end "standard" americano.

Montada no prazo de três meses pela equipe brasileira, a linha TGM recebeu luz síncrotron pela primeira vez em 19 de Outubro de 1992.

Em Novembro de 1992, a linha de luz brasileira já estava operacional e cientistas do Grupo de Física de

Superfícies da LSU realizaram experiências até o final de Dezembro de 1992.

A figura IV.1.1 mostra a linha de luz TGM montada em CAMD, com o front-end americano.

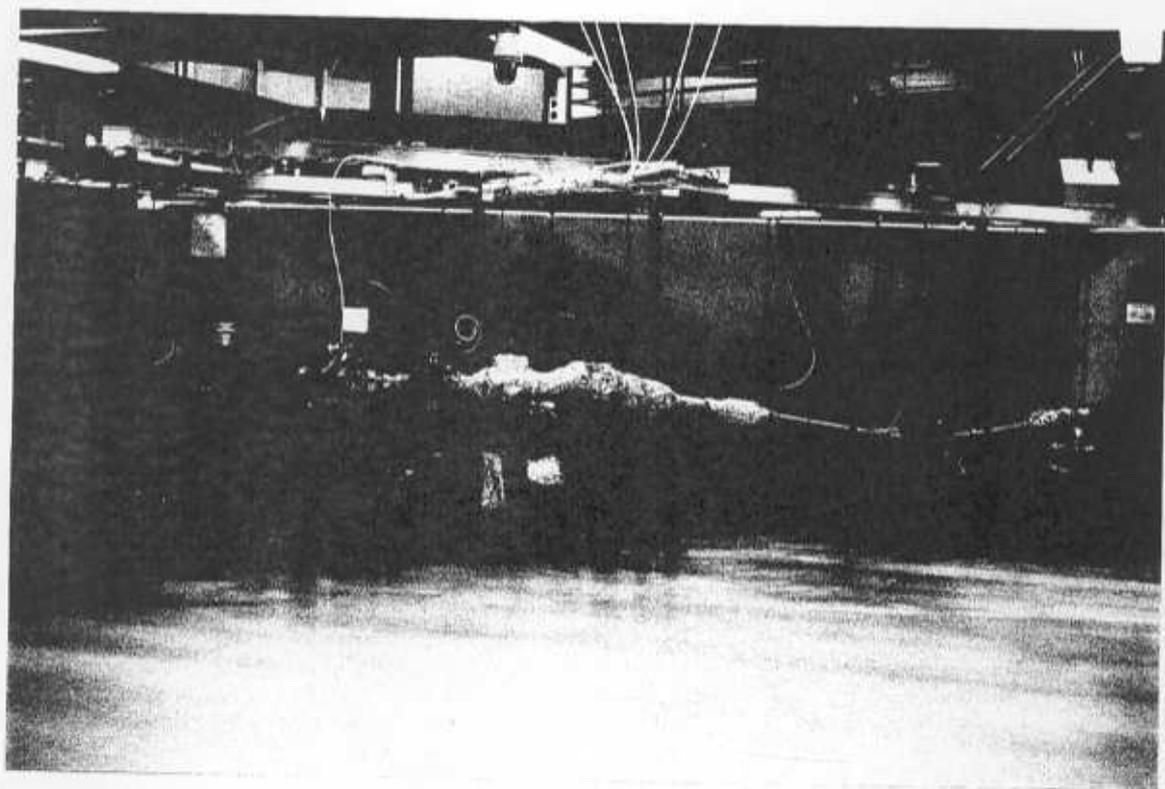
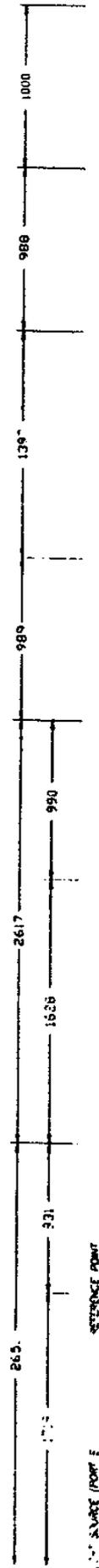


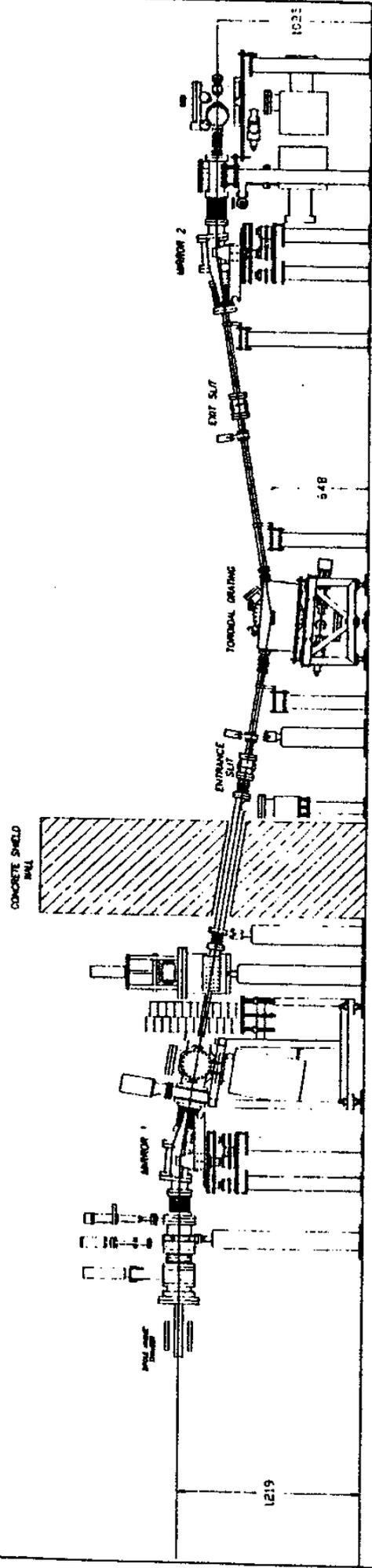
FIGURA IV.1.1.(a) - Fotografia da linha TGM montada em CAMD⁽⁴¹⁾.

CAMD-LNLS BRAZIL TGM BEAMLINE

METRIC SCALE (mm)



RF SOURCE (PORT E)



APPROX. DATE OF MANUFACTURE	APR 20 1983
DESIGNER	CAMD-LNLS PROJECT
DRAWN BY	FILE
PROJECT NO.	CAMD-LNLS BRAZIL BEAMLINE
SCALE	AS SHOWN
APPROVED BY	APPROVED
DATE	APR 20 1983

FIGURA IV.1.1.1.(b) - Desenho da linha TGM montada em CAMD.

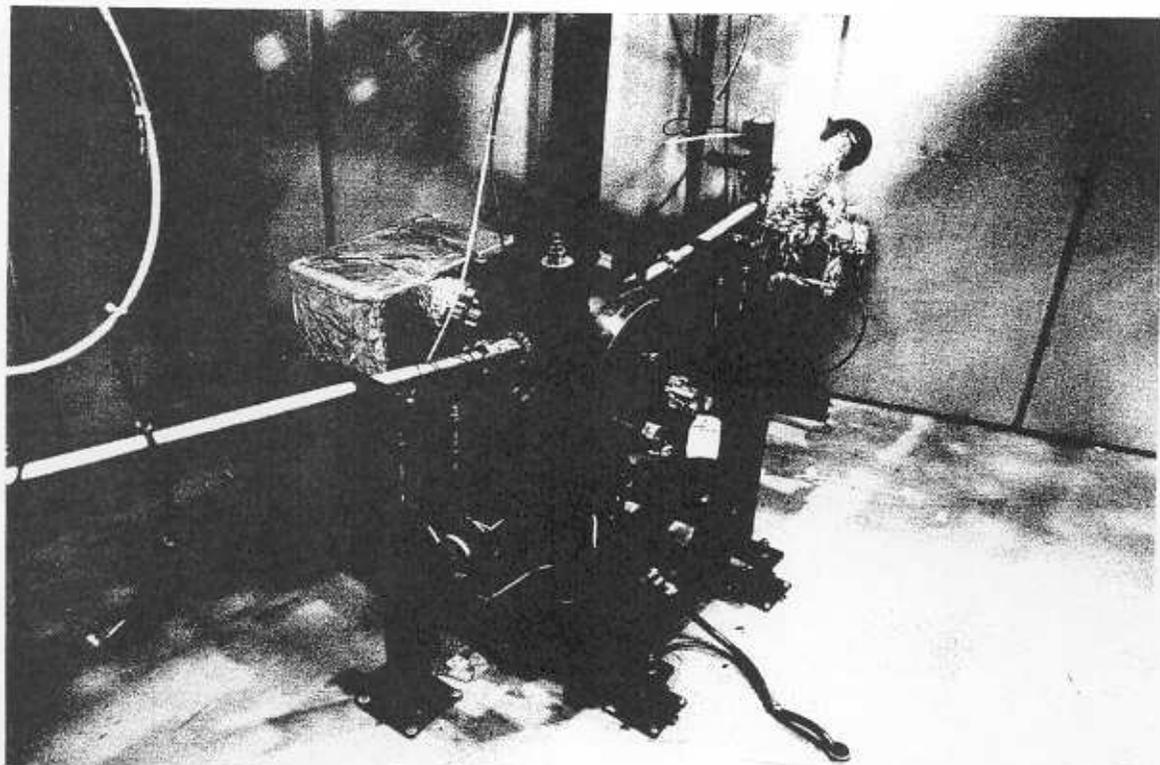


FIGURA IV.1.1.(c) - Monocromador TGM montado
em CAMD⁽⁴¹⁾.

2. Montagem e Condicionamento:

2.1. Posicionamento dos componentes

Uma fonte de luz síncrotron tem uma "profundidade" $d=2.\rho.\text{sen}(\phi/2)$, onde ρ é o raio de órbita de curvatura e ϕ é o ângulo horizontal coletado pela linha de luz.

O primeiro componente ótico precisa estar posicionado com uma precisão da ordem de $d/10$. No caso de CAMD, $\rho=2928\text{mm}$ e $\phi=10\text{mrad}$, o que resulta $d\approx 55\text{mm}$. Sendo a profundidade do foco para espelhos e grades toroidais da ordem de milímetros⁽³⁵⁾, vê-se que não há, com relação ao eixo da linha de luz, grandes problemas para posicionar os componentes ao longo do eixo da linha de luz.

Entretanto, as distâncias focais e a qualidade da "mancha" no foco dependem fortemente dos ângulos da ótica de incidência rasante. A precisão angular é limitada pela precisão nas medidas das distâncias, especialmente as distâncias verticais menores.

Se observarmos a equação (III.2.3a), acha-se para uma mudança de dr_2 na distância focal, quando o ângulo de incidência rasante ξ muda de $d\xi$:

$$dr_2/r_2 = [1+(r_2/r_1)].\text{cotan}\xi.d\xi \quad (\text{IV.2.1})$$

O ângulo de incidência rasante ξ é relacionado a distância l e ao "offset" h na altura entre os sucessivos componentes óticos por:

$$(d\xi/\xi) = (dh/h) + (dl/l) \quad (\text{IV.2.2})$$

Seja dx a precisão necessária nas medidas das distâncias. Fazendo $dh = dx = dl$ e desde que para a linha TGM $l \gg h$, tem-se:

$$(d\xi/\xi) \cong (dx/h) \quad (\text{IV.2.3})$$

Resolvendo para dx em termos de dr_2 ("profundidade do foco"):

$$dx = h \cdot (dr_2/r_2) \cdot [(\tan\xi)/\xi] \cdot [r_1/(r_1+r_2)] \quad (\text{IV.2.4})$$

Para o monocromador TGM, tem-se $r_1 \cong 1000\text{mm}$, $r_2 \cong 1400\text{mm}$, $dr_2 \cong 6\text{mm}$, $h \cong 100\text{mm}$ e $\xi = 4,5$ graus. Com isso, a equação (IV.2.4) fornece $dx \cong 0,2\text{mm}$, indicando que é importante posicionar com alta precisão os componentes óticos. Foi possível posicionar as grades e as fendas de entrada e saída dentro de um erro de mais ou menos $0,3\text{mm}$ das distâncias ideais.

A orientação dos espelhos toroidais e das grades também é um fator crítico. Estudos com o SHADOW(22) mostram que a rotação de apenas $0,1$ grau ($1,7$ mrad) em torno do

eixo normal da grade alarga a mancha focal e reduz o poder resolutivo por um fator de dois. Conseguiu-se alinhar as grades e seus eixos de orientação dentro de mais ou menos 0,7 mrad (0,04 graus) com relação à orientação ideal.

Uma empresa contratada pelo CAMD posicionou marcas no solo ao longo do eixo onde seria instalada a linha TGM. Foi fornecido à equipe brasileira um relatório contendo a posição absoluta de cada marca com relação aos seguintes parâmetros (origens):

1) Fonte síncrotron, $x=0$.

2) Plano vertical contendo o eixo teórico da linha de luz, $y=0$.

3) Plano da órbita do feixe de elétrons, $z=0$.

Tal relatório foi obtido pela empresa baseado nas marcas instaladas na época do posicionamento e alinhamento dos componentes do anel de armazenamento, pois não se pode usar simplesmente o nível do solo, visto que o mesmo não é ideal.

Basicamente, o procedimento utilizado para posicionar os componentes da linha TGM foi⁽³⁶⁾:

1) Utilizando-se uma trena metálica com escala milimétrica, instalou-se marcas nas posições dos componentes óticos;

2) Adicionaram-se outras marcas fora do eixo da linha de luz em posições arbitrárias, tal que se pudesse ter triângulos com os vértices nas posições dos componentes

óticos. As distâncias entre vértices foram determinadas utilizando-se a mesma trena do item (1);

3) Os suportes de cada componente tiveram seus parafusos de ajuste XYZ colocados nas posições intermediárias;

4) Tendo-se um teodolito localizado em uma das marcas fora do eixo da linha de luz e o outro teodolito localizado em uma das marcas no eixo da linha, realizou-se o processo interativo entre os dois teodolitos, determinando-se com precisão suficiente a posição de cada componente da linha de luz.

2.2. Vácuo

Após o posicionamento de todos os componentes da linha de luz levados do Brasil, instalou-se um "viewport" (janela ótica) na entrada da primeira fenda e fez-se vácuo na linha TGM. Realizou-se o recozimento ("baking"), obedecendo as rampas de temperatura das fendas, das grades e dos espelhos, assim como os limites de temperatura para estes componentes. A rampa é da ordem de 10 graus Celsius por hora e o limite é de 150 graus Celsius.

A pressão de 10^{-10} mbar foi conseguida em toda a linha de luz.

O front-end padrão do CAMD foi instalado e condicionado. Outra janela ótica também foi colocada na

saída do front-end (lado de fora da blindagem), de modo a se poder ver o espectro visível da luz síncrotron. Os dois viewports ficaram a aproximadamente 10 cm um do outro.

No dia 19 de Outubro de 1992, às 17:50 hs., a linha TGM viu luz síncrotron pela primeira vez. Pôde se observar o espectro visível atravessando a janela ótica do front-end. A mancha estava desfocalizada, mas atuando remotamente (lado de fora da blindagem) os controles dos motores de passo que atuam os acionadores do primeiro espelho, pôde-se focalizar o "spot" e ver a luz síncrotron chegar à câmara de amostra.

3. Comissionamento da linha de luz TGM:

O usuário de uma linha de luz tem o interesse em saber, entre outras coisas, os seguintes parâmetros⁽³⁷⁾:

- 1) Fluxo de fótons;
- 2) Resolução espectral;
- 3) Contaminação harmônica;
- 4) Calibração em energia.

Mediu-se o fluxo de fótons na posição da amostra e comparou-se com a expectativa teórica.

Um diodo Schottky GaAsP/Au (Hamamatsu 1127-04)⁽³⁸⁾ foi colocado na posição da amostra e mediu-se a fotocorrente em função da energia do fóton incidente, com três aberturas diferentes para as fendas (0,5mm, 0,3mm e 0,1mm) e para cada uma das três grades. As leituras das fotocorrentes foram normalizadas em função da eficiência quântica do diodo e também em função de uma corrente de 100mA para o feixe de elétrons armazenados a 1,3 GeV.

A figura IV.3.1 mostra os resultados obtidos.

As grades de 200s/mm e 600s/mm apresentaram resultados próximos aos esperados. Porém, a grade de 1800s/mm apresentou um fluxo 25 vezes menor. As medidas foram repetidas, mas os resultados se confirmaram.

A tabela IV.3.1 mostra as eficiências das grades, as refletividades dos espelhos e os fluxos medidos e esperados para algumas energias.

ABSOLUTE FLUX AT SAMPLE
TGM BEAMLINe
Grating 200g/mm
CAMD, January 26, 1993.

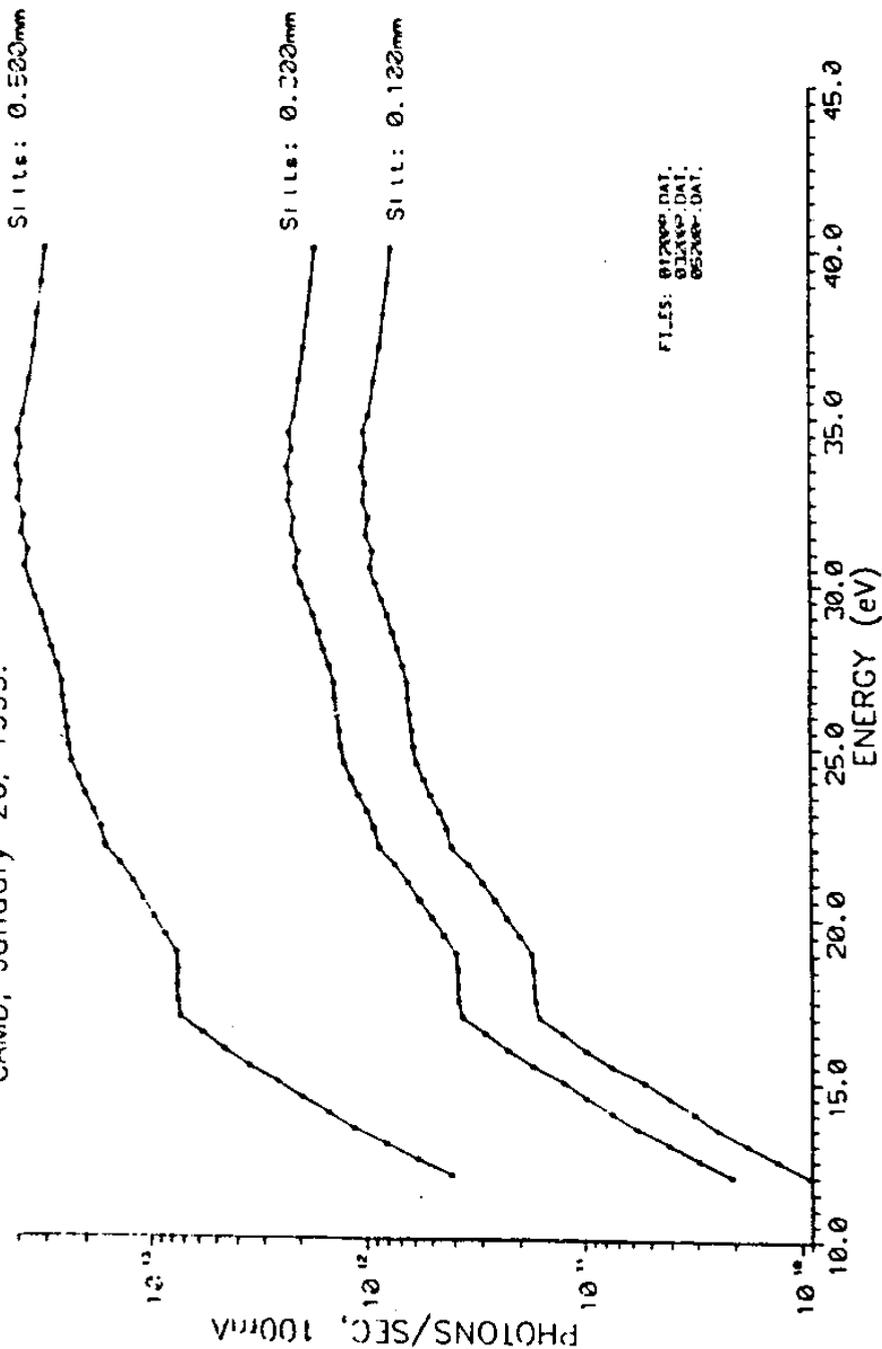


FIGURA IV.3.1.(a) - Fluxo absoluto na posição da amostra para a grade de 200s/mm.

ABSOLUTE FLUX AT SAMPLE
TGM BEAMLINe
Grating 600g/mm
CAMD, January 26, 1993.

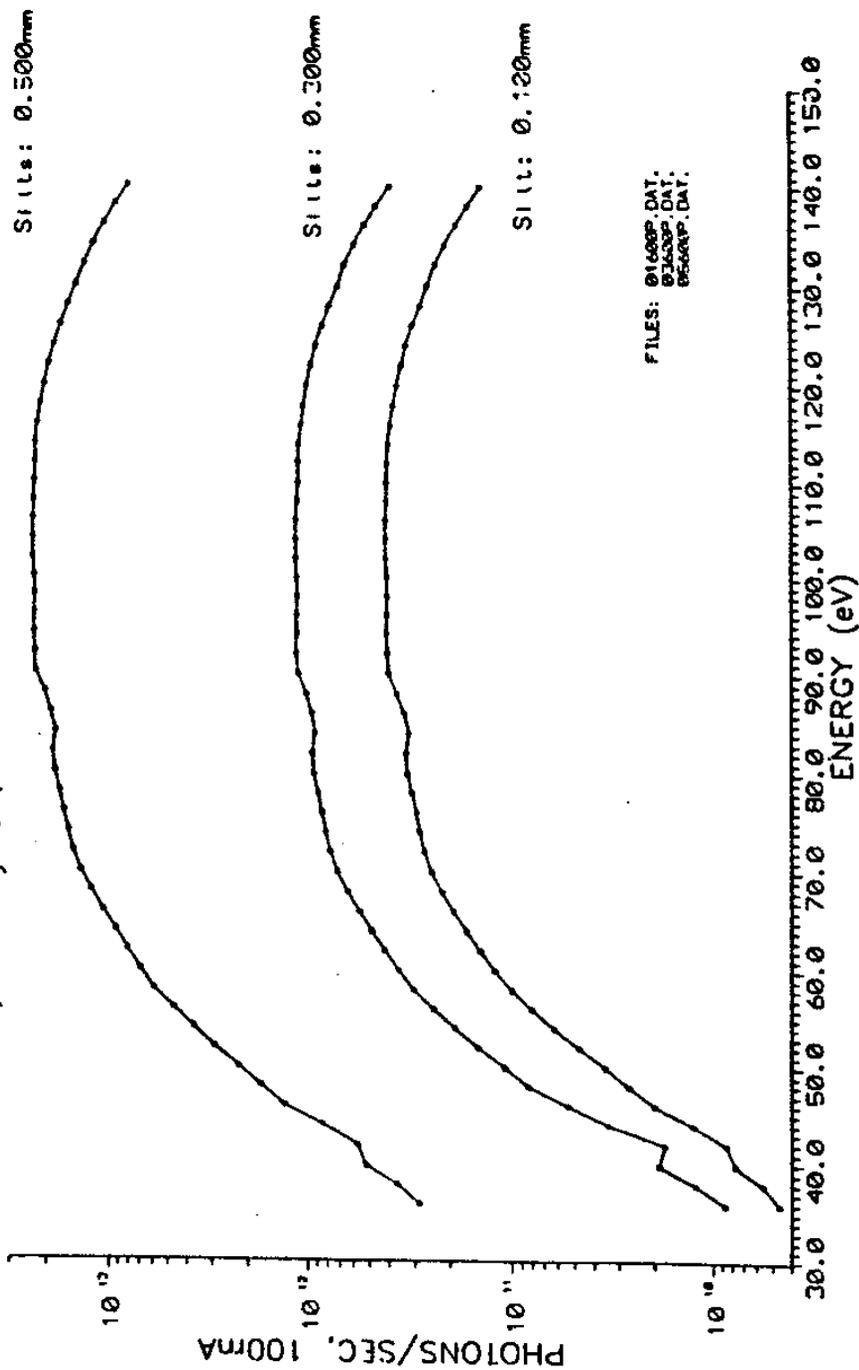


FIGURA IV.3.1.(b) - Fluxo absoluto na posição da

amostra para a grade de 600s/mm.

ABSOLUTE FLUX AT SAMPLE
TGM BEAMLINe
Grating 1800g/mm
CAMD, January 26, 1993:

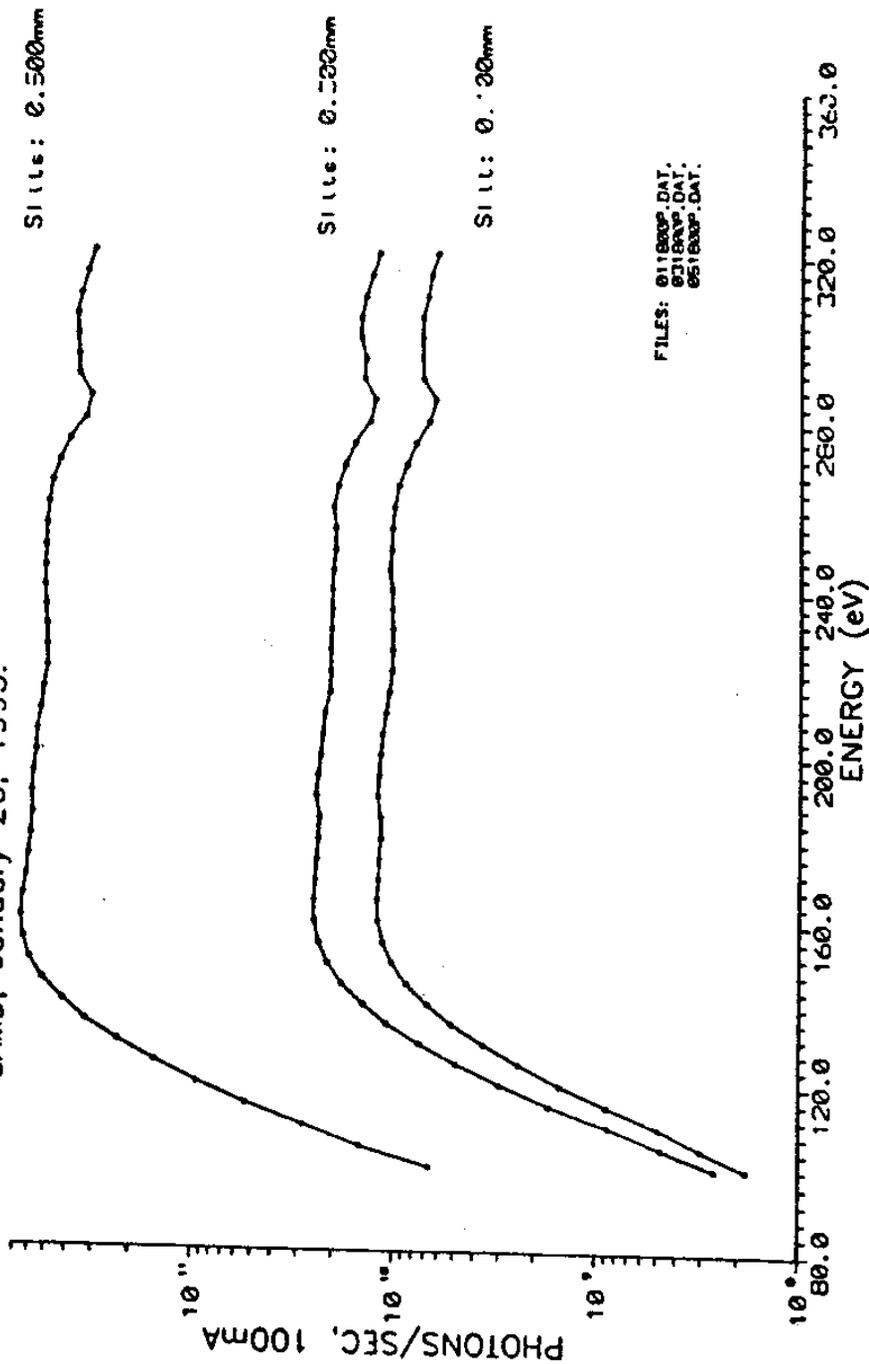


FIGURA IV.3.1.1.(c) - Fluxo absoluto na posição da amostra para a grade de 1800s/mm.

ENERGIA DO FÓTON (eV)	35	100	200
GRADE USADA (s/mm)	200	600	1800
EFICIÊNCIA DA GRADE	0,5	0,3	0,1
REFLETIVIDADE DO OURO	0,80	0,82	0,50
FLUXO ESPERADO	-3.10^{13}	-3.10^{13}	-1.10^{13}
FLUXO MEDIDO	$-2,8.10^{13}$	$-1,5.10^{13}$	-4.10^{11}

TABELA IV.3.1 - Dados para a obtenção do fluxo na câmara de amostras.

Utilizou-se um filtro de alumínio, com espessura de 1500 Angstroms, para checar a calibração absoluta da energia do TGM em alguns pontos da faixa espectral das grades de 200s/mm e 600s/mm. Convém salientar que todas as três grades foram ajustadas no mecanismo de rotação (que é o mesmo para as três grades) tal que o feixe especular das grades fossem refletidos na mesma direção. As escalas de comprimento de onda para cada uma das grades tem a mesma origem e diferem em comprimento de acordo com a densidade

de sulcos. Logo, a informação sobre a calibração absoluta da energia em um dado ponto fornece a calibração em toda a faixa espectral abrangida pela grade.

A banda de absorção 2p do Al medida é mostrada na figura IV.3.2 e reproduz o que é mostrado na literatura⁽³⁹⁾. Ainda segundo a literatura, considerando-se os picos 2p(1/2) e 2p(3/2) do Al, pode-se concluir que a calibração absoluta do comprimento de onda do TGM está em torno de 2%.

Descontinuidades similares na transmissão em comprimentos de onda que são múltiplos da banda de absorção, mas com "contrastos" menores, foram observadas. Isso evidenciou que o monocromador tem contaminação harmônica.

A contribuição do segundo harmônico no monocromador TGM foi estimada usando-se também a banda de absorção 2p do Al. Assumindo-se que a intensidade de saída pode ser descrita por:

$$I(w) = I_1(w) + I_2(2w) \quad (\text{IV.3.1})$$

onde I_1 é a "fundamental" e I_2 é o segundo harmônico, o feixe transmitido através de um filtro com coeficiente de transmissão $T(w)$ é dado por:

$$I'(w) = T(w) \cdot I_1(w) + T(2w) \cdot I_2(2w) \quad (\text{IV.3.2})$$

Assumindo-se que a distribuição espectral do TGM é "suave", podendo-se então ver claramente a banda de absorção, fez-se medidas da intensidade transmitida em torno da banda de absorção (intervalo: w_+ e w_-).

Com isso, tem-se:

$$\begin{aligned} I'(w_+) &= T(w_+) \cdot I_1(w) + T(2w_+) \cdot I_2(2w) \\ I'(w_-) &= T(w_-) \cdot I_1(w) + T(2w_-) \cdot I_2(2w) \end{aligned} \quad (\text{IV.3.3})$$

Os valores de $I'(w_+)$ e $I'(w_-)$, assim como os coeficientes de transmissão são conhecidos, ou podem ser medidos. Daí, pode-se obter I_1 e I_2 .

A tabela IV.3.2 mostra os valores para os coeficientes de transmissão e intensidades medidas para o feixe em w_+ e w_- .

De acordo com a tabela IV.3.2, para a grade de 600s/mm com o TGM ajustado para 72eV, obtém-se $I_2/I_1 = 0,26$. Para a grade de 200s/mm e com o TGM ajustado em 36eV, $I_2/I_1 = 0,075$.

Comparando-se os dados obtidos com a linha TGM6 do Daresbury Laboratory⁽⁴³⁾, onde tipicamente 25% da luz que chega até a amostra é devido à difração de segunda ordem das grades toroidais, conclui-se que a linha TGM/LNLS apresenta contaminação harmônica típica. Esse fator deve ser considerado durante a realização de experimentos. Filtros podem ser utilizados para a atenuação das ordens superiores.

A resolução espectral obtida com a grade de 600s/mm e fendas de entrada e saída ajustadas em 0,1mm foi conseguida através da comparação da banda de absorção 2p do Al, mostrada na figura IV.3.2.

TRANSMISSÃO PARA UM FILME FINO DE ALUMÍNIO (1500 Å)

ENERGIA DOS FÓTONS (eV)	TRANSMISSÃO
35,5	0,36
71,0 - ε	0,50
71,0 + ε	0,0
142,0	0,3

FLUXO MEDIDO APÓS O FILME DE Al - GRADE 600s/mm

ENERGIA DOS FÓTONS (eV)	FLUXO (UNIDADES ARBITRÁRIAS)
71,8	1,2
71,0	8,8

FLUXO MEDIDO APÓS O FILME DE Al - GRADE 200s/mm

ENERGIA DOS FÓTONS (eV)	FLUXO (UNIDADES ARBITRÁRIAS)
35,5	5,8
35,0	6,4

TABELA IV.3.2 - Valores para os coeficientes de transmissão e intensidades medidas para o feixe transmitido em w_+ e w_- .

ALUMINUM FILTER - TGM CALIBRATION
SLITS: 0.100mm
STEPS: 0.05eV
GRATING 600 g/mm
CAMD, February 02, 1993.

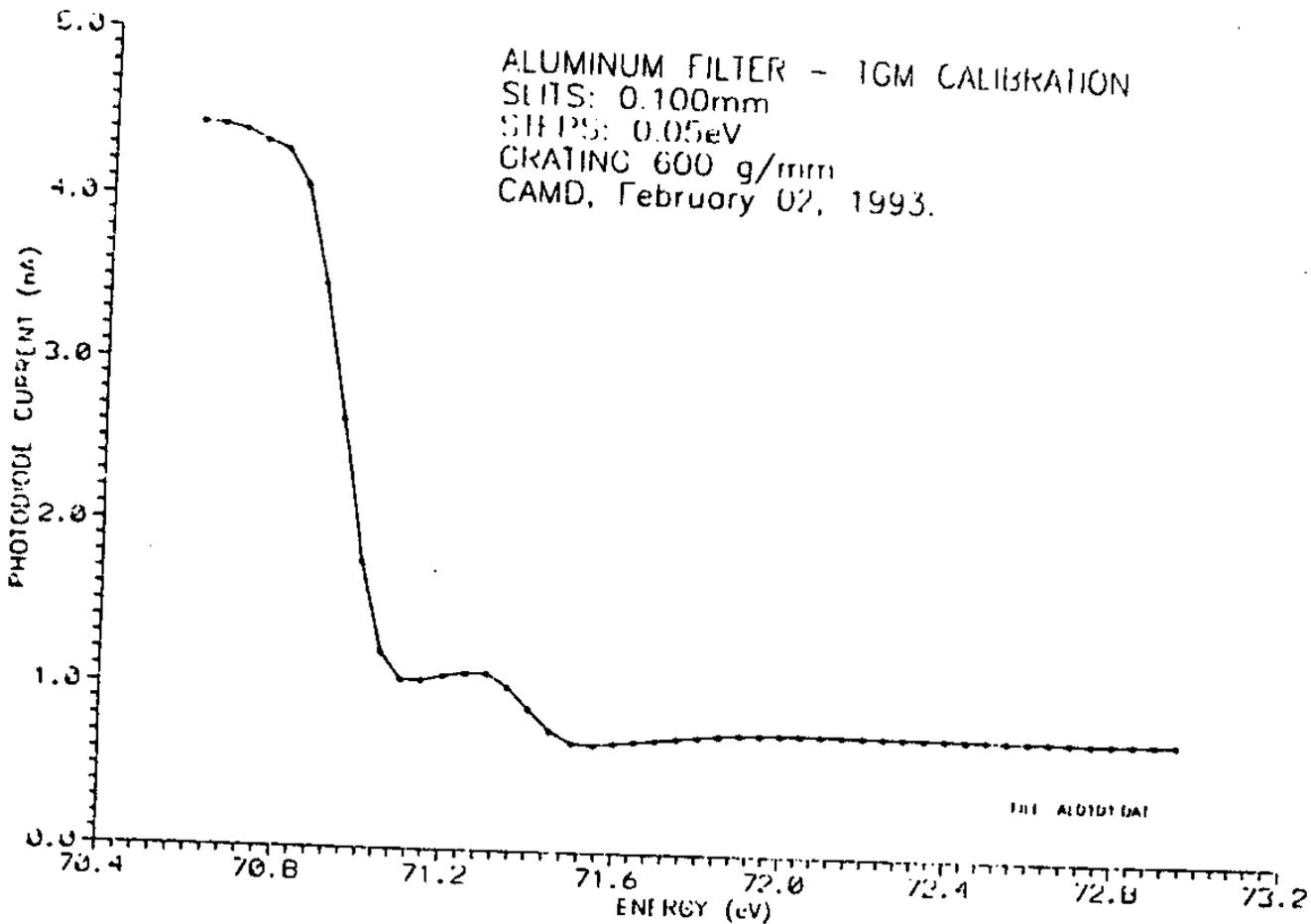


FIGURA IV.3.2 - Banda de absorção 2p do Al.

A tabela IV.3.3 lista os valores medidos na linha TGM e os valores encontrados na literatura.

	G & B (*)	LINHA TGM
POSIÇÃO DA BANDA	73,30	71,12 (0,05)
LARGURA DA "RAMPA"	0,20	0,20 (0,05)
RESOLUÇÃO DOS INSTRUMENTOS	0,04	Vide texto

(*)Gaehwiller and Brown, Phys. Rev. B2, 1918-25 (1970)

TABELA IV.3.3 - Principais características da banda de absorção 2p do Al.

A largura do limiar é a característica mais notória nesta banda de absorção. Sabe-se que isso tem relação com os efeitos de temperatura na superfície de Fermi, tempo de vida dos estados iniciais e resolução dos instrumentos utilizados para a medição. Acredita-se que a contribuição dominante seja a resolução dos instrumentos. Estima-se que a linha TGM tenha uma resolução não melhor que 0,05eV. Isso

garante o poder resolutivo teórico de ~ 1400 , consistente com os limites de aberração da grade.

Um espectrógrafo de VUV e raios-X moles contendo uma grade toroidal holográfica foi construído no LNLS. Esse instrumento cobre a faixa espectral de 30eV à 150eV e tem um poder resolutivo máximo de 500. O ângulo sólido de aceitação da grade é 644 mrad^2 . (40)

O espectrógrafo foi instalado na câmara de amostras da linha TGM, em CAMD. Testes iniciais foram realizados. A resposta espectral do sistema de detecção foi caracterizada medindo-se diretamente a eficiência de conversão da camada de fósforo e do bloco de fibra ótica em toda a faixa espectral do espectrógrafo, levando-se em conta também a eficiência da grade.

V - CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi construir uma linha de luz com um monocromador de grade toroidal (TGM) para o LNLS.

A linha construída opera na faixa espectral de 12eV a 310eV, com um fluxo de ftons da ordem de $2 \cdot 10^{12}$ fótons/seg em uma banda espectral de $\Delta E/E = 0,001$. Foi medida a contaminação harmônica, obtendo-se da ordem de 25% para o segundo harmônico de 72eV, 7,5% para o segundo harmônico de 36eV, e valores desprezíveis para o terceiro harmônico. O poder resolutivo foi estimado em $E/\Delta E \geq 1400$ em 72eV, com fendas de 0,200mm de largura. Verificou-se a calibração de energia do monocromador, encontrando-se erro menor que 2%.

É importante ressaltar que a oportunidade de se instalar a linha de luz brasileira nos Estados Unidos foi de importância fundamental, visto que nós brasileiros jamais tínhamos executado tal tarefa. Durante a montagem, vários detalhes práticos foram desenvolvidos e/ou aperfeiçoados. Certamente, o tempo necessário para instalar a mesma linha de luz (ou outra semelhante) ao redor de um anel de armazenamento e deixá-la operacional diminuiria para 1/3 do tempo gasto em CAMD.

Outro aprendizado importante foi o comissionamento da linha TGM. Todo o sistema desenvolvido no Brasil está funcionando satisfatoriamente, dentro das especificações de projeto.

O auxílio de pessoas experientes no uso de luz síncrotron foi de total enriquecimento ao nosso método de trabalho.

Futuras linhas de luz serão construídas no LNLS. A experiência adquirida com a primeira linha de luz brasileira irá contribuir de forma relevante.

REFERÊNCIAS

- (1) S. Krinsky, M.L. Perlman and R.E. Watson, "Characteristics of Synchrotron Radiation and of its Sources". Handbook on Synchrotron Radiation, Vol. 1A, E.E. Koch, 1983.
- (2) H. Winick and s. Doniach, "Synchrotron Radiation Research", Plenum Press - New York and London, 1983.
- (3) Roberto Lobo, "Proposta Preliminar do Estudo de Viabilidade para a Implantação de um Laboratório Nacional de Radiação Síncrotron", CBPF, Rio de Janeiro, 1983.
- (4) A.R.D. Rodrigues, "Projeto LNRS-01", Laboratório Nacional de Radiação Síncrotron, 1985.
- (5) J.C. Fuggle, "Overview of Synchrotron Radiation: Uses and Machines", School of Synchrotron Radiation in Science and Technology, 14 October - 8 November 1991, Trieste, Italy.
- (6) J.D. Jackson, "Eletrodinâmica Clássica", cap. 14, Editora Guanabara Dois, 1983.
- (7) A. Craievich and A.R.B. de Castro, "Scientific Instrumentation at LNLS", First Workshop Synchrotron Light: Applications and Related Instrumentation, Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, Campinas, Brazil, July 25-28, 1988.
- (8) Cylon E.T. Gonçalves da Silva, "Brief History and Objectives of the Laboratório Nacional de Luz Síncrotron",

Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, Campinas, Brazil, July 25-28, 1988.

(9) L. Lin, L. Jahnel e P.F. Tavares. "The LNLS UVX2 Soft X-Ray Source", MeT-09/91, LNLS, Campinas/SP, Brasil.

(10) A.R.B. de Castro, "Instrumentação Ótica para Ultra Violeta de Vácuo e Raios-X Moles", First Summer School on the Physics of Synchrotron Light Sources, Applications and Related Instrumentation", 12-16 Fevereiro 1990, LNLS, Campinas, SP.

(11) P.T. Fonseca, "Estudos para o Projeto de uma Grade de Difração Côncava Holográfica", EQM apresentado na UNICAMP em 23 de Junho de 1992.

(12) B.D. Cullity, "Elements of X-Ray Diffraction" (Second Edition), Addison-Wesley Publishing Company, Inc.

(13) P. Thiry, "Caracteristiques des TGM Existants ou en Projet a LURE", Laboratoire pour l'Utilisation du Rayonnement Electromagnétique (LURE), Orsay, France, Novembro/1984.

(14) Fotos tiradas no anel Super ACO por P.T. Fonseca durante período de estágio em Novembro de 1990.

(15) Data Sheet DS-28, Maxwell Brobeck Division, 4905 Central Avenue, Richmond, California 94804-5803, U.S.A..

(16) P.T. Fonseca, J.G. Pacheco, E.d'Ávila Samogin and A.R.B. de Castro, Rev. Sci. Instrum., 63, 1256 (1992).

(17) J.G. Pacheco, P.T. Fonseca, A.R.B. de Castro, Rev. Bras. Apl. de Vácuo, 10, 151 (1991).

(18) Milton B. da Silva (Grupo de Vácuo do LNLs),
"Procedimentos de limpeza padrão", LNLs CT04/92.

(19) H. Haber, J. Opt. Soc. Am., 40, 153 (1950).

(20) W. R. McKinney and C. Palmer, Appl. Opt., 26,
3108 (1987).

(21) ISA division Jobin Yvon, 16 - 18 Rue du Canal,
Logjumeau, Cedex, France.

(22) B. Lai, K. Chapman and F. Cerrina, "SHADOW",
Nucl. Instrum. Meth., A266, 544 (1988).

(23) M. Born and E. Wolf, "Principles of Optics",
Pergamon Press, London, 1970, 4th Edition, ch. V.

(24) A.R.B. de Castro, P.T. Fonseca, "Primary Shutter
and Gamma Ray Trap", Second Workshop Synchrotron Light:
Applications and Related Instrumentation II, Laboratório
Nacional de Luz Síncrotron, Campinas, Brazil, September 4-
8, 1989.

(25) "Manual explicativo sobre Aços Inoxidáveis", Aços
Villares S.A., Avenida do Estado 6116, Cx. Postal 3589, São
Paulo - Capital.

(26) R. Jean et J. Rauss, "Sur la protection contre
les rentrées d'air dans les installations sous vide", Le
Vide, 111, Maio-Junho 1964.

S. Sato, A. Kakizaki, T. Miya, Y. Morioka, T.
Yamakawa and T. Ishii, "Transit times of pressure waves in
an Acoustic Delay Line", Nucl. Inst. and Meth. in Phys.
Res. A240 (1985) 194-198, North-Holland. Amsterdam.

(27) P.A.P. Gomes, "Aplicação da Criossorção no Vácuo de Aceleradores e Linhas de Luz Síncrotron", Tese de Mestrado apresentada no IFGW/UNICAMP.

(28) M.A.B. de Moraes, G.M. Gualberto e R.A. Douglas, "Ciência e Tecnologia de Vácuo", IFGW/UNICAMP.

(29) A.R.B. de Castro, P.T. Fonseca, J.E. Verdugo, "A Solid State Parallel Detection System for IR, Visible and X-Ray Photons", Festschrift in Honor of Rogério Cerqueira Leite, World Scientific, 1991.

(30) A.R.B. de Castro, " Optics for a VUV Beamline at LNLS", Second Workshop Synchrotron Light: Applications and Related Instrumentation II, Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, Campinas, Brazil, September 4-8, 1989.

(31) C. Scorzato, M.S.Z. Graeff, J.E.A. Verdugo, "Four-phase step motor driver", LNLS MT01/92.

M.S.Z. Graeff, J.E.A. Verdugo, "Five-phase step motor driver", LNLS MT02/92.

(32) J.G.R.S. Franco, S. Furquim, O. Monteiro, A.R.D. Rodrigues and C.R. Scorzato, "LNLS Control System Conceptual Design", Proc. IEEE PAC (March 20-23 1989, Chicago, IL) edited by F. Bennett and J. Kopta (IEEE, Piscataway, NJ 1989), Vol. 3, pp. 1651-1653.

(33) A.M.C. Moutinho, M.E.S.F. e Silva, M.A.C.M.I. da Cunha, "Tecnologia de Vácuo", Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia.

(34) B.C. Craft, A.M. Findley, G.L. Findley, S.P. McGlynn, J.D. Scott and F.H. Watson, "LSU Center for Advanced

Microstructures and Devices", Rev. Sci. Instrum. 60(7) July 1989.

R.L. Stockbauer, E.D. Poliakoff, P. Ajmera, B.C. Craft and V. Saile, "Center for Advanced Microstructures and Devices (CAMD) at Louisiana State University", Physica Scripta, Vol. 41, 788-792, 1990.

(35) A.R.B. de Castro, P.T. Fonseca, J.G. Pacheco, J.E. Verdugo, M.S.Z. Graeff, G.B. Fraguas, "Design and Applications of a Toroidal Grating Beamline", Brazilian Journal of Physics, vol. 23, 1, March, 1993.

(36) A.R.B. de Castro, "Surveying and Alignment of the TGM Beamline", Comunicação interna, LNLS, Março/92.

J.G. Pacheco, P.T. Fonseca, A.R.B. de Castro, "TGM Alignment Procedure: Results", Comunicação interna, LNLS, Junho/92.

(37) P.T. Fonseca, G.B. Fraguas, A.R.B. de Castro, "Comissioning of TGM beamline and testing of spectrograph", Technical Report, LNLS, February/93.

(38) M. Krumrey, E. Tegeler, J. Barth, M. Krisch, F. Schaefers, R. Wolf, "Schottky type photodiodes as detectors in the VUV and soft X-ray range", Appl. Opt. 27, 4336-41 (1988).

(39) C. Gaehwiller and F.C. Brown, "Photoabsorption near the LII and LIII edge of Silicon and Aluminun", Phys. Rev. B2, 1918-25, (1970).

(40) A.R.B. de Castro, Physica Scripta, A41, 499 (1990).

(41) Fotos tiradas por A.R.B. de Castro no CAMD, em Janeiro/1993.

(42) D.J. Struik, "Lectures on Classical Differential Geometry", ch. 2, fig 2-33, Publ. Addison-Wesley Co Inc, Reading USA (1950)

(43) T.S. Turner and D. Teehan, "Characteristics of TGM6", Daresbury Laboratory Technical Memorandum DL/SCI/M85E, March 1991.