

TÍTULO:

"APLICAÇÃO DA CRIOSSORÇÃO NO VÁCUO DE ACELERADORES E  
LINHAS DE LUZ SÍNCROTRON".

Paulo Alberto Paes Gomes

Este exemplar corresponde à  
Relatório Final da Tese defendida  
pelo aluno Paulo A P Gomes e  
aprovada pela Comissão julgadora.

A. Rubens B. de Castro  
19 Abril 1990

CLASSIF. ....

AUTOR.....

V..... EX.....

TOMBO BC/ 12109

I. FÍSICA - UNICAMP

n.º c.

+ UNICAMP/M

n.º :

G1 585 a

n.º tombo.

12107193

IM 780

MM

CM 000 589 142

Este trabalho é dedicado a todos aqueles que como Dr. Flávio , meu pai , se empenharam e se empenham pelo ensino e pesquisa neste país , apesar de tudo.

Agradeço de coração a todos os amigos do LNLS, em especial ao prof. A. R. B. de Castro , que gentilmente me acolheu como seu orientando , aos professores C. E. T. G. da Silva e A. R. D. Rodrigues, por todo apoio que me deram , aos companheiros do Lab. de Vácuo , e a Marina Marino pelo seu paciente trabalho de datilografia.

## Resumo

Neste trabalho foi apresentado o projeto dos Sistema de Vácuo dos Aceleradores Linear e Circular do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS). Foram levantados vários problemas de operação destas máquinas devidos à contaminação com Hidrocarbonetos, normalmente provenientes de bombas mecânicas usadas no pré-vácuo. Foi proposta a obtenção de pressões menores que  $1 \times 10^{-4}$  mbar usando-se sistemas de bombas de criossorção. Estas bombas foram projetadas, construídas e caracterizadas mostrando-se apropriadas para a obtenção das pressões desejadas, sem o menor risco de contaminação. Finalmente elas foram aplicadas em sistemas de Ultra Alto Vácuo como o Sistema de Testes do Canhão de Elétrons e o LINAC de 50 MeV.

# ÍNDICE

## Cap. I - O Projeto Síncrotron

### 1.1 - Introdução

### 1.2 - O Linac Injetor

#### 1.2.1 - O Canhão de Elétrons

#### 1.2.2 - Transporte e Agrupamento dos Elétrons entre o canhão e a primeira estrutura

#### 1.2.3 - As Estruturas Aceleradoras

#### 1.2.4 - Sistemas Auxiliares

### 1.3 - O Anel de Armazenamento

### 1.4 - As Linhas de Luz

## Cap. II - Projeto dos Sistemas de Vácuo

### II.1 - Sistema de Vácuo do LINAC

#### II.1.1 - Requisitos

#### II.1.2 - Cálculo da Velocidade de Bombeamento necessária

#### II.1.3 - Descrição do Sistema de Vácuo e seus Componentes

#### II.1.4 - Problemas relacionados à operação do LINAC

### II.2 - Sistema de Vácuo do Anel

#### II.2.1 - Requisitos

#### II.2.2 - Cálculo para determinação da velocidade de Bombeamento Necessária.

#### II.2.3 - Descrição do Sistema de Vácuo e escolha das Bombas

#### II.2.4 - Problemas relacionados à interação do feixe de elétrons com as moléculas dos gases residuais.

### II.3 - Sistema de Vácuo das Linhas de Luz

#### II.3.1 - Sistema de Vácuo do "Front End"

#### II.3.2 - Sistema de Vácuo da Parte Óptica das Linhas de Luz

II.4 - Problemas por Contaminação com Hidrocarbonetos e Bombas de Criossorção.

Cap. III - A Zeolita

III.1 - O que são as Zeolitas

III.2 - Como se dá a Adsorção

Cap. IV - Construção e Caracterização das Bombas de Criossorção

IV.1 - As Bombas de Criossorção

IV.2 - Montagem Experimental para Caracterização das Bombas

IV.3 - Bombeamento em um Estágio

IV.4 - Bombeamento em dois Estágios

IV.5 - Bombeamento em tres Estagios

Cap. V - Aplicação das Bombas de Criossorção em Sistemas de Ultra Alto Vácuo

V.1 - O Sistema de Testes do Canhão de Elétrons

V.2 - O Sistema de Testes da Estrutura Aceleradora

V.3 - O LINAC 50 MeV

Cap. VI - Conclusões

## I.1 Introdução

O Laboratório Nacional de Luz Síncrotron é um projeto de física e engenharia de aceleradores que tem como objetivo principal fornecer a toda comunidade científica brasileira uma poderosa fonte de radiação eletromagnética. Esta radiação, chamada radiação síncrotron, é emitida por elétrons relativísticos quando forçados por campos magnéticos a descreverem trajetórias curvas. Para tanto, estão sendo projetados e construídos um acelerador de elétrons, um anel de armazenamento e diversas estações experimentais onde pesquisas pura e aplicada serão efetuadas.

O espectro eletromagnético da radiação emitida por um anel pode ser caracterizado, a grosso modo, por dois números (ref.1). O primeiro chamado comprimento de onda crítico (ou  $\lambda_c$ ), é o valor do comprimento de onda que divide o espectro em dois lados de igual energia. Ou seja, integrando-se a energia de todos os fótons emitidos com  $\lambda > \lambda_c$  e  $\lambda < \lambda_c$  temos o mesmo valor.

O segundo número é a potência total radiada. Em unidades práticas temos que:

$$\lambda_c \text{ (Å)} = 186,4 / B E^2$$

•

$$P \text{ (KW)} = 2,654 B E^3 I$$

Onde: B é dado em KGauss

E é dado em GeV

I é dado em Amperes

Vemos que estes dois números dependem somente do campo magnético, da energia dos elétrons e no segundo caso da corrente total.

Números típicos para anéis de armazenamento para utilização da Radiação Síncrotron são: B entre 10 e 60 KGauss (60 já em anéis supercondutores); E entre 0,5 e 8 GeV e I entre 0,05 e 1 Ampere.

No LNLS optamos por construir um anel de armazenamento com os seguintes parâmetros:

$$E = 1,15 \text{ GeV}$$

$$B = 14 \text{ KGauss}$$

$$I = 100 \text{ mA}$$

$$\lambda_c = 10,07 \text{ \AA}$$

$$P = 5,65 \text{ KW}$$

Esta máquina terá seu espectro distribuído entre o Ultra Violeta de Vácuo e raio-X moles. Este espectro de Radiação mostrado na Fig. I.1, pode ser utilizado por pesquisadores das mais diversas áreas. Citamos aqui por exemplo:

- Difração de Raio X
- Litografia de Raio X
- Espectroscopia de VUV
- Espectroscopia convencional

A diversidade dos usuários da Radiação Síncrotron trás em si mesma alguns dos outros objetivos do Projeto Síncrotron como:

- Facilitar intercâmbio entre centros de pesquisa e indústrias
- Incentivar trabalhos multidisciplinares



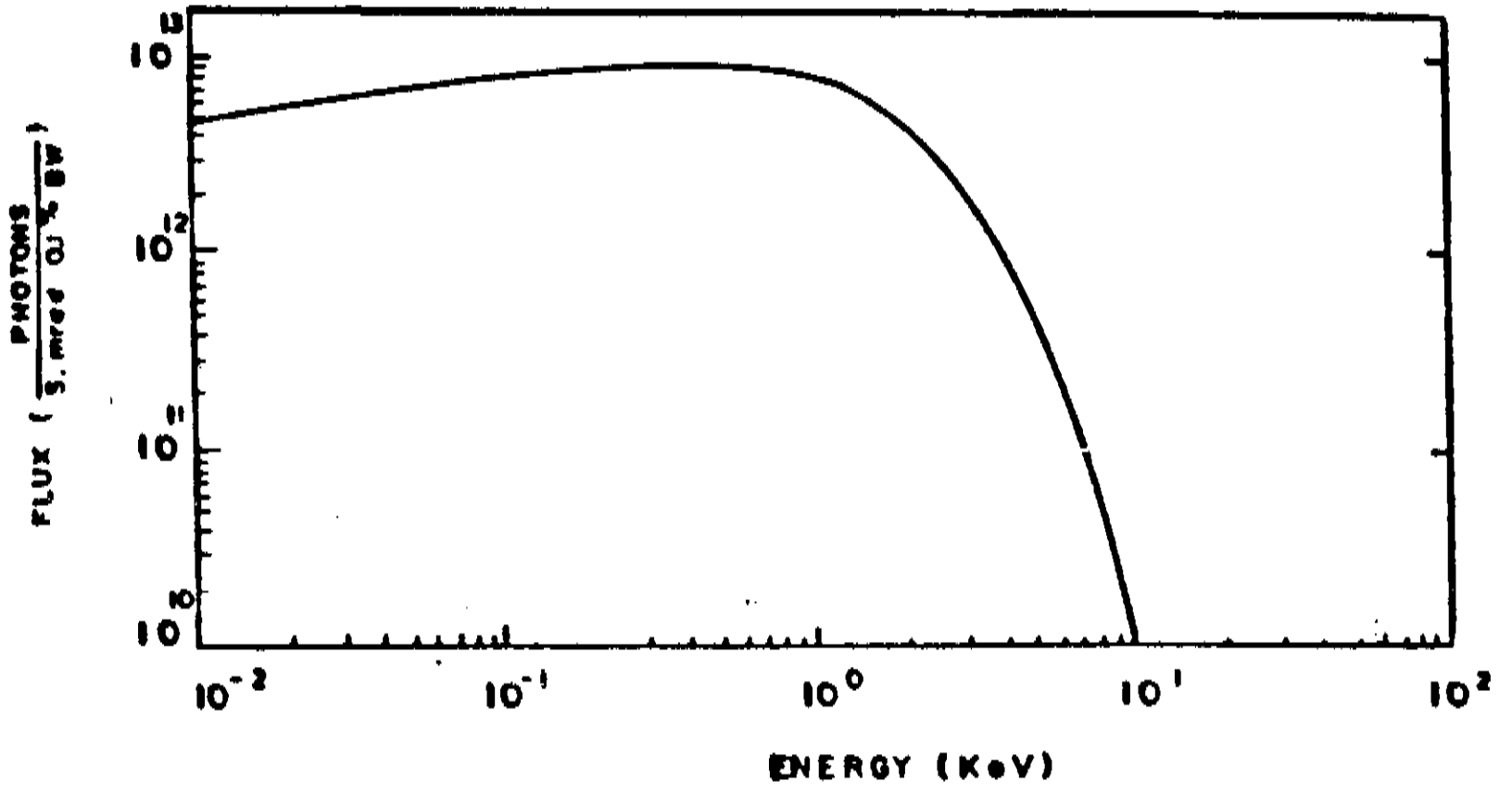


Fig. I.1 - Espectro da Radiação Emitida pelo anel do LNL

## - Fortalecer a comunidade científica

Um outro grande objetivo deste projeto é o fortalecimento da indústria nacional de tecnologia. Assim, a grande maioria dos componentes utilizados neste projeto serão desenvolvidos pelos seus técnicos ou por indústrias nacionais em colaboração com o LNLS, o que significa o domínio de tecnologias estratégicas como: Ultra Alto Vácuo, Eletrônica de Potência, Óptica Fina, etc.

No restante deste capítulo descreveremos os principais componentes deste projeto:

- O acelerador linear
- O anel de armazenamento
- As linhas de luz

### I.2 O Linac Injetor

A primeira máquina a ser construída é o acelerador linear (LINAC) usado para a injeção de elétrons no anel de armazenamento (ref.2). No LINAC os elétrons são acelerados basicamente em duas fases. Na primeira os elétrons ganham energia de até 80 KeV ao atravessarem um campo eletrostático em um componente chamado canhão de elétrons. Na segunda estes elétrons entram em 4 guias de onda, chamados estruturas aceleradoras, onde ondas de rádio frequência lhes fornecem energia de até 100 MeV. Descreveremos mais detalhadamente cada um destes componentes.

#### I.2.1 O Canhão de Elétrons

Um desenho esquemático do canhão de elétrons utilizado no

LNLS é mostrado na Fig. I 2.

Este canhão consiste de um cátodo emissor de elétrons, uma grade e um anodo de Cobre. Estes componentes se encontram montados dentro de um tubo de cerâmica (Alumina 99) corrugado que faz o isolamento entre o anodo e o catodo.

A operação deste canhão é feita da seguinte forma:

Primeiramente uma tensão de 80 KeV é aplicada entre catodo e anodo por uma fonte estabilizada de alta tensão. Os elétrons no entanto são impedidos de deixarem o catodo pois uma tensão de 50 V em relação a ele é aplicada na grade.

Um pacote de elétrons é então liberado quando uma fonte pulsada de 175 V polariza o catodo negativamente com relação à grade. Este pulso, no nosso caso, tem 100 ns de duração e a corrente extraída é de aproximadamente 1 A. A Fig. I.3 mostra a corrente em função do tempo para a taxa de repetição máxima (33Hz) do nosso LINAC.

A largura do pulso, 100 ns é limitada pela queda de tensão na fonte. Assim, com este pulso temos uma dispersão de energia de  $\approx 0,1\%$  (80eV) entre os elétrons. Se aumentamos a largura do pulso esta dispersão também aumenta.

I.2.2 Transporte e agrupamento dos elétrons entre o canhão e a primeira estrutura

Os elétrons saem do canhão com 80 KeV de energia  $\pm 0,1\%$ , o que equivale a um  $\beta \cong 0,5$ . Eles são então focalizadas por lentes magnéticas e passam por um componente chamado pré agrupador ou pré buncher. Este é simplesmente uma cavidade de  $\cong 1$ cm de comprimento alimentada por uma antena de RF na mesma frequência da microonda

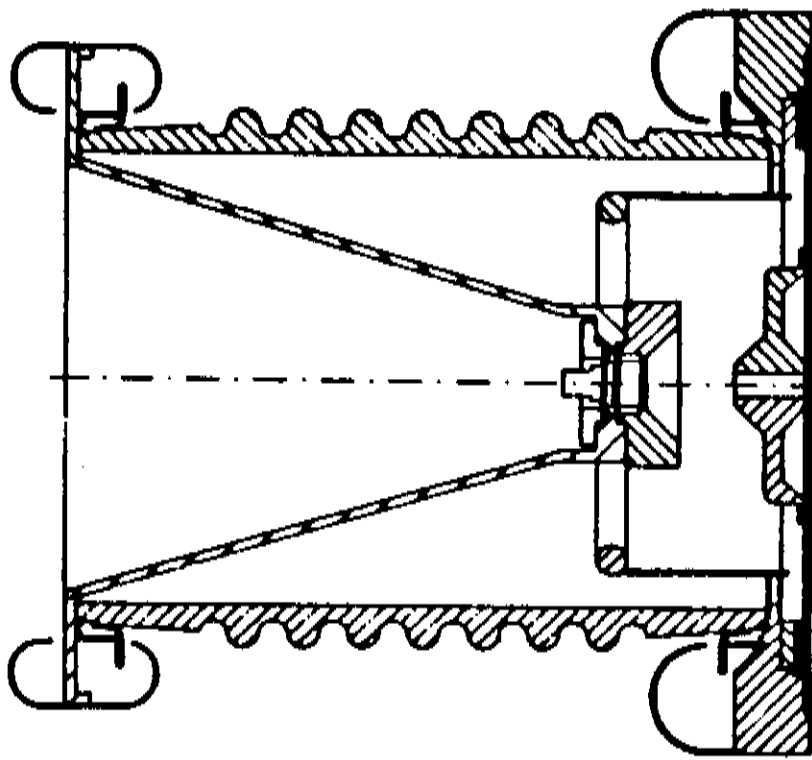


Fig. I.2 - Canhão de Elétrons

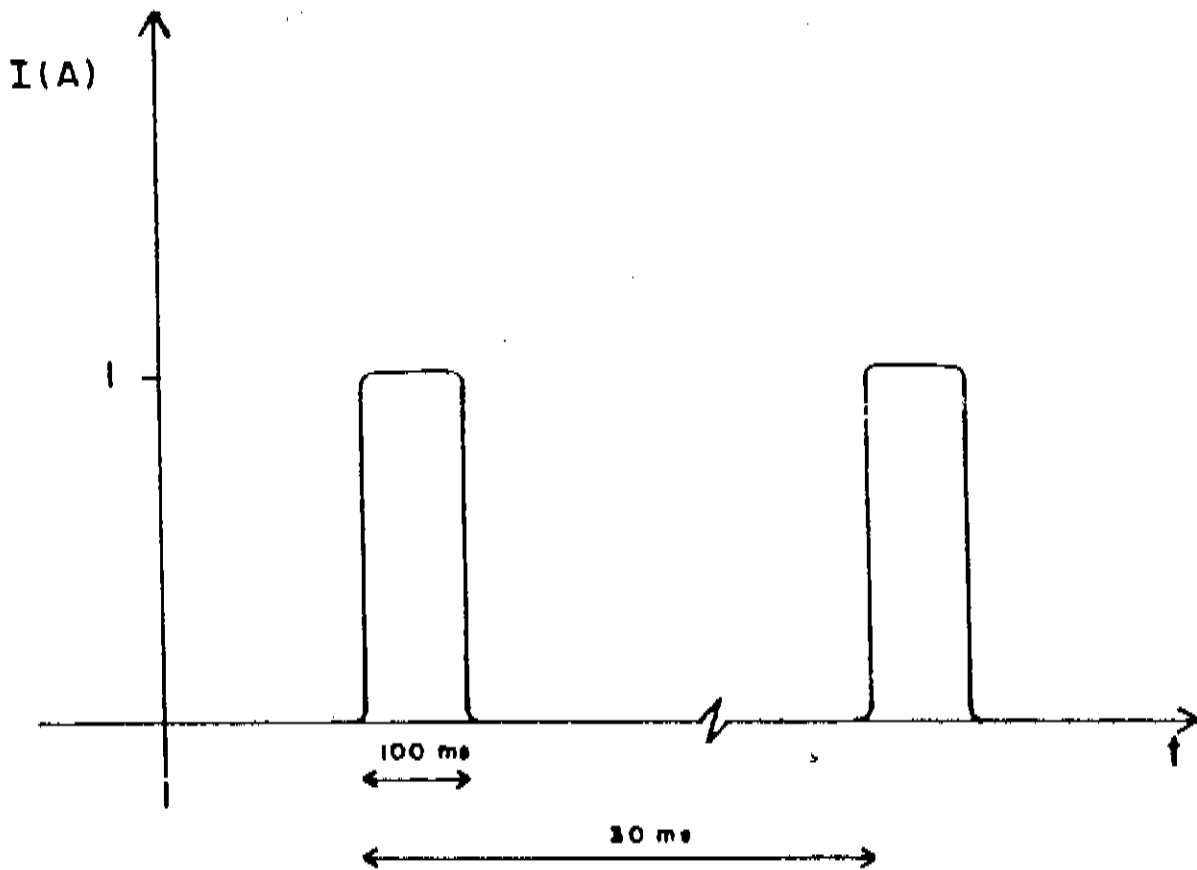


Fig. I.3 - Corrente na saída do Canhão

que alimenta as estruturas aceleradoras. A função deste elemento é agrupar os elétrons em microbunches de duração menor que o período do rádio frequência. Isto acontece pois elétrons que chegam em fases diferentes do pulso de RF recebem impulsos diferentes. Assim, após uma região de dispersão, que no caso é de 30,7cm temos os elétrons distribuídos especialmente em um macrobunch de 100 ns formado por 285 microbunches de  $\approx 20$  ps de duração, espaçados de 350 ps. Ver Fig. I.4.

Durante este empacotamento um pouco mais que 50% dos elétrons se perdem do feixe.

### I.2.3 As Estruturas Aceleradoras.

Uma vez agrupados os elétrons são novamente focalizados para entrar na 1a. estrutura aceleradora. Estas estruturas são guias de onda tipo "disk-loaded" formadas por 84 cavidades e irís de cobre OFHC. O modo de operação é  $2\pi/3$  com ondas caminhantes, o que significa que a cada 3 cavidades temos um comprimento de onda da RF. A alimentação é feita por uma válvula Klystron de alta potência (25 MW de pico) que tem taxa de repetição máxima de 30 Hz e duração de pulso 2,5  $\mu$ s.

O campo elétrico máximo nas estruturas é de aproximadamente 15 MV/m (no seu eixo).

A aceleração se dá da seguinte forma:

- Primeiramente a estrutura é preenchida com o pulso de RF de 2,5  $\mu$ s. Uma vez cheia, um macrobunch de 100 ns de elétrons entra na estrutura com seus microbunches sincronizados na fase da RF. Uma boa parte dos elétrons é perdida nas primeiras cavidades pois a velocidade de fase da RF é aproximadamente  $c$  e a velocidade dos

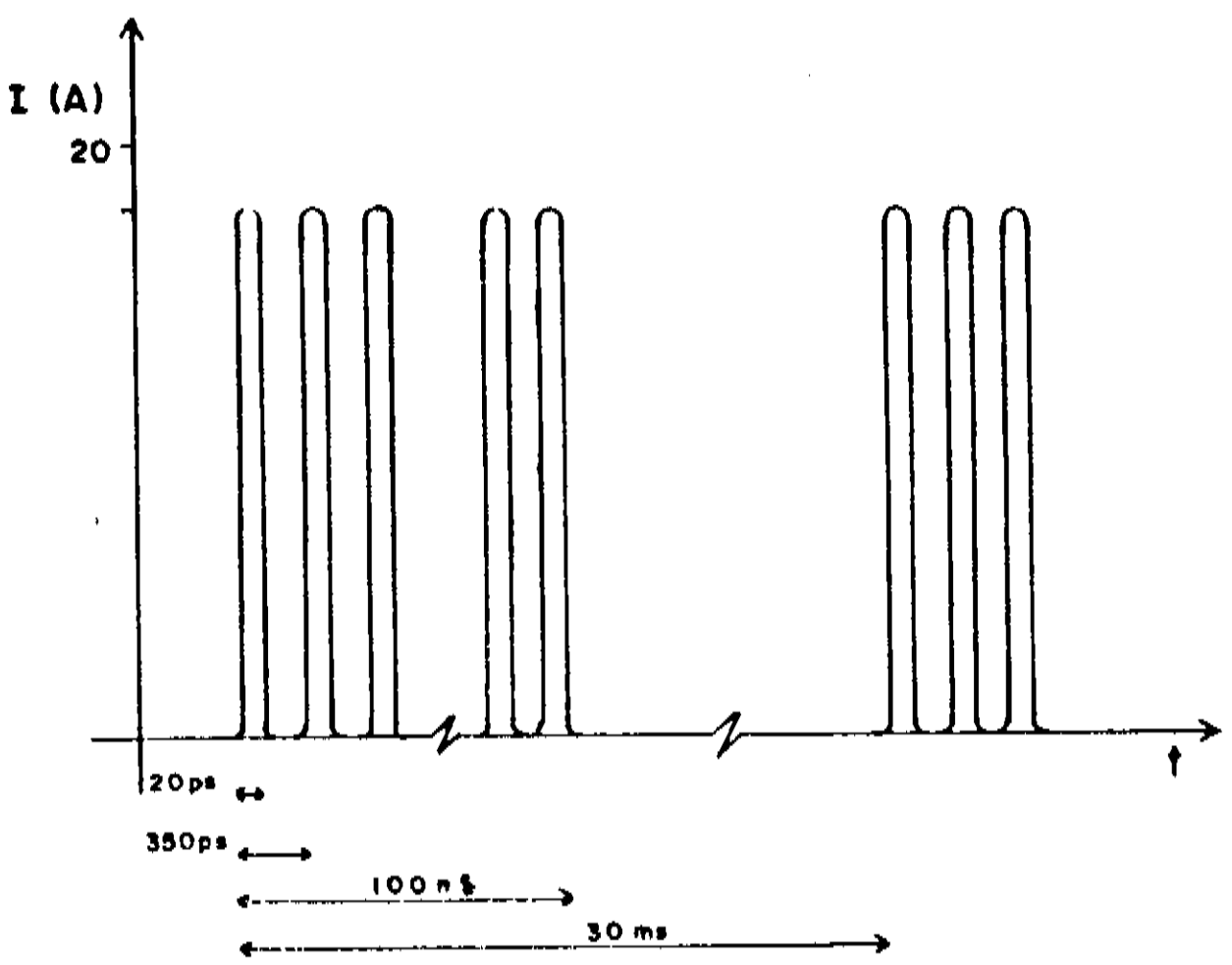


Fig. I.4 - Corrente após o pré-buncher

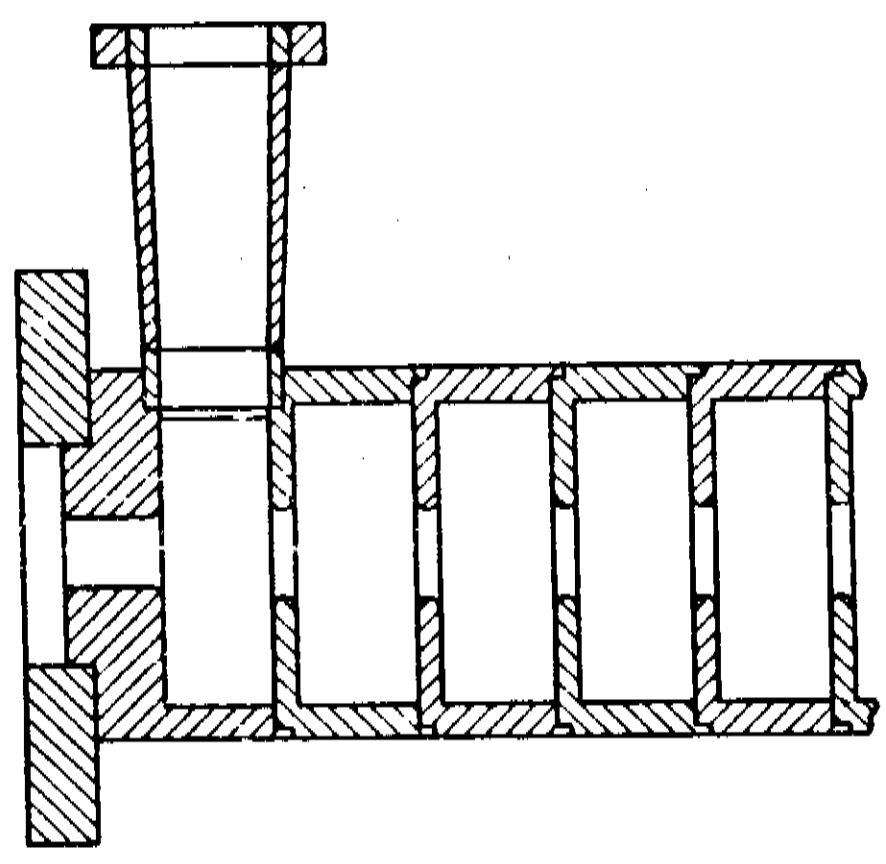


Fig. I.5 - Esquema da Estrutura Aceleradora

elétrons  $c/2$ , impossibilitando que eles sejam acelerados todo o tempo.

Depois de algumas cavidades a velocidade dos elétrons aumenta e então todos os que restaram atravessam a estrutura.

Um desenho das estruturas é mostrado na fig. I.5

Ao final das 4 estruturas esperamos obter um feixe de elétrons com 200 mA no macrobunch e 100 MeV de energia com 1% de dispersão.

#### I.2.4 Sistemas Auxiliares

Vários sistemas auxiliares são necessários para a operação de LINAC's. Dois dos mais importantes são o Sistema de Refrigeração e o Sistema de Vácuo.

O primeiro é responsável pelo equilíbrio da temperatura de operação em  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  em torno de  $45^{\circ}\text{C}$ . Devemos ressaltar que a Potência dissipada nas estruturas devida à RF é da ordem de 2500 W e que variações na temperatura das cavidades ocasionam mudanças na frequência de ressonância e fase da RF.

O sistema de Vácuo evita espalhamento dos elétrons pelas moléculas dos gases residuais e evita também que haja "RF break down" devido à ionização destas moléculas. Este Sistema será descrito detalhadamente no Cap. II.

Uma tabela com os parâmetros básicos do LINAC vem a seguir:

Tabela I.1 - Parâmetros básicos do LINAC.

$E = 100 \text{ MeV}$

$\Delta E = 2\%$

estrutura aceleradora tipo gradiente constante - TW - modo  $2\pi/3$

$F_{RF} = 2856 \text{ MHz}$

largura do pulso = entre 100ns e 1  $\mu\text{s}$

corrente média no macropulso: 200 mA

taxa de repetição: entre 0,5 e 30 Hz

emitância:  $4 \times 10^{-7}$  rad m.

### I.3 O Anel de Armazenamento

Na grande maioria dos Laboratórios dedicados à utilização de Radiação Síncrotron os elétrons oriundos de um LINAC são continuamente acelerados em um acelerador circular, normalmente chamado "Synchrotron Booster", e depois, já com energias da ordem de 1 GeV ou mais são estocados em um Anel de Armazenamento.

No nosso caso, um procedimento menos ortodoxo será utilizado. Os elétrons provenientes do LINAC serão armazenados a baixa energia em um Anel e só então terão suas energias aumentadas. Este tipo de procedimento, chamado de injeção a Baixa Energia, tem uma série de pontos de risco, mas já foi provado eficaz em outros Laboratórios como o SRC da Universidade de Wisconsin e o Max Lab da Universidade de Lund. A grande vantagem deste procedimento é a diminuição do custo total ao se eliminar do projeto uma das máquinas.

O Anel de Armazenamento que está sendo projetado e construído no LNLS terá uma rede magnética tipo Chasman Green com



símetria 6. fig. I.6. A característica principal deste tipo de rede é uma diminuição do número de elementos magnéticos de focalização. Isto baixa sensivelmente o custo e os problemas de alinhamento do anel, mas diminui a sua flexibilidade (ref 3).

O campo magnético nos 12 dipolos será de 14 KGauss e o anel terá 6 secções retas longas para aceitar futuros dispositivos de inserção como Wigglers e Onduladores.

Um parâmetro muito importante de um anel de armazenamento é o tempo de vida dos elétrons que estão armazenados. Normalmente este tempo deve ser da ordem de 10 horas ou mais de modo que os experimentos possam ser efetuados durante todo um dia de trabalho. Vários processos contribuem para a diminuição do tempo de vida dos elétrons. Por exemplo, devido a interação do feixe com o gás residual temos 4 tipos de espalhamentos possíveis:

- Espalhamento elástico nos núcleos das moléculas: Produz um desvio angular na trajetória dos elétrons. Se o desvio excede a abertura da câmara o elétron é perdido.
- Espalhamento Bremsstrahlung no núcleo: Este processo inelástico leva a perda de energia. A partícula é perdida se  $\Delta E/E$  excede a aceitância do sistema RF.
- Espalhamento elástico nos elétrons das moléculas dos gases residuais: Similar ao espalhamento elástico nos núcleos.
- Espalhamento inelástico nos elétrons: Leva a produção de fótons e perda de energia.

Temos também o fenómeno de Ion Trapping que será descrito no Cap. II.

Devido a interação entre os elétrons do feixe temos o chamado efeito Touschek. Se o desvio de energia  $\Delta E/E$  devido a espalhamento Coulombiano intra feixe excede a aceitância da RF a

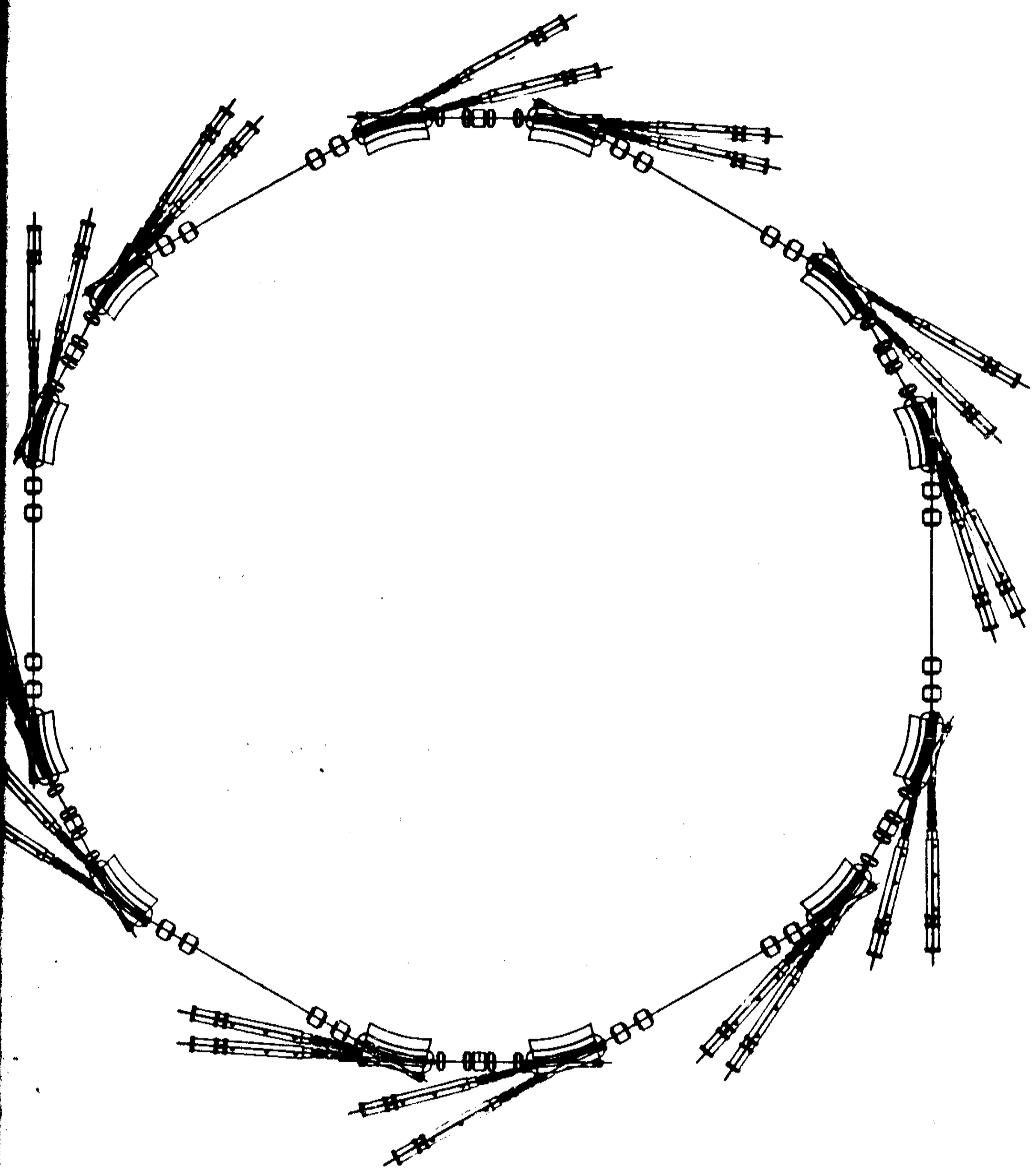


Fig. I.6 - Rede Magnética do Anel do LNS

partícula é perdida.

Temos também outros fenômenos coletivos como indução de RF parasita em cavidades da câmara pelos bunches, que também perturbam o feixe diminuindo seu tempo de vida.

Os principais parâmetros do anel do LCLS são dados a seguir (ref. 3).

Tabela I.2 - Parâmetros básicos do Anel

$E = 1.15 \text{ GeV}$

$I = 100 \text{ mA}$

Raio no magneto defletor: 2.735 m

Campo no magneto defletor: 1.4 T

Circunferência: 65.93 m

Superperíodo: 6

Energia de Injeção: 100 MeV

Energia crítica dos fótons: 1.2 KeV

Largura do pulso: 50 ps

Potência radiada: 5.7 KW

Fluxo:  $4.3 \times 10^{17}$  fótons/(segundo mrad)

#### I.4 As Linhas de Luz

A extração da Radiação de um Anel começa na câmara de vácuo dos dipolos defletores. Esta câmara será descrita no próximo capítulo.

Até chegar ao experimento a radiação passa por uma série de câmaras que formam a chamada linha de luz. Esta linha de luz pode ser dividido em 3 partes:

- "Front End"
- Parte óptica da linha
- Estação Experimental

O Front End tem como função básica a proteção dos usuários com relação a radiação e proteção do anel contra possíveis falhas no sistema de vácuo da Estação Experimental.

Ela é composta basicamente de válvulas, um shutter contra radiação e uma linha de retardo acústico. O Front End será descrito mais detalhadamente e a função de cada componente apresentada no cap. II.

A parte óptica da linha de luz é ajustada de acordo com a faixa do espectro que interessa ao usuário. Ela consiste basicamente de câmaras com espelhos, monocromadores e fendas, mas o tipo de espelhos e monocromadores difere bastante se o usuário está interessado em fazer por exemplo espectroscopia de VUV ou difração de raio X.

No capítulo II será descrito o sistema de vácuo de uma parte óptica para raio X.

As estações experimentais são bastante diferentes umas das outras, sendo assim, apenas citaremos várias referências onde elas são descritas (ref. 4, 5 e 6 e 7).

Uma parte fundamental na construção dos aceleradores e das linhas de luz síncrotron é o seu Sistema de Vácuo. Toda a região onde os elétrons passam e a grande maioria das linhas de luz devem ser mantidas sob baixíssima pressão, da ordem de  $10^{-9}$  mbar, ou seja, no regime de Ultra Alto Vácuo.

Neste capítulo descreveremos os sistemas de vácuo de cada componente de nossa fonte de luz e mostraremos os cálculos feitos para seus dimensionamentos.

## II.1 Sistema de Vácuo do LINAC

### II.1.1 Requisitos

Para se evitar um grande espalhamento dos elétrons pelos gases residuais e também a chamada "RF breakdown" é necessária uma pressão de operação menor que  $1 \times 10^{-6}$  mbar. (ref. 8 e 9)

Próximo às janelas dielétricas da rede de microondas é aconselhável que a pressão seja ainda menor que  $1 \times 10^{-7}$  mbar, de modo que não haja uma deposição de moléculas significativa, a ponto tornar esta janela opaca à Rádio Frequência. Isto ocasionaria um aquecimento excessivo da janela podendo inclusive causar sua ruptura. (ref. 8)

Na região do canhão de elétrons é aconselhável uma pressão da ordem de  $5 \times 10^{-8}$  mbar de modo que tenhamos uma vida média longa para o seu cátodo.

Um outro requisito fundamental é que o gás residual seja completamente livre de Hidrocarbonetos. Na presença de Rádio

Frequência em alta potência dentro das estruturas aceleradoras, estes compostos de carbono se decompõem e depositam sobre a superfície das cavidades de cobre, atenuando significativamente seu coeficiente Q.

Estes requisitos limitam consideravelmente a escolha das bombas de pré-vácuo e de regime de operação. Deveremos usar bombas iônicas durante a operação e alguma bomba livre de óleo para o pré vácuo. Optamos também por conectar todos os tubos por flanges Conflat com selo metálicos de cobre minimizando a quantidade de componentes orgânicos.

## II.1.2 Cálculo da Velocidade de Bombeamento Necessária

Para se calcular a velocidade de bombeamento necessária para que cheguemos às pressões de operação usaremos os seguintes dados: (q representa a Taxa de degaseificação do material)

q do aço inox.....	$2 \times 10^{-12}$ mbar l/scm <sup>2</sup>	(ref 10)
q do cobre.....	$1 \times 10^{-11}$ mbar l/scm <sup>2</sup>	(ref 11)
Área em aço inox entre canhão e 1a. estrutura....	$3,0 \times 10^3$ cm <sup>2</sup>	
Área aço inox entre 1a. e 2a. e 3a. e 4a. estrut....	$0,6 \times 10^3$ cm <sup>2</sup>	
Área em aço inox entre 2a. e 3a. estruturas.....	$1,0 \times 10^3$ cm <sup>2</sup>	
Área em cobre do pré agrupador.....	$0,3 \times 10^3$ cm <sup>2</sup>	
Área em cobre de cada estrutura.....	$1,54 \times 10^4$ cm <sup>2</sup>	
Condutância de 1 estrutura.....	0,5 l/s	
Condutância por metro do tubo padrão de 35 mm.....	45 l/s	

Concluimos pelos valores acima que as regiões críticas do nosso sistema são as estruturas aceleradoras de cobre, não só pela sua alta taxa de degaseificação como pela baixa condutância.

Assim, se obtivermos a pressão desejada nestas regiões com certeza todo o resto do LINAC funcionará sob pressões aceitáveis.

Para um tubo retilíneo de comprimento  $2L$  (fig.II.1) bombeado pelas suas extremidades por 2 bombas de mesma velocidade temos a seguinte distribuição de pressão (ref. 12).

$$P_0(x) = a l \left[ \frac{L}{S} + \frac{x}{C} - \frac{x^2}{2CL} \right]$$

$$P = \frac{a l L}{S}$$

$$P(L) = \frac{a l L}{S} (1 + S/2C)$$

$$P = \frac{a l L}{S} (1 + S/3C)$$

onde:

$a$  = taxa de degaseificação do tubo (mbar l/s)

$l$  = perímetro do tubo (cm)

$S$  = velocidade de bombeamento de cada bomba (l/s)

$C$  = condutância entre  $x = 0$  e  $x = L$  (l/s)

$L$  = comprimento de meio tubo (cm)

Vamos aproximar a nossa estrutura a um tubo de secção reta constante com 85mm de diâmetro interno para o cálculo de  $l$ . Para que mantenhamos a carga total de gás constante deveremos usar no entanto:  $a = 2 \times 10^{-11}$  mbar l/s cm<sup>2</sup> pois a estrutura aceleradora, com sua complexa geometria interna, tem aproximadamente 2 vezes a área que este tubo teria.

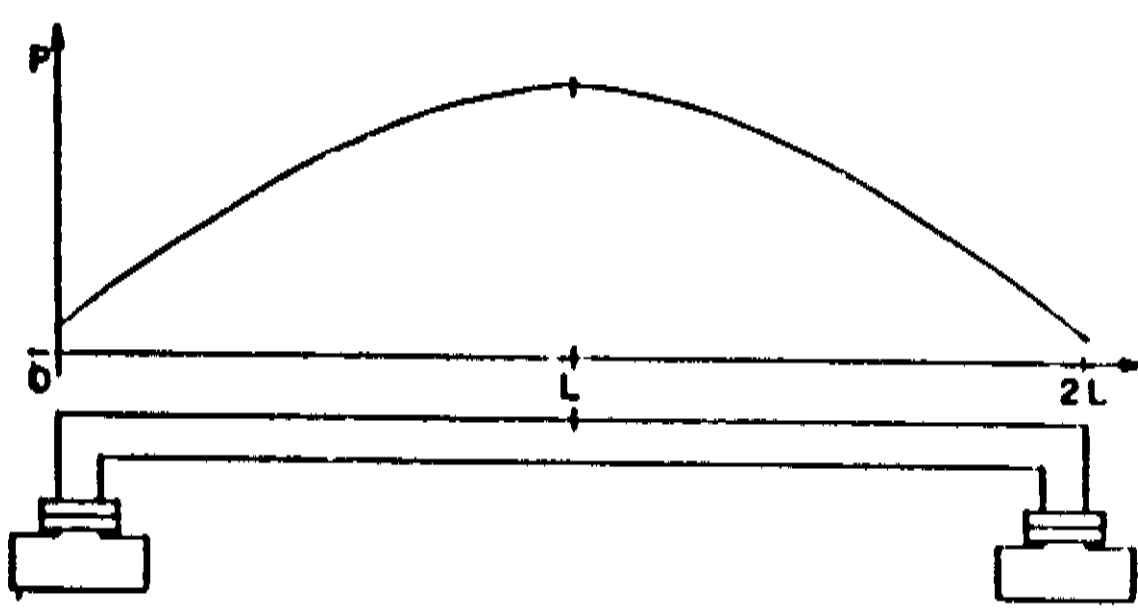


Fig. II.1 - Distribuição da pressão em um tubo com degaseificação uniforme bombeado pelas extremidades

Pressões mínima, médio e de pico em uma estrutura aceleradora em função de  $S$

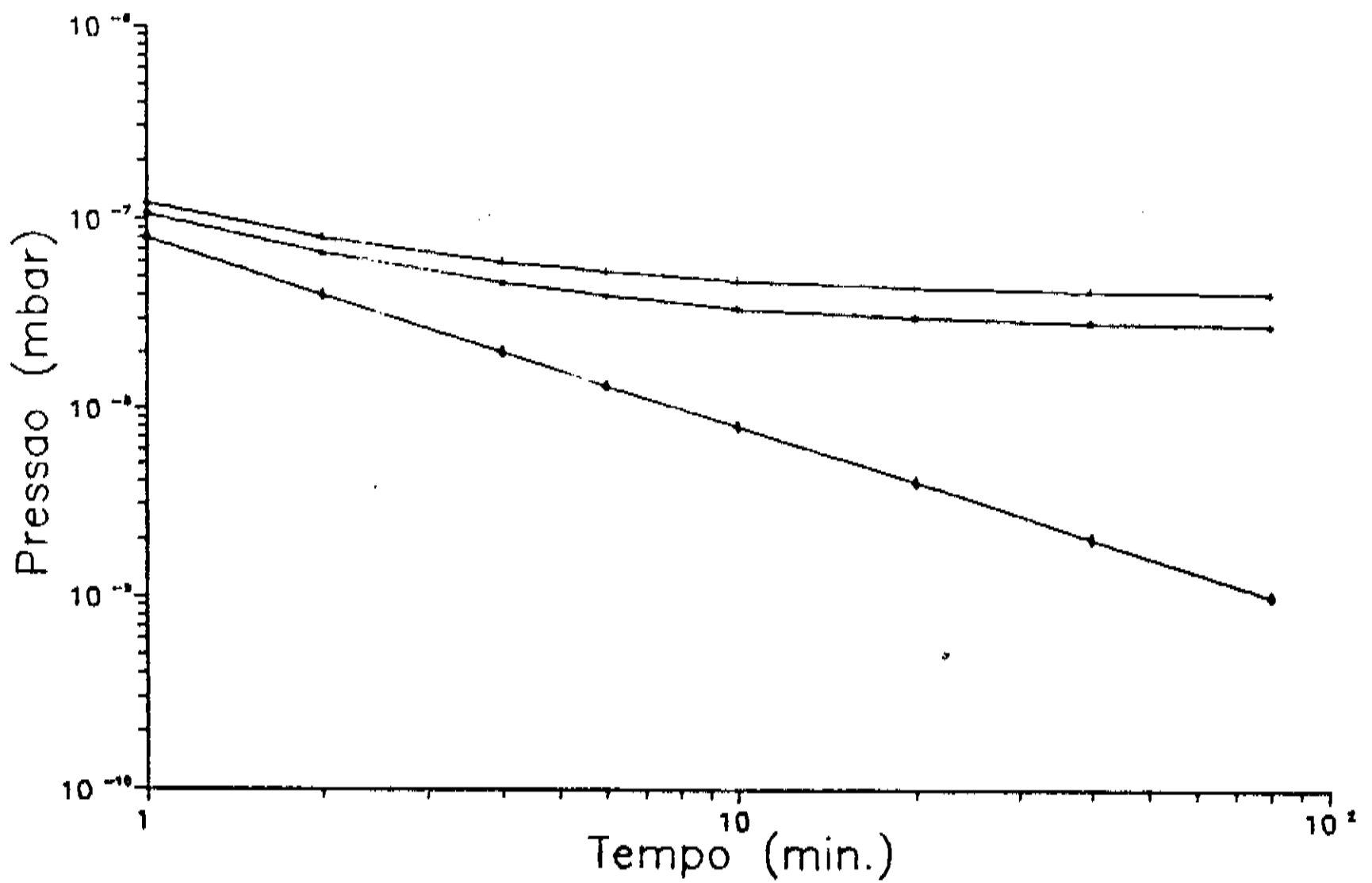


Fig. II.2



Obtemos então os seguintes resultados:

$$P_0 = \frac{g}{S} \times 10^{-8} \text{ mbar}$$

$$P(L) = \frac{g}{S} \times 10^{-8} (1 + S/2) \text{ mbar}$$

$$\bar{P} = \frac{g}{S} \times 10^{-8} (1 + S/3) \text{ mbar}$$

Na fig. II.2 mostramos como as pressões mínima, média e de pico variam quando mudamos a velocidade de bombeamento nas extremidades da estrutura.

Desta figura concluímos não ser muito útil o uso de bombas iônicas com a alta velocidade de bombeamento, pois as pressões média e de pico não podem ir muito abaixo de  $5 \times 10^{-8}$  mbar. Escolhemos então para o nosso LINAC bombas iônicas tipo StarCell de 20 l/s.

Na região do canhão de elétrons devido à presença de uma grande superfície de cerâmica, superfícies metálicas de área dificilmente calculáveis e um catodo que funciona a alta temperatura resolvemos utilizar uma bomba iônica de 60 l/s.

### II.1.3 - Descrição do Sistema de Vácuo e seus Componentes

Uma vez determinadas as velocidades de bombeamento necessárias para a operação do LINAC passamos então a projetar e especificar todas as câmaras e componentes do seu sistema de vácuo.

Respeitando as posições determinadas pela óptica do feixe para a posição das lentes magnéticas e ainda evitando a presença

de campos magnéticos espúrios na região do feixe , projetamos o sistema de vácuo do LINAC, que pode ser dividido em 5 partes:

- a) Sistema do canhão
- b) Trecho entre canhão e 1a. estrutura
- c) Câmara entre estruturas
- d) Região do tripleto magnético
- e) Espectrômetro de energia

Descrevemos agora o projeto de cada uma destas partes.

#### a) Sistema do canhão

Optamos por construir o sistema de vácuo do canhão completamente independente do resto do LINAC de modo que qualquer ventilação do canhão para sua manutenção não exigisse que ventilássemos as estruturas e vice-versa. Assim, em uma câmara chamada por nós de "panela do canhão" temos uma bomba iônica 60l/s, um medidor Penning, uma válvula de ângulo reto para o pré vácuo e uma válvula tipo Gaveta para a saída dos elétrons (fig.II.3). Tanto a posição da bomba quanto do medidor penning são previstas de modo que o campo magnético devido a seus ímãs permanentes não perturbe o feixe de elétrons.

A câmara é de aço inox 304 e todas as flanges são de selo metálico. As duas válvulas tem corpos e foles de aço inox e vedação de Viton.

#### b) Trecho entre canhão e 1a. estrutura

O primeiro elemento após a válvula de setor é um monitor tipo transformador de corrente que nos dá a corrente total que sai

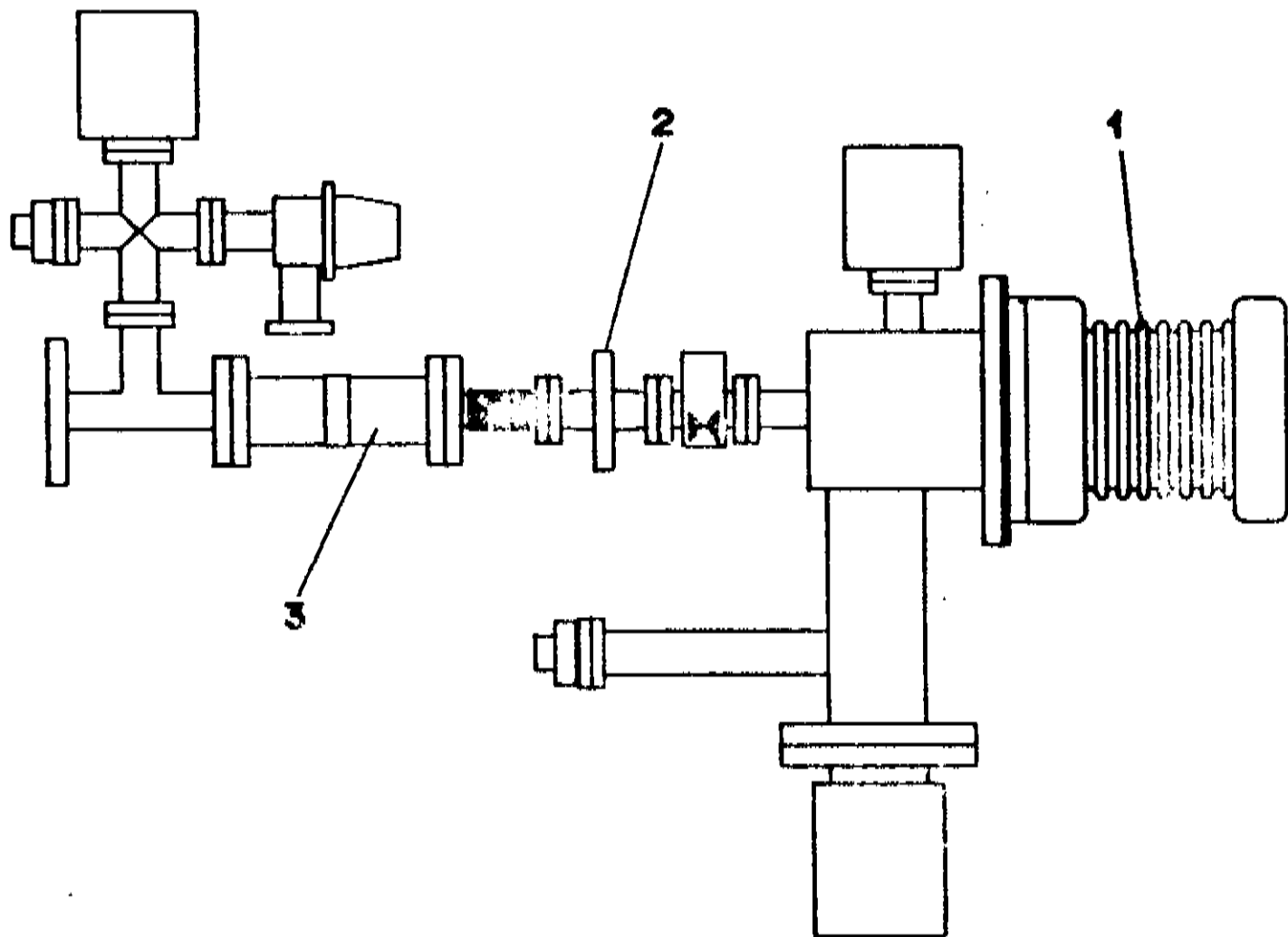


Fig. II.3 - Trecho anterior à primeira estrutura do LINAC

- 1) Canhão de Elétrons
- 2) Monitor de Corrente
- 3) Pré buncher

do canhão. Este monitor é composto de um trecho cerâmico (alumina 99) brasado aos tubos de aço inox para conexão por flanges CF35. Ao redor desta cerâmica temos um fio enrolado em uma ferrit. Neste fio é induzida uma corrente, proporcional a corrente de elétrons que passa por dentro da alumina. Após este monitor temos um fole que protege a alumina contra possíveis tensões, que poderiam causar sua ruptura. Este fole é conectado via uma flange CF63 ao pré-buncher. Após o pré-buncher temos um "T" que o liga à 1a. estrutura. Na saída superior deste T ligamos uma cruzeta na qual estão conectadas uma válvula de ângulo reto para pré vácuo, uma bomba iônica a 20 l/s e um medidor tipo Bayart Alpert de Ionização por catodo quente. A figura II.3 mostra também este trecho do LINAC.

### c) Câmara entre estruturas

Entre a 1a. e 2a. estruturas e entre a 3a. e a 4a. estruturas temos, devido à construção do "berço" de alinhamento, apenas 190 mm. Neste reduzido espaço temos no entanto que posicionar 2 bombas iônicas de 20 l/s, um monitor de perfil por fluorescência um monitor de corrente tipo eletrostático, um fole para alinhamento e ainda os 2 flanges para conexão com as estruturas.

O monitor de perfil por fluorescência é composto basicamente por um tubo flexível que posiciona no caminho do feixe de elétrons uma placa de alumina 99. O choque dos elétrons com a Alumina causa a fluorescência desta que é observada através de uma janela de vidro em um monitor de vídeo.

O monitor de corrente tipo eletrostático é simplesmente um

tubo metálico isolado da câmara de vácuo por um passante elétrico. Quando a corrente de elétrons passa por dentro deste tubo ela induz nele uma carga que é medida por um circuito eletrônico. Esta quantidade de carga é proporcional à corrente que passou.

#### d) Região do tripleto magnético

Depois da 2a. estrutura temos uma cruzeta onde uma bomba iônica de 20 l/s, um medidor Penning e uma válvula de setor são ligados. Nesta região, a perturbação devida aos campos magnéticos destes componentes já não é tão grave pois os elétrons com energia de aproximadamente 50 MeV não são mais sensíveis a pequenos campos.

Após a válvula de setor temos apenas um trecho reto onde 3 quadrupolos focalizadores serão colocados, um tubo flexível para facilitar o alinhamento e outra cruzeta com Bomba Iônica e medidor Penning, ligada à 3 estrutura.

#### e) Espectrômetro de energia

Ao final da 4a. estrutura estamos interessados em conhecer a corrente final e a dispersão de energia dos elétrons.

Projetamos então um espectrômetro de energia baseado em dois elementos magnéticos: um dipolo "H" e um quadrupolo. O primeiro elemento tem como função curvar o feixe de elétrons separando-os espacialmente de acordo com suas energias. O segundo tem como função focalizar o feixe em uma fenda fina. Variando-se delicadamente o campo no dipolo e medindo-se a corrente que passa pela fenda obtemos o espectro de energia dos elétrons.

Após a 4a. estrutura temos um "T" que a liga a uma válvula

de setor e a sua bomba iônica de 20 l/s. Após a válvula de setor temos um outro "T" ligada na parte superior a uma cruzeta com um medidor Penning, uma válvula para pré-vácuo e uma outra bomba iônica. A presença deste medidor é fundamental pois a válvula de setor só deve ser aberta se a pressão for inferior a  $1 \times 10^{-7}$  mbar de modo que a carga de gás proveniente do espectrômetro não atrapalhe a operação do LINAC. Em seguida temos um fole, um medidor de corrente e uma pequena secção reta para o quadrupolo. Antes dos elétrons entrarem no imã eles passam por um outro fole cuja função é facilitar o alinhamento da câmara do dipolo. A câmara do dipolo tem a forma de um cilindro chato de 20 mm de altura e 200 mm de diâmetro, (fig. II.4) com 4 portas. As portas 1 e 2 são para entrada e saída dos elétrons em linha reta, ou seja, quando o campo do dipolo é zero. A porta 3 é para a saída dos elétrons na direção da fenda, quando B é máximo. A porta 4 terá uma janela cuja função será a de extrair a Radiação Síncrotron gerada pelos elétrons ao passarem pelo espectrômetro. Fizemos estudos que mostram que a intensidade e a faixa de comprimento de onda da radiação emitida pelos elétrons é suficiente para sua detecção em detetores de silício. Isto no entanto será descrito em outro trabalho.

Entre a porta 3 e a fenda teremos aproximadamente 500mm que devem ser preenchidas por um fole e uma outra bomba iônica e o tubo no qual a fenda é suportado. Após a fenda teremos um outro monitor de corrente e um anteparo para os elétrons (Beam Stop). A figura II.4 mostra o esquema do espectrômetro de energia. A área total de aço inox após a válvula de setor é de aproximadamente  $3000 \text{ cm}^2$ . Usando  $q_{ss} = 2 \times 10^{-12} \text{ mbar l/s cm}^2$ , temos:

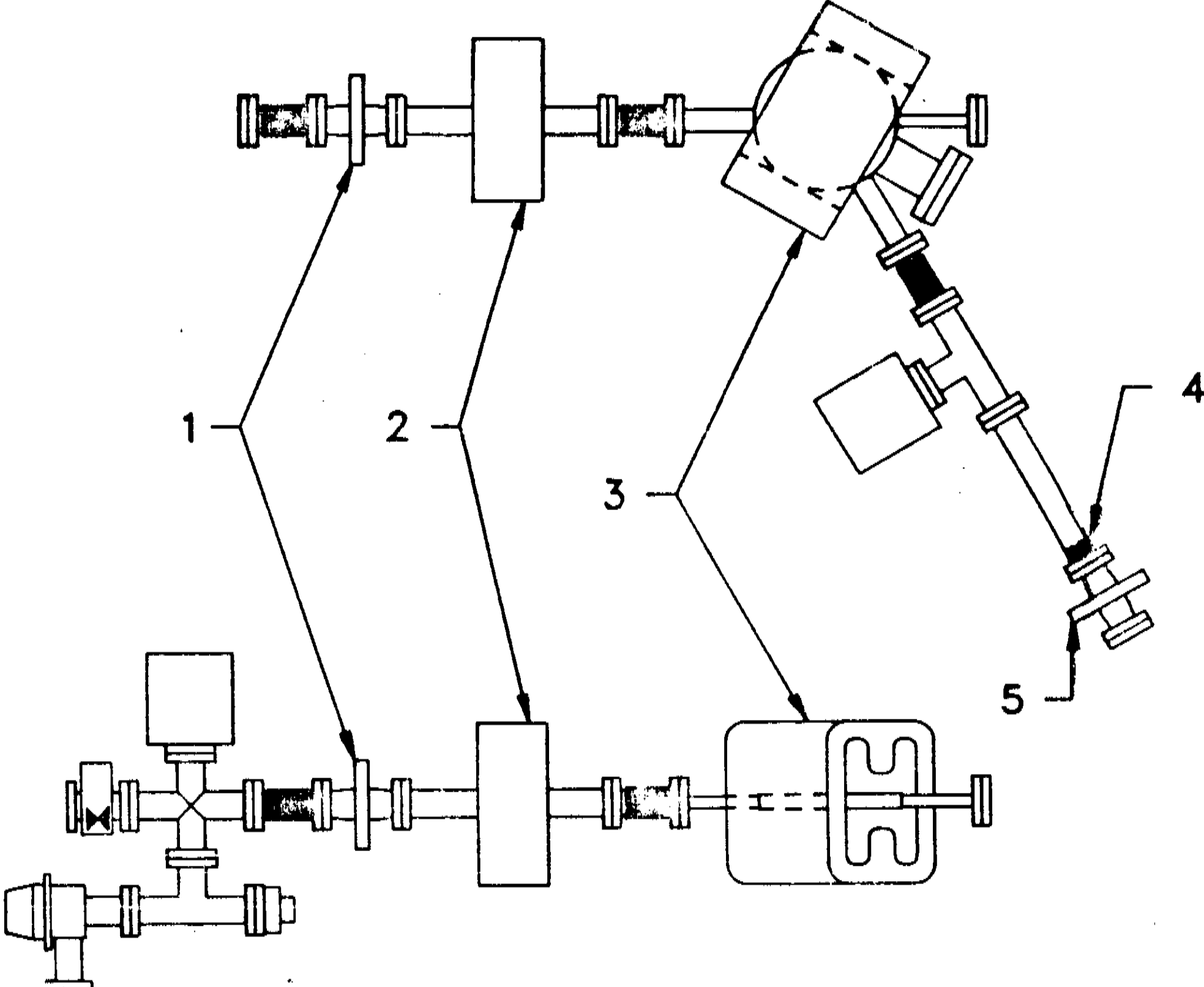


Fig. II.4 - Espectrometro de Energia

1 Monitor de Corrente

2 Ouadrupolo

3 Dipolo

4 Fenda

5 Monitor de Corrente

$$Q_{ss} = 8 \times 10^{-9} \text{ mbar l/s}$$

A princípio, apenas a 1a. bomba iônica seria suficiente para manter a pressão nas redondezas da estrutura aceleradora a níveis aceitáveis, devido a degaseificação termo induzida. No entanto, na região da fenda teremos uma carga adicional dificilmente estimável devida às colisões dos elétrons. A potência dissipada por estes elétrons é da ordem de 30W o que já não é desprezível. Temos também o fenômeno de sputtering e ainda produção de radiação ionizante. Por estes motivos posicionamos uma outra bomba iônica de 20 l/s próxima à fenda.

Na fig. II.5 mostramos um desenho completo do sistema de Vácuo do LINAC (ref 13).

#### II.1.4 Problemas Relacionados à Operação LINAC

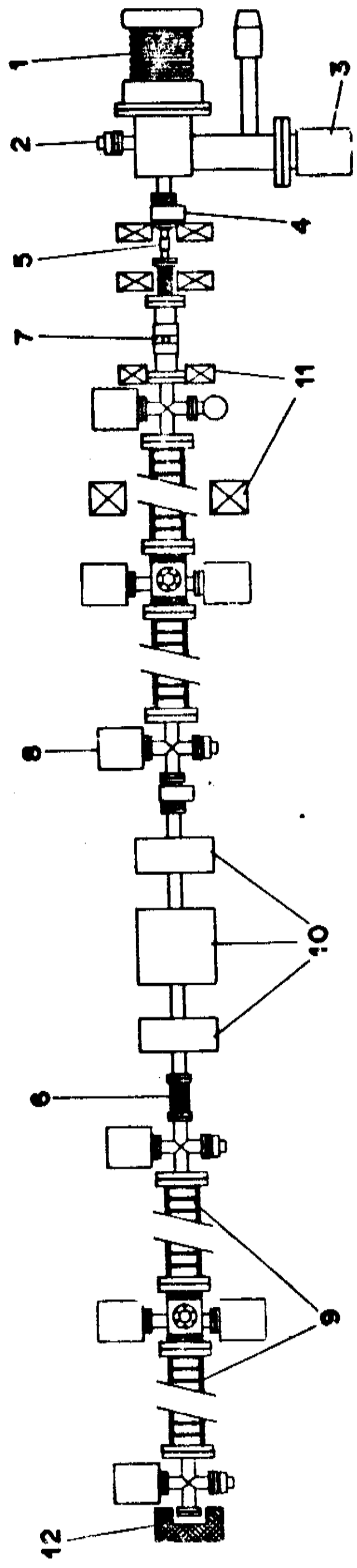
Após a descrição de todos os componentes do Sistema de Vácuo do LINAC vamos expor dois problemas que podem surgir durante a sua operação relacionados à limpeza das paredes da câmara.

##### a) "RF" breakdow" (ou colapso devido à RF)

Normalmente quando injetamos RF em uma estrutura aceleradora, temos uma pequena corrente de elétrons que corre de uma íris a outra devido ao forte campo elétrico. Esta corrente é comumente chamada de "field emitted current". Quando a potência de RF é aumentada bruscamente em uma estrutura ainda não condicionadas temos subitamente os seguinte fenômenos:

- Pulsos de RF são refletidos para a Klystron
- Temos "spark's" dentro das estruturas.





- 1) Canhão de elétrons
- 2) Medidor Penning
- 3) Bomba iônica 60 l/s
- 4) Válvula de setor
- 5) Monitor de feixe
- 6) Bellows
- 7) Pré buncher

- 8) Bomba iônica 20 l/s
- 9) Estruturas aceleradoras
- 10) Quadrupolos
- 11) Lentes magnéticas
- 12) Beam Stop

Fig. II.5 - LINAC

- Field Emitted Current cresce por um fator de 20 a 40 acima da corrente de equilíbrio.
- Aparece um forte pulso de raio X ao longo da estrutura.
- Temos a liberação repentina de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  das paredes, medidas em um analisador de gases residuais (RGA).

Após quase 40 anos de estudos ainda não há uma teoria completa descrevendo este fenômeno, no entanto o último artigo publicado sobre o assunto parece convincente em sua explicação (ref.9). Este artigo diz que a "RF breakdown" ocorre quando a Field Emitted C. em um dado local causa uma dissipação de calor suficiente para vaporizar uma dada quantidade de material que se encontra na superfície da íris. Este material podendo ser o próprio metal, em uma irregularidade da superfície, ou algum dielétrico, como óxido, resíduos orgânicos, poeira, etc. Quando a vaporização acontece uma descarga de plasma acontece junto com um "spark". Esta descarga causa o colapso do campo de RF e produz um pulso de corrente devido à ionização dos gases residuais.

Este fenômeno pode ser fatal para o bom desempenho de um LINAC pois, o "sputtering" causado pelos íons ao colidirem com as paredes das estruturas podem danificá-las irreparavelmente.

Vemos então que além de um bom acabamento superficial nas cavidades das estruturas e uma limpeza rigorosa devemos nos certificarmos de que o tipo de bombeamento utilizado não contamine as superfícies com resíduo algum.

#### b) Atenuação do Q das cavidades

Para avaliar a qualidade de uma cavidade de ressonância temos uma figura de mérito chamada Q, ou Fator de Qualidade desta

cavidade. Este coeficiente é simplesmente a razão entre a energia armazenada no interior da cavidade e a energia perdida nas suas paredes. É sabido que a presença de um filme dielétrico na superfície de uma cavidade de ressonância atenua significativamente seu Q e ainda pode deslocar ligeiramente sua frequência de ressonância.

No caso de um Acelerador Linear este filme dielétrico poderia aparecer devido à presença, no gás residual, de moléculas de Hidrocarbonetos. Isto causaria a diminuição da energia disponível para acelerar os elétrons atrapalhando assim o desempenho da máquina.

## II.2 Sistema de Vácuo do Anel

### II.2.1. Requisitos:

Temos três requisitos principais com relação ao sistema de vácuo do nosso anel de armazenamento, para garantir um bom desempenho da máquina: (ref 13 - 14 - 15)

- 1) Pressão de operação deve ser da ordem de  $1 \times 10^{-9}$  mbar, a 1,15 GeV e 100 mA, de modo que o tempo de vida do feixe devido à interação dos elétrons com os gases residuais não seja inferior a 10 horas.
- 2) Gás residual livre de hidrocarbonetos para preservar os componentes óticos das linhas de luz.
- 3) Período de recondicionamento após uma ventilação não superior a alguns dias.

O maior problema que enfrentamos para alcançar estes requisitos é sem dúvida a dessorção de gases das paredes devido à

presença de radiação. A carga de gás foto induzida chega a ser uma ordem de grandeza maior que a carga induzida termicamente.

Um outro problema sério é o aquecimento da câmara devido à alta potência irradiada ( $P = 5.7 \text{ KW}$ ). No caso do LNLS para mantermos a câmara a uma temperatura aceitável devemos fazer com que a radiação incida sobre absorvedores de cobre refrigerados a água, localizados dentro das nossa câmaras (ref.17).

Temos também problemas de aquecimento localizado provocados por modos parasitas de rádio frequência. Estes são excitados pelos pacotes de elétrons, em descontinuidades da câmara de vácuo, como foles, válvulas, etc (ref.18).

É ainda aconselhável que evitemos qualquer material orgânico no nosso sistema, pois a radiação emitida deterioraria estes materiais exigindo manutenção frequente da máquina.

Outros problemas relacionados à interação dos elétrons do feixe com as moléculas dos gases residuais serão abordados mais a frente.

## II.2.2 Cálculos para a determinação da Velocidade de Bombeamento Necessária

### a) Cálculo da dessorção foto-induzida

O efeito da foto dessorção se dá em 3 etapas (ref. 15):

- i) Elétrons acelerados emitem radiação síncrotron.
- ii) Fótons incidentes nas paredes das câmaras produzem Fotoelétrons.
- iii) Fotoelétrons arrancam moléculas das paredes quando são

extraídos e quando batem na parede oposta.

É dado experimental que fótons de energia menor que 10 eV tem um eficiência quântica, K, (número de fotoelétrons produzidos por 1 fóton) muito pequena em comparação com fótons de energia maior (ref. 18). Assim, para os nossos cálculos levaremos em conta apenas fótons com Energia maior que 10 eV que tem  $K \sim 10^{-1}$  elétrons/fóton.

O fluxo integrado de fótons com  $E > 10$  eV para nossa máquina a 1,18 GeV e 400 mA é:

$$f = 1,08 \times 10^{21} \quad \text{fótons/segundo}$$

Aqui é bom observar que apesar de pretendermos trabalhar com 100 mA de corrente, os cálculos para o sistema de vácuo e sistema de refrigeração serão feitos para 400 mA.

Não nos é possível medir a eficiência de dessorção, (DE), (número de moléculas dessorvidas por foto elétron) para o nosso aço inox. Assim, vamos utilizar em nossos cálculos 2 vezes o valor usado no projeto do síncrotron europeu ESRF (ref. 20).

$$(DE) = 2 \times 10^{-6} \quad \text{moléculas/fotoelétron}$$

Temos então o número de moléculas foto dessorvidas por segundo:

$$\begin{aligned} N &= f \times K \times (DE) \\ &= 2,16 \times 10^{14} \quad \text{moléculas/s} \end{aligned}$$

que à temperatura ambiente nos dá uma taxa de degaseificação de:

$$Q_{ph} = 9 \times 10^{-6} \text{ mbar l/s}$$

b) Cálculo da dessorção térmica

Podemos estimar a área total de nosso anel em:

$$A_{SS} = 4 \times 10^5 \text{ cm}^2 \text{ de aço inox}$$

$$A_{Cu} = 4 \times 10^4 \text{ cm}^2 \text{ de cobre}$$

Usando (referência 10 e 11):

$$q_{SS} = 2 \times 10^{-12} \text{ mbar l/s cm}^2$$

e

$$q_{Cu} = 1 \times 10^{-11} \text{ mbar l/s cm}^2$$

Chegamos a uma carga de gás termicamente induzida de:

$$Q_{th} = 1.2 \times 10^{-6} \text{ mbar l/s}$$

c) Cálculo de S

Para que operemos a uma pressão de  $1 \times 10^{-9}$  mbar

necessitaremos de uma velocidade de bombeamento efetiva de:

$$S_{ef} = Q_{total}/P = (Q_{ph} + Q_{th})/10^{-9}$$

$$S_{ef} = 1 \times 10^4 \text{ l/s a } 10^{-9} \text{ mbar}$$

### II.2.3 Descrição do Sistema de Vácuo e Escolha das Bombas

Optamos por aço 316 e 304 para a construção de todas as câmaras. Apenas os absorvedores serão de cobre OFHC. Todas as flanges serão tipo Conflat com selo metálico também de cobre OFHC.

Nas secções retas as câmaras serão de tubos redondos de 80 mm de diâmetro interno ligados por flanges CF83.

Na região dos dipolos, a câmara é chata, com 40 mm de altura e é dividida em 3 partes separadas por trilhos de cobre que dão continuidade elétrica à câmara dos elétrons (Fig. II.6).

Na parte interior será colocada uma fita de NEG (non evaporable getter) que funcionará como bomba distribuída. No exterior teremos as bombas iônicas, o sublimador de titânio, os absorvedores e as saídas de luz.

Será evitada toda mudança brusca da secção reta da câmara de vácuo utilizando-se transições suaves na entrada das câmaras dos dipolos.

Temos previsto espaço para fitas de aquecimento e isoladores térmicos em todas as câmaras de modo que possamos fazer o "baking in situ" da máquina. Esta técnica de limpeza é fundamental para que alcancemos rapidamente pressões da ordem de  $1 \times 10^{-9}$  mbar após uma ventilação do sistema (ref 21).

Em regime de operação o bombeamento será feito por bombas iônicas e bombas tipo NEG (non evaporable getter). Esta escolha foi feita baseada na alta eficiência e limpeza destes tipos de bomba e ainda pela facilidade de se fazer um bombeamento distribuído nas câmaras dos dipolos com as fitas de NEG (ref.22). Este novo elemento de bombeamento tem despertado bastante

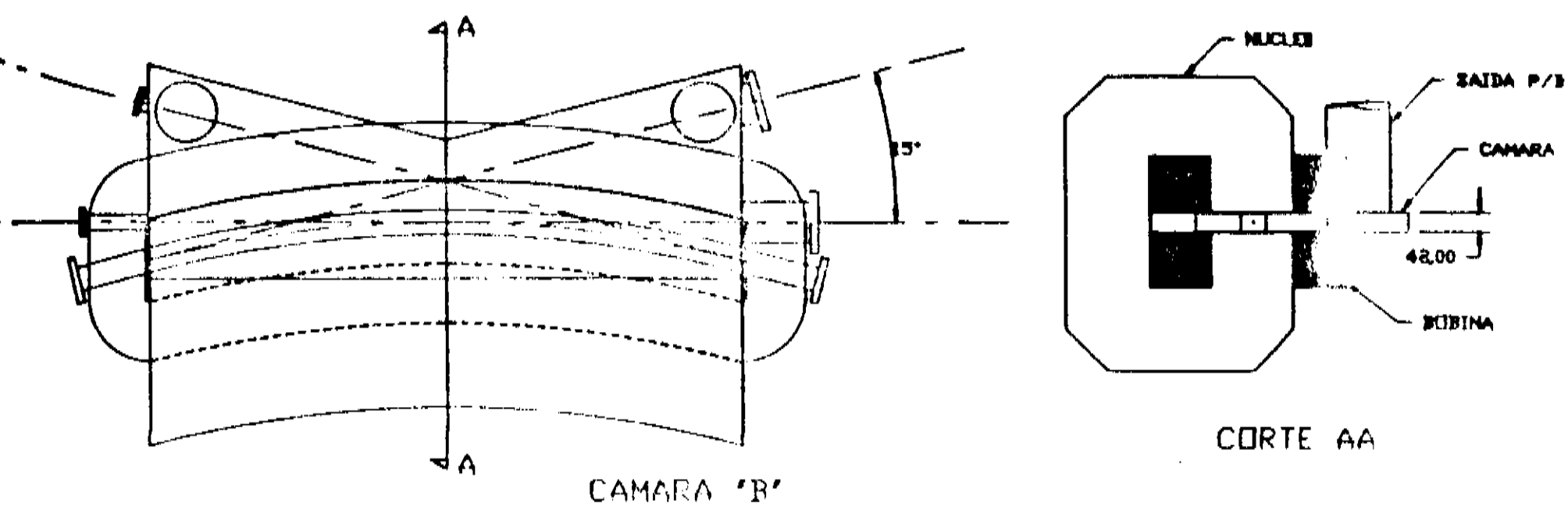


Fig. II.6 - Câmara do Dipolo

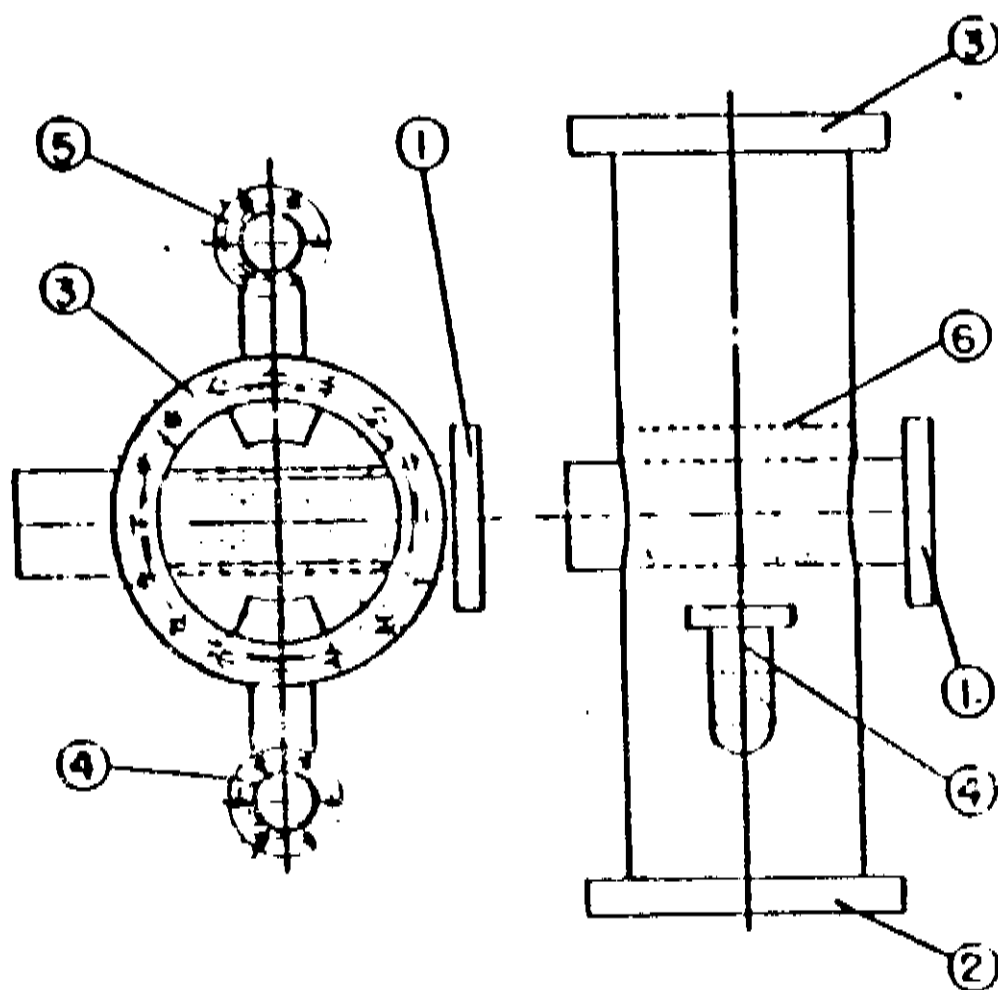


Fig. IV - Estação de Bombeamento.  
 1) Entrada dos Elétrons  
 2) Porta para Bomba Iônica  
 3) Porta para o sublimador de Ti  
 4) Conexão para medidor iônico  
 5) Conexão para RGA ou válvula de pré-vácuo.  
 6) Baffle

Fig. II.7 - Estação de Bombeamento



interesse da comunidade de físicos e engenheiros de aceleradores devido a sua simplicidade e alta velocidade de bombeamento para gases como  $H_2$  e CO. Por exemplo: uma fita de 30 mm de largura e aproximadamente 1 mm de espessura tem  $S$  300 l/s por metro para o  $H_2$  após o seu condicionamento. Pelos nossos cálculos estas fitas teriam sua velocidade de bombeamento reduzida a metade da inicial após um ano, trabalhando dentro da câmara do dipolo a  $10^{-9}$  mbar. Só então ela seria recondicionada. Usaremos 1.2 m de fita NEG em cada câmara de dipolo.

As bombas iônicas serão de 230 l/s acopladas com NEG. Estas bombas mantêm  $S_{ef} = 230$  l/s até  $10^{-9}$  mbar. Serão usadas também pequenas bombas de 45 l/s em pontos estratégicos para se abaixar a pressão média na região entre as bombas maiores.

Utilizaremos também bombas de sublimação de titânio para a fase inicial de operação da máquina e para acelerar o "pump down" após cada ventilação.

Nas secções retas tentaremos agrupar todos os componentes de vácuo em uma mesma câmara, chamada Estação de Bombeamento (fig. II.7). Nelas teremos as bombas, medidores, válvulas de pré-vácuo, analisadores, de gases residuais, etc. Devido a condutância dos orifícios nesta Estação, as bombas iônicas terão  $S_{ef} = 190$  l/s e as bombas de sublimação de titânio  $S_{ef} = 900$  l/s.

A Tabela II.1 resume a carga de gás, a velocidade de bombeamento e a pressão mínima em cada câmara como se elas fossem isoladas umas das outras. Estamos considerando que 1/4 da radiação sai da câmara do dipolo pela porta dos elétrons e é absorvida na secção reta adjacente. Consideramos os outros 3/4 absorvidos dentro da câmara (caso de uma câmara sem saída de luz).

Tabela II.1 - Carga de gás, velocidade de bombeamento e pressão mínima em cada câmara.

	Q mbar-l/s	S <sub>ef</sub> l/s	P mbar
Câmara do Dipolo	$6,0 \times 10^{-7}$	640	$9 \times 10^{-10}$
Secção reta curta	$1,0 \times 10^{-7}$	235	$9 \times 10^{-10}$
Secção reta longa	$2,1 \times 10^{-7}$	430	$5 \times 10^{-10}$

A pressão média em cada setor deve ser um fator 2 ou 3 maior que a pressão mínima devido à baixa condutância das câmaras.

Na figura II.8 mostramos a posição de alguns componentes do sistema de vácuo em um dos superperíodos da máquina (ref.23).

Teremos um medidor de vácuo tipo iônico com sensibilidade até  $2 \times 10^{-10}$  mbar após cada magneto defletor e um no final de cada secção reta longa perfazendo um total de 18 medidores.

Teremos também um analisador de gases residuais no final de cada secção reta longa para monitorarmos a qualidade do nosso vácuo.

Todas as válvulas serão de selo metálico, evitando-se assim a presença de material orgânico (Viton). As válvulas de setor serão tipo Gaveta e as de pré-vácuo serão de ângulo reto.

#### II.2.4 Problemas relacionados à interação do feixe de elétrons com as moléculas dos gases residuais.

Descrevemos agora dois problemas relacionados ao Sistema de Vácuo de Anéis de Armazenamentos que surgem durante a operação destas máquinas, quando os pacotes de elétrons interagem com os gases residuais. Vários outros problemas relacionados à interação

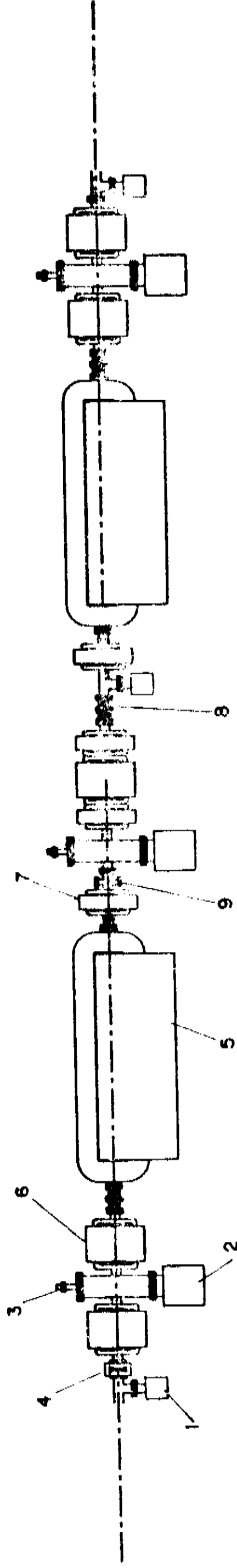


Fig. II.8 - Componentes do Sistema de Vácuo de um dos super períodos do anel

- 1) Bomba iônica 45 l/s
- 2) Bomba iônica 230 l/s
- 3) Sublimador de Ti 900 l/s
- 4) Válvula de setor

- 5) Dipolo
- 6) Quadrupolo
- 7) Sextupolo
- 8) Monitor de Perfil
- 9) Monitor de Fluorescência

dos elétrons com a câmara de vácuo e com as bombas iônicas não serão comentadas aqui (referências 18 e 24)

### a) Aprisionamento Iônico

Os elétrons armazenados em um anel colidem com as moléculas dos gases residuais gerando íons positivos. Durante o tempo em que um pacote de elétrons passa por um íon este sente um potencial atrativo que a fig. II.9.a representa simplifadamente. Como temos em um anel uma sequência de pacotes de elétrons o movimento dos íons é determinado por um potencial periódico atrativo e eles ficam "dançando" exatamente em frente à trajetória dos elétrons. Este fenômeno causa vários problemas à qualidade do feixe pois devido às colisões os pacotes de elétrons tendem a "engordar" e pode até mesmo impedir sua operação (ref. 25, 26 e 27).

Um íon é aprisionado em seu movimento horizontal se sua massa  $A$  satisfaz:

$$A > A_c = 2 \left[ \frac{\pi R}{n} \right]^2 \left[ \frac{m_e}{m_p} \right] \left[ \frac{I}{I_A} \right] \frac{1}{\sigma_x (\sigma_x + \sigma_z)}$$

e em seu movimento vertical se trocamos  $\sigma_x$  por  $\sigma_z$ . Nesta expressão temos:

$A_c$  = massa crítica

$R$  = "raio médio do anel"

$n$  = número de pacotes de elétrons

$m_e$  = massa do elétron

$m_p$  = massa do próton

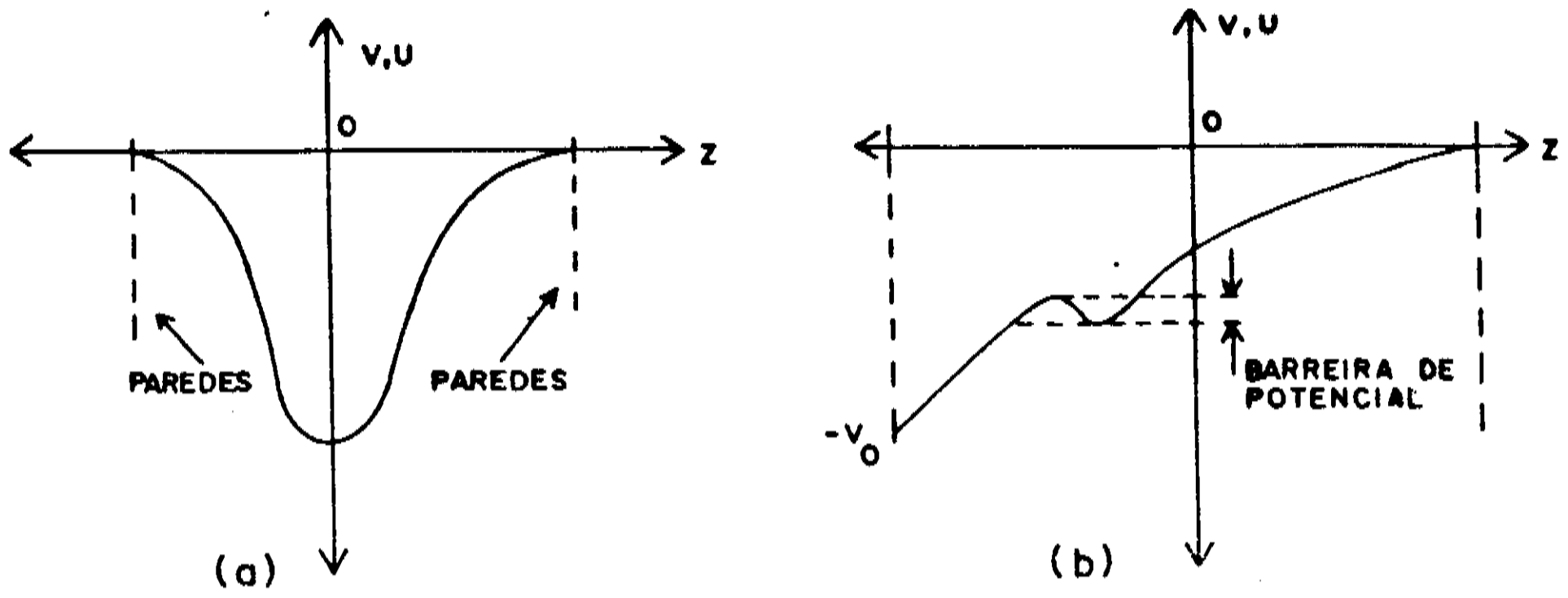


Fig. II.9 a) Potencial devido aos bunches  
 b) Potencial total com Eletrodos de Limpeza ligados

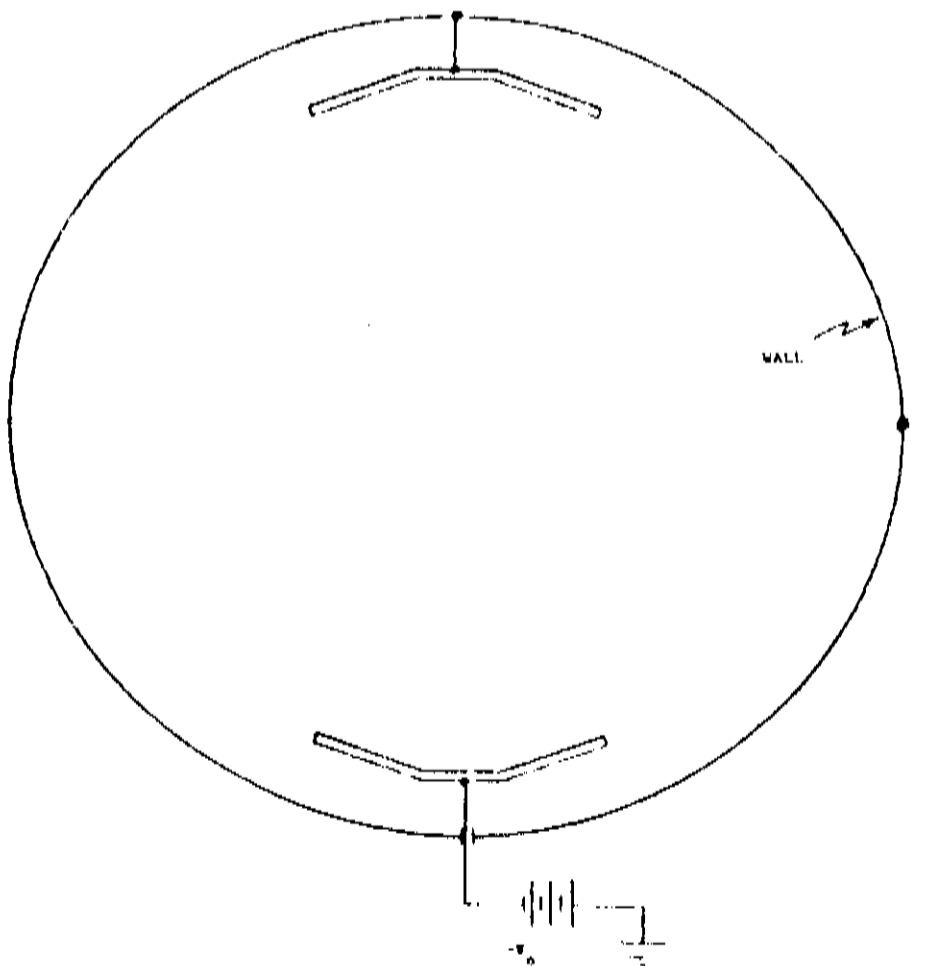


Fig. II.10 - Eletrodos de Limpeza

$I$  = corrente média

$I_A$  = Corrente de Alfvén =  $e c / r_e = 17045$  A

$\sigma_x$  = largura RMS do feixe

$\sigma_y$  = altura RMS do feixe

Vemos desta expressão que quando maior a massa de íon mais facilmente ele é aprisionado. Isto pode ser bem compreendido pois a inércia de um íon pesado impede que entre a passagem de um bunch e outro ele alcance a parede da câmara, se neutralizando. Em outras palavras um íon pesado fica no fundo do poço de potencial.

Há algumas maneiras de se evitar uma grande densidade de íons na órbita dos elétrons. Descreverei brevemente a mais simples e que provavelmente será utilizada por nós em nosso anel.

Simplesmente colocaremos dentro de nossas câmaras eletrodos em alta tensão DC ( $\sim 2$ KV) que deformam o potencial periódico sentido pelos íons como mostra a fig. II.9.b.

Além de diminuir a profundidade do poço de potencial facilitando que os íons escapem, estes eletrodos agem deslocando o mínimo deste poço para uma região fora da trajetória dos elétrons. Nesta posição, mesmo se temos uma grande concentração de íons eles não perturbam nosso feixe.

Outras soluções são apresentadas na literatura. Uma delas sugere que se excite os íons com campos de RF de mesma frequência de suas oscilações de modo que eles entrem em ressonância e acabem batendo na parede da câmara.

Um desenho do modelo de eletrodo que utilizaremos é mostrada na fig. II.10

b) Redução do tempo de vida do feixe devido ao espalhamento por moléculas dos gases residuais

No capítulo I citamos rapidamente várias interações que os elétrons sofrem que podem diminuir o tempo de vida do feixe. Nesta seção nos concentraremos apenas na causa dominante da degradação do feixe em anéis de armazenamento de elétrons, a saber: perda de partículas devida à diminuição de suas energias causada por *Bremstrahlung*.

Partículas carregadas sendo aceleradas perdem energia ao emitirem radiação síncrotron a uma taxa proporcional à quarta potência da sua energia e à curvatura de sua órbita. Esta energia perdida é repostada por um campo de RF e isto evita que os elétrons espiralem até se chocarem com a câmara de vácuo. Mesmo assim, partículas que perdem mais de uma certa quantidade de energia  $\Delta E$  (chamada aceitância em energia do anel) em uma só emissão de fóton, são perdidas antes de serem reaceleradas (ref. 28). Similar a este fenômeno temos a perda de uma fração do feixe, devido, à interação dos elétrons com as moléculas dos gases residuais, ou seja, uma perda de feixe dependente da pressão.

Quanto mais alto o peso atômico das moléculas dos gases residuais maior sua seção de choque e conseqüentemente maior a probabilidade de colisão dos elétrons. Vemos então a importância em se manter não só uma baixa pressão em nossas câmaras, mas também que os gases residuais tenha pequena massa molecular.

## II.3 Sistema de Vácuo das Linhas de Luz

O espectro de Radiação Síncrotron emitida por nosso anel se estende desde o infra vermelho até a região de raios X moles. A configuração de uma linha de luz depende fundamentalmente da faixa de interesse para o usuário desta linha. Por exemplo para a faixa do Ultra Violeta de Vácuo (10eV a 2000 eV) necessitamos de uma linha sem nenhuma janela, pois esta radiação não se propaga em nenhum meio sólido. Isto significa que a linha inteira, da câmara do dipolo ao experimento deve ser mantida a uma pressão tão baixa quanto a pressão no anel ( $P < 1 \times 10^{-9}$  mbar). Já para uma linha de raio X temos a facilidade de podermos utilizar janelas de Berílio isolando partes que funcionam a pressões mais altas.

Como já foi dito uma linha de luz se divide em 3 partes: O "Front End", a Parte Óptica e a Estação Experimental. Descreverei aqui brevemente o projeto da câmaras do "Front End" feito pelo grupo de Instrumentação do LNLS e projeto de uma parte óptica feito por nós para uma estação de Difração de Raio X .

### II.3.1 O Sistema de Vácuo do "Front End"

O "Front End" é composto por um bloqueio primário de radiação, blindagem contra raios gama, uma válvula "all metal" manual, uma válvula pneumática, uma válvula rápida, medidores rápidos e uma linha de retardo acústico. fig II.11.

A função principal do "Front End" é proteger no anel contra possíveis acidentes na linha de luz (ref.30) Esta proteção é feita principalmente pela linha de retardo acústico, pela válvula e sensores rápidos. Caso haja algum acidente na estação



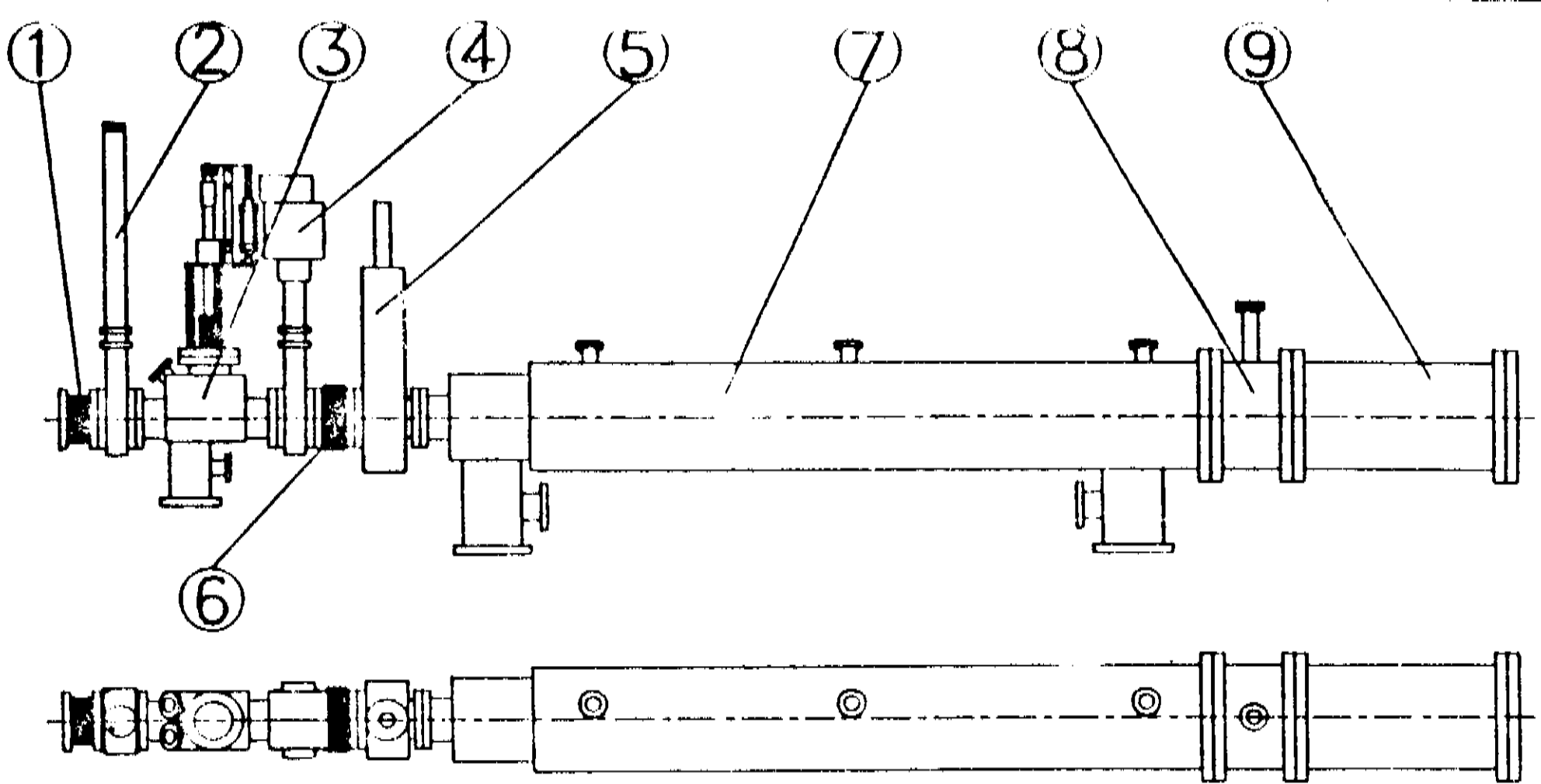


Fig. II.11 - Front End

- 1) Fole
- 2) Válvula Manual
- 3) Shutter
- 4) Válvula pneumática
- 5) Válvula rápida
- 6) Fole
- 7) Linha de Retardo Acústico
- 8) Sensor Rápido

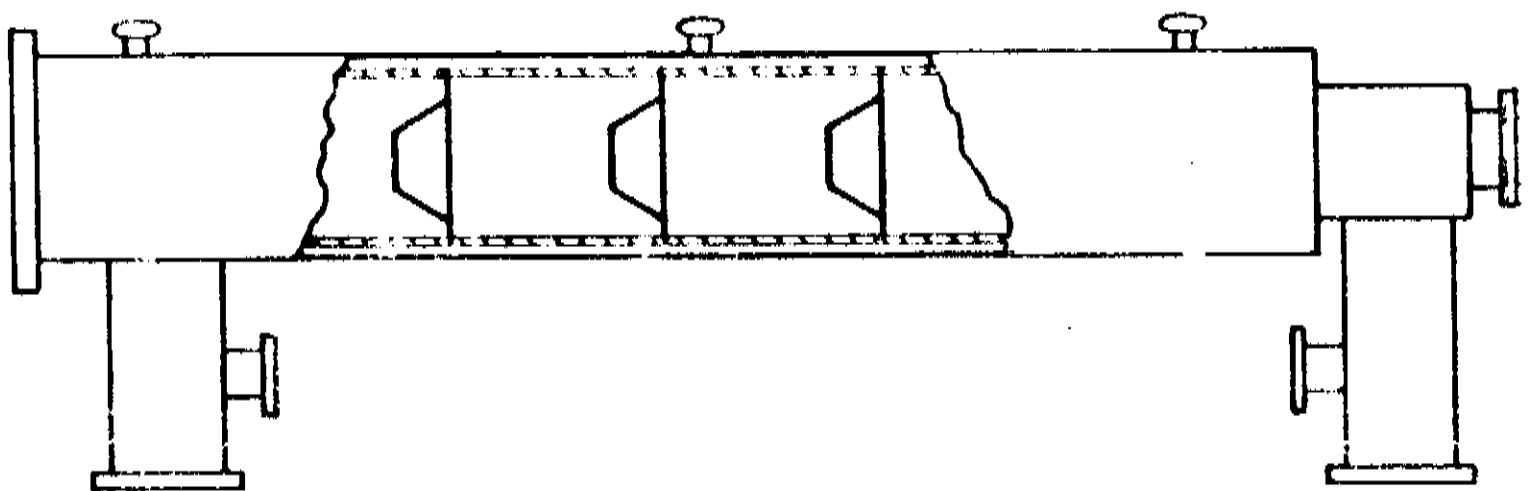


Fig. II.12 - Linha de Retardo Acústico

experimental, quebrando-se indevidamente o Vácuo, uma onda de pressão vai na direção do anel. O sensor rápido acusa então esta alta de pressão mandando um sinal para o fechamento da válvula rápida e da válvula pneumática. A primeira se fecha em um intervalo da ordem de 10 ms mas não tem boa estanqueidade. A válvula pneumática que veda totalmente o sistema, atua aproximadamente em alguns segundos.

Mesmo se pensamos nos 10ms necessários para a válvula rápida se fechar, teríamos problemas caso uma onda de pressão a uma atmosfera entrasse no anel. Provavelmente perderíamos o feixe e uma nova injeção seria necessária. Para diminuirmos a probabilidade de um "shut down" colocamos entre sensor rápido e as válvulas uma câmara chamada linha de retardo acústico fig. II.12. Esta câmara, composta por várias íris e células tem a propriedade de diminuir a velocidade de propagação da onda de pressão até por um fator 5.

Todo o "front end" deve se encontrar a pressões da mesma ordem que o anel ( $P < 1 \times 10^{-9}$  mbar). Para tanto ele será bombeado por 3 bombas iônicas, uma de 60 e duas de 230 l/s.

### II.3.2 Sistema de Vacuo da Parte Óptica das Linha de Luz

Descreverei aqui o trecho óptico que projetamos para uma estação experimental de Difração de raio X. fig. II.13.

O primeiro componente óptico após a válvula que separa o "front end" desta seção é uma fenda ajustável que reduz as dimensões o feixe de luz antes dele chegar ao espelho. Após esta fenda temos uma saída para bomba iônica, um fole e então a câmara mais sofisticada de todo o sistema, a câmara do espelho Toroidal

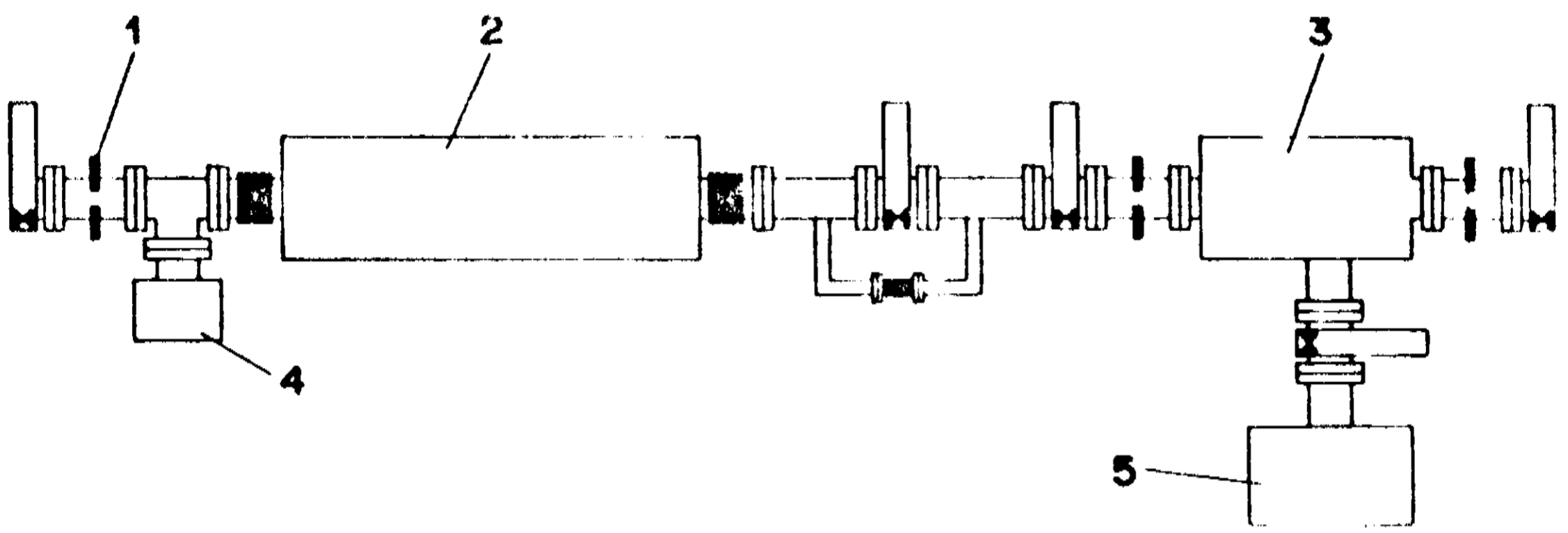


Fig. II.13 - Parte Óptica de uma linha de Luz para difração de Raio-X.

- 1) Fenda
- 2) Câmara do Espelho
- 3) Câmara do Monocromador
- 4) Bomba Iônica
- 5) Sistema Turbo Molecular



Fig. II.14 - Câmara do Espelho Toroidal

(fig. II.14). Esta câmara tem várias peculiaridades mas o mais difícil em sua construção é o seu sistema de alinhamento. A tabela II.2 abaixo (ref 32) mostra os requisitos necessários para que possamos alinhar bem o espelho. Este, um espelho Toroidal de incidência razante, tem aproximadamente 1 metro de comprimento e é fixo a parte central da câmara. A câmara então é alinhada como um todo, evitando-se assim um complexo sistema de "feed throughs" mecânicos.

Tabela II.2 - Exigências de Movimento  
para a câmara do espelho

Translação	Curso	Resolução
x	20 mm	0,5 mm
y	20 mm	0,5 mm
z	10 mm	0,01 mm
Rotação		
$\theta_x$	$1^\circ$	1 mrad
$\theta_y$	$1^\circ$	0,1 $\mu$ rad
$\theta_z$	$1^\circ$	0,1 mrad

Esta câmara deve ser provida de uma válvula de vazamento e de um eletrodo de alta tensão que são usados para se fazer o "glow discharge" de  $O_2$ . Esta técnica de limpeza é usada para se descontaminar a superfície do espelho quando ele começa a perder sua refletividade. Isto ocorre principalmente por contaminação com Hidrocarbonetos.

Moléculas de Hidrocarbonetos adsorvidas na superfície refletora dos espelhos sofrem o "craking" devido à ação de

fotoeletrons gerados pela radiação síncrotron. (ref. 33 e 34). Os produtos desta reação são gases como CO, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub> e ainda átomos de carbono. Este carbono depositado na superfície atenua a refletividade do espelho por várias ordens de grandeza, principalmente na região da linha K do carbono, que é em torno de 280 eV. Esta contaminação ocorre em espelhos de ouro, e mais intensamente ainda em superfícies catalisadoras como platina. Este tipo de contaminação ocorre também nos outros componentes ópticos como monocromadores e janelas.

Caso o "Glow Discharge" com O<sub>2</sub> não seja suficiente para limpar o espelho, a única solução é abrir a câmara e substituí-lo, o que implica em se repetir todo o trabalho de alinhamento.

Prosseguindo com o sistema de vácuo temos após a câmara do espelho e seu segundo fole uma câmara com uma válvula com janela de berílio e um "by pass" de segurança. Isto funciona da seguinte maneira: se um acidente ocorre na estação experimental e ar entra na câmara a janela poderia se quebrar. Como estas janelas são muito caras é interessante se colocar uma membrana metálica de resistência inferior ao berílio em paralelo à janela. Assim em caso de acidente este "fusível mecânico" se rompe e protegemos esta janela.

Este projeto ainda não está completamente detalhado mas como todos os materiais usados são compatíveis com UHV e temos poucos dispositivos móveis nos parece que uma só bomba iônica de 400 l/s deve ser suficiente para manter esta seção em pressões menores que  $1 \times 10^{-9}$  mbar.

No final deste trecho temos uma outra válvula gaveta que o separa da câmara do monocromador. Esta, por ter que ser aberta

frequentemente, será bombeada por um sistema turbo molecular. Ela é composta basicamente por fendas de entrada e saída e uma câmara maior ligada à turbo por uma válvula tipo borboleta. A pressão nesta câmara deve ser da ordem de  $10^{-5}$  mbar. A parte óptica da lunha de luz termina em uma válvula de setor que a liga à estação experimental.

## II.4 Problemas por Contaminação com Hidrocarbonetos e Bombas de Criosorção

Neste Capítulo descrevemos o sistema de vácuo de cada parte da nossa fonte de luz. Discutimos uma série de problemas relacionados ao sistema de vácuo que afetam a performance destas máquinas.

Um problema que é comum a todas as partes da nossa fonte, por motivos completamente diferentes é a contaminação por Hidrocarbonetos.

Na seção II.1.4 mostramos como esta contaminação pode causar a "RF breakdow" e a atenuação do Q das cavidades do LINAC.

Na seção II.2.4 mostramos como íons pesados são mais facilmente aprisionados pelo potencial causado pelos bunches em um anel. Mostramos ainda como o tempo de vida do feixe devido a perda de elétrons por emissão de fótons por Bremstrahlung diminui quando a massa atômica dos gases residuais aumenta.

Na seção II.3.2 mostramos como a contaminação com hidrocarbonetos atenua a refletividade de espelhos e degrada outros componentes ópticos das linhas de Luz.

Todos estes problemas são graves e tem dificultado os trabalhos em vários laboratórios pelo mundo. Podemos citar por

exemplo (ref. 35) um acidente ocorrido no NSLS de Brookhaven, quando um problema em uma bomba turbo molecular contaminou o anel. Mesmo com pressões da ordem de  $1 \times 10^{-9}$  mbar o tempo de vida do feixe não passava de alguns minutos.

Sabe-se que a maior fonte de Hidrocarbonetos são bombas a óleo como difusoras e bombas mecânicas. Procuramos então substitutas para estes tipos de bomba de modo a diminuir o risco de contaminação dos nossos sistemas. Para operação em regime temos as consagradas bombas iônicas. Para se fazer o pré vácuo usam-se normalmente no exterior sistemas turbo moleculares, que apesar de não serem completamente confiáveis, tem um bom desempenho. Estes sistemas tem para nós no Brasil outros tantos inconvenientes:

- Dificuldade de importação
- Dificuldade de manutenção
- Alto custo, etc.

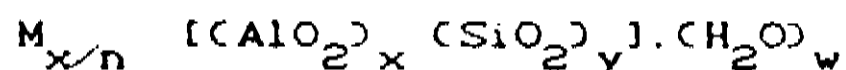
Propusemo -nos então a procurar outra saída para se fazer o pré vácuo nas nossas câmaras. Vislumbramos a possibilidade de construirmos bombas de criosorção usando-se zeolitas comerciais usadas na indústria química nacional. Este tipo de bomba é bastante atraente pois, por não ter nenhuma peça móvel não usa nenhum tipo de óleo, reduzindo o risco de contaminação a zero.

Todo o resto deste trabalho se dedica ao estudo da zeolita, ao desenvolvimento e caracterização de bombas e a suas aplicações em montagens no LNLS .

## III.1 - O que são Zeolitas

Zeolitas são aluminossilicatos hidratados contendo cátions das colunas I e II da tabela periódica, em particular sódio, potássio, magnésio e cálcio (ref.36). A rede cristalina das zeolitas pode ser vista como uma armação de aluminossilicatos baseada numa rede tri-dimensional de tetraedros  $AlO_4$  e  $SiO_4$ , com os átomos de Si ou Al no centro do tetraedro e com os átomos de Oxigênio servindo de ponte de ligação entre um tetraedro e outro. fig III.1.

Esta rede contém poros que são interligados por canais. Dentro destes poros localizam-se os cátions e as moléculas de água. A forma estrutural de uma zeolita é expressa como:



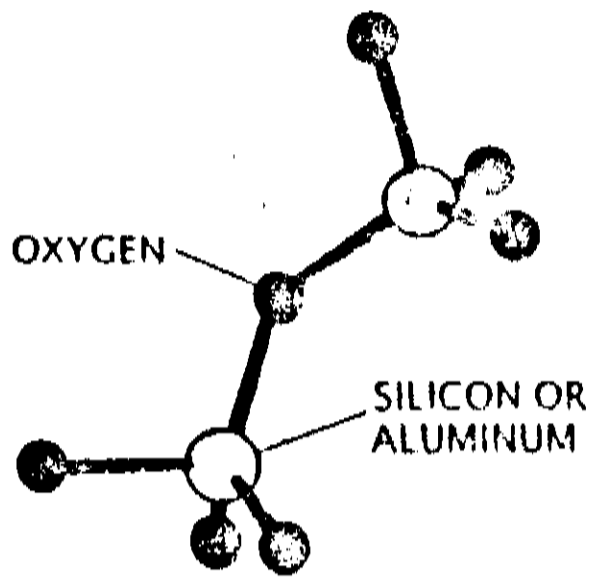
Onde M é um cátion de valência n, w é o número de moléculas de  $H_2O$  e a razão y/x varia usualmente de 1 a 5. A soma (x + y) dá o número total de tetraedros na célula unitária.

Há vários tipos de zeolitas naturais e sintéticas. Estamos especialmente interessados em um tipo de zeolita sintética chamada de 4A pois esta, além de ter sido normalmente aplicada em bombas de criosorção, é facilmente encontrada no mercado nacional.

A Zeolita tipo A foi obtida e caracterizada por D.W. Breck (ref. 37), em 1956. Sua estrutura é descrita em termos de dois tipos de poliedros: o primeiro é um arranjo cúbico simples de 8 tetraedros colocados cada um em um vértice do cubo, o outro é um



a



b

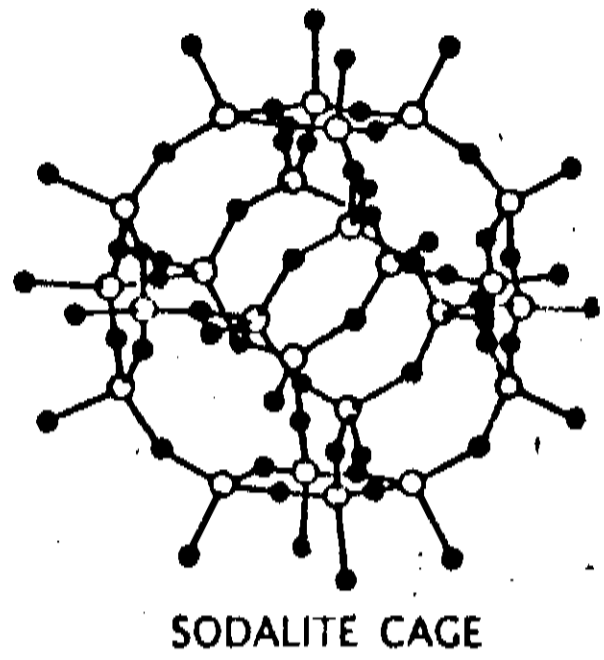


Fig. III.1 a) Tetraedos que formam a base da estrutura cristalina da zeolita  
b) Cavidade formada a partir dos tetraedos

c

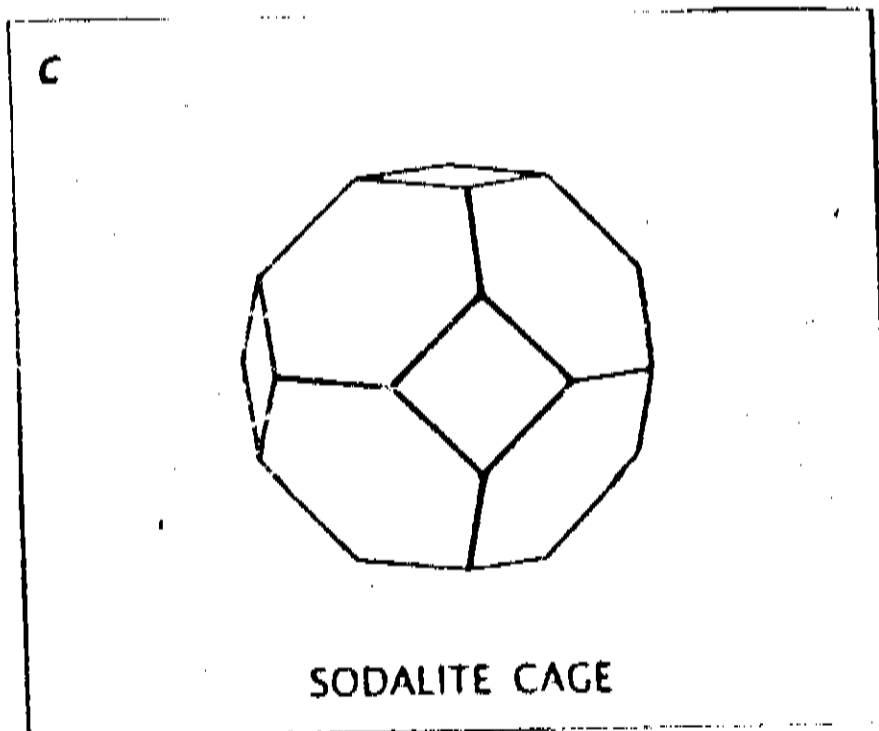


Fig. III.2 - Célula básica da zeolita A

octaedro truncado de 24 tetraedros. Este octaedro forma dentro de si uma cavidade com diâmetro livre de 6,6 Å chamada cavidade  $\beta$ .

A rede da zeolita A é gerada colocando-se 12 unidades cúbicas ( $\text{Al}_4 \text{Si}_4 \text{O}_{16}$ ) nos centros das arestas de um cubo cujas arestas tem 12,3 Å. Cada vértice do cubo é ocupada por um octaedro truncado (fig. III.3).

O centro da célula unitária é uma grande cavidade com diâmetro livre de 11,4 Å chamada cavidade  $\alpha$ . Nela se localizam os cátions, que no caso da zeolita 4A são átomos de Na (ref.38). Também ali se encontram as moléculas de  $\text{H}_2\text{O}$ , que para a zeolita 4A totalmente hidratada são 27.

A fig. III.4 mostra um corte no plano 110 da estrutura da zeolita 4A. Nela podemos ver as cavidades  $\alpha$  e  $\beta$  com 11,4 Å e 6,6Å de diâmetro respectivamente. Vemos também a entrada da cavidade  $\alpha$  com 4,2 Å de abertura. Os círculos claros representam oxigênios e os sombreados os cátions Na. A característica fundamental das zeolitas que possibilita que elas sejam usadas como adsorvedores é a capacidade que elas possuem de serem desidratadas sem colapso da rede cristalina. Ou seja, ao serem aquecidas, as zeolitas liberam as moléculas de água sem que sua rede cristalina se rearranje. Pelo contrário, quando a água é removida, a estrutura do cristal permanece inalterada e estável com sua rede de cavidades e poros vazios. O volume destas cavidades pode ser de 50% ou mais do volume do cristal.

Obviamente, se desejamos adsorver todos os gases da atmosfera, então a zeolita utilizada deve ter poros maiores que as dimensões das moléculas destes gases. Por outro lado não é desejável ter os poros grandes demais pois isto reduziria o seu número e assim o potencial de adsorção da zeolita.

e

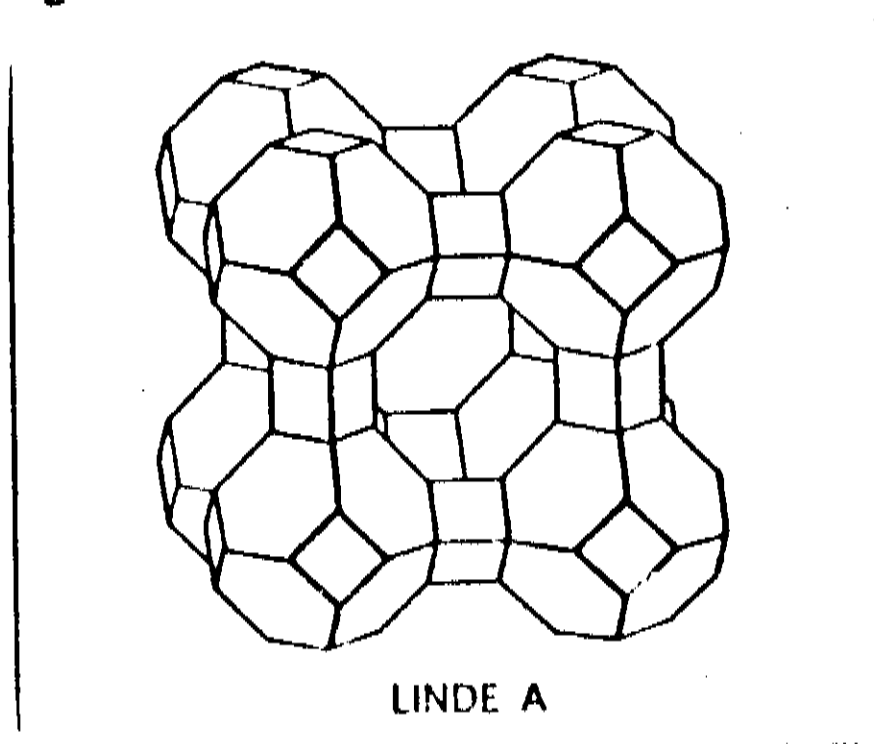


Fig. III.3 - Estrutura da zeolita tipo A

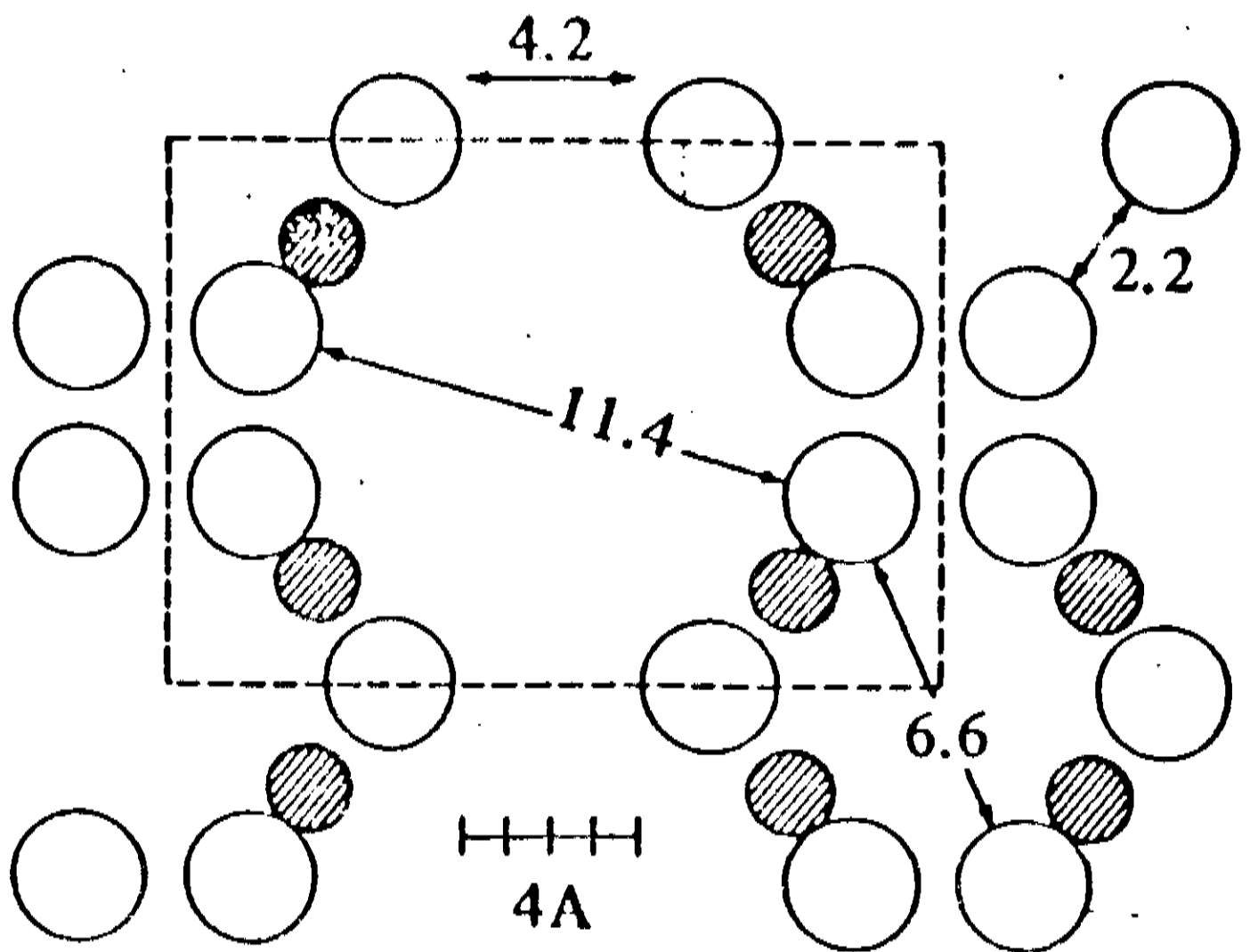


Fig. III.4 - Corte no plano 110 da zeolita 4A

Cavidade  $\alpha$  de 11,4 Å

Cavidade  $\beta$  de 6,6 Å

Poros de 4,2 Å

Se examinamos a tabela III.1 abaixo vemos que o maior diâmetro molecular dos gases atmosféricos é aproximadamente 3,2 Å.

TABELA III.1

Oxigênio	2,92 Å
Nitrogênio	3,15 Å
Argônio	2,94 Å
CO <sub>2</sub>	3,23 Å

As zeolitas comerciais mais utilizadas na adsorção de gases são:

Tipo 4A (Sódio)	diâmetro = 4Å
Tipo 5A (Cálcio)	diâmetro = 5Å
Tipo 13X (Sódio)	diâmetro = 10Å

Assim nos parece acertada a opção por zeolita tipo 4A.

### III.2 - Como se dá a adsorção

As forças intermoleculares que ligam as moléculas dos gases à superfície dos sólidos variam consideravelmente para conjuntos gas-sólidos diferentes. Em muitos casos, interações similares a aquelas envolvidas em reações químicas ocorrem, ou seja, perturbações nas configurações eletrônicas das moléculas dos gases adsorvidos e dos átomos dos sólidos levam a formação de ligações entre eles. Este tipo de adsorção, chamada adsorção química é associada com um alto grau de especificidade entre o material adsorvido e adsorvedor, com um alto calor de adsorção e é

reversível com grande dificuldade. Um exemplo conhecido deste tipo de adsorção é o que se passa entre as moléculas de  $N_2$  e  $O_2$  com o titânio em bombas iônicas e de sublimação.

Mais geral, no entanto, do que a adsorção química é a chamada adsorção física, onde forças do tipo Van der Waals agem ligando as partículas. Neste tipo, até mesmo átomos que não reagem quimicamente, como os gases nobres, são aprisionados. Este é o tipo de interação que faz com que a zeólita adsorva os gases. A adsorção física tem muitos pontos em comum com o fenômeno da liquefação. Por exemplo, ela cresce com o decréscimo da temperatura e em geral ela é maior a uma dada temperatura, para gases mais facilmente condensáveis.

Qualitativamente a origem física da força de Van der Waals é facilmente explicada (ref. 39):

Consideremos dois átomos (1 e 2) separados pela distância  $r$ . Se o momento de dipolo do átomo 1 é  $P_1$ , então haverá um campo elétrico proporcional a  $P_1/r^3$ , a uma distância  $r$  deste átomo. Este campo induz um momento de dipolo no átomo 2 proporcional a ele mesmo. Ou seja:

$$P_2 = \alpha E \sim \alpha P_1/r^3$$

Onde  $\alpha$  é a polarizabilidade do átomo 2.

Uma vez que dois dipolos tem uma energia de interação proporcional ao produto dos seus momentos, dividido pelo cubo da distância entre eles, haverá uma diminuição da energia do sistema associada à indução do momento dipolar da ordem de:

$$\frac{P_2 P_1}{r^3} \sim \frac{\alpha P_1}{r^6}$$

Vemos que a força associada a esta energia cai rapidamente com a distância.

Quando os átomos se aproximam ao ponto de suas nuvens eletrônicas se superporem, uma forte força de repulsão entra em jogo e o balanço entre ela e a Força de Van der Waals determina a posição de equilíbrio do sistema. O potencial total normalmente é representado na forma de uma série de potências chamadas Potencial de Lennard-Jones (fig. III.5):

$$\phi(r) = \frac{-A}{r^6} + \frac{B}{r^{12}}$$

Mas é importante ressaltar que não há uma boa razão para a escolha do expoente 12 sobre o 20. termo. A expressão acima não é nada mais do que uma maneira simples de se expressar que:

- a) O potencial é atrativo e varia com  $1/r^6$  a grandes distâncias.
- b) O potencial é fortemente repulsivo a curtas distâncias.
- c) Os parâmetros A e B são as medidas da força de atração e do raio da nuvem eletrônica dos átomos. Eles devem ser calculados a partir de dados experimentais.

No caso da zeólita, em tratamento mais rigoroso para a determinação das forças de adsorção deveria ser feito levando-se em conta a interação entre molécula adsorvida e os vários cátions localizados dentro de suas cavidades. Isto no entanto não é o

objetivo deste trabalho.

Passaremos agora ao estudo prático da adsorção de gases pela zeolita.

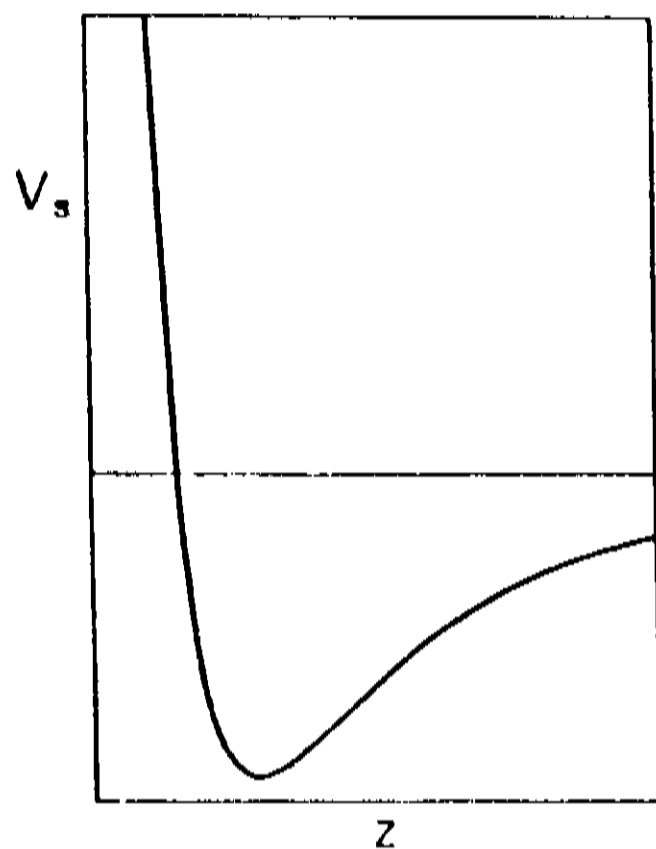


Fig. III.5 - Potencial devido à Força de Van der Waals próximo à superfície dos sólidos

## IV.1 As Bombas de Criossorção

Agora que já estudamos a constituição da Zeolita e a maneira como se dá a adsorção, passamos ao estudo prático das bombas de criossorção.

Estas bombas são recipientes metálicos carregadas de zeolita (ou outro adsorvedor) que quando imersas em Nitrogênio líquido ( $LN_2$ ) tem a capacidade de adsorver ou bombear grandes quantidades de gases (ref. 40 - 41 - 42 - 43 - 44).

Para nossos estudos projetamos e construímos 3 tipos diferentes de Bombas. A mais simples (fig. IV.1.a) é formada por um tubo de aço inox 304 de 63 mm de diâmetro externo e 1,5mm de parede, preenchido inteiramente por 600g de zeolita 4A da Bayer. Sua saída é feita por uma flange CF35 e um tubo de 38 mm de diâmetro externo ligado ao tubo de 63 por flanges Conflat. Isto facilita o acesso ao interior da bomba, fato que nos parece interessante nesta fase de desenvolvimento. Esta bomba é isolada por uma válvula de ângulo reto, de aço inox e selo de víton com diâmetro nominal 35 mm.

A motivação para projetarmos esta bomba foi sobretudo sua facilidade de execução.

Um dos problemas que encontramos ao utilizarmos bombas de Criossorção é a baixa condutância térmica da zeolita, que faz com que os tempos de ativação e resfriamento sejam muito grandes. Para



diminuirmos este problema projetamos então uma segunda bomba (fig. IV 1.b). Esta possui um tubo interno por onde o  $LN_2$  entra, o que facilita consideravelmente a troca de calor. Na saída desta bomba também temos uma CF 35 e uma válvula de ângulo reto mas desta vez esta saída conectada ao recipiente de zeolita por flanges CF 100.

Uma propriedade geométrica importante para as Bombas de Sorção é a área de zeolita exposta aos gases. Para aumentarmos esta área projetamos e construímos um terceiro tipo de bomba (fig. IV.1.c). Esta bomba além de possuir o tubo interno que melhora a troca de calor, tem uma rede de aço inox que mantém a zeolita próxima das paredes frias e aumenta a área exposta enormemente. Temos o mesmo tipo de saída que anteriormente com flanges CF 100 fazendo a sua ligação com a garrafa.

Nesta, como nas outras duas bombas temos 600 g de zeolita 4A.

Todas as bombas foram construídas em aço inox 304 e soldadas com solda tipo TIG.

Após jateadas com microesferas de vidro todas elas sofreram o seguinte tratamento de limpeza.

- a) limpeza com acetona e papel
- b) banho de vapor de tricloroetileno
- c) enxague
- d) banho de ultra som com detergente alcalino (pH 11)
- e) enxague
- f) secagem em estufa a  $150^{\circ}C$  por uma hora

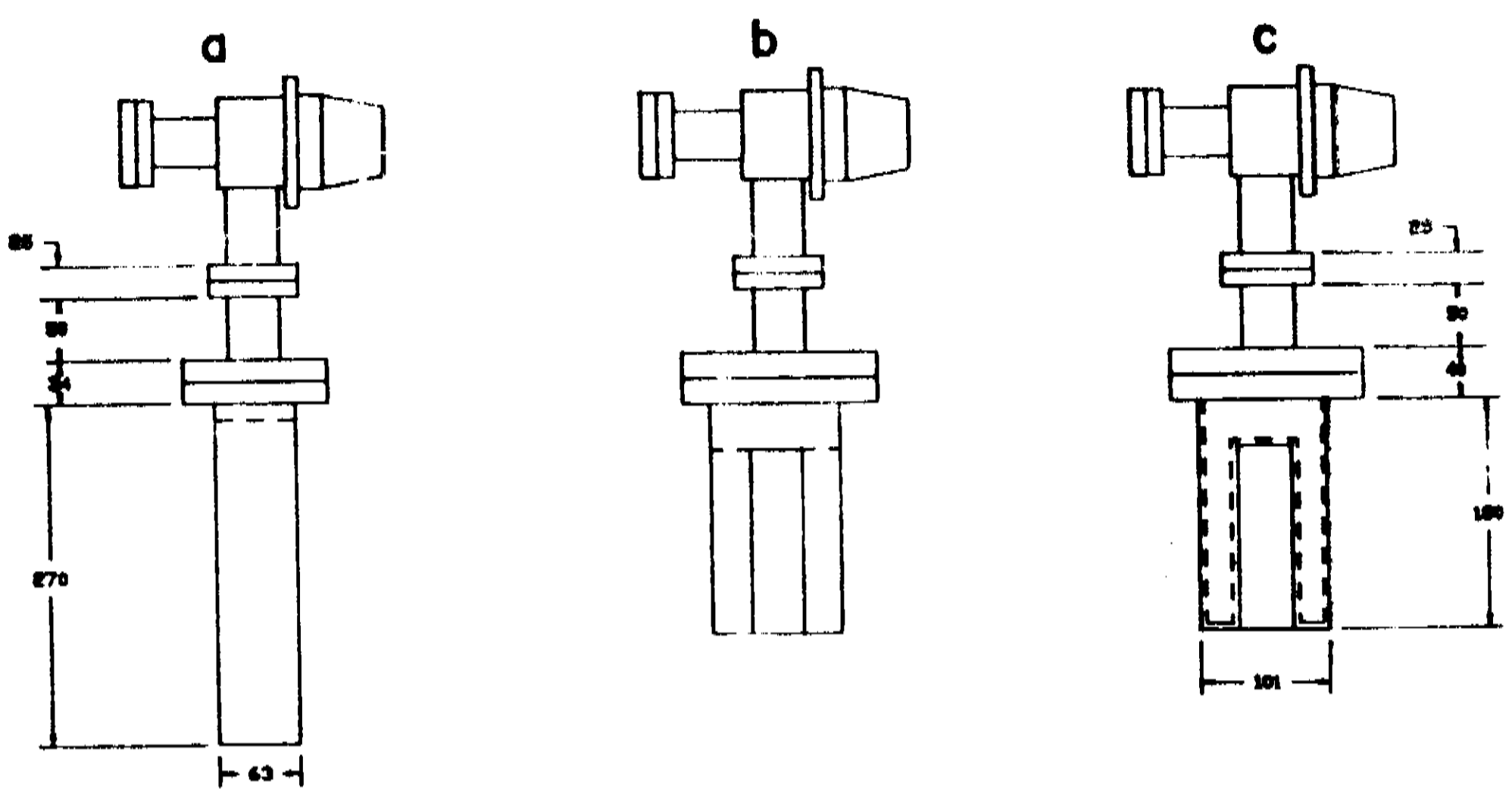


Fig. IV.1 - Bombas de Criossorção

- a) BS1
- b) BS2
- c) BS3

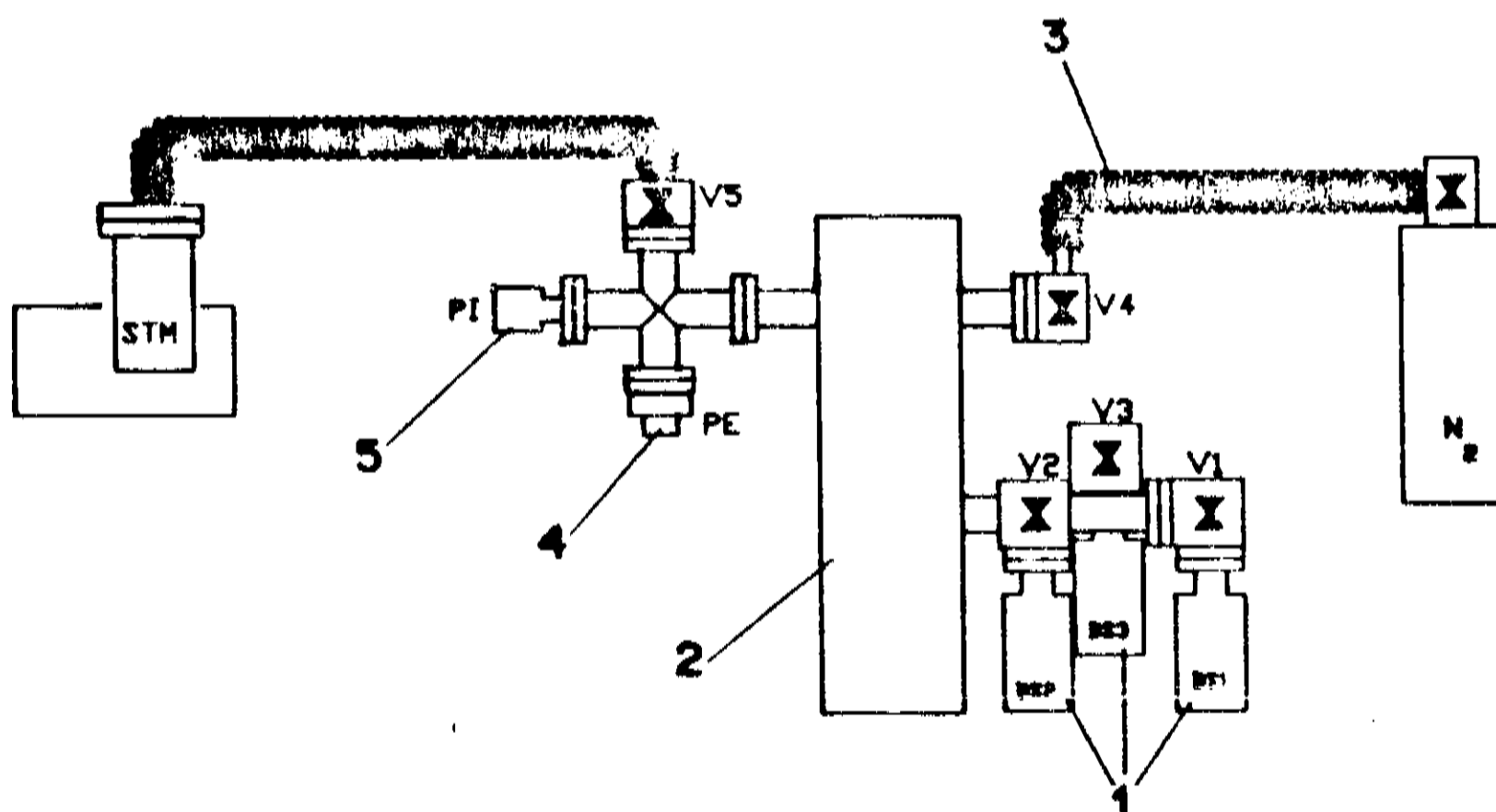


Fig. IV.2 - Montagem para testes das Bombas

- 1) Bombas de Sorção
- 2) Câmara Principal
- 3) Admissão de Gases
- 4) Medidor Penning
- 5) Medidor Pirani

Na tabela IV.1 temos o resumo das principais características das 3 bombas.

Tabela IV.1

Bomba	Carga de Zeolita	Superfície Exposta	Superfície para Troca de Calor
BS 1	600g	28 cm <sup>2</sup>	28 cm <sup>2</sup>
BS 2	600g	40 cm <sup>2</sup>	66 cm <sup>2</sup>
BS 3	600g	1000 cm <sup>2</sup>	785 cm <sup>2</sup>

#### IV.2 Montagem Experimental para caracterização das Bombas

Desejamos conhecer diversas características das nossas bombas como:

- a) velocidade de bombeamento
- b) capacidade
- c) facilidade de ativação, etc

Para tanto montamos o sistema mostrado na fig. IV.2. Nele temos uma câmara principal de aproximadamente 4 litros ligada por uma cruzeta às 3 bombas de criosorção. Temos também na parte superior desta câmara uma outra cruzeta com 1 medidor de Vácuo tipo Pirani, 1 medidor tipo Penning e uma válvula para pré-vácuo. Esta válvula liga nossa câmara a um pequeno sistema turbo molecular de 50 l/s. Finalmente temos uma válvula de ângulo reto para admissão rápida de gases.

Os medidores Pirani e Penning são ligados em uma mesma eletrônica que por sua vez está ligada a um microcomputador. Foi feito um programa de aquisição de dados que durante qualquer experiência lê e armazena em arquivos os valores das pressões em um e outro medidores e do tempo.

Todas as junções desta montagem foram feitas com selo de cobre Elox, exceto a conexão da válvula de admissão que foi feita por um O'ring de Viton. Todos os componentes foram feitos e limpos da mesma maneira que as bombas, já descrita anteriormente.

Após montado o sistema foi feita uma rigorosa detecção de vazamentos com um "Leak Detector", ligando-o entre a bomba mecânica e a turbo molecular. Todas as conexões que vazavam tiveram seus anéis trocados e estanqueidade garantida até  $1 \times 10^{-9}$  cc (std)/s.

Com V1, V2 e V3 fechadas, obtivemos pressões da ordem de  $1 \times 10^{-5}$  mbar simplesmente bombeando a câmara principal por 24h com o sistema turbo molecular. É bom observar que não fizemos "baking" na câmara.

A ativação das bombas foi feita através de coleiras de aquecimento e a temperatura controlada com o uso de Variac's. A temperatura de ativação era da ordem de  $200^{\circ}\text{C}$  mas notamos que ela não era homogênea em toda bomba, havendo variações de até  $30^{\circ}\text{C}$  em pontos distantes da coleira. A ativação era feita durante aproximadamente 15 horas com as bombas de sorção sendo evacuadas pelo sistema turbo molecular.

Depois de algumas experiências vimos que o comportamento de

uma bomba não era muito afetado pela maneira como ela era ativada pelo menos quando ela era usada em primeiro estágio. Isto vai ser exposto mais à frente.

O resfriamento das bombas foi feito por nitrogênio líquido colocado em caixas de isopor. Notamos que aproximadamente 10 minutos depois da imersão de qualquer bomba o  $LN_2$  parava de ebulir violentamente. Isto indicava que o aço inox já se encontrava aproximadamente na temperatura do  $LN_2$ . Fizemos todas as nossas experiências abrindo as válvulas das bombas após 15 minutos de imersão. Isto garantia que pelo menos parte da zeolita já se encontrava a baixa temperatura.

É bom frisar que procuramos não o melhor sistema de ativação e resfriamento possível mas sim os melhores sistemas factíveis dentro de situações rotineiras. Por exemplo, observamos que quanto mais tempo deixássemos a bomba submersa antes de abrirmos sua válvula melhor seu desempenho, no entanto este procedimento não é prático nem econômico. No caso da ativação, 15 horas foi o intervalo escolhido por se tratar do período entre 17:00h de uma dia a 8:00h do dia seguinte.

#### IV.3 Bombeamento em um Estágio

A primeira manipulação feita foi simplesmente o bombeamento da câmara principal por cada uma das três bombas independentemente. Antes de abrirmos as válvulas expurgávamos e enchíamos a câmara com Nitrogênio super-seco até a pressão de uma

atmosfera. Com o sistema de aquisição de dados conectado obtivemos os pontos para a construção do gráfico mostrado na fig IV.3.

Neste gráfico vemos que, como era de se esperar, o desempenho da BS3 é melhor que da BS2 e este melhor que o da BS1. No entanto, estas diferenças não são grandes o suficiente para que projetos mais sofisticados fossem tentados. Qualquer passo neste sentido seria custoso demais e o resultado certamente não seria muito superior ao obtido com a BS3.

É importante observar que os resultados obtidos estão em concordância com valores registrados na literatura para bombeamento em um estágio. Por exemplo temos as experiências feitas por J.C. Godot em sua tese de doutoramento (ref.45) onde uma bomba com 700g de zeolita 13x evacuava um volume de 5l a  $1 \times 10^{-2}$  mbar em 1 hora.

Para compararmos o desempenho destas bombas com bombas mecânicas comuns é interessante calcularmos a velocidade de bombeamento delas em metros cúbicos por hora.

Por definição a velocidade de bombeamento de uma bomba que evacua um recipiente com degaseificação zero (ou desprezível frente à carga de gás nele existente) é:

$$S = - V \frac{[ \ln P_2 - \ln P_1 ]}{\frac{T}{2} - \frac{T}{1}}$$

Comparação entre as tres bombas

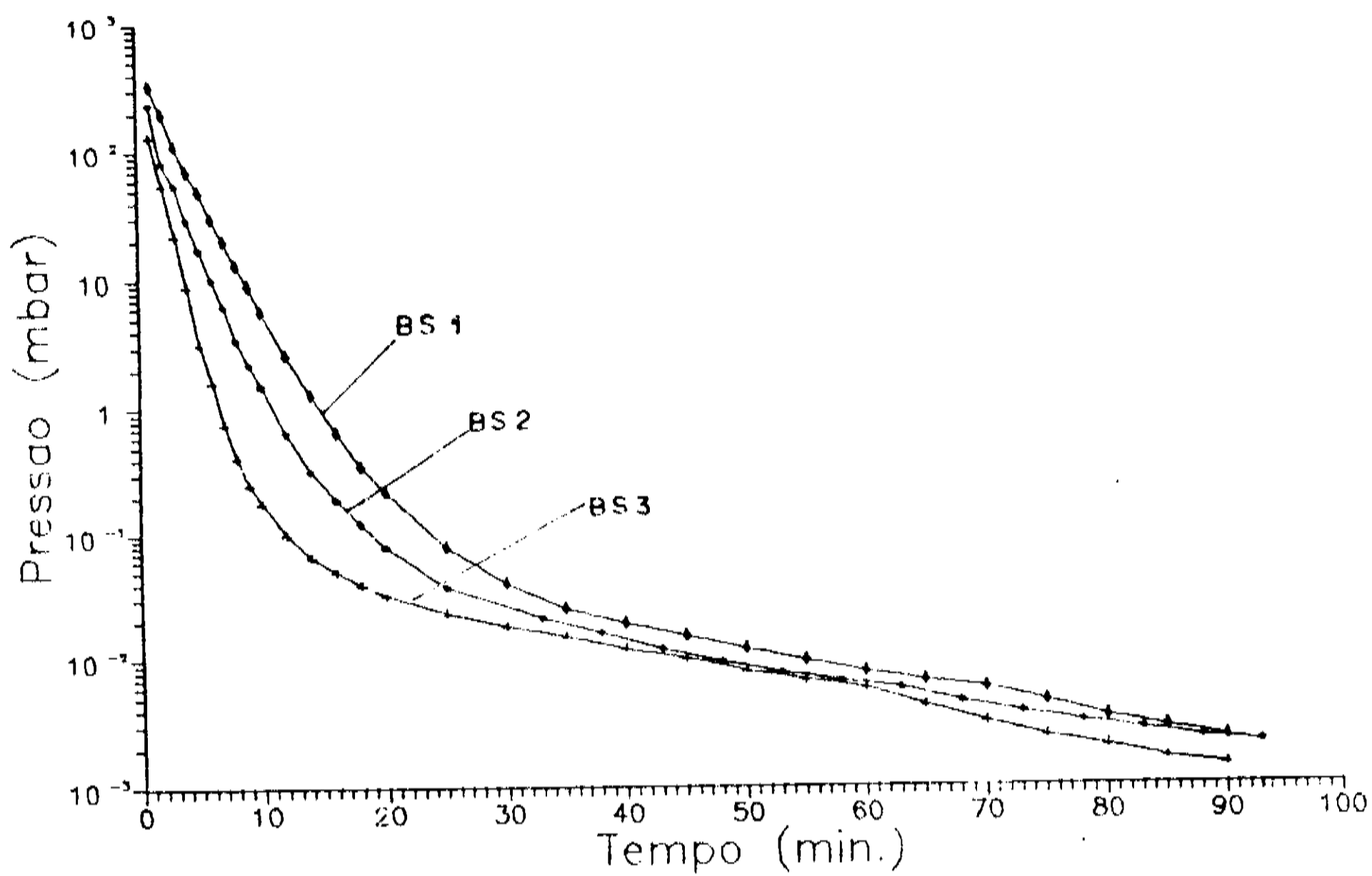


Fig. IV.3

Ln da pressão para os min. iniciais de bombeamento

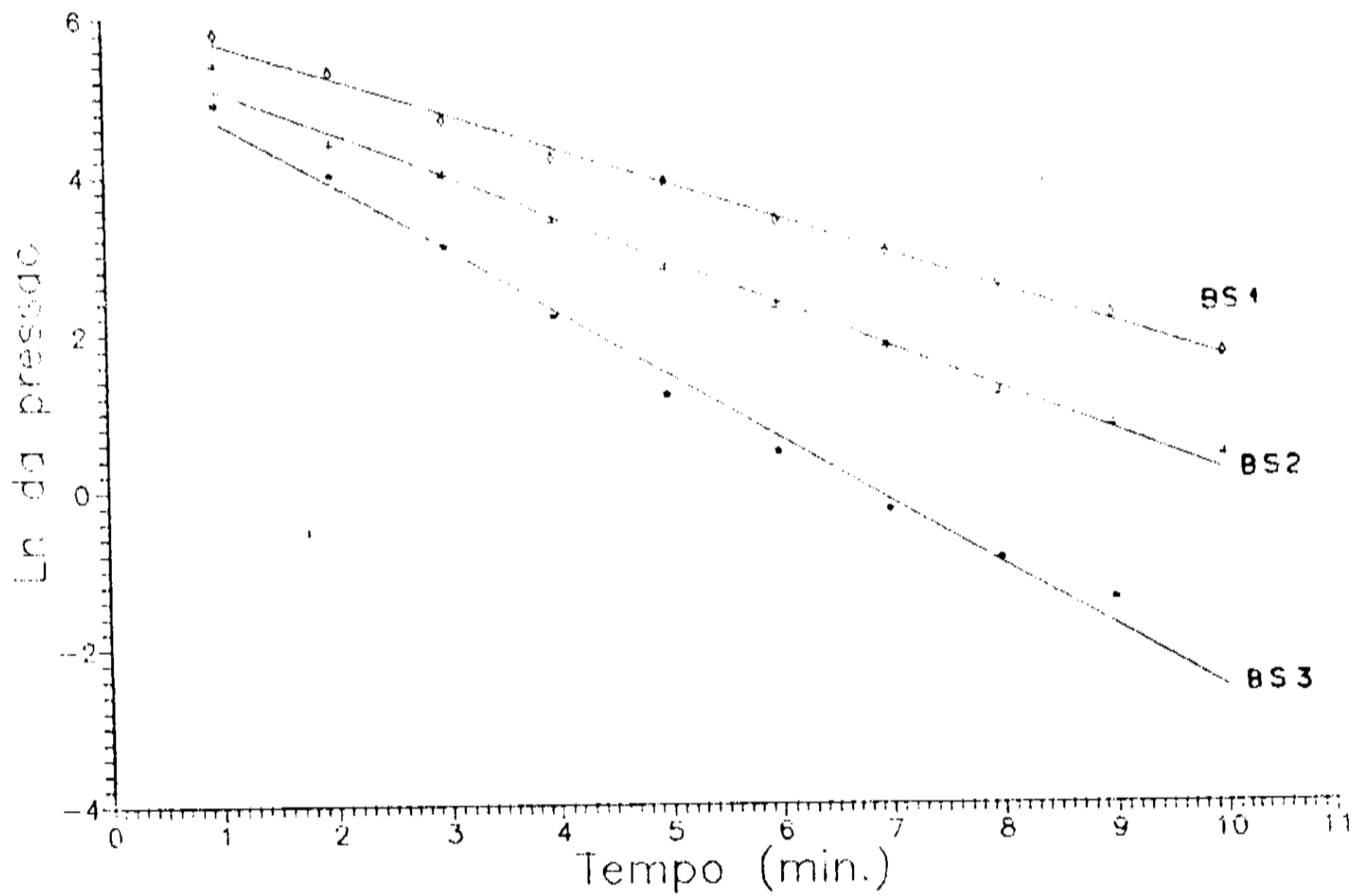


Fig. IV.4

Onde:

V é o volume da câmara

$P_2$  é a pressão no instante  $T_2$  e

$P_1$  é a pressão no instante  $T_1$ .

No gráfico da fig. IV.4 plotamos  $\ln P$  contra  $t$  para os primeiros 10 minutos de bombeamento. Temos praticamente retas até que  $\ln P$  seja aproximadamente  $-1$ , ou seja  $P \approx 4 \times 10^{-1}$  mbar.

Deste gráfico podemos tirar as velocidades de bombeamento que são mostradas na tabela IV.2. Nesta tabela mostramos também, para comparação, a pressão alcançada por cada uma das bombas após 90 minutos.

Tabela IV.2

	$S$ ( $m^3/h$ )	$P_{90}$ (mbar)
BS1	0,10	$2,3 \times 10^{-3}$
BS2	0,12	$2,2 \times 10^{-3}$
BS3	0,20	$1,4 \times 10^{-3}$

Neste ponto, estávamos preocupados com a reprodutibilidade dos nossos dados devido a variações na maneira em se ativar as bombas. Fazendo alguns testes observamos que algumas horas a mais ou a menos no tempo de ativação não faziam diferenças significativas na performance das bombas.



Isto é facilmente explicável pois nos primeiros segundos de bombeamento a partir da atmosfera a zeolita adsorve uma carga de gás muitas vezes maior do que ela desorve nas horas finais da ativação.

Resolvemos então verificar como se comportaria uma das bombas ao ser ativada contra atmosfera e não contra vácuo. O resultado é a curva da fig. IV.5 que mostra uma diferença não muito grande no começo do bombeamento, mas uma significativa piora na pressão limite.

Concluimos que a forma de ativação não é muito crítica para bombas de primeiro estágio mas é bastante importante para as bombas de 2<sup>o</sup> e 3<sup>o</sup> estágio que vão trabalhar a partir de pressões mais baixas. É aconselhável que estas bombas sejam ativadas sempre contra alguma outra bomba.

Outra característica importante das nossas bombas que gostaríamos de conhecer é a sua capacidade. Gostaríamos de conhecer o comportamento delas quando expostas a volumes maiores. Como a construção destes volumes seria muito inconveniente a nós, resolvemos simplesmente bombear a câmara principal por várias vezes consecutivas sem a reativação da nossa bomba. Seguimos o seguinte procedimento.

- A câmara principal foi evacuada a partir da atmosfera pela BS3 durante 90 minutos.
- A válvula V3 foi fechada e a BS3 retirada do LN<sub>2</sub> por 20 min.
- Durante este tempo a câmara foi novamente preenchida com N<sub>2</sub>

Comparação entre b91 ativada contra vácuo e atmosfera

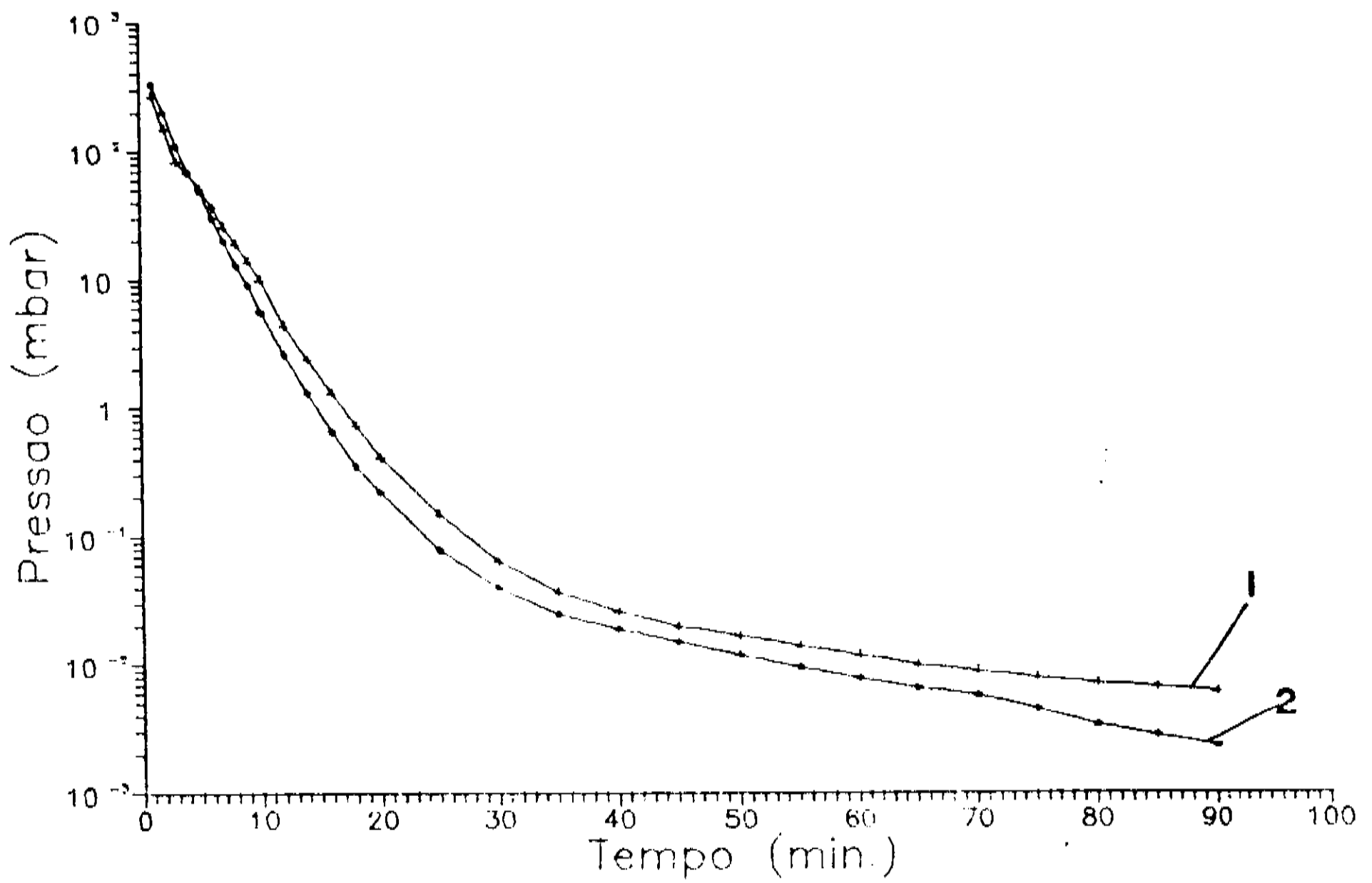


Fig. IV.5 - Curva 1 - Bomba ativada contra a atmosfera  
Curva 2 - Bomba ativada contra Vácuo

Bombamentos consecutivos com b93

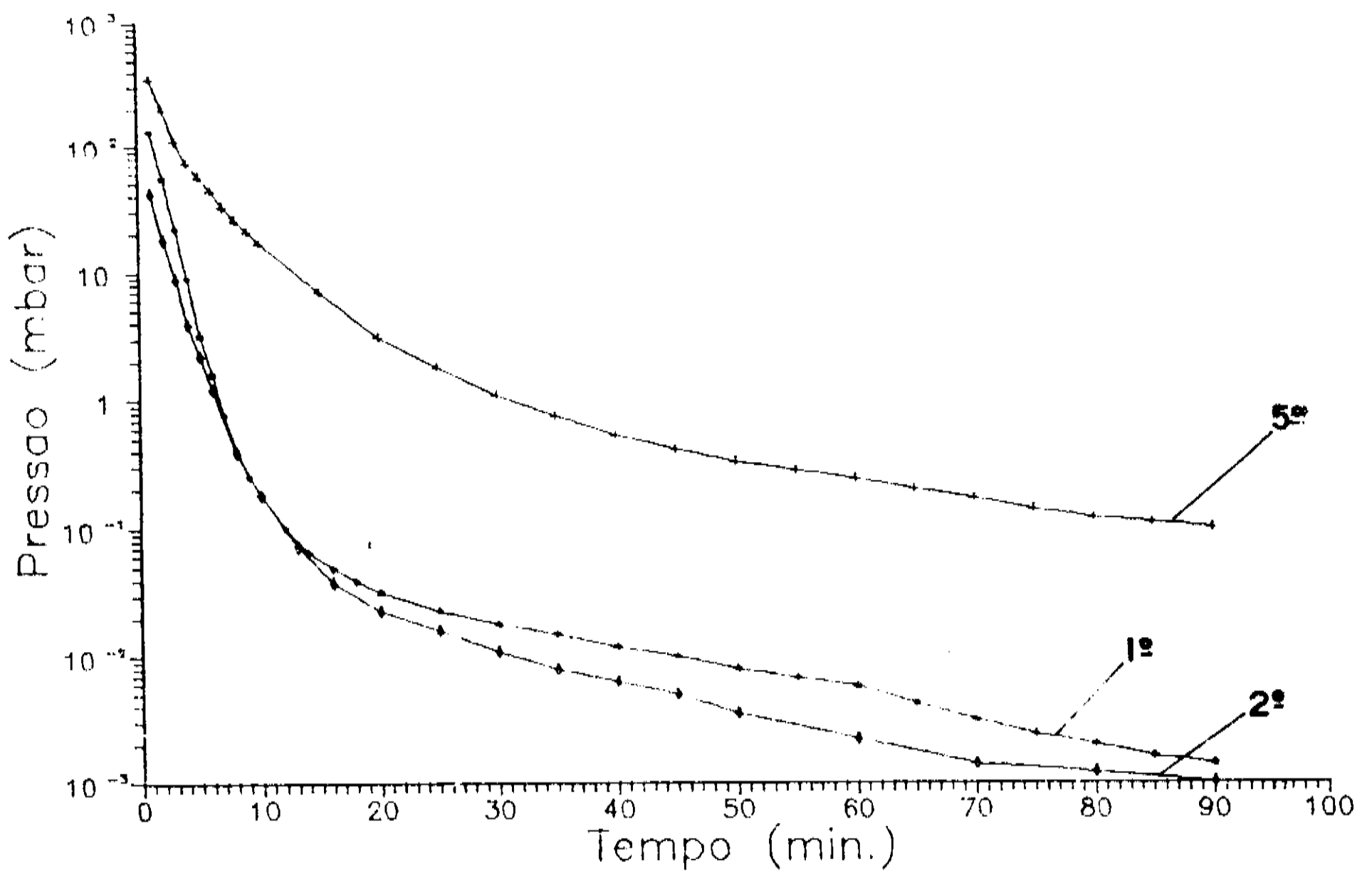


Fig. IV.6

super-seco até a atmosfera.

- Após os 20 min. BS3 foi novamente imersa em LN<sub>2</sub> e V3 aberta.
- Cinco ciclos como este foram feitos.

Obtivemos as curvas mostradas na figura IV.6. Neste gráfico podemos observar que BS3 pode tranquilamente levar um recipiente de 20 litros da pressão atmosférica até 10<sup>-1</sup> mbar. Observamos também que na segunda curva a performance da BS3 é melhor que na primeira. Isto é devido ao fato de que a Bomba estava com a zeolita mais fria no segundo bombeamento que no primeiro, apesar de ter estado fora do LN<sub>2</sub> por 20 minutos.

Esta sequência de bombeamentos nos deixou confiantes de que nossas bombas seriam capazes de evacuar alguns sistemas que projetamos, como o sistema de testes do canhão, sem nenhuma modificação drástica em seus desenhos.

#### IV.4 Bombeamento em Dois Estágios

Infelizmente não contávamos em nosso laboratório com um analisador de gases residuais. Este nos seria muito útil na determinação dos gases que fazem com que as bombas de sorção em um estágio se saturem. Da literatura, com um grau de concordância razoável, tiramos a seguinte tabela de gases residuais, quando uma câmara é evacuada da atmosfera até uma dada pressão.

Tabela IV.3

Pression totale en torr	Mode de pompage	H <sub>2</sub> %	He %	H <sub>2</sub> O %	Ne %	N <sub>2</sub> %	O <sub>2</sub> %	Ar %	CO <sub>2</sub> %
760	nul (air ambient sec)	$5 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-4}$	0	$1,8 \cdot 10^{-3}$	78,1	20,4	0,93	$3 \cdot 10^{-2}$
$5 \cdot 10^{-2}$	sorption	1	7	10	65	10	5	1	1
$1 \cdot 10^{-2}$	sorption	1	7	10	60	10	10	2	1
$6 \cdot 10^{-3}$	sorption	1	7	3	55	11	12	3	3
$8 \cdot 10^{-5}$	Pompe mécanique + pompe à sorption	55	4	19	10	7	1	1	3

Vemos que a baixas pressões, a maior parte dos gases residuais é formada por aqueles que não são facilmente adsorvidos, Ne e He. isto implica que não deve ser muito eficaz a abertura de uma outra bomba, o 2o. estágio, após a saturação do 1o. Ora, os gases que não foram adsorvidos pelo 1o. estágio também não o seriam pelo 2o. Fizemos esta experiência usando BS1 como 1o. estágio e BS3 como segundo. A curva é mostrada na figura IV.7. Vemos neste gráfico que a pressão caiu rapidamente um fator 4 mas se estabilizou em poucos minutos. O sistema alcançou uma pressão limite da ordem de  $1 \times 10^{-3}$  mbar.

Comprovamos então a tese de que no nosso sistema, a pressão limite é alcançada quando o gás residual é composto principalmente por gases não adsorvíveis pela zeolita.

Para alcançarmos pressões mais baixas devemos encontrar uma maneira de diminuir a quantidade destes gases no nosso sistema.

A primeira maneira pensada é o uso em primeiro estágio de uma bomba que não diferencia os gases, como as mecânicas, de

diafragma ou de piston. Entretanto, estas opções vão contra exatamente as maiores vantagens do sistema de bombeamento por criossorção: a limpeza, ausência de barulho e vibração e ausência do risco de contaminação devido a acidentes. Preferiríamos resolver o problema de alcançar pressões mais baixas, da ordem de  $1 \times 10^{-4}$  mbar, usando somente bombas de sorção. Na literatura já foi sugerido o arraste e aprisionamento dos gases nobres dentro da bomba de primeiro estágio, se esta é fechada antes de alcançar a pressão limite. Resolvemos então perseguir esta possibilidade.

Enquanto o escoamento através de uma canalização se encontra no regime viscoso o movimento das moléculas dos gases é restrito ao movimento do conjunto. Assim, há pouquíssimas moléculas que se deslocam contra o fluxo, pois os choques entre moléculas é muito frequente.

As transições entre fluxo turbulento e viscoso, viscoso e intermediário e intermediário e molecular dependem basicamente da pressão e da geometria do sistema estudado. Raramente encontramos em um sistema de vácuo um fluxo turbulento. Ele ocorre apenas quando bombas de alta velocidade de bombeamento evacuem grandes sistemas a partir da pressão atmosférica. Em um sistema como o nosso, o fluxo que a princípio é viscoso passa ao regime intermediário quando o livre caminho médio,  $\lambda$ , passa a ser da ordem de alguns centésimos da dimensão típica da tubulação.

Usamos então como critério que:

$$\text{fluxo é viscoso se } \lambda < \frac{D}{100}$$

Bombeamento em dois estagios - bs1 atm bs3 8.5e-3 -

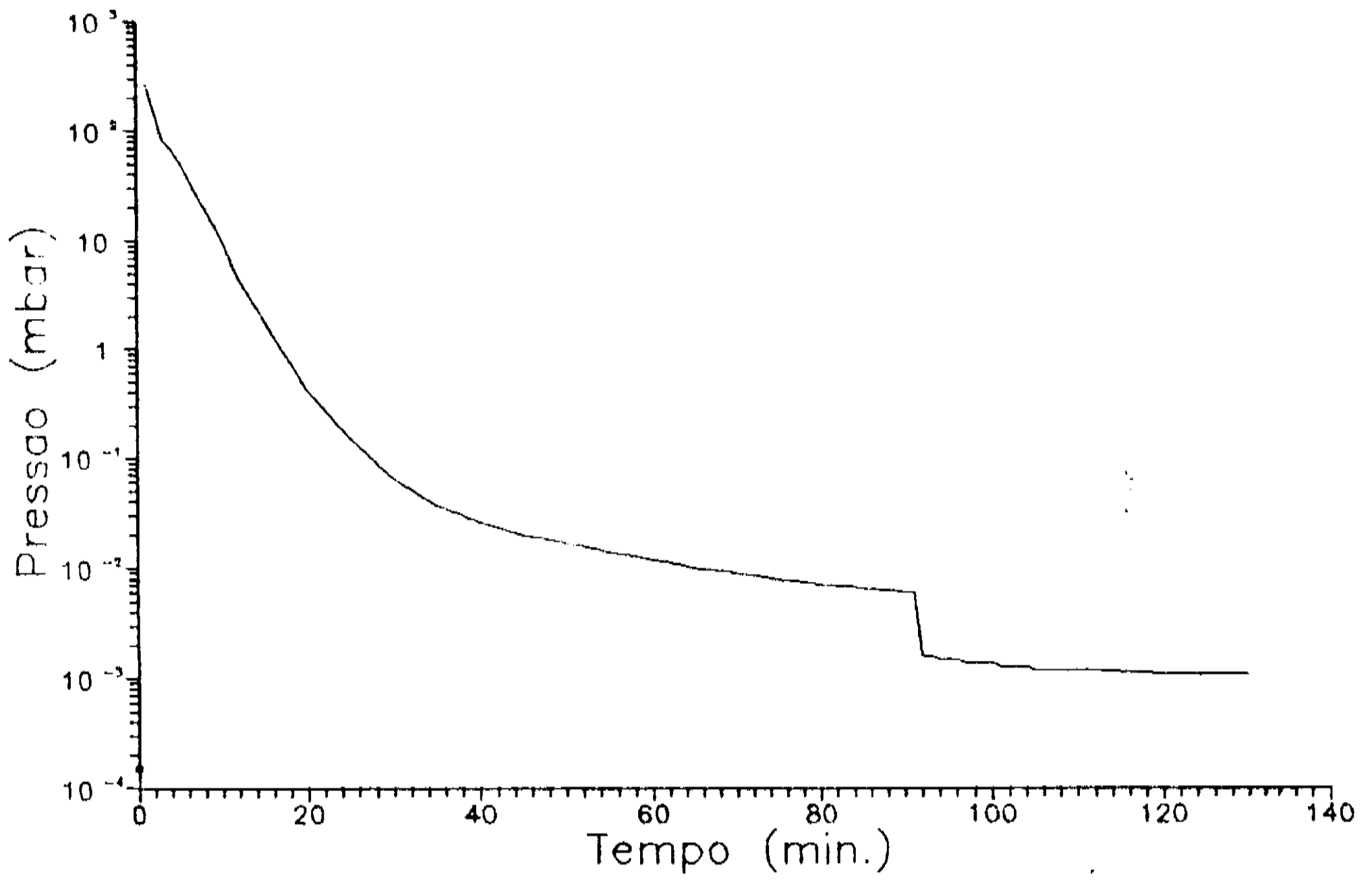


Fig. IV.7

Bombeamento em dois estagios - bs1 atm , bs2 6.5e-1 -

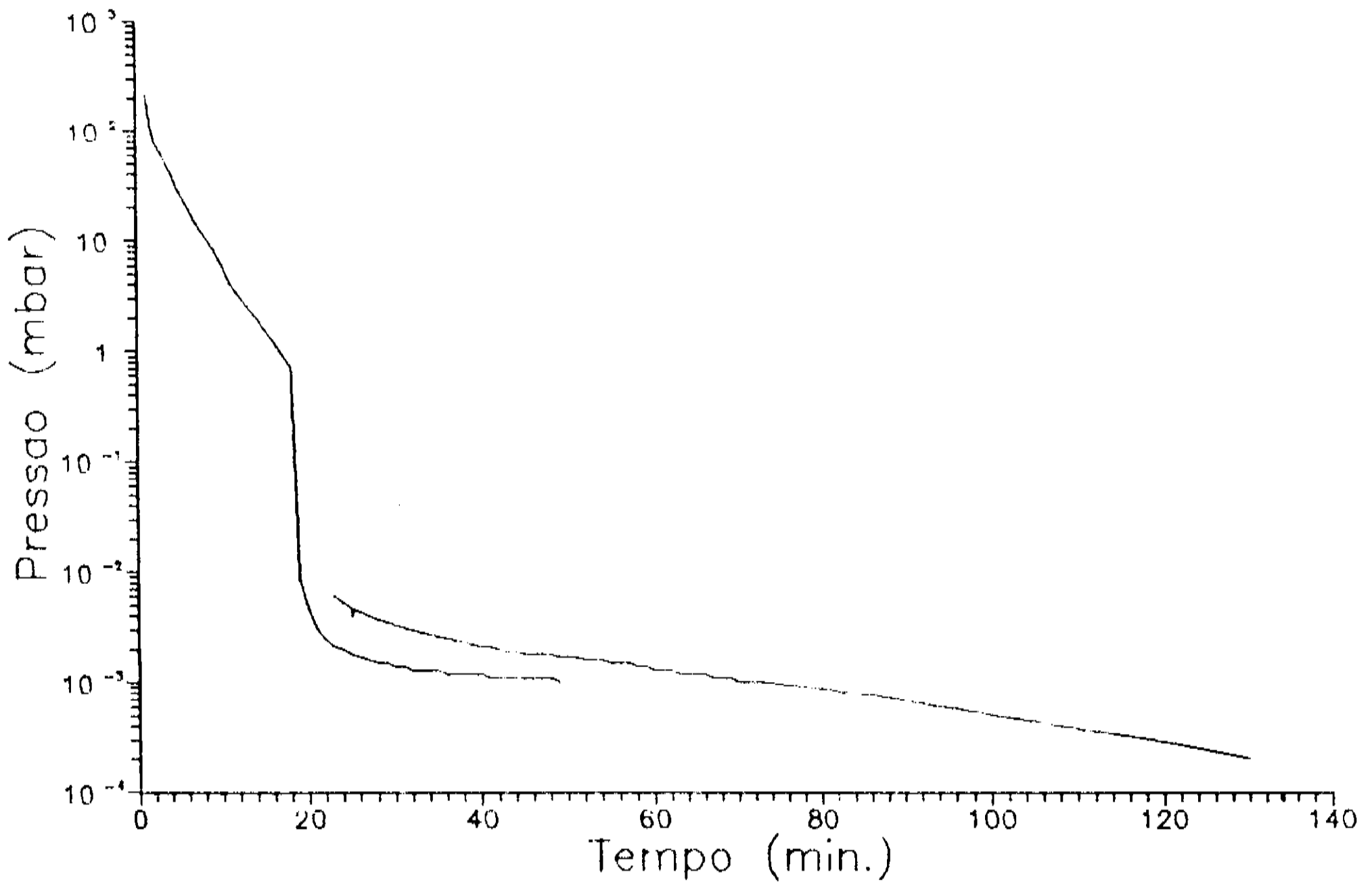


Fig. IV.8

onde  $D$  é o diâmetro da tubulação.

Temos que (ref 12) o livre caminho médio para o ar a  $20^{\circ}\text{C}$  é dado pela fórmula:

$$\lambda = \frac{6,6 \times 10^{-3}}{P \text{ (mbar)}} \text{ (cm)}$$

A dimensão típica de nossa canalização, seu diâmetro, é 3,5 cm. Temos então que:

$$\text{fluxo é viscoso se: } P > 1,9 \times 10^{-1} \text{ mbar}$$

Uma vez conhecido o limite onde o fluxo deixa de ser viscoso fizemos duas novas experiências com bombeamento em dois estágios. Na primeira fechamos o primeiro estágio em  $6,5 \times 10^{-1}$  mbar, ou seja, próximo do limite calculado acima para o fim do fluxo viscoso. Assim pretendíamos ter aprisionado a maior parte das moléculas de Ne e He, cerca de 99,9% delas, o que nos possibilitaria alcançar uma pressão limite bem mais baixa do que a obtida anteriormente. Conseguimos, como mostra a figura IV.8, um resultado excelente. Em poucos minutos a pressão caiu mais de duas ordens de grandeza e após 120 minutos de bombeamento obtivemos uma pressão de  $1,5 \times 10^{-4}$  mbar e ainda caindo.

Parece importante esclarecer aqui por que neste e nos próximos gráficos as curvas são descontínuas. Utilizamos em nossas

medidas dois tipos de medidores. O Pirani, de  $1 \text{ atm}$  a  $8 \times 10^{-4} \text{ mbar}$  e o Penning de  $6 \times 10^{-3}$  a  $10^{-9} \text{ mbar}$ . Ambos os medidores são sensíveis à modificação do gás residual na câmara. O Pirani varia sua leitura de acordo com a massa do gás e o Penning com a sua facilidade de ionização. Como não tínhamos um medidor padrão para calibração, consideramos que o mais honesto a fazer seria mostrarmos ambas as curvas.

Para testar a hipótese de que realmente não havia refluxo, enquanto  $P$  era maior que  $2 \times 10^{-1} \text{ mbar}$ , fizemos então a seguinte experiência:

Ao invés de fecharmos o 1o. estágio próximo ao limite do fluxo viscoso resolvemos fechá-lo duas ordens de grandeza acima. Neste ponto tínhamos certeza de que o número de moléculas que retornaria da bomba seria praticamente zero pois o fluxo era fortemente viscoso. Assim, obtivemos a curva mostrada na figura IV.9, onde o primeiro estágio foi fechado em  $6.5 \times 10^{+1} \text{ mbar}$ .

O resultado obtido foi coerente com nossa expectativas. Realmente a pressão caiu várias ordens de grandeza mas mostrou uma saturação em torno de  $4 \times 10^{-4} \text{ mbar}$ . Isto implica que conseguimos aprisionar em torno de 90% das moléculas não adsorvíveis pela zeolita.

Concluimos então que o sistema de bombeamento em dois estágios é efetivo e que podemos realmente confiar que até bem próximo do limite de fluxo viscoso não há refluxo de moléculas para a câmara.



Bombeamento em dois estagios -- bs1 atm . b3 6.5e+1 --

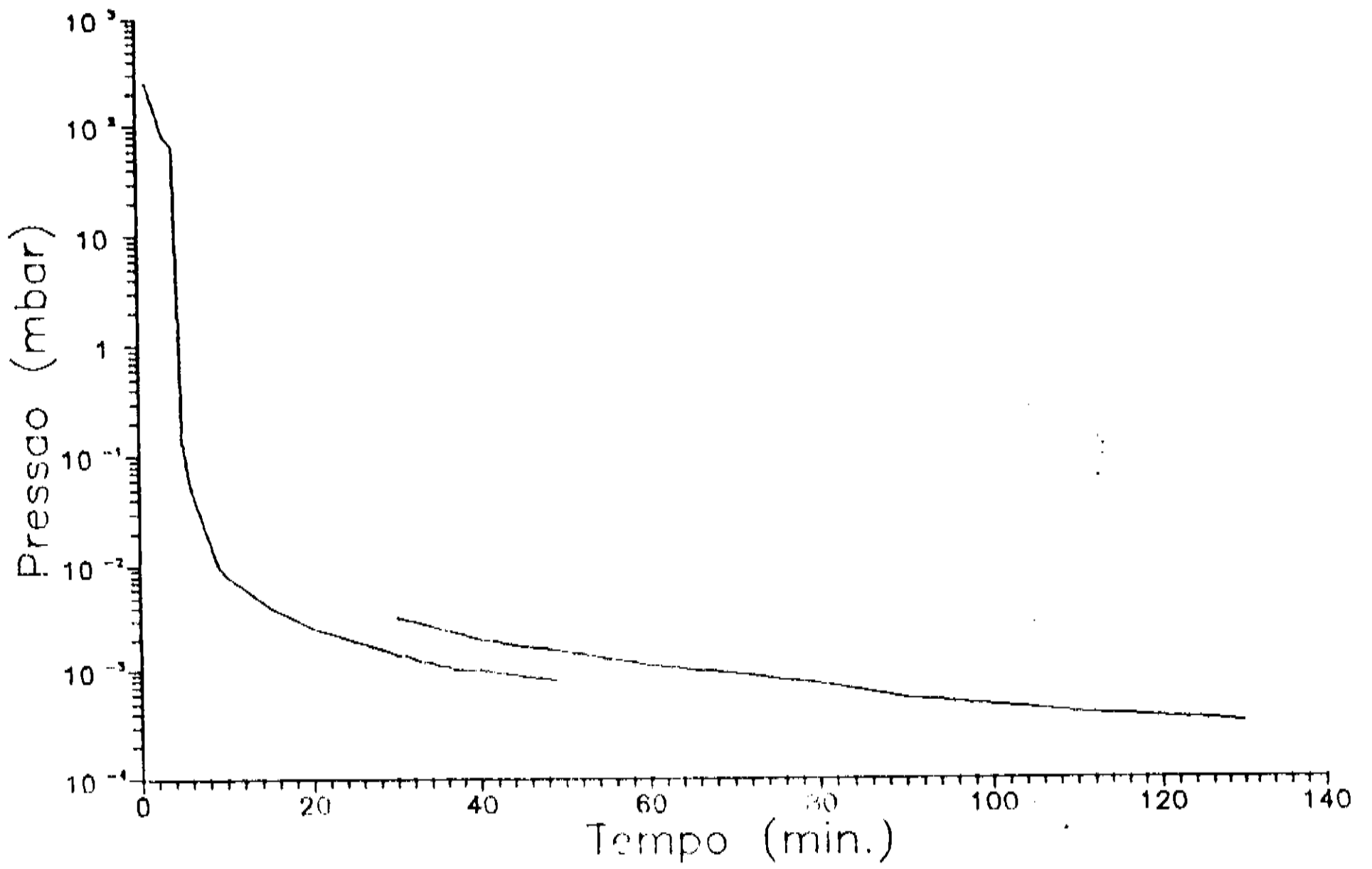


Fig. IV.9

Bombeamento em 3 estagios -- BS1 , BS2 , BS3 --

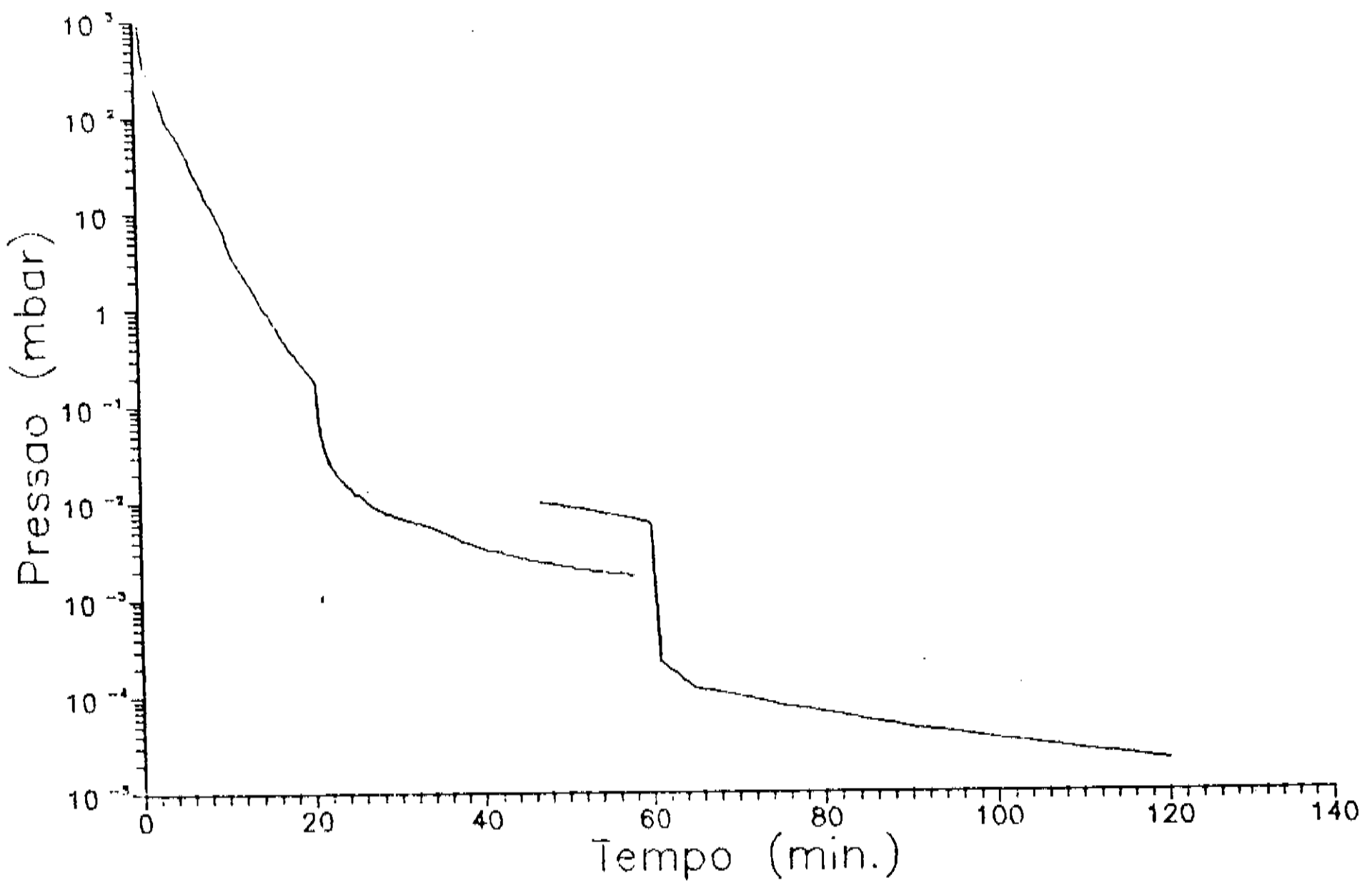


Fig. IV.10

#### IV.5 - Bombeamento em 3 Estágios

Apesar de já termos obtido pressões suficientemente baixas para se dar a partida na bomba iônica, com o bombeamento em dois estágios, resolvemos tentar alcançar estas pressões em um período mais curto de tempo. Parecia bastante atraente a idéia de se abrir uma terceira bomba assim que o segundo estágio começasse a perder sua velocidade de bombeamento.

Tentamos por diversas vezes fazer esta experiência mas nos deparamos com uma série de problemas. Primeiro, os medidores começaram a ter suas leituras cada vez mais distantes, até chegar ao ponto em que o Pirani já estava fora de seu limite de medida ( $P < 8 \times 10^{-4}$ ) e o Penning ainda não entrava em funcionamento ( $P > 6 \times 10^{-3}$ ). Substituímos estes medidores por outros e tentamos novamente. Esbarramos então em outra dificuldade. Desta vez tudo parecia funcionar bem até que abriamos o terceiro estágio. Neste ponto a pressão não caía rapidamente como prevíamos e algumas vezes o sistema se comportava pior do que se simplesmente deixássemos o segundo estágio bombeando.

Estes problemas não estavam sendo bem compreendidos até um dia em que nem o primeiro estágio funcionou como antes. Suspeitamos que poderia ter havido algum tipo de contaminação e realmente estávamos certos. O óleo da bomba mecânica do sistema turbo estava complementamente carbonizado e sua pressão limite era muito mais alta que o normal.

A saída foi se trocar a zeolita das bombas, limpar os medidores, limpar e trocar o óleo da bomba mecânica e então

recomeçar o trabalho.

Durante estas trocas resolvemos também tentar colocar um outro tipo de zeolita em uma das bombas. Pensavamos que dois tipos diferentes de zeolita poderiam ter ações complementares durante o bombeamento. Colocamos zeolita 5A na BS3, para o terceiro estágio.

Após a ativação durante todo um fim de semana, aproximadamente 60 horas, refizemos o experimento cujo resultado é mostrado na fig IV. 10

Obtivemos um resultado excelente pois com 65 minutos de bombeamento já havíamos alcançado  $1,2 \times 10^{-4}$  mbar, com 120 minutos  $2,1 \times 10^{-5}$  mbar e a pressão continuava caindo. Após 3 horas de bombeamento, resultado não mostrado no gráfico, já nos encontravamos em torno de  $8 \times 10^{-6}$  mbar.

Esta experiência mostra a potencialidade destas bombas para outras aplicações além de se fazer o pré vacuo, pois sem nenhum tipo de vibração ou ruído conseguiríamos entrar na faixa de alto vácuo ( $10^{-7}$  mbar) com uma atmosfera de gases residuais completamente livre de hidrocarbonetos.

Passamos agora as aplicações destas bombas.

## CAP. V APLICACOES DAS BOMBAS DE CRIOSSORCAO EM SISTEMAS DE ULTRA ALTO VACUO

No capítulo anterior caracterizamos e mostramos a viabilidade do uso das bombas de criossorção na obtenção de pressões da ordem de  $1 \times 10^{-4}$  mbar. Agora passamos a apresentar o resultado de suas aplicações em sistemas de Ultra Alto Vácuo montados no LNLS.

### V.1 O Sistema de Testes do Canhão de Elétrons

O objetivo desta montagem era caracterizar o canhão de elétrons em relação à sua corrente, largura de pulso e emitância, bem como testá-lo com relação ao vácuo. Para tal, necessitávamos de monitores de corrente e perfil do feixe, lentes magnéticas para focalização e ainda medidores de vácuo.

O sistema de testes é mostrado na fig. V.1. Seu volume é de aproximadamente 8,5 l e sua superfície  $3600 \text{ cm}^2$  de aço inox.

Uma vez montado o sistema nós utilizamos para o pré vácuo um sistema de bombas de sorção em três estágios. No primeiro estágio utilizamos a BS1 que teve sua válvula fechada em  $1 \times 10^0$  mbar. Vemos que esta pressão foi alcançada em tempo inferior ao que poderíamos prever com base nos testes feitos no laboratório. Isto é devido ao fato de que a BS1 foi resfriada por mais tempo, aproximadamente 20 minutos. No segundo estágio utilizamos BS2 que foi fechada em  $1 \times 10^{-3}$  mbar e então BS3 foi aberta, levando o sistema a  $6 \times 10^{-5}$  mbar. Neste ponto demos a partida nas bombas

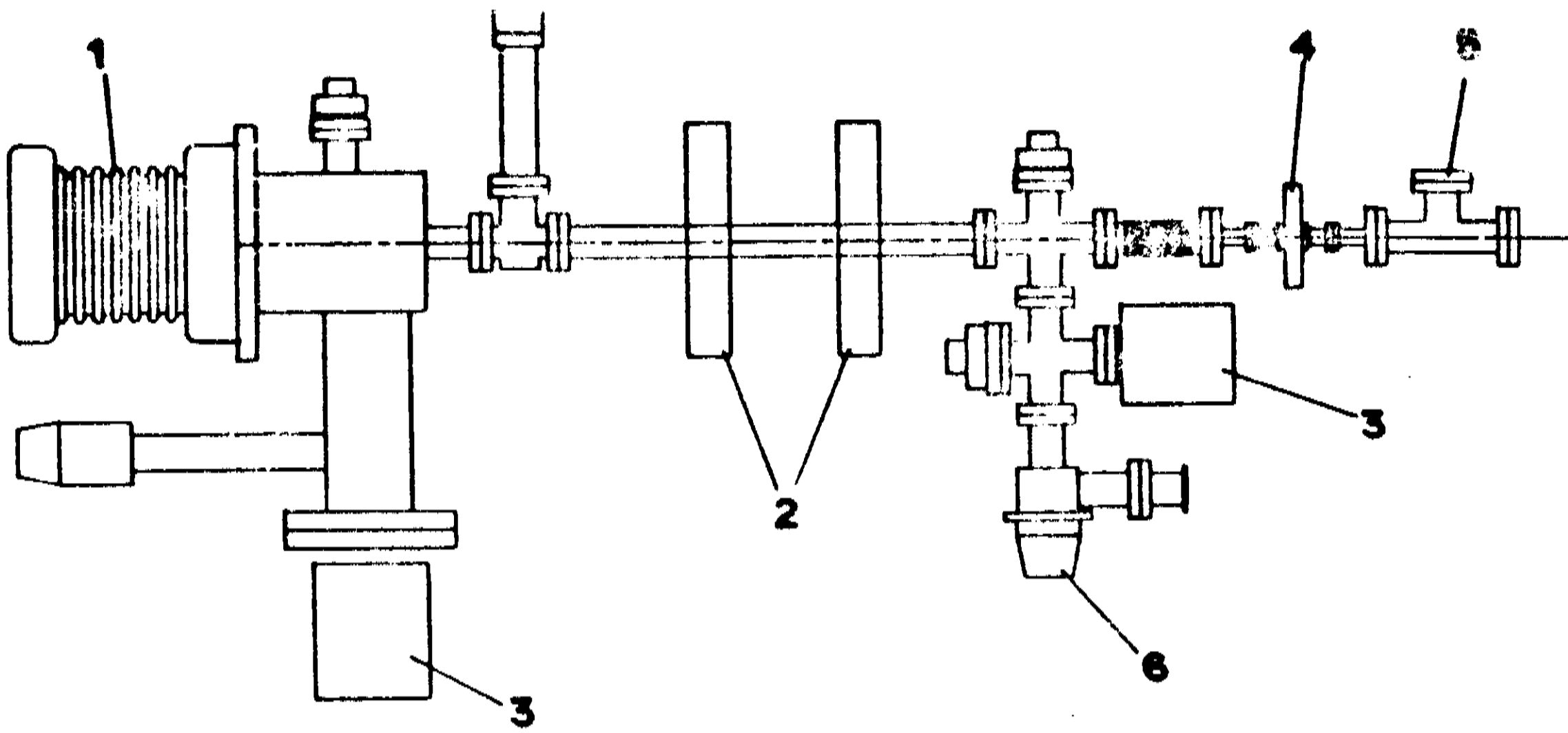


Fig. V.1 - Sistema de testes do Canhão de Elétrons

- 1) Canhão
- 2) Lentes Magnéticas
- 3) Bombas iônicas
- 4) Monitor de Corrente
- 5) Monitor de Perfil
- 6) Saída para Pré Vácuo

Bombeamento do Sistema de Testes do Canhão de Elétrons

1 est BS1 - 2 est BS3 - 3 est BS2

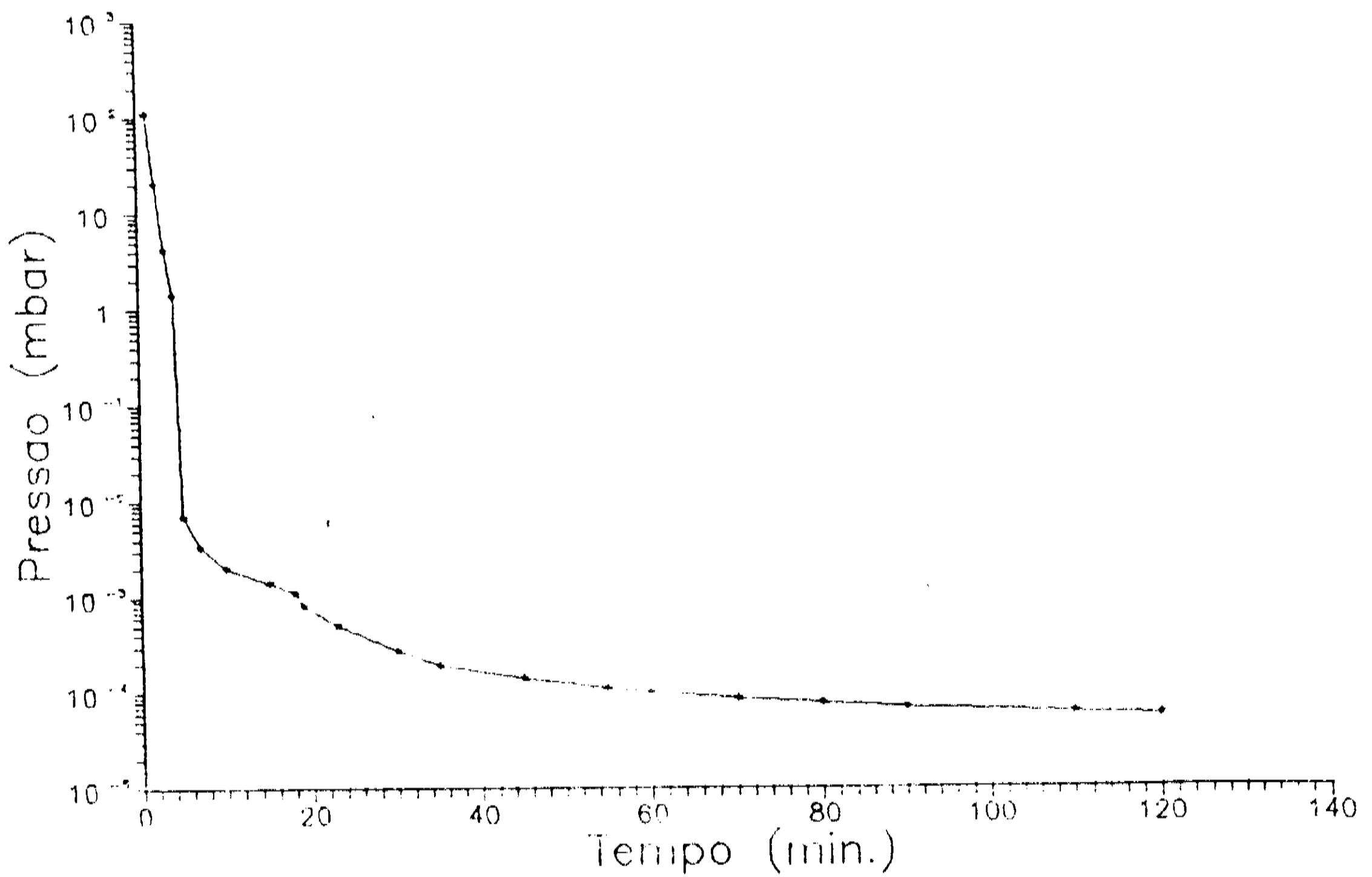


Fig. V.2

iônicas. A facilidade com que alcançamos esta pressão se deve sobretudo ao fato de que todos os componentes deste sistema haviam sido condicionados previamente no laboratório.

Ao final de 24 horas o sistema já se encontrava na faixa de  $1 \times 10^{-7}$  mbar e após um curto baking de 24 horas a  $150^{\circ}\text{C}$  alcançamos pressões da ordem de  $1 \times 10^{-8}$  mbar na região do canhão. Esta pressão satisfazia plenamente os requisitos para a operação do canhão de elétrons.

A figura V.2 mostra a curva do bombeamento deste sistema.

## V.2 Sistema de Testes da Estrutura Aceleradora

O objetivo deste sistema era testar as estruturas aceleradoras com relação à sua "limpeza" interna e vazamentos. Fizemos então a montagem mostrada na fig. V.3. que consta simplesmente de 2 Bombas iônicas, 2 medidores tipo Penning e uma válvula de Pré-Vácuo.

Na ocasião em que esta montagem foi feita não contávamos com as três bombas de sorção disponíveis. Optamos então por fazer o pré-vácuo do sistema utilizando uma bomba mecânica de pistons de teflon como primeiro estágio e duas bombas de sorção como segundo e terceiro estágio.

O resultado obtido é mostrado na fig. V.4.

Ao alcançarmos uma pressão de  $1 \times 10^{-4}$  mbar ligamos as Bombas iônicas. Conseguimos após alguns dias uma pressão de equilíbrio da ordem de  $8 \times 10^{-9}$  mbar nas extremidades. Este valor

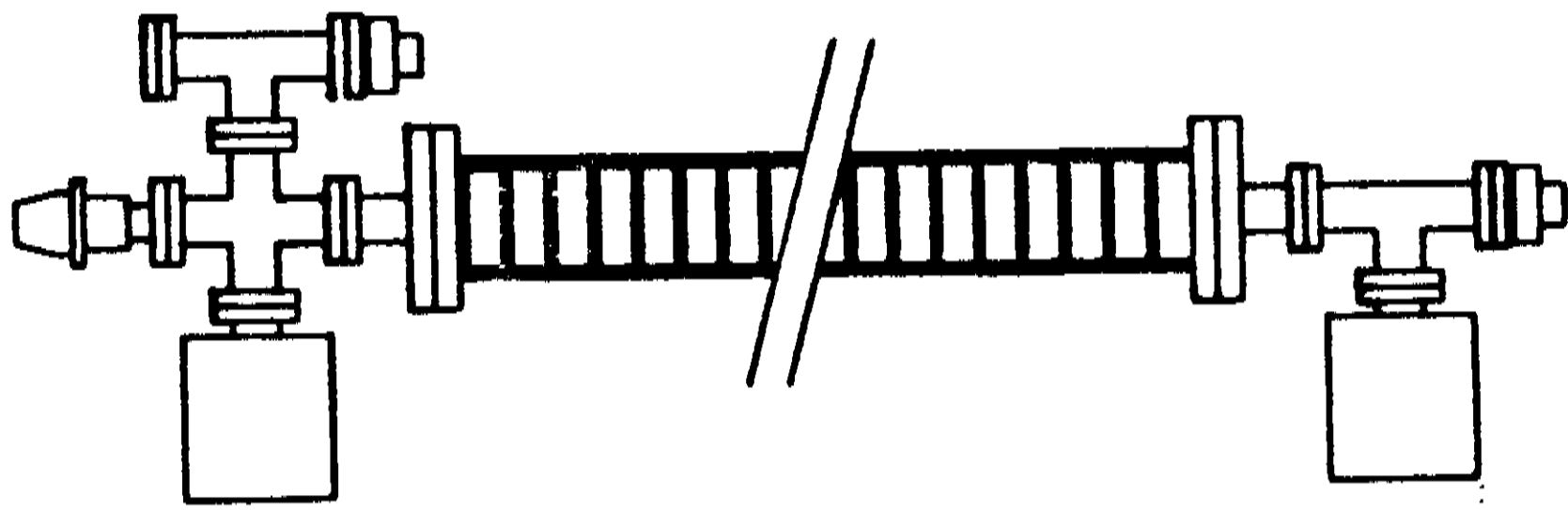


Fig. V.3 - Sistema de Testes da Estrutura Aceleradora

Bombeamento da estrutura aceleradora

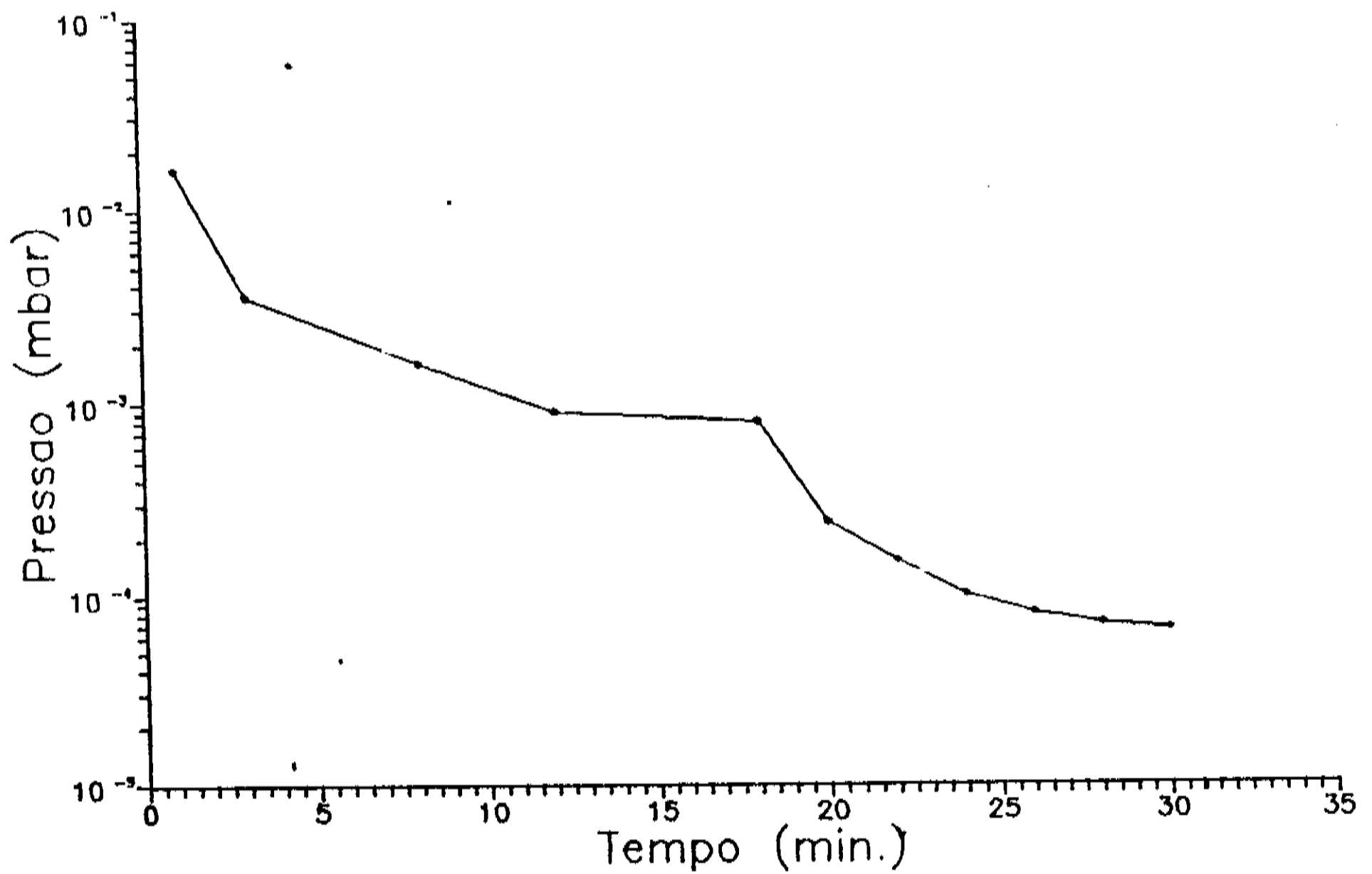


Fig. V.4

concorda plenamente com os cálculos feitos no cap II e assegura que internamente a estrutura se encontrava em bom estado.

### V.3 O Linac 50 MeV

No final de 1989 foi montado no LNLS a primeira fase do acelerador linear, o LINAC de 50 MeV.

Devido a necessidade de se colocar este acelerador sob vácuo o mais rápido possível, não tivemos tempo de construir Bombas de Criossorção dimensionadas especialmente para bombeá-lo. Assim utilizamos as nossas bombas de teste, mesmo sabendo que elas não seriam capazes de levar a pressão a  $1 \times 10^{-4}$  mbar em um tempo razoável. A idéia era de se chegar com as Bombas de sorção a  $1 \times 10^{-3}$  mbar e depois, abrindo uma válvula para um sistema turbo-molecular já em rotação total, alcançarmos a pressão para se ligar as bombas iônicas.

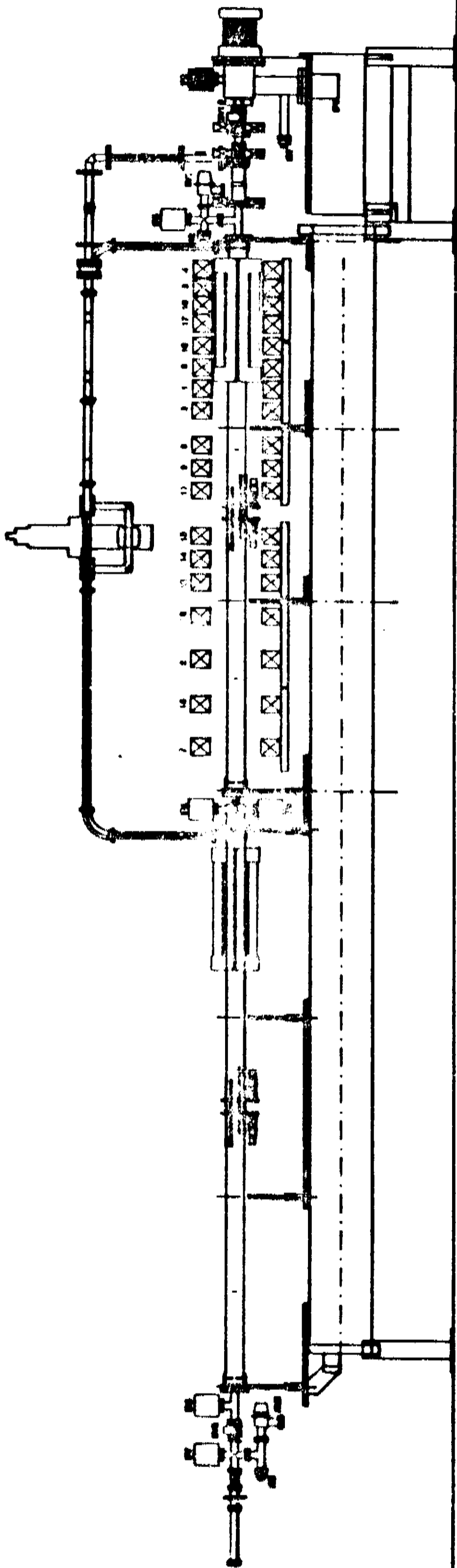
Isto diminuiria drasticamente o tempo em que o sistema estaria sendo bombeado pela turbo e eliminaria a fase inicial de bombeamento, onde só a bomba mecânica trabalha (a turbo ficando com rotação zero).

O LINAC 50 MeV tem aproximadamente o volume de 40 litros e é basicamente o mesmo linac apresentado no cap. II, sem as duas ultimas estruturas (fig. V.5).

A curva de bombeamento é mostrada na fig V.6 onde podemos ver os 3 estágios de Bombas de Sorção e o início do bombeamento com o turbo. Ao final de 2 horas e meia começamos a ligar as Bombas Iônicas que entraram sem problemas.

Quarenta e oito horas depois de começado o bombeamento já tínhamos todos os medidores e bombas iônicas marcando pressões da





P - ION PUMP  
 SV - SECTOR VALVE  
 RV - ROUGHING PUMP VALVE  
 18 - ION GAUGE



Fig. V.5 LINAC 50 MeV

ordem de  $10^{-7}$  mbar, alguns marcando até  $5 \times 10^{-8}$  mbar.

Ao final de um mês temos a seguinte distribuição de

Pressão:

Canhão	-	$5 \times 10^{-9}$	mbar
Entrada da 1a. estrutura	-	$1 \times 10^{-8}$	
Entre estruturas	-	$5 \times 10^{-8}$	
Final da 2a. estrutura	-	$1 \times 10^{-7}$	

Estes valores concordam bastante com nossos cálculos e as pressões satisfazem plenamente os requisitos para a operação do LINAC. Nele já injetamos alta potência de RF, sem que problemas relacionados ao vácuo aparecessem.

Não foi necessário nenhum procedimento de "Baking in Situ".

Bombeamento do Lincac 50 MeV com bombas de sorcao em 3 estagios

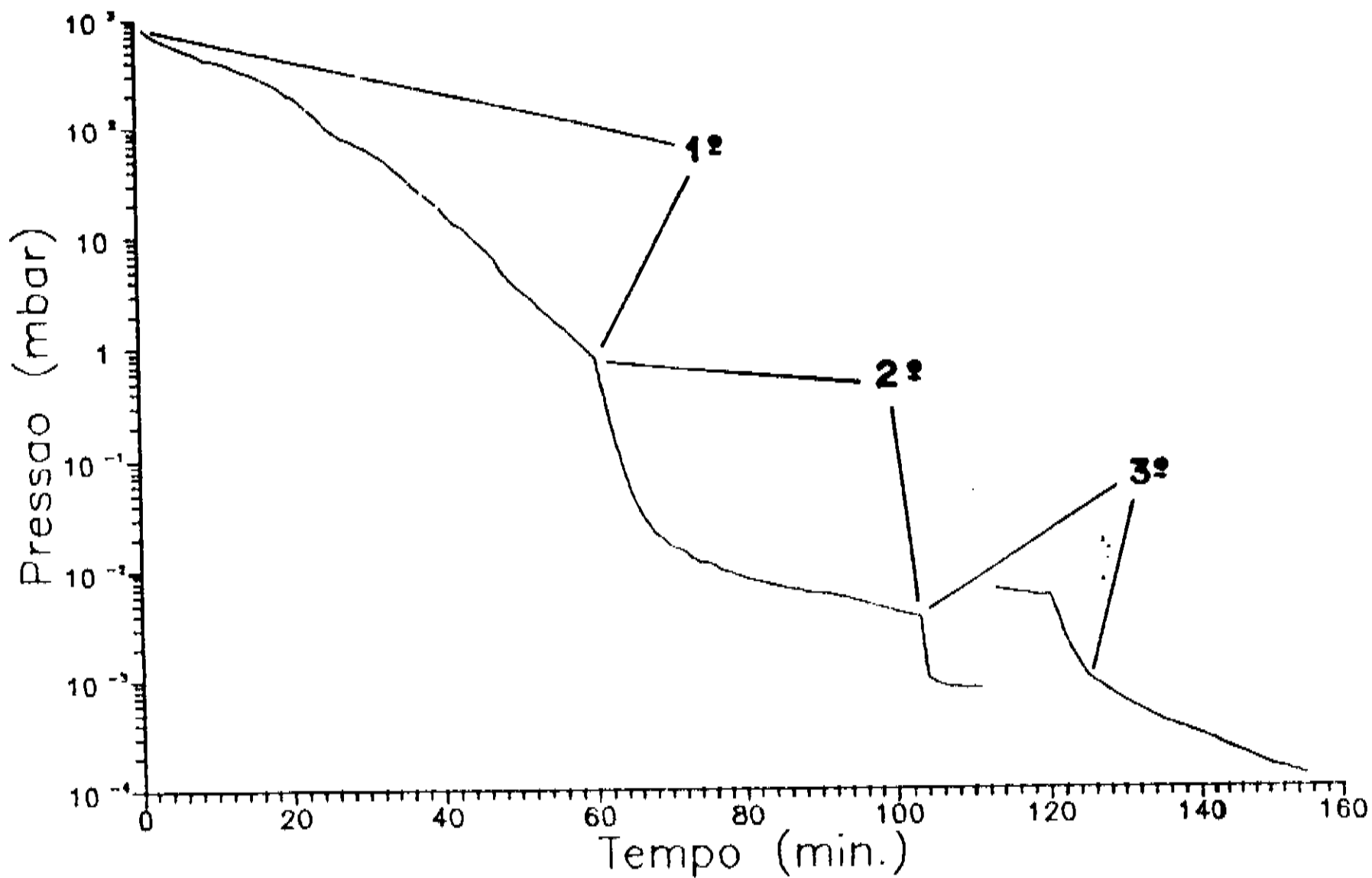


Fig. V. 6

O objetivo deste trabalho era desenvolver os cálculos dos sistemas de vácuo do Projeto Síncrotron e apresentar soluções para os diversos problemas levantados.

No capítulo I fizemos uma descrição geral das máquinas que compõe a nossa fonte de Radiação.

No capítulo II desenvolvemos os cálculos para a determinação das bombas a serem usadas em cada máquina, e apresentamos detalhadamente o projeto dos sistemas de vácuo. Levantamos também vários problemas a serem enfrentados, em especial o problema de contaminação por Hidrocarbonetos. Para diminuir o risco de contaminação sugerimos o uso de Bombas de Criossorção para se fazer o pré-vácuo em nossas câmaras.

No capítulo III estudamos rapidamente as características da rede cristalina da Zeolita, um material usado na indústria química nacional que pode ser utilizado como adsorvedor. Descrevemos também o tipo de interação que faz com que as moléculas dos gases sejam adsorvidos por ela.

Passamos ao estudo experimental da criossorção no capítulo IV, onde Bombas foram construídas e caracterizadas. Obtivemos excelentes resultados no bombeamento de uma câmara por 2 bombas em série (bombeamento em 2 estágios) onde pressões da ordem de  $1 \times 10^{-4}$  mbar foram alcançadas. Para acelerar a obtenção destas pressões montamos um sistema com 3 bombas. Além de alcançarmos mais rapidamente a faixa de  $10^{-4}$  mbar, chegamos à conclusão que

este tipo de bombeamento pode ser usado também em outras aplicações, pois em um sistema onde nunca fizemos o baking nós alcançamos a faixa de  $10^{-6}$  mbar.

Todos estes resultados confirmavam a viabilidade deste tipo de bombeamento vir a ser utilizado no pré-vácuo de Aceleradores e Linhas de Luz Síncrotron.

Finalmente utilizamos as bombas em sistemas de testes e no pré-vácuo do Acelerador Linear de 50 MeV. Obtivemos ótimos resultados, que são expostos no cap. V.

As pressões alcançadas nestes sistemas após o equilíbrio concordam plenamente com os cálculos feitos no capítulo II.

Superamos então o problema de se fazer o pré vácuo sem o risco de contaminação com hidrocarbonetos, utilizando bombas simples, baratas e feitas em nosso laboratório.

## BIBLIOGRAFIA

1. H. Winick. Properties of Synchrotron Radiation. In: H. Winick and S. Doniach. Synchrotron Radiation Research. New York, Plenum Press, 1982. Cap. II, p. 11-25.
2. Laboratorio Nacional de Luz Síncrotron. Acelerador Linear Injetor. Campinas, LNLS, 1989.
3. L. Liu and L. Jahnel. VUV-III Structure. Campinas, LNLS-MP/009/89.
4. S.L. Hulbert et al. An Extended Range Soft X-Ray Beam Line for the 1 GeV Storage Ring Aladdin. Nuclear Instruments and Methods, 208:43-7, 1983.
5. G.P. Williams and M.R. Howells. Soft X-Ray and Vacuum Ultra violet Beamlines at the National Synchrotron Light Source 700 MeV Storage Ring. Nuclear Instruments and Methods, 208:37-42 1983.
6. H. Kuroda. Beam Lines and Experimental Instruments Planned at the Photon Factory. Nuclear Instruments and Methods, 208:39-42, 1980.
7. P.M. Guyon; C. Depaulex and G. Morel. Design of a Synchrotron Radiation Facility for Orsay's ACO Storage Ring: LURE. Review Scientific and Instrumentation, 47(11):1347-56, Nov. 1976.

8. R. B. Neal, Editor. The Stanford Two-Mile Accelerator. New York, W. A. Benjamin, 1968. 1169p.
9. J. W. Wang and G. A. Loew. RF Breakdown Studies in Copper Electron LINAC Structures. In: IEEE Particle Accelerator Conference, Chicago, IL., March 20-23, 1989 or/and SLAC-PUB 4866, 1989.
10. Valor Medido no LCLS.
11. D. Allard. Mesure du Taux de Degazage. Geneva, CERN PS/ML/ Note Tech. 84-10, 1984.
12. J. Delafosse and G. Mongodin. Les Calculs de la Technique du Vide. Paris, Societe Francaise des Ingenieurs et Techniciens du Vide, 1961. 108p.
13. L. R. B. Rocha e P. A. P. Gomes. Sistema de Vácuo do Acelerador Linear do LCLS: Projeto e Resultados. In: 9o Congresso Brasileiro de Aplicações de Vácuo na Indústria e na Ciência. Campinas, Unicamp 27 - 29 julho 1989.
14. B. A. Trickett. The Vacuum System for the Daresbury Synchrotron Radiation Source. Vacuum, 28(10/11):471-82, 1978.
15. T. Kobari & H. J. Halama. Photon Simulated Desorption from a Vacuum Chamber at the National Synchrotron Light Source. Journal of Vacuum Science and Technology A, 5(4):2355-8, Jul./Aug. 1987.

16. J.C. Schuchman et al. Vacuum System for National Synchrotron Light Source. The Journal of Vacuum Science and Technology, 16:(2):720-3, Mar./Abr., 1979.
17. A.R.B. de Castro. Bending-Magnet Vacuum Chambers for the VUV-III Ring. In: A. Craievich, editor. II Workshop Luz Síncrotron Aplicações e Instrumentação Associada. Campinas, 4-8 setembro 1989. (no prelo)
18. R. Cappi. RF Bypass on the Proton Synchrotron Vacuum Chamber Flanges. CERN, Geneva.
19. M. Bernardini and L. Malter. Vacuum Problems of Electron and Positron Storage Rings. In: 11th Annual Symposium of the American Vacuum Society, High-Energy Machines Session. 30 September-2 October 1964, Chicago, Ill.
20. B.A. Trickett. The ESRF Vacuum System. Vacuum, 38(8/10):607-12, 1988.
21. J.G.M. Romer et al. Dynamic in situ bakeout for the Hera Protonring vacuum system. Vacuum, 39(7/8):835-837, 1989.
22. H.C. Hseuh and C. Lanni. Evaluation of Zr-V-Fe Getter Pump for UHV System. Journal Vacuum Science and Technology A, 1(2):1283-7, Apr.-June 1983.



23. P. A. P. Gomes; A. R. B. de Castro and A. R. D. Rodrigues. Vacuum System of the VUV Source of the Brazilian Synchrotron Light Laboratory. In: 11th International Vacuum Congress. Cologne, 25-29 September 1989. (no prelo)
24. M. G. Billing et al. Interaction of CESR Vacuum Pumps With Stored Beam. CLNS 89/907.
25. D. C. Morin. Simple Theory of DC Clearing of Ions. University of Wisconsin - Synchrotron Radiation Center, Technical Note, SRC-67, October 1988.
26. A. Poncet. Trapping of Ions in the EPA Electron Beam: Stability Conditions and Diagnosis. Geneva, CERN/PS88-14(ML), 1988.
27. A. Poncet. Ion Clearing in EPA. Geneva, CERN/PS/ML/Note 83-1, 1983.
28. H. J. Halama. Electron Storage Ring Beam Lifetime Dependence on Pressure and Pumping Speed. Journal of Vacuum Science and Technology A, 3(3):1599-1702, May/June 1985.
29. C. Benvenuti, R. Calder and O. Grobner. Vacuum Particle Accelerators and Storage Rings. Vacuum, 37(8/9):699-707, 1987.
30. S. Sato et al. Front Ends for the Photon Factory Beam Lines. Nuclear Instruments and Methods, 208:31-6, 1983.

31. A.R.B. de Castro and P. de Tarso Fonseca. Primary Shutter and Gama-Ray Trap. In: A. Craievich, editor. II Workshop Luz Síncrotron: Aplicações e Instrumentação Associada. Campinas, 4-8 setembro 1989. (no prelo)
32. L. Bittner, U. Hahn and V. Saile. Mirrorchambers at Hasylab. Review Scientific Instruments, 60(7):2038-40, July 1989.
33. K. Boller et all. Investigation of Carbon Contamination of Mirror Surffaces Exposed to Synchrotron Radiation. Nuclear Instruments and Methods, 208:273-9, 1983.
34. D.A. Shirley. Beam Line Chemistry.
35. T.S. Chou. Effect of Fomblin Oil on Beam Lifetime. Brookhaven National Laboratory, Brookhaven NSLS Technical Note, nr. 213, 1985.
36. M.H.F. Brito. Adsorção em Zeolita A. Campinas, Unicamp, 1985. Tese de Mestrado.
37. D.W. Breck et all. Journal of American Chemical Society, 78:5963, 1956.
38. G.T. Kerr. Synthetic Zeolites. Scientific American, 261(1):82-7, July 1989.
39. N.W. Aschcroft. Solid State Physics. New York, Holt, 1976. 826p.

40. S. A. Stern and F. S. DiPaolo. The Adsorption of atmospheric Gases on Molecular Sieves at Low Pressures and Temperatures. The Effect of Preadsorbed Water. The Journal of Vacuum Science and Technology, 4(6):347-55, 1986.
41. P. Vejendran and C. V. G. Nair. Design and Performance Characteristics of Sorption Pumps. Vacuum, 21(5): 159-64, 1971.
42. S. A. Stern and F. S. DiPaolo. Pumping Speed of a High Vacuum -Sorption Pump: Determination of Condensation Coefficients. Vacuum, 27(9):549-53, 1977.
43. F. A. Inkley and J. W. Coleman. The Use of Porous Materials for Obtaining UHV. Vacuum, 15(8):401-6, 1965.
44. R. R. Bannock. Molecular Sieve Pumping.
45. J. C. Godot. Contribution a L'Etude des Pompes et Pieges a Zeolithes. Paris, A La Faculte des Sciences de L'Universite de Lyon, 1967. Tese de Doutorado.
46. S. A. Stern and F. S. DiPaolo. Cryosorption pumping of Air on Molecular Sieves at 77K - The Ultimate Achievable Vacuum. The Journal of Vacuum Science and Technology, 6(6):941-50, 1969.