UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA

Quebra molecular em ambiente de baixa pressão: caracterização de um *stripper* gasoso para a implementação de um sistema AMS de baixas energias

Marco Antonio Pannunzio Carmignotto

Orientador: Prof. Dr. Nemitala Added

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Instituto de Física para a obtenção
do título de Mestre em Ciências

Comissão Julgadora:
Prof. Dr. Nemitala Added (IFUSP)
Prof. Dr. Alain Andre Quivy (IFUSP)
Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi (FATEC/SP)

São Paulo
2010

FICHA CATALOGRÁFICA
Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação do Instituto de Física da Universidade de São Paulo

Carmignotto, Marco Antonio Pannunzio

Quebra molecular em ambiente de baixa pressão: caracterização de um stripper gasoso para a implementação de um sistema AMS de baixas energias. - São Paulo, 2010.

Mestrado (Dissertação) – Universidade de São Paulo. Instituto de Física. Departamento de Física Nuclear

Orientador: Prof. Dr. Nemitala Added

Área de Concentração: Física

Unitermos: 1.Física experimental.

USP/IF/SBI-014/2010

Resumo

O objetivo desse trabalho foi estudar a viabilidade de adaptação do Implantador Iônico da Universidade de São Paulo para a técnica de *Accelerator Mass Spectrometry* (AMS), tendo em vista as baixas energias utilizadas por este acelerador de partículas.

A técnica de AMS, amplamente utilizada para a análise de ^{14}C no estudo de datação de fósseis, requer que algum componente do acelerador garanta a quebra de moléculas de massa 14, contaminantes no processo de medição dos átomos de carbono com massa 14.

Com a utilização de energias da ordem de dezenas de keV no acelerador, o estudo do processo de quebra de moléculas para estas energias foi realizado através do projeto, construção e caracterização de um *stripper* gasoso.

Para caracterizar o *stripper* implementado foram realizadas medidas de seção de choque para troca de carga do feixe e quebra molecular em função da pressão de gás injetado no *stripper*. Também investigou-se a influência do átomo utilizado como gás, através de três diferentes gases injetados no *stripper*: Hélio, Argônio e Xenônio.

Alguns feixes posivos foram produzidos no Implantador para o estudo destas seções de choques: Ar^+, Ar^{2+}, CO^+, CO_2^+ e O_2^+.

O projeto do *stripper* foi idealizado para minimizar a variação de pressão no interior do implantador, visando preservar as condições da fonte de íons. Curvas de perfil de pressão de gás dentro do tubo do *stripper* foram calculadas segundo as teorias da Tecnologia do Vácuo que permitiram tanto a estimativa desta variação quanto a quantidade de gás no interior do *stripper*.

Também foram realizados estudos do perfil de pressão em *stripper* com outras geometrias (cônicas abertas e fechadas), buscando estimar a otimização da espessura do *stripper* em função da injeção de gás em sua base.

Baseando-se nos resultados, foram apontadas mudanças necessárias no atual estágio de adaptação desse acelerador de partículas para que se torne possível a concepção de um sistema AMS em sua linha de pesquisa.

Abstract

The present work aimed on studying the feasibility of adapting the Ion Implanter of University of Sao Paulo to the Accelerator Mass Spectrometry technique, taking into account the low energies employed by this type of particle accelerator.

The AMS technique, largely applied to the ^{14}C analysis for fossil dating, requires the breaking of molecules with mass 14 by some component in the accelerator, since these lead to interference on the ^{14}C counting process.

By employing energies on the level of keV in the accelerator, the study of the breaking process of the molecules for this energy was accomplished by means desiring, building and characterization of a gaseous stripper.

In order to characterize the installed stripper, measurements were taken of the charge state exchange and molecular break up process as a function of the pressure of the gas injection into the stripper. The influence of the atom employed as gas was also investigated. The experiments were realized with the following different gases: Helium, Argon and Xenon.

Some positive beams were produced on the implanter: Ar^+ , Ar^{2+} , CO^+ , CO_2^+ and O_2^+ .

The designed stripper was idealized to minimize the pressure variation on the inside of the implanter in order to preserve the conditions of the ion source. Pressure profiles of the gas inside the stripper were calculated according to the Vacuum Technology theory, which allowed estimating the quantity of gas inside the stripper.

Studies on the pressure profile for different stripper geometries (open and closed conic forms) were also carried out to estimate the optimization of the stripper thickness as a function of the gas injection on its base.

Based on the results, specifications for further work and changes on the current system were listed to make it possible to implement the AMS system.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por permitir que tantas pessoas tenham passado por esta etapa de minha vida. Em especial, gostaria de agradecer a Ele por colocar essas pessoas no meu caminho:

- Minha família, que sempre esteve bem junto em todos os momentos, sempre me apoiando: Atílio, Ana, Gabriela e Thiago.
- Meu orientador, Professor Nemitala, meus agradecimentos especiais por sempre me apoiar e ser extremamente compreensivo à minha dificuldade de conduzir minha vida acadêmica em paralelo à minha vida profissional.
- Meu carinho especial a uma pessoa brilhante que, mesmo estando longe, me ajuda e incentiva em todos os momentos: a Adrianinha.
- Aqueles amigos que foram fundamentais nesta caminhada, estavam ali sempre, com total apoio e dedicação: Francisco, Marcel, Carol, Adriana Delgado e Marcelo.
- Os grandes amigos de Bragança: Alexandre, Koketsu e Alberto.
- Meus outros três orientadores, que muito me ensinaram sobre Física: Professor Manfredo, Professora Márcia e Professor Tadeu.
- O pessoal da oficina, profissionais muito competentes que se tornaram amigos, de tanto que me ajudaram fazendo aquela pecinha que faltava de última hora: Marcão, Otávio, Edmilson, Pedrão, Tucão, Seu Donato.
- Todo o pessoal do IFUSP que de maneira direta ou indireta tem um dedo lá no LIO: Marquinhos, Vinícius, Tiago, Zenaide, Andrea, Tanaka, Francisleine, Tromba, Dito, MacDowell, Fabinho, Evandro, João Terassi, Jorge, Abreu, Márcio, Messias, Wanda, Ribas, Alex, Nelson Carlin, Eloísa, Mazé, Medina e todos os outros.
- O GFAA, que forma uma quantidade apreciável de alunos em Física Aplicada com Aceleradores. Em especial, aqueles alunos que compartilhei as dificuldades e os sucessos nestes últimos anos de trabalho: Priscila, Jéssica, Suene, Bob, Hellen, Vivian, Jim.
- Não posso deixar de agradecer o pessoal do IPT, que segurou as pontas quando eu precisei estar na USP: Padovezi, Zanutto, Ana Gilda, Silvia, Célia, Maria, Cyntia, Felipe, Fábio, Axel, Torrinha, Hélio, Erix, Umeda, David, Mário, Bruno, Fidel, Zé Nascimento, Zé Geraldo, Silas, Binoto, Marcelo, Militão, Luis, Luiz, Henrique, 16, Marcos, João, Renato, Costa, Dito, Ademir, Newton, George, Daniel, James, Parra, Gândara.

Realmente são muitas as pessoas que me ajudaram. E seriam muitas as palavras que eu gostaria de escrever para cada uma dessas pessoas... Mas é preciso deixar um espaço para a minha dissertação!

Sumário

Resumo ii

Abstract iii

Agradecimentos iv

Sumário vi

Lista de Figuras viii

1 Introdução 3
- 1.1 Datação por ^{14}C com aceleradores de partículas . . . 4
  - 1.1.1 Datação por radio-carbono (^{14}C) . . . 5
  - 1.1.2 AMS - Espectroscopia de massa com aceleradores . . . 9
  - 1.1.3 AMS & Radio-carbono . . . 11
  - 1.1.4 AMS de baixas energias . . . 13
- 1.2 Implantadores iônicos . . . 15
- 1.3 *Stripper* gasoso . . . 16
  - 1.3.1 Perfil de pressão em *stripper* gasosos . . . 18
  - 1.3.2 Física de baixas pressões . . . 18

2 Materiais e métodos 20
- 2.1 Montagem do implantador . . . 21
  - 2.1.1 A estrutura do acelerador . . . 21
  - 2.1.2 Detalhes dos componentes do acelerador . . . 27
- 2.2 Projeto e construção da câmara . . . 31
- 2.3 Equipamentos de medição . . . 34
  - 2.3.1 Medição de corrente do feixe - copos de Faraday . . . 35
  - 2.3.2 Incertezas devido às leituras dos copos de Faraday . . . 40
  - 2.3.3 Medição de Gás no *Stripper* - Medidores de Vácuo . . . 43
  - 2.3.4 Medição de campos magnéticos nos ímãs - sonda Hall . . . 44

3 Estudo do perfil de pressão em *stripper* gasosos 46
- 3.1 Definição de grandezas . . . 47
- 3.2 Regimes de Trabalho . . . 48
- 3.3 Processo de bombeamento - tratamento discreto . . . 49

3.4 Processo de bombeamento - tratamento contínuo 50
3.5 Condutância de tubos 52
3.5.1 Solução para tubos cilíndricos 52
3.6 Consideração do tubo de conexão com o *stripper* 55
3.7 A equação do perfil de pressão dentro do *stripper* 58
3.8 Exemplo de perfil de pressão no *stripper* construído 58
3.9 Validade dos cálculos 62
3.10 Espessuras do *Stripper* Gasoso 63

4 Medições experimentais 66
4.1 Interação feixe-*stripper* 67
4.1.1 Feixe de Argônio 67
4.1.2 Feixe de monóxido de carbono - CO^+ 71
4.1.3 Feixe de dióxido de carbono - CO_2^+ 77
4.1.4 Feixe de oxigênio molecular - O_2^+ 79

5 Análise de dados 81
5.1 Análise de feixe total 81
5.2 Análise percentual dos feixes 88
5.2.1 Feixe de argônio 88
5.2.2 Feixe de monóxido de carbono - CO^+ 92
5.2.3 Feixe de dióxido de carbono - CO_2^+ 94
5.2.4 Feixe de oxigênio molecular - O_2^+ 96

6 Discussões 98
6.1 Análise geral dos dados 98
6.2 Aproximação de gás ideal x gás real 99
6.3 Sensibilidade da espessura à taxa de desgaseificação 100

7 Conclusões 102

8 Possibilidades futuras para este trabalho 104
8.1 Análise de isótopos 104
8.2 *Stripper* de Tubos Cônicos 105
8.3 AMS de baixíssimas energias 109
8.4 Equipamentos portáteis de quebra de CO_2 109

A Desenhos da câmara do *Stripper* Gasoso 110

Referências Bibliográficas 123

Lista de Figuras

1.1 Desenho esquemático do processo de fixação de ^{14}C 6

1.2 Primeira análise de ^{14}C feita por Libby, em 1952, para validação de seu modelo de medição do tempo com análise relativa de ^{14}C (referência [3]). É importante ressaltar que a curva não é um ajuste dos pontos experimentais, trata-se da aplicação do modelo resultado da medição do tempo de meia-vida de amostras contemporâneas. 7

1.3 Método de verificação da datação por ^{14}C , que levantou dúvidas no passado sobre a validade deste modelo. 8

1.4 Alguns espectros de massa obtidos por Francis W. Aston, no primeiro equipamento desenvolvido como espectrômetro de massa. O feixe de íons era defletido por um campo magneto-estático sobre um filme fotográfico, revelando as diferentes massas em suas amostras. 10

1.5 Exemplo de um acelerador de partículas atual, utilizado para AMS para datação por ^{14}C . Este acelerador, presente na ETH, Zürich, produz feixe negativo de ^{14}C através de uma fonte de íons tipo *sputtering*. As moléculas são quebradas pelo *stripper* gasoso e os átomos de ^{12}C e ^{13}C são medidos por Copos de Faraday. A medição de ^{14}C, ordens de grandeza menos intenso, é realizada por detector de íons. 12

1.6 Estudo do processo de quebra molecular de partículas com massa 14 em *stripper* gasoso, demonstrando a possibilidade de realização de AMS em baixas energias. Neste gráfico da referência [26], o estudo foi realizado em *stripper* de Argônio com feixe de 221 keV. É possível verificar que a eficiência de quebra molecular depende da espessura do *stripper* ; este processo deve ser bem caracterizado para garantir que as condições de trabalho permitam que a interferência molecular seja eliminada do feixe. 14

1.7 Desenho esquemático de uma câmara de *stripper* gasoso (referência [14]). O projeto visa preservar o vácuo do tubo acelerador e garantir que as dimensões do *stripper* não interfiram na transmitância do feixe de íons. 17

2.1 Desenho esquemático das principais partes do Implantador Iônico utilizadas no trabalho. Em detalhe, a fonte de íons (1), a lente eletrostática tipo Einzel (2), o imã seletor de carga/massa de 90° (3), o primeiro Copo de Faraday de referência (4), o *stripper* gasoso (5), o imã de canalização (6), o Copo de Faraday na "linha zero" (7) e o Copo de Faraday para medição dos feixes carregados na "linha 30° (8). 22

2.2 Esquema dos potenciais existentes no Implantador Iônico. Inicialmente, o potencial (V_{plasma}) gera um elevado campo elétrico no interior da fonte de íons ionizando as partículas do meio. O potencial de extração ($V_{extracao}$) extrai estas partículas gerando o feixe de íons, com um potencial de até 30 kV. A seguir, a geometria da lente e o potencial (V_{lente}) focalizam o feixe para dentro do ímã. Por fim, o feixe é acelerado no tubo acelerador pelo potencial de aceleração ($V_{aceleracao}$). 23
2.3 Módulo de Alta Tensão com fonte de íons, sistema de vácuo e controle embarcados, para geração e aceleração de feixes de íons. A tensão máxima nominal do módulo é de 400 kV. Em referência ao esquema do acelerador (figura 2.1), dentro deste módulo estão incluídos os componentes de 1 a 3. 24
2.4 Módulo de pré-aceleração do feixe de íons, na parte interna do módulo apresentado na figura 2.3. Em destaque a fonte de íons. 25
2.5 Montagem utilizada neste trabalho, com câmara do *stripper* gasoso e ímã seletor de canalizações, referenciados com os números 5 e 6 no esquema da figura 2.1. 26
2.6 Copos de Faraday montados após o ímã de canalização, na linha "zero graus" e na linha 30 graus, para distinção entre feixe neutro e seleção de carga do feixe ionizado. Equipamentos sinalizados pelos números 7 e 8 no esquema do acelerador, da figura 2.1. 27
2.7 Fonte de Íons tipo PIG, utilizada para extração dos feixes (referência [18]). Em detalhe, (1) o encapsulamento externo, (2) peças do pólo catodo, (3) o catodo, (4) bobina para o campo magnético, (5) anodo, (6) isolante, (7) alimentação para alta tensão, (8) disco do catodo, (9) injeção de gás. 28
2.8 Fonte de Íons utilizada para extração de feixes utilizando-se gases como fonte de partículas. 29
2.9 Lente para focalização e ímã para seleção do feixe de íons, localizados após a fonte de íons no módulo de aceleração do Implantador Iônico. 30
2.10 Visualização do Feixe de Íons após atravessar todas as etapas do acelerador. Nesta imagem, o *stripper* gasoso estava sem inserção de gás. 31
2.11 Desenhos esquemáticos da câmara do *stripper* com detalhes do *stripper* gasoso. 32
2.12 Imagem da câmara do *stripper* gasoso. 33
2.13 Detalhe do sistema de alinhamento do tubo do *stripper* no interior da câmara, que permite ajustes na direção vertical e nos três graus de liberdade de rotação. 33
2.14 Tubo suporte para injeção de gás e sistema de fixação do *stripper*. Todo o alinhamento desse sistema é realizado com as facilidades mostradas na figura 2.13. A peça de suporte do tubo pode ser substituída para uma eventual troca do tubo do *stripper*. 34
2.15 Modelo de Copo de Faraday utilizado para medição de corrente de feixe após a passagem pelo *stripper*, posicionados na "linha zero" e na "linha 30 graus" do ímã de canalização 35
2.16 Calibração do sistema de medição de corrente elétrica nos Copos de Faraday. . 37
2.17 Gráfico de rendimento de extração de elétrons secundários de uma placa de cobre, em função da energia da partícula incidente sobre essa placa. Neste caso da referência [33], o feixe de partículas é composto de elétrons. 41

2.18 Medidores de vácuo utilizados para medição da pressão de injeção de gás no *stripper* e pressão da câmara do *stripper*, para posterior cálculo da espessura do *stripper*. 43
2.19 Gráfico de calibração do ímã seletor, para os diversos feixes gerados no decorrer deste trabalho. 45

3.1 Modelagem utilizada para o cálculo do perfil de pressão no *stripper* com injeção central de gás. As setas vermelhas e verdes representam *throughputs* do sistema; as menores representam a degaseificação das paredes do tubo e a maior representa a injeção central de gás. 54
3.2 Modelagem do *stripper* gasoso em conjunto com o tubo suporte: o *stripper*, em verde, foi reduzido a um tubo equivalente cuja condutância específica é igual à condutância do conjunto dos dois semi-tubos do *stripper*. 56
3.3 Perfil de pressão um para tubo cilíndrico com injeção de gás na parte central e taxa de desgaseificação constante ao longo de todo o tubo. Cálculo realizado para regime estacionário (não dependente do tempo). 60
3.4 Outros exemplos de perfil de pressão parabólico em tubo cilíndrico, em regime estacionário. As curvas diferenciam-se apenas pela pressão medida na injeção de gás (p_{in}), acima do tubo suporte (controlada experimentalmente pela válvula de injeção de gás no sistema). 61
3.5 Número de Knudsen em função da pressão central do *stripper*, para verificação da validade das equações de escoamento utilizado. No regime molecular, aqui modelado, este número deve ser maior que um. 62
3.6 Dependência da espessura do *stripper* com a pressão no centro do tubo, para os diferentes tipos de gases utilizados no experimento. 64

4.1 Gráficos de carga elétrica medida nos Copos de Faraday em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, para feixe de Ar^+. 68
4.2 Gráficos de carga elétrica total medida nos Copos de Faraday em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, para feixe de Ar^{2+}. 70
4.3 Gráficos de carga elétrica total medida nos Copos de Faraday em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, para feixe de CO^+ e *stripper* de Hélio. . 72
4.4 Gráficos de carga elétrica total medida nos Copos de Faraday em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, para feixe de CO^+ e *stripper* de Argônio. 74
4.5 Gráficos de carga elétrica total medida nos Copos de Faraday em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, para feixe de CO^+ e *stripper* de Xenônio. 76
4.6 Gráficos de carga elétrica total medida nos Copos de Faraday em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, para feixe de CO_2^+ e *stripper* de Hélio. . 77
4.7 Gráficos de carga elétrica total medida nos Copos de Faraday em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, para feixe de CO_2^+ e *stripper* de Argônio. 78
4.8 Gráficos de carga elétrica total medida nos Copos de Faraday em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, para feixe de CO_2^+ e *stripper* de Xenônio. 79
4.9 Gráficos de carga elétrica total medida nos Copos de Faraday em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, para feixe de O_2^+ e *stripper* de Argônio. . 80

5.1 Soma de todas as parcelas dos feixes para cada tipo de feixe, para análise isolada de *straggling* angular e energético dos feixes. 83
5.2 Simulação da distribuição angular das partículas do feixe de Ar^+ com energia de 30 keV interagindo com diferentes gases de *stripper*. Condição para pressão de injeção no tubo suporte p_{in} de 2.10^{-2} torr. 85
5.3 Número de partículas nos Copos de Faraday em função da pressão de injeção no *stripper*. A queda com o aumento de pressão, na simulação, é referente à análise de *straggling* angular do feixe de íons, ao interagir com o gás do *stripper*. 87
5.4 Gráficos de proporcionalidade de feixe em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, para feixe de Ar^+. 89
5.5 Gráficos de proporcionalidade de feixe em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, para feixe de Ar^+. 91
5.6 Gráficos de proporcionalidade de feixe em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, para feixe de CO^+. 93
5.7 Gráficos de proporcionalidade de feixe em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, para feixe de CO_2^+. 95
5.8 Gráficos de proporcionalidade de feixe em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, para feixe de O_2^+. 97

8.1 Desenhos esquemáticos de *stripper* cônico. 107
8.2 Perfil de pressão calculado ao longo de tubos com geometrias diferentes (cônico de extremidades "fechadas", cilíndrico e cônico de extremidades "abertas"), com constante injeção de gás no centro. Condições calculadas para o regime estacionário de pressão - sistema estabilizado temporalmente. 107

Apresentação

A necessidade da construção de um sistema para realização de AMS (*Accelerator Mass Spectroscopy*), principalmente quando se trata da análise de rádio-carbono (^{14}C), é grande hoje no Brasil. Atualmente, a datação de fósseis nos grupos de pesquisa brasileiros é quase que totalmente realizada no exterior (Alemanha, Estados Unidos, Suécia, Holanda, ...), [7, 8, 9, 10, 11]. Uma pequena parcela dessa análise é feita no Brasil, utilizando-se exclusivamente o decaimento de radio-nuclídeos.

Porém, a análise de ^{14}C por decaimento radioativo é consideravelmente limitada pelo tamanho da amostra, tendo em vista a grande meia vida desse elemento.

É nesse cenário que o GFAA - Grupo de Física Aplicada com Aceleradores [12] do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP) decidiu dedicar parte de suas atividades à implementação da técnica de AMS.

A etapa inicial dessa nova linha de pesquisa do grupo é o objetivo desse trabalho: construir e caracterizar um *stripper* gasoso no escopo de troca de cargas elétricas e de quebra molecular. A câmara de *stripper* gasoso é fundamental na análise de ^{14}C, uma vez que, no AMS, feixes de partículas de massa 14 são gerados e é necessário eliminar interferência de outras partículas com esta massa. No caso, o *stripper* gasoso deve ser responsável pela quebra das outras duas partículas de massa 14 que podem ser geradas na fonte de íons: moléculas de $^{12}CH_2$ e ^{13}CH.

Desde o princípio desse projeto teve-se em mente a contrução desse *stripper* gasoso para o sistema de AMS, visando sua adaptação ao Laboratório de Implantação Iônica (LIO), nova facilidade do Instituto de Física da Universidade de São Paulo.

A ideia de utilizar o implantador como acelerador de íons na análise de partículas, princi-

palmente de radiocarbonos, fundamentou-se em artigos atuais da literatura que, ao contrário do que se pensava, mostram cada vez mais que é possível a utilização de baixas energias para esse tipo de espectroscopia [26, 27, 28, 29, 30].

Assim uma parte significativa deste trabalho consistiu na montagem do implantador de íons e sua adaptação para receber o *stripper* desenvolvido.

Um modelo foi desenvolvido para a estimativa da espessura do *stripper* em diferentes condições experimentais. Uma modelagem do *stripper* em função de parâmetros medidos experimentalmente foi desenvolvida com base no estudo de escoamento molecular de partículas em tubos.

Por fim, alguns feixes foram gerados e acelerados para interagir com o *stripper* gasoso, visando estudar o comportamento destes feixes em função da espessura do *stripper* e do tipo de gás nele utilizado.

Através destes feixes (com energias de 30 keV) foram observados fenômenos de troca de carga do feixe de íons e também de quebra molecular. Em particular as medidas de quebra molecular em energias tão reduzidas mostraram a viabilidade da concretização da ideia de adaptar o implantador iônico à análise de radio-isótopos.

Capítulo 1

Introdução

A multidisciplinaridade se tornou um conceito bastante difundido entre os campos da ciência no final do século XX e hoje se faz presente em praticamente todas as grandes áreas de pesquisas.

Não foi diferente para a Física de Aceleradores. Sua aplicação vem se tornando cada vez mais frequente nas diferentes áreas do conhecimento, principalmente aquelas que demandam alta tecnologia, como a indústria farmacêutica, a medicina e a arqueologia, por exemplo.

Em meados do século XX, alguns estudos sobre arqueologia e Física de Aceleradores revolucionaram a datação de fósseis através de ^{14}C . Surgia a técnica AMS, a espectroscopia de massa com aceleradores[1]. Era possível contar diretamente átomos de ^{14}C com uma eficiência muito maior que o tradicional método de medição de decaimento radioativo.

Muito estudo foi necessário para o pleno estabelecimento desta técnica. Um dos principais estudos foi a respeito da eliminação da interferência de outras partículas de massa 14 do processo de medição (os átomos de ^{14}N e as moléculas de $^{12}CH_2$ e ^{13}CH).

A parcela de átomos de ^{14}N foi eliminada usando fonte de íons negativos, pois íons de N^- não se formam. As moléculas de massa 14, no entanto, necessitaram de um tratamento especial. Uma importante estrutura dos aceleradores cumpre o papel de quebrar as moléculas de $^{12}CH_2$ e ^{13}CH: o *Stripper*.

[1]Sigla em inglês de *Accelerator Mass Spectroscopy*

Com a possibilidade de ser sólido ou gasoso, o *stripper* constitui-se na inserção de pequenas quantidades de material no caminho do feixe de íons, possibilitando a ocorrência de fenômenos como troca do estado de carga dos íons deste feixe e/ou quebra de moléculas existentes no feixe. Assim, o *stripper* gasoso se tornou uma peça fundamental no AMS, é com ele que as moléculas são extintas.

No início da aplicação do AMS, acreditava-se que altas energias destes feixes de íons eram necessárias para garantir o processo de quebra molecular no *stripper*. Porém, estudos atuais (referências [26, 27, 28, 29, 30]) vêm mostrando a viabilidade de se trabalhar com baixas energias. Isso implica na utilização de máquinas mais compactas, menos complexas e mais economicamente viáveis.

Fundamentando-se nestes trabalhos, a possibidade de adaptação de um implantador de íons para realização de AMS foi vislumbrada. A aquisição de um Implantador Iônico pelo Instituto de Física da USP possibilitou o início dos trabalhos para realização deste objetivo.

A primeira etapa do processo de adaptação deste acelerador foi realizada e é apresentada nesta dissertação. A montagem do implantador iônico, o projeto e confecção de um *stripper* gasoso, sua caracterização e a discussão sobre a viabilidade de concretizar o AMS neste acelerador serão discutidos nos capítulos deste trabalho.

Um pouco da história e utilização da datação por ^{14}C, a técnica AMS e os Implantadores Iônicos são apresentadas nas próximas seções. A seguir, a Física de Fluídos utilizada nos cálculos de caracterização do *stripper* deste trabalho será brevemente descrita.

1.1 Datação por ^{14}C com aceleradores de partículas

Um dos objetivos do presente trabalho foi realizar um passo na adaptação do Implantador Iônico para análise de ^{14}C, onde o acelerador estaria apto à realização de Espectroscopia de Massa para estudos de datação com este isótopo.

Para entender um pouco mais sobre as necessidades da ciência de medição do tempo através da contagem de átomos, são apresentadas a seguir um breve histórico do estudo de Datação

por ^{14}C e do estudo de espectroscopia de massa com aceleradores.

O resultado da união das duas ciências é discutido, mostrando os avanços que foram fruto desta união.

1.1.1 Datação por radio-carbono (^{14}C)

Como muitos outros avanços na ciência, a datação por radio-carbono foi fruto da curiosidade científica. O desenvolvimento desta técnica de medição do tempo através da medição de uma quantidade relativa de átomos foi um marco para a ciência, resultando no Prêmio Nobel de Química (1960) para o sei pai: Willard F. Libby.

De acordo com [3], toda essa ciência iniciou-se pelo estudo dos possíveis efeitos dos raios cósmicos sobre a Terra e sobre a sua atmosfera. Em 1952, Libby publicou os resultados de sua pesquisa:

- Raios cósmicos geram cerca de 2 neutrons secundários por cm^2 por segundo na atmosfera terreste;
- A grande maioria destes neutrons se tornam térmicos e reagem com nitrogênio, através da reação nuclear $^{14}N(n,p)^{14}C$;
- O ^{14}C se oxida formando $^{14}CO_2$;
- Seres vivos trocam continuamente CO_2 com o meio ambiente e fixam o ^{14}C em seus durante sua vida. Assim, somente perderão ^{14}C com o passar dos anos, pois este é um átomo instável, com meia vida de 5568 anos[1], diminuindo a proporção com relação ao isótopo estável ^{12}C.

Um desenho esquemático do processo de fixação do ^{14}C é apresentado a seguir, na figura 1.1.

[1] Valor encontrado por Libby em suas pesquisas.

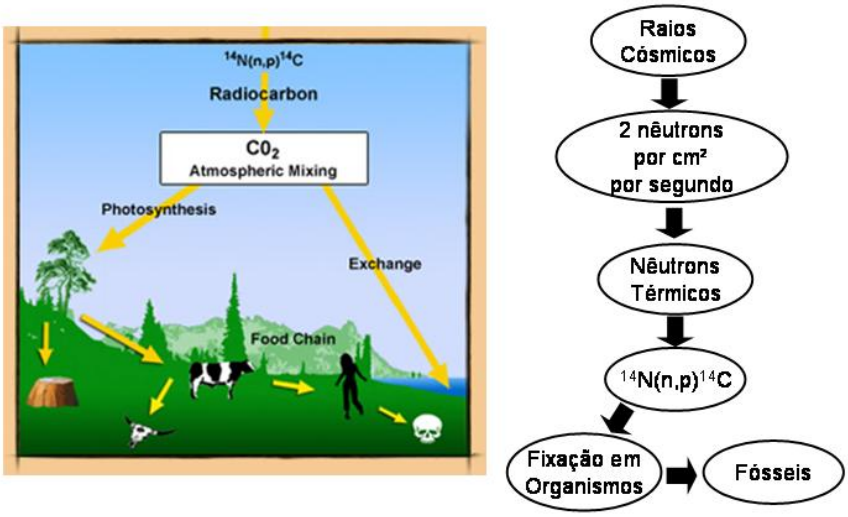


Figura 1.1: Desenho esquemático do processo de fixação de ^{14}C .

A medição da quantidade relativa de ^{14}C em anéis de árvores e artefatos de civilizações antigas permitiu a Libby, ainda em 1952, fazer a primeira análise de seu modelo. Contando decaimentos radioativos através de um contador Geiger (com anti-coincidência) durante alguns dias em amostras com idade conhecida, o incrível resultado de sua análise é mostrado na figura 1.2. A comparação de seu modelo de decaimento radioativo com a contagem de anéis de árvores mostraram-se bastante compatíveis.

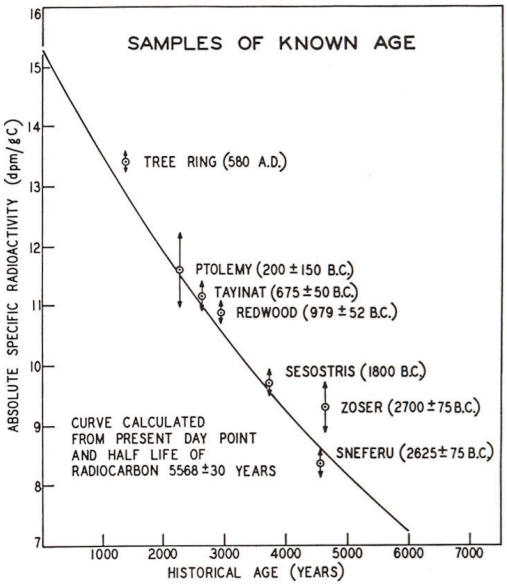


Figura 1.2: Primeira análise de ^{14}C feita por Libby, em 1952, para validação de seu modelo de medição do tempo com análise relativa de ^{14}C (referência [3]). É importante ressaltar que a curva não é um ajuste dos pontos experimentais, trata-se da aplicação do modelo resultado da medição do tempo de meia-vida de amostras contemporâneas.

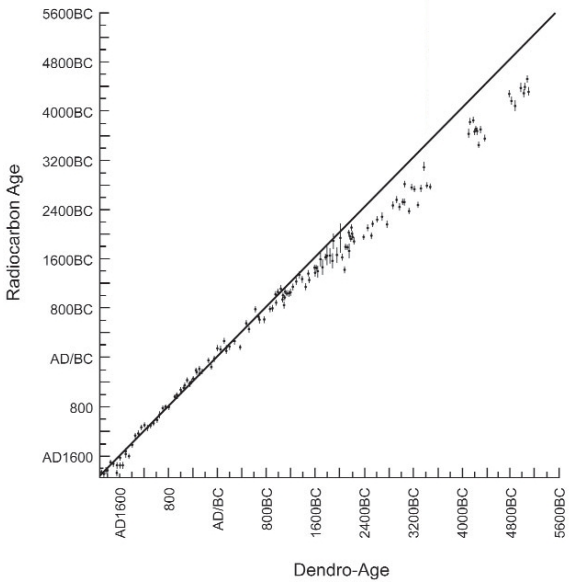
A partir dos experimentos de Libby esta técnica evoluiu muito. Em certo momento, o modelo foi questionada devido à observação de desvios quando analisadas amostras de pinheiros Bristlecone, os seres vivos mais velhos do mundo, com até 5000 anos de idade[1] (figura 1.3(a)). Com idades conhecidas pela dentrocronologia[2] (ver figura 1.3(b)), o modelo de ^{14}C não ajustava as medições de idade destes seres - figura 1.3(c).

[1] Atualmente exemplares de outras espécies de árvore, *spruce tree*, já foram encontrados com até 10000 anos [4].

[2] Método científico de determinação de idade de uma árvore pela contagem do número de anéis em seu tronco.

(a) Espécie de Árvore com até 5000 anos de idade (referência [5]).

(b) Dendrocronologia - Idade da árvore em função do número de anéis em seu troco [6].



(c) Comparação entre a datação por dendrocronologia e por ^{14}C (referência [3])

Figura 1.3: Método de verificação da datação por ^{14}C , que levantou dúvidas no passado sobre a validade deste modelo.

As respostas à estes questionamentos trouxeram maiores resultados à ciência. Os desvios do modelo de Libby foram estudados e concluiu-se que são principalmente em razão de (1) mudanças na taxa de produção do ^{14}C devido a alterações do campo magnético terrestre, (2)

flutuações da atividade solar e (3) mudanças nos reservatórios geoquímicos de ^{14}C e a taxa de transferência de carbono entre eles.

Desde o início, a técnica de medição da concentração destes átomos em uma amostra foi através da contagem do número de decaimentos beta do ^{14}C . Esta é uma técnica ainda utilizada, mas possui limitações. De acordo com a referência [1], um grama de carbono de uma amostra biológica contemporânea contém cerca de 6.10^{10} átomos de ^{14}C . Desta maneira, com uma meia-vida de 5730 anos[1], são necessárias cerca de 12 horas de experimento para contagem de 10.000 eventos de decaimento, considerando-se uma eficiência de 100% de medição. Com amostras mais antigas esse número é mais reduzido ainda.

Este elevado tempo de meia-vida do ^{14}C faz desta técnica um método de medição não muito eficiente, uma vez que apenas $\frac{10^4}{10^{10}} = 10^{-8}\%$ dos átomos de ^{14}C são medidos em aproximadamente 12 horas.

Esta reduzida eficiência também acaba por limitar a técnica de medição por decaimento radioativo em relação à quantidade de massa de amostra necessária para realizar uma medição. A técnica AMS foi uma melhoria da técnica, uma maneira mais eficiente de contar os átomos de ^{14}C principalmente em amostras pequenas.

1.1.2 AMS - Espectroscopia de massa com aceleradores

A técnica AMS baseia-se na utilização de um analisador eletrostático e/ou magnetostático para separar um feixe de íons em diferentes partes, selecionando simultaneamente a carga, a massa e a velocidade das partículas deste feixe.

Pode-se dizer que a história da Espectroscopia de Massa com Aceleradores (AMS) iniciou-se com J. J. Thomson no final do século XIX e início do século XX. Em seus experimentos em tubos de raios catódicos, diferentes traços em filmes fotográficos foram observados saindo de aberturas do catodo.

Campos magnéticos e eletrostáticos defletiam os feixes positivos de maneira diferente, em

[1] Valor atualmente aceito como constante de decaimento do ^{14}C .

função de suas massas. Estava construído o primeiro espectrômetro de massa. O principal resultado dos experimentos de Thomson foi a observação da existência de isótopos estáveis (o mesmo elemento com diferentes massas), um grandioso passo na história da ciência.

O desenvolvimento definitivo de um sistema dedicado à analise de massa só apareceu mais tarde, após a 1ª Guerra Mundial, com o trabalho de Francis W. Aston (um dos ajudantes de Thomson) e Arthur J. Dempster. Os primeiros resultados de seu trabalho, alguns espectros de massa, são apresentados a seguir.

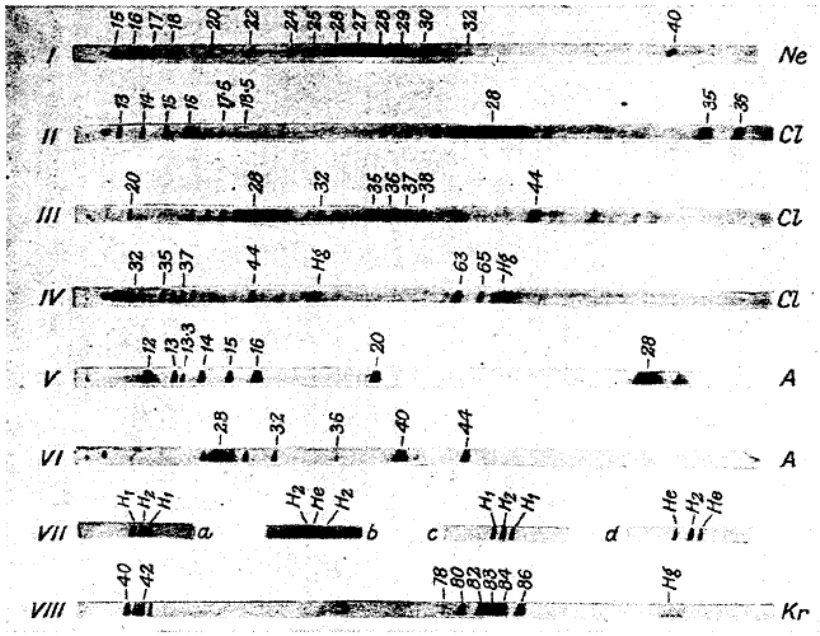


Figura 1.4: Alguns espectros de massa obtidos por Francis W. Aston, no primeiro equipamento desenvolvido como espectrômetro de massa. O feixe de íons era defletido por um campo magneto-estático sobre um filme fotográfico, revelando as diferentes massas em suas amostras.

Estava iniciada uma nova era de pesquisas na Física Atômica e Nuclear. A medição da existência e abundância de massas, a descoberta de isótopos radioativos e suas estabilidades e até a descoberta de novos átomos.

Tudo isso rendeu a Aston o Prêmio Nobel de Química em 1922 (referência [2]). A partir daí as pesquisas não pararam mais. Foram criadas máquinas comerciais para este tipo de análise, *handbooks* específicos e conferências especializadas.

As pesquisas do século XX foram fortemente influenciadas pela espectroscopia de massa.

Alguns poucos exemplos podem ilustrar a abrangência de utilizações: estudos astronômicos sobre a composição de nosso sistema solar, a geocronologia (incluindo-se a história do clima e evolução da vida), arqueologia por isótopos. A técnica também está presente nas análises químicas, biológicas, bioquímicas e médicas, como na identificação de produtos complexos de metabolismos, identificação e medição de elementos traços em toxicologia, medição de poluição ambiental. Estudos na indústria petrolífica, química, farmacêutica e nuclear. Mais especificamente em Física, todos os aceleradores de partículas foram desenvolvidos com base nas ideias destes primeiros espectrômetros de massa. Até mesmo equipamentos de medição de vazamento em sistemas de vácuo, os *leak detectors*, são resultado desta tecnologia, com a medição de Hélio no espectrômetro de massa.

É certo que atualmente a espectroscopia de massa está presente em grandes áreas da ciência e dá suporte à evolução de muitos experimentos. Em meio a todas essas utilizações, um importante passo foi entre todas as ciências: a datação através de radio-carbonos.

1.1.3 AMS & Radio-carbono

De acordo com [3], em 1977 uma revolução aconteceu na ciência de datação com ^{14}C . Com o alto desenvolvimento de aceleradores de partículas tanto na parte de geração de feixe de íons quando na elevação de suas tensões de trabalho foi possível casar as técnicas de datação por radio-carbono com AMS.

Alguns problemas existentes incialmente eram relativos à interferência de outras partículas no feixe de íons que também possuíam massa 14: ^{14}N, $^{12}CH_2$ e ^{13}CH.

O problema do ^{14}N foi resolvido com a inversão da polaridade do acelerador, quando fontes de feixes negativos foram criadas. Como o $^{14}N^-$ é altamente instável, é possível garantir que não haverá feixe desta partícula nas fontes negativas.

Para eliminar a contaminação de feixes moleculares, a interação destes feixes com *stripper* sólidos (filmes finos) ou ainda *stripper* gasosos garantia que todas as moléculas quebrariam por explosão Coulombiana.

Estava garantida a união das técnicas. Uma configuração típica entre os muitos aceleradores que estão em uso para AMS é apresentado na figura 1.5.

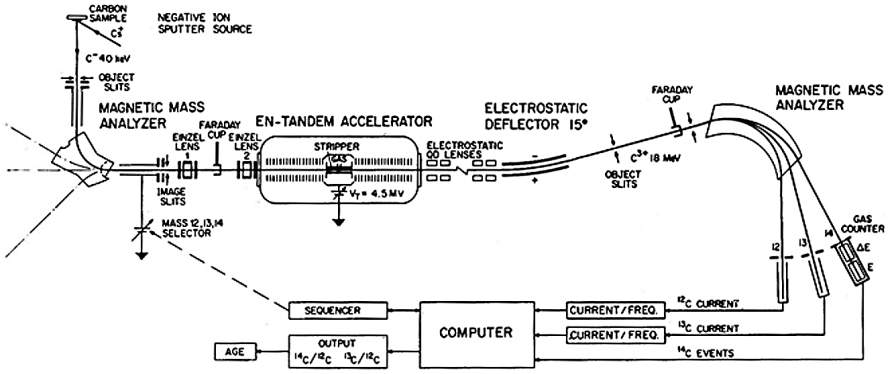


Figura 1.5: Exemplo de um acelerador de partículas atual, utilizado para AMS para datação por ^{14}C . Este acelerador, presente na ETH, Zürich, produz feixe negativo de ^{14}C através de uma fonte de íons tipo *sputtering*. As moléculas são quebradas pelo *stripper* gasoso e os átomos de ^{12}C e ^{13}C são medidos por Copos de Faraday. A medição de ^{14}C, ordens de grandeza menos intenso, é realizada por detector de íons.

Como neste processo de medição de ^{14}C conta-se átomos diretamente, considerando-se uma eficiência típica de um acelerador na extração de feixe de aproximadamente 3% (para a fonte de íons e a transmitância do acelerador, de acordo com [1, 3]), uma estatística de 1000 contagens é facilmente atingida em poucos minutos com a utilização de apenas 1 mg de amostra! Isso garante um aumento de eficiência na medição de ^{14}C em cerca de 10^5 vezes, se comparada à técnica de decaimento radioativo.

Além disso, mesmo com a necessidade de utilização de uma massa de amostra bem mais reduzida, os limites de medição também são reduzidos devido à contagem de fundo. Com esta ligação entre as técnicas, hoje é possível obter medições com até 0,2% de exatidão.

Por fim, a datação através de radio-isótopos menos abundantes e com tempo de meia-vida bem maiores que o ^{14}C foi desenvolvida após a união destas técnicas. Isso permite estudos em escalas de tempo ainda maiores. A utilização de ^{36}Cl (meia-vida de 301 mil anos, para análise de água em meteoritos, gelo polar, água da chuva e água do mar), ^{10}Be , ^{26}Al, ^{32}Si e ^{129}I (com milhões de anos de meia-vida, para análise de sedimentos de tempos bastante remotos) são alguns exemplos das possibilidades que se criaram.

1.1.4 AMS de baixas energias

Desde as origens do AMS para análise de ^{14}C julgava-se necessária a utilização de aceleradores com altas energias para garantir a quebra das moléculas do feixe com massa 14. De acordo com [28], a grande maioria das máquinas atualmente utilizadas é de tensões de aceleração da ordem de MV. Isso torna necessária a utilização de grandes e caras estruturas para o acelerador. Por exemplo, estruturas de gases isolantes para a alta tensão, equipamentos de óptica de feixe para altas energias, entre outros.

Há alguns anos algumas pesquisas para redução dos aceleradores de partículas dedicados à execução de AMS vêm sendo praticadas. Esta espectroscopia de massa não requer energias tão elevadas (a necessidade de tensão na máquina limita-se à resolução em massa que se deseja atingir com o acelerador), garantindo-se o processo de quebra molecular das interferências de massa 14 e a óptica do feixe.

Análises de quebra molecular de partículas de massa 14 (referência [26]) para energias de feixe da ordem de 200 keV mostraram a possibilidade de execução de trabalhos com energias reduzidas. Ficou comprovado que o processo de quebra molecular ocorre nos *stripper* mesmo para essas energias baixas, como mostra o gráfico da figura 1.6.

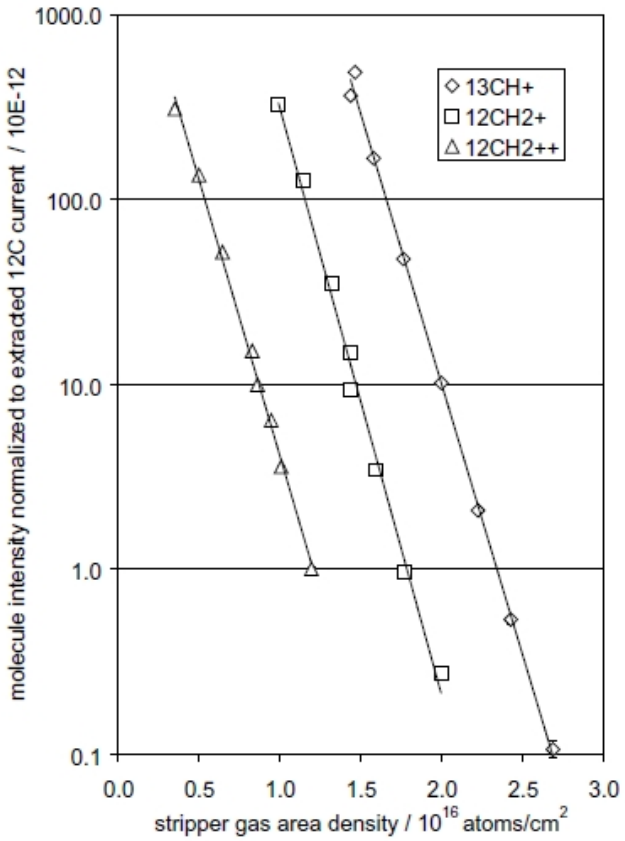


Figura 1.6: Estudo do processo de quebra molecular de partículas com massa 14 em *stripper* gasoso, demonstrando a possibilidade de realização de AMS em baixas energias. Neste gráfico da referência [26], o estudo foi realizado em *stripper* de Argônio com feixe de 221 keV. É possível verificar que a eficiência de quebra molecular depende da espessura do *stripper*; este processo deve ser bem caracterizado para garantir que as condições de trabalho permitam que a interferência molecular seja eliminada do feixe.

Isso possibilitou o desenvolvimento de máquinas mais simples para medir o ^{14}C (referência [31]). Aceleradores menores, que trabalham com o terminal de alta tensão em ar e economicamente mais viáveis começaram a serem aplicados para AMS. Alguns parâmetros como a transmitância de feixe, eficiência de quebra molecular, *straggling* angular do feixe, em decorrência da redução das energias desses feixes, são objetos atuais de estudos para esta nova configuração.

Em decorrência da aquisição de um acelerador de baixas energias no Instituto de Física da USP, a oportunidade de construir um AMS no Brasil e ainda estar envolvido nas atuais pesquisas desta técnica no mundo inspiraram a realização do presente trabalho. Este acelerador

de partículas de apenas um estágio, com tensão de aceleração de até 400 kV, é bastante similar aos utilizados em pesquisas recentes (referência [27]).

1.2 Implantadores iônicos

A maior parte dos aceleradores de partículas utilizados para AMS na atualidade são do tipo Tandem (de acordo com [29]), onde grandes máquinas com potenciais da ordem de Mega-Volts são dedicadas a esta espectroscopia.

No entanto, o estudo da possibilidade de redução das energias para a operação desta técnica tornou possível a utilização de máquinas mais simples e baratas para AMS, com apenas um estágio de aceleração e que possuem o terminal de alta tensão em ar.

A simplificação destas máquinas remete aos Implantadores Iônicos de décadas passadas, amplamente utilizados nos estudos de componentes eletrônicos para a tecnologia do silícios e nas aplicações de modificação de superfícies. Em 2003, como resultado de um projeto de pesquisa (referência [13]), um Implantador Iônico foi adquirido pelo GFAA [12].

Porém, existem duas grandes diferenças entre um implantador de íons convencional e um sistema AMS: a carga elétrica do feixe de íons e a posição da amostra que se deseja estudar.

Os implantadores de íons são projetados para modificação de materiais com feixes intensos de íons. A criação destes feixes é muito mais eficiente para feixes positivamente carregados. Isso acontece porque as partículas a serem ionizadas pela fonte de íons são geralmente neutras, com as camadas eletrônicas estabilizadas. A extração de um elétron de uma das camadas eletrônicas de uma partícula é um processo muito mais eficiente que a inserção de um elétron em sua estrutura.

É por esta razão que as fontes de íons de implantadores são projetadas para a geração de feixes de partículas positivamente carregadas. Para aceleração destas partículas positivas, a fonte de íons geralmente está posicionada sobre uma alta tensão positiva, permitindo que as amostras fiquem aterradas, facilitando a operação do acelerador.

Para um sistema AMS, como discutido anteriormente, é necessário trabalhar com fontes

de íons negativos, para eliminação do ^{14}N do feixe de massa 14.

A segunda grande diferença é a posição do objeto de estudo. Em um implantador iônico, as amostras são posicionadas em uma câmara de análise em frente ao feixe de íons, para que seja realizada a modificação de suas superfícies ou para outros estudos de interação do feixe com materiais. Em AMS, por sua vez, é necessário produzir um feixe a partir da amostra que se deseja analisar.

Para agilizar o processo de análise de amostras, fontes de íons multi-catódicas são comumente utilizadas em AMS. Desta maneira, diversas amostras são posicionadas na fonte antes do início de sua operação. Para o início das análises do acelerador, o vácuo é estabelecido na fonte de íons e a geração dos feixes é realizada sem a necessidade de grandes manipulações do acelerador. Apenas a rotação de um carrossel de amostras é necessária para a sequência de análises de um AMS.

Portanto, duas grandes modificações são necessárias no Implantador de Íons para que este seja transformado em AMS: a inversão da polaridade de seu terminal de alta tensão, permitindo a extração de feixes negativos, e a adaptação de uma fonte multi-catódica de íons negativos, para a análise eficaz de amostras.

Ambos os processos são simples de serem realizados; as soluções estão disponíveis no mercado e à disposição de algum projeto para financiar sua compra.

Por fim, um *stripper* gasoso é o elemento deste implantador que necessitava ser projetado para viabilizar o sistema AMS.

1.3 *Stripper* gasoso

A utilização de aceleradores de partículas para datação por ^{14}C exige a utilização de *stripper*, dada a necessidade de quebrar moléculas existentes nos feixes com massa 14 ($^{12}CH_2$ e ^{13}CH).

Os tipos de *stripper* podem ser dois: filmes finos sólidos ou *stripper* gasosos. Ambos são utilizados na física de aceleradores, porém a maior possibilidade de controle sobre as condições

do feixe nos *stripper* gasosos tem feito com que este modelo seja mais utilizado na atualidade.

O *stripper* gasoso torna possível o controle sobre a espessura de *stripper* (quantidade de material inserida no caminho do feixe de íons) e também a utilização de diferentes gases em seu meio, permitindo modificar as condições de eficiência de troca de carga e quebra molecular. Além disso, a possibilidade de trabalhar com reduzidas quantidades de gases o torna vantajoso em máquinas de baixas energias. Filmes finos possuem um limite inferior de espessura e não poderiam ser utilizados neste trabalho, pois não é possível produzir filmes auto-portantes com densidades superficiais tão reduzidas.

O projeto, a confecção e o estudo da interação de feixes de íons com um *stripper* gasoso é o objetivo principal deste trabalho. Por esta razão, um estudo mais detalhado sobre alguns *stripper* atualmente utilizados pelo mundo é apresentado a seguir.

De acordo com a literatura ([14, 15]), um importante problema a ser resolvido na construção de um *stripper* gasoso é o compromisso entre as densidades de gases a serem injetados no *stripper* e a manutenção do alto-vácuo nos tubos aceleradores.

Além do problema do vácuo, cuidados com o diâmetro do tubo do *stripper* são necessários. Todo *stripper* funciona como um desfocalizador do feixe de íons. É importante atentar-se à emitância da fonte de íons para reduzir a interferência do feixe com o tubo do *stripper*.

Um desenho esquemático do *stripper* da referência [14] é apresentado na figura 1.7.

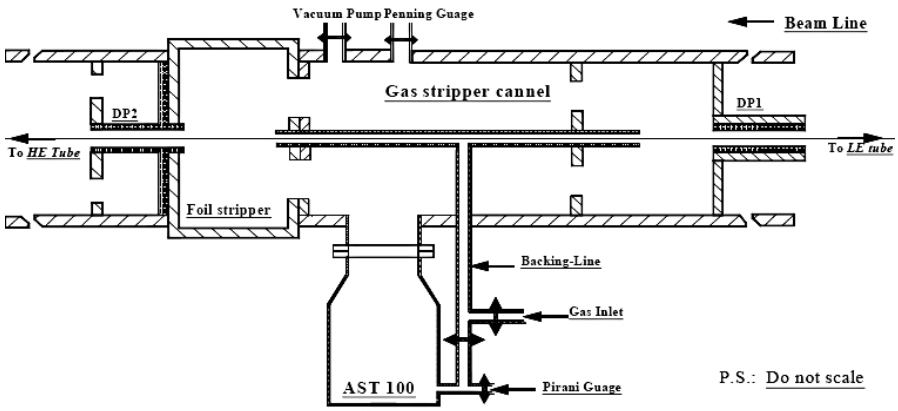


Figura 1.7: Desenho esquemático de uma câmara de *stripper* gasoso (referência [14]). O projeto visa preservar o vácuo do tubo acelerador e garantir que as dimensões do *stripper* não interfiram na transmitância do feixe de íons.

O dispositivo da figura 1.7 utiliza um *stripper* de 8 mm de diâmetro e 500 mm de comprimento, utilizado em medições de carbono com energia de 3 MeV e estado de carga +3 (após o *stripper*).

O projeto do *stripper* gasoso deste trabalho foi baseado nestes estudos. O tubo utilizado, no caso deste trabalho, possuía 0,98 mm de diâmetro interno e 400 mm de comprimento. Desenhos técnicos utilizados na construção da câmara e do *stripper* são apresentados no Apêndice A.

Por fim, o cálculo da quantidade de gás dentro do *stripper* é o assunto da próxima seção.

1.3.1 Perfil de pressão em *stripper* gasosos

Certamente a Física de Aceleradores depende, e muito, da tecnologia do vácuo, principalmente no que se refere a criar condições para execução de experimentos. Em particular, quando se deseja criar um feixe de partículas, é necessário criar um ambiente com livre caminho médio satisfatório, para que a experiência possa ser realizada com pouca interferência do meio em que está sendo executada.

Em contrapartida, em algumas situações, é necessário criar e controlar campos de pressões de gases em algumas regiões do acelerador, para atuar como parte do experimento planejado. É o caso do *stripper* gasoso.

O processo de injeção de gás e medições de pressões em pontos estratégicos permite, através do estudo da física de baixas pressões, calcular a quantidade de partículas presentes no caminho do feixe. Esse cálculo se realiza pelo estudo de perfil de pressão, que será explorado no capítulo 3.

1.3.2 Física de baixas pressões

Muito já se estudou sobre o processo de retirada parcial das partículas de um meio, deixando-o com pressões inferiores à pressão atmosférica (vácuo). Atualmente, diversas revistas científicas dedicam-se exclusivamente à tecnologia e à ciência do vácuo, além daquelas que referenciam experimentos que somente são possíveis graças à existência desses estudos.

Por se tratar de um acelerador de partículas, onde bombas mecânicas atuam juntamente com bombas turbo-moleculares para extração das partículas de seu interior, fez-se adequada a utilização destes estudos sobre as baixas pressões e o processo de transporte de gases nesse meio.

O estudo destas baixas pressões possibilitou a caracterização do *stripper* gasoso, uma vez que as pressões de gás inseridas em seu interior foram de, pelo menos, um milhão de vezes inferiores à pressão atmosférica.

Capítulo 2

Materiais e métodos

A execução das medidas de interação de feixes de íons com o *stripper* gasoso foi o resultado de todo um processo de montagem de equipamentos, projeto de uma câmara para o *stripper* e calibração de sensores.

Inicialmente, um extenso trabalho laboratorial foi realizado, partindo da montagem do acelerador de partículas até a realização de ajustes finais de suas condições para realização dos experimentos.

Em paralelo, a discussão do projeto do *stripper* e sua câmara e o acompanhamento de sua construção com especialistas na área de vácuo e aceleradores permitiriam a concretização da ideia do *stripper* gasoso.

Por fim, após a conclusão destas duas etapas, os testes iniciais e a calibração de equipamentos de medição fecharam o ciclo que tornou possível a realização de medições de interação de feixe de íons com *stripper* gasosos.

Nas seções a seguir serão apresentados alguns detalhes de cada uma destas etapas, caracterizando assim o arranjo experimental utilizado neste trabalho.

2.1 Montagem do implantador

A etapa inicial do trabalho de construção e ensaio da câmara de *stripper* gasoso consistiu na montagem do acelerador de partículas, mais especificamente um Implantador Iônico de partículas com 400 kV de tensão nominal no terminal. Este equipamento, parte do novo Laboratório de Implantação Iônica (LIO) do Instituto de Física da USP (referência [13]), foi remontado e colocado em funcionamento após a sua importação da Alemanha.

Desde a parte de tecnologia de vácuo, preparação de câmaras e restituição de vedações para plena operação da máquina, até o conhecimento das diferentes fontes de íons disponíveis para a extração de feixe, todas as etapas de funcionamento deste acelerador foram trabalhadas.

Vale ressaltar que um segundo implantador de menores dimensões, com tensão de aceleração até 70 kV, também faz parte deste Laboratório.

2.1.1 A estrutura do acelerador

Um desenho esquemático ilustrando as principais partes do acelerador é mostrado na figura 2.1.

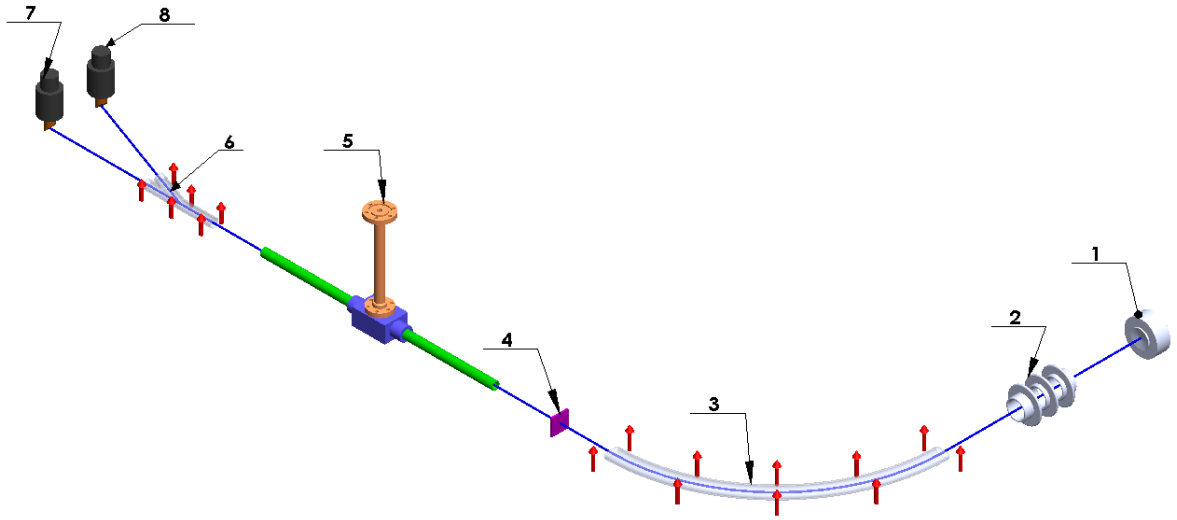


Figura 2.1: Desenho esquemático das principais partes do Implantador Iônico utilizadas no trabalho. Em detalhe, a fonte de íons (1), a lente eletrostática tipo Einzel (2), o imã seletor de carga/massa de 90° (3), o primeiro Copo de Faraday de referência (4), o *stripper* gasoso (5), o imã de canalização (6), o Copo de Faraday na "linha zero" (7) e o Copo de Faraday para medição dos feixes carregados na "linha 30° (8).

Um desenho esquemático dos potenciais existentes neste acelerador é mostrado na figura a seguir.

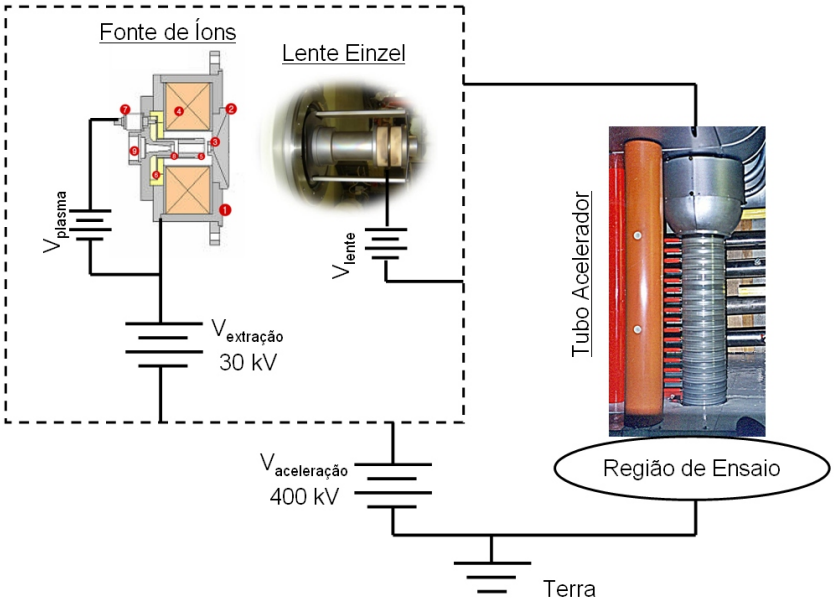


Figura 2.2: Esquema dos potenciais existentes no Implantador Iônico. Inicialmente, o potencial (V_{plasma}) gera um elevado campo elétrico no interior da fonte de íons ionizando as partículas do meio. O potencial de extração ($V_{extracao}$) extrai estas partículas gerando o feixe de íons, com um potencial de até 30 kV. A seguir, a geometria da lente e o potencial (V_{lente}) focalizam o feixe para dentro do ímã. Por fim, o feixe é acelerado no tubo acelerador pelo potencial de aceleração ($V_{aceleracao}$).

Algumas imagens do acelerador são mostradas abaixo. Primeiramente, é mostrado o módulo principal do acelerador, onde o feixe de íons é gerado, pré-acelerado e focalizado pela lente Einzel para dentro de um ímã de 90°.

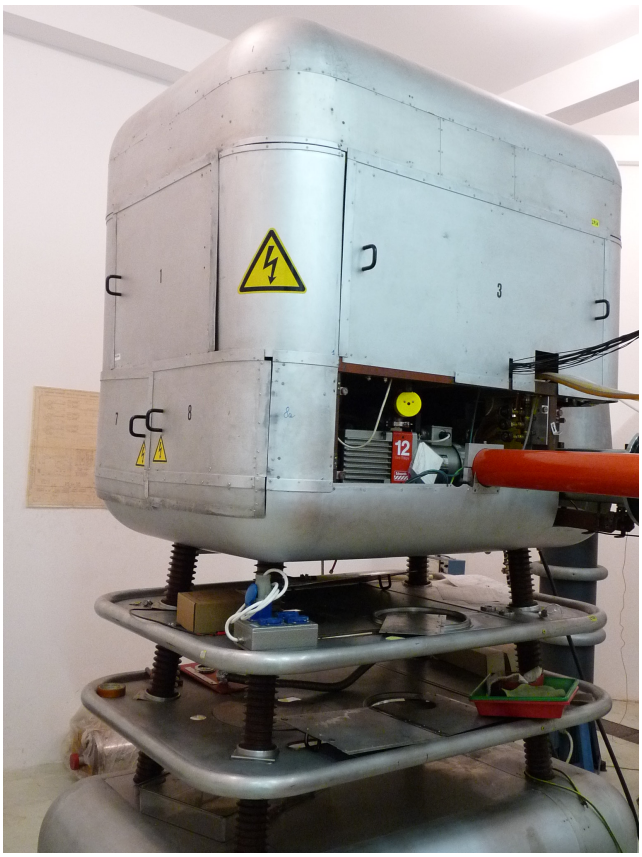


Figura 2.3: Módulo de Alta Tensão com fonte de íons, sistema de vácuo e controle embarcados, para geração e aceleração de feixes de íons. A tensão máxima nominal do módulo é de 400 kV. Em referência ao esquema do acelerador (figura 2.1), dentro deste módulo estão incluídos os componentes de 1 a 3.

Internamente ao módulo de aceleração, muitos equipamentos de vácuo, controle e geração de alta tensão (para pré-aceleração) trabalham com seu potencial de referência ("terra") em 400 kV. Por limitações de montagem do acelerador, trabalhou-se apenas com o potencial de extração da fonte de íons para dar energia ao feixe (embora as primeiras etapas de montagem do acelerador tenham resultado em elevação da tensão deste módulo em até 50 kV). Desta maneira, todo o módulo de aceleração que eleva a tensão de referência trabalhou aterrado.

Maiores detalhes sobre os equipamentos deste módulo são apresentados na figura a seguir.

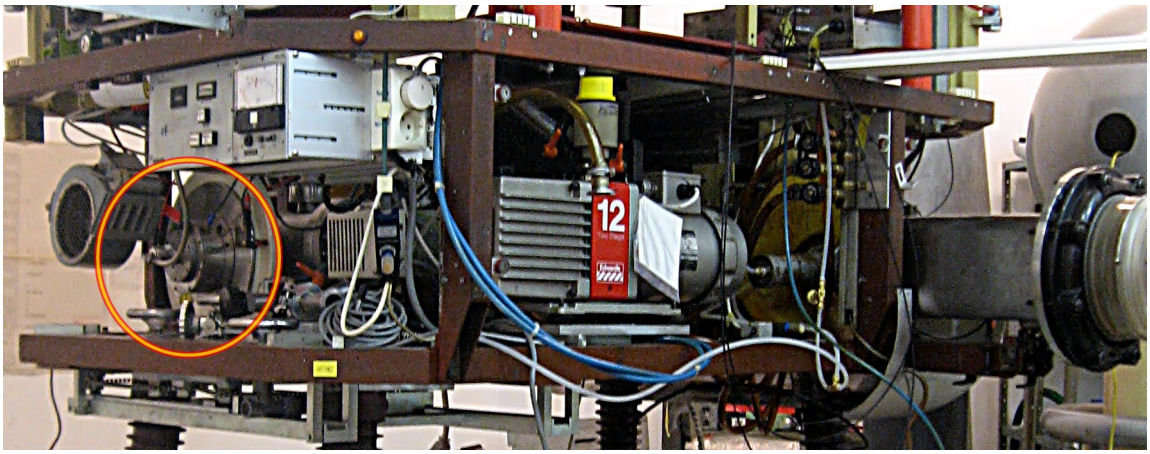


Figura 2.4: Módulo de pré-aceleração do feixe de íons, na parte interna do módulo apresentado na figura 2.3. Em destaque a fonte de íons.

Como comentado acima, as primeiras tentativas de passar o feixe pelo acelerador de partículas levaram em consideração a possibilidade de elevação da tensão do módulo acelerador. Desta maneira, inicialmente o acelerador foi completamente montado. Após o módulo de aceleração, foram instalados peças do acelerador na seguinte ordem: tubo acelerador, tripleto quadrupolar para focalização de feixe, ímã seletor de canalizações, um segundo tripleto quadrupolar e, por fim, a câmara do *stripper* gasoso.

Devido a problemas na transmissão do feixe pelo sistema na tentativa de aproveitar toda a energia disponível no acelerador (através da elevação do potencial de referência), decidiu-se trabalhar apenas com a tensão de extração da fonte. Isso ocorreu devido a dificuldades de focalização e alinhamento da máquina como um todo.

Esta simplificação do acelerador resultou na impossibilidade de trabalhar-se com energias de feixe mais altas, como aquelas utilizadas pelas referências deste trabalho no AMS de baixas energias ([26, 28, 29]), mas não inviabilizou a caracterização dos processos.

A montagem utilizada neste trabalho, conforme esquematizado na figura 2.1, não utilizou tubo acelerador e tripletos quadrupolares. Posicionou-se a câmara do *stripper* gasoso logo após a saída do ímã de 90°. Após a câmara do *stripper*, o ímã de canalizações foi instalado, permitindo selecionar feixe carregado e feixe neutro. A figura 2.5 detalha esta nova montagem.

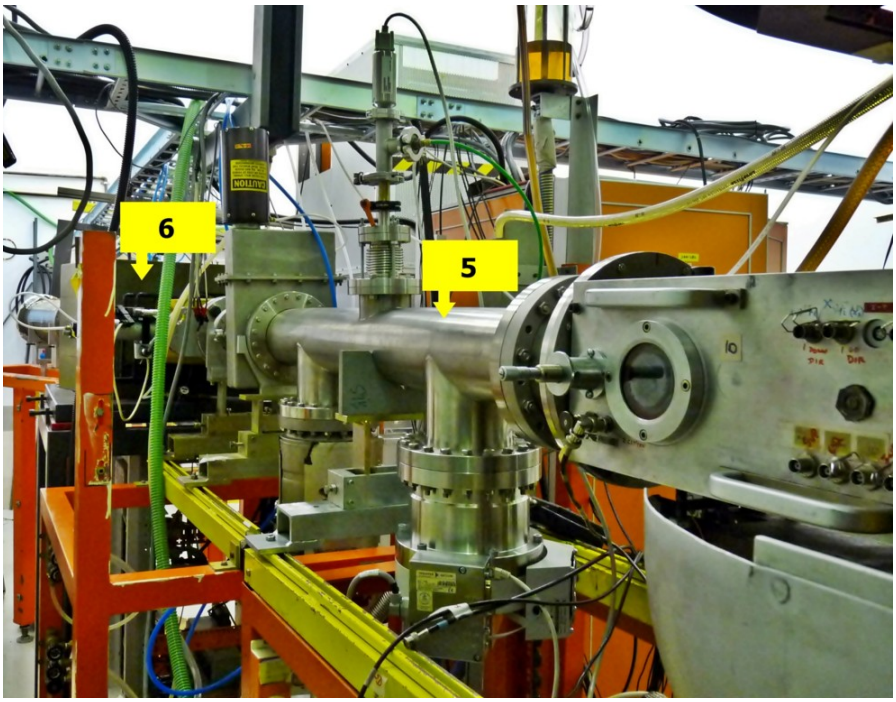


Figura 2.5: Montagem utilizada neste trabalho, com câmara do *stripper* gasoso e ímã seletor de canalizações, referenciados com os números 5 e 6 no esquema da figura 2.1.

Por fim, instalou-se Copos de Faraday na saída "zero graus" e na saída "30 graus" deste ímã, para medição de corrente de feixe.

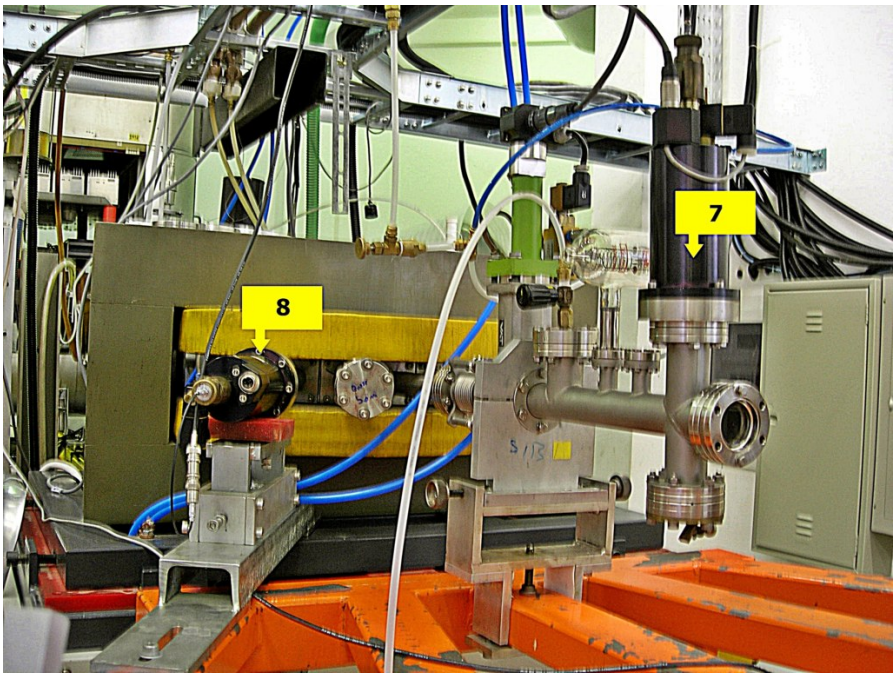


Figura 2.6: Copos de Faraday montados após o ímã de canalização, na linha "zero graus" e na linha 30 graus, para distinção entre feixe neutro e seleção de carga do feixe ionizado. Equipamentos sinalizados pelos números 7 e 8 no esquema do acelerador, da figura 2.1.

Esta montagem experimental permitiu produzir feixes de íons positivos através de ionização de gases e aceleração destes íons através de potencial de extração de até 30 kV.

É importante ressaltar novamente que, atualmente, a tensão do implantador é positiva, o que implica que somente são gerados feixes de partículas carregadas positivamente. Esse é um problema para execução de AMS de ^{14}C, uma vez que o nitrogênio é um gás altamente abundante e também é formado juntamente com um eventual feixe de 14 u.m.a. Para eliminar esse elemento do feixe, a polaridade do implantador deverá ser invertida. Visto que não é formado feixe de nitrogênio negativo, garantir-se-á que apenas partículas que contenham carbono estarão no feixe (magneticamente selecionado para massa 14 u.m.a.).

2.1.2 Detalhes dos componentes do acelerador

Alguns elementos utilizados no experimento são apresentados nesta seção para caracterização do arranjo experimental. O primeiro deles, a fonte de íons, é mostrado abaixo (item

número 1 da figura 2.1). Esta é uma fonte tipo PIG (*Penning Ionization Gauge*), capaz de extrair feixes através da injeção de gases. Todos os feixes produzidos neste trabalho utilizaram esta fonte de íons, esquematizada na figura 2.7.

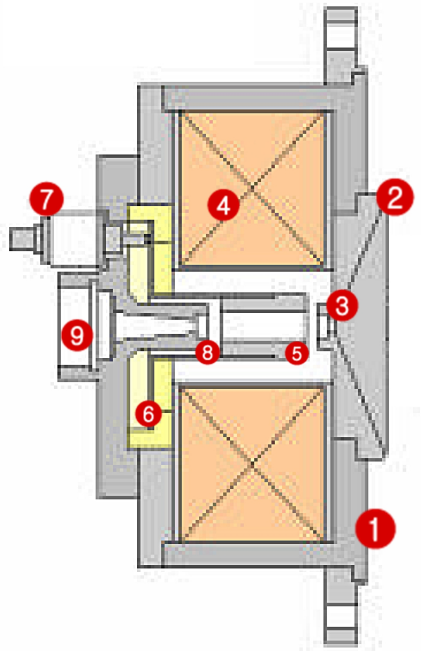


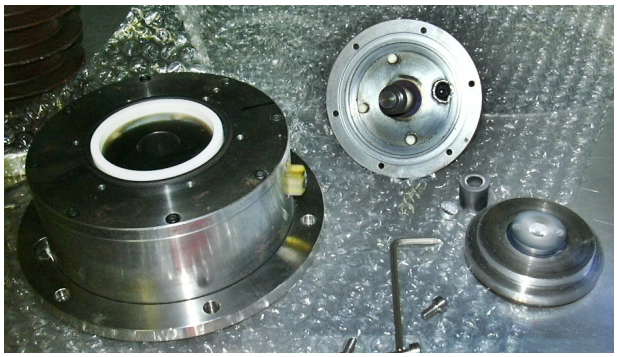
Figura 2.7: Fonte de Íons tipo PIG, utilizada para extração dos feixes (referência [18]). Em detalhe, (1) o encapsulamento externo, (2) peças do pólo catodo, (3) o catodo, (4) bobina para o campo magnético, (5) anodo, (6) isolante, (7) alimentação para alta tensão, (8) disco do catodo, (9) injeção de gás.

De maneira simplificada, esta fonte de íons funciona injetando-se um gás que contenha partículas que se deseja criar o feixe, através da região 9. Com a aplicação de uma tensão através do conector representado por 7, um elevado campo elétrico é formado entre as peças 8 e 5 e entre 5 e 3. Quando partículas do gás passam por este campo elétrico, elétrons são extraídos de seus átomos, formando íons positivos e elétrons. Como também há um elevado campo magnético nesta região, formado pela bobina 4, esses elétrons passam a espiralar e colidir com outras partículas no meio, ionizando-as. Este é o processo de criação de plasma na fonte de íons. Por fim, como há o potencial de extração (a fonte de íons está em um potencial mais elevado que o restante da máquina), os íons são acelerados em direção à saída da fonte. Está

formado o feixe de íons.

Algumas imagens desta fonte de íons são apresentadas abaixo.

(a) Foto da Fonte de Íons

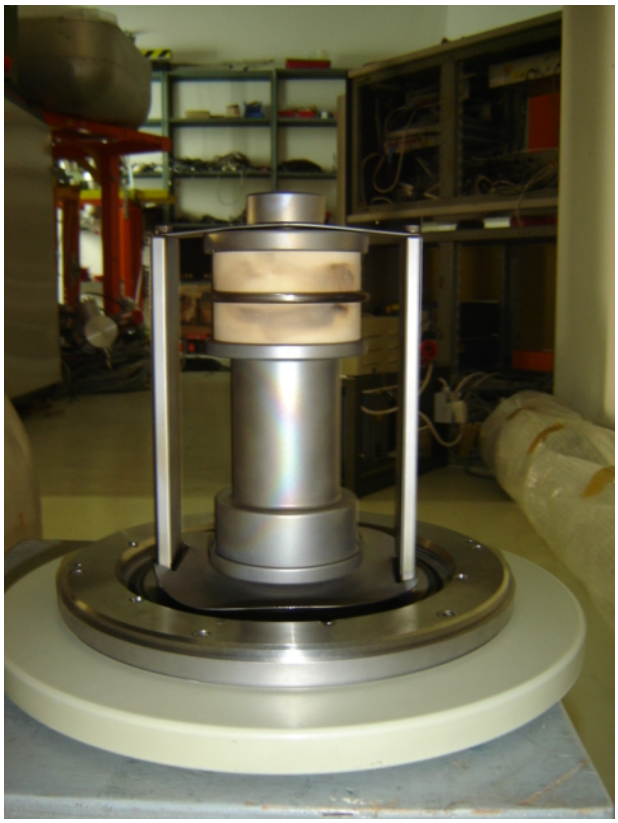


(b) Foto da Fonte de Íons desmontada

Figura 2.8: Fonte de Íons utilizada para extração de feixes utilizando-se gases como fonte de partículas.

Maiores detalhes sobre esta fonte de íons podem ser encontrados na referência [18].

Logo após a fonte de íons, uma lente Einzel foi utilizada para focalização do feixe (item número 2 da figura 2.1). Após este ponto do acelerador, utilizando feixe de Argônio, por exemplo, obteve-se medição de até 300 μA de corrente de feixe. Em seguida, um ímã de raio 500 mm e deflexão de 90° foi utilizado para a seleção de carga/massa (terceiro item da figura 2.1). Estes dois componentes são mostrados na figura 2.9.



(a) Lente Einzel, após a fonte de íons

(b) Ímã seletor de carga/massa, de raio 500 mm e deflexão de 90°

Figura 2.9: Lente para focalização e ímã para seleção do feixe de íons, localizados após a fonte de íons no módulo de aceleração do Implantador Iônico.

Em seguida, foi montado um colimador circular de diâmetro 3 mm para seleção do diâmetro do feixe de íons e medição da corrente elétrica do feixe incidente. A medição da corrente elétrica que incidia sobre as paredes do colimador foram utilizadas como referência à intensidade do feixe, isto é, assumiu-se que a proporção entre o feixe que passava pelo colimador e o feixe que parava nele era constante. Desta maneira era possível verificar a estabilidade da fonte de íons e criar um parâmetro para normalização dos feixes medidos (as análises serão apresentadas sempre em função deste feixe total incidente).

Finalmente, o feixe passava pelo *stripper* gasoso e era então selecionado pelo ímã de canalização (item número 6 da figura 2.1) para diferenciação de estados de carga na saída do *stripper* e medidas de átomos provenientes de quebras de moléculas. Copos de Faraday permitiam a leitura de corrente de feixe. Imagens mais detalhadas sobre estas etapas serão apresentadas

nas seções a seguir, que tratam especificamente da câmara do *stripper* e do sistema de medição de corrente do feixe.

Para finalizar a descrição da montagem do Implantador Iônico, é mostrada na figura 2.10 uma imagem do feixe de íons após passar por todas as etapas descritas acima.

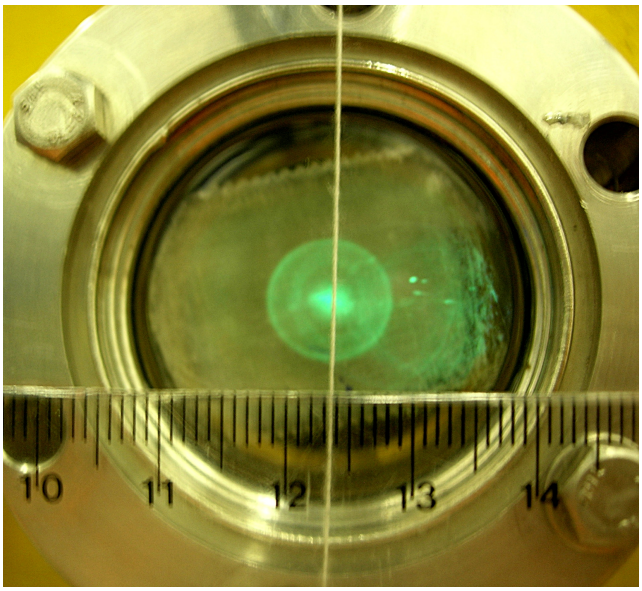


Figura 2.10: Visualização do Feixe de Íons após atravessar todas as etapas do acelerador. Nesta imagem, o *stripper* gasoso estava sem inserção de gás.

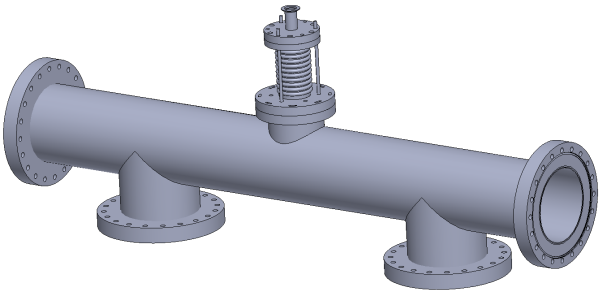
Esta imagem foi obtida inserindo-se uma janela de quartzo ZnS (Sulfeto de Zinco) no final da canalização mostrada na figura 2.6. O efeito de luminescência deste sal, quando atingido pelo feixe de íons, permite verificar o perfil deste feixe. Neste caso, não havia inserção de gás no *stripper* gasoso.

2.2 Projeto e construção da câmara

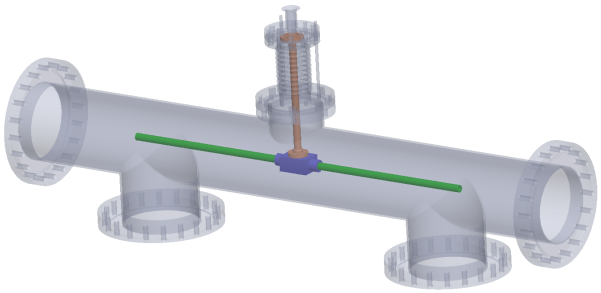
O projeto do *stripper* gasoso, feito em conjunto com o corpo técnico de vácuo do Laboratório Pelletron do Instituto de Física da USP, seguiu os padrões de *stripper* existentes na literatura [14, 15, 16, 17]: tubos compridos (da ordem de 700 mm) e finos (cerca de 7 mm) para garantir a possibilidade de baixa pressão dentro do tubo (operando sob regime molecular de pressão)

e uma suficiente quantidade de partículas no caminho do feixe.

A criação deste *stripper* gasoso consistiu em duas etapas fundamentais: a câmara externa e a estrutura de injeção e manutenção de fluxo de gás. A figura 2.11 mostra desenhos esquemáticos da câmara e do *stripper*.



(a) Câmara externa do *stripper* gasoso.



(b) Detalhes do interior da câmara do *stripper*, evidenciando os tubos de injeção de gás no caminho do feixe de íons.

Figura 2.11: Desenhos esquemáticos da câmara do *stripper* com detalhes do *stripper* gasoso.

Na câmara externa, duas bombas turbo de alto-vácuo (de 500 l/s cada) mantêm o sistema em pressões da mesma ordem de grandeza que as pressões de todo o implantador iônico (mesmo com a injeção de gás no *stripper* gasoso ativa). Além das conexões para estas bombas e para as duas extremidades da canalização (permitindo a conexão com o acelerador de partículas), uma conexão superior foi projetada para a montagem do sistema de injeção de gás. Imagens desta câmara externa podem ser observadas na figura 2.12.

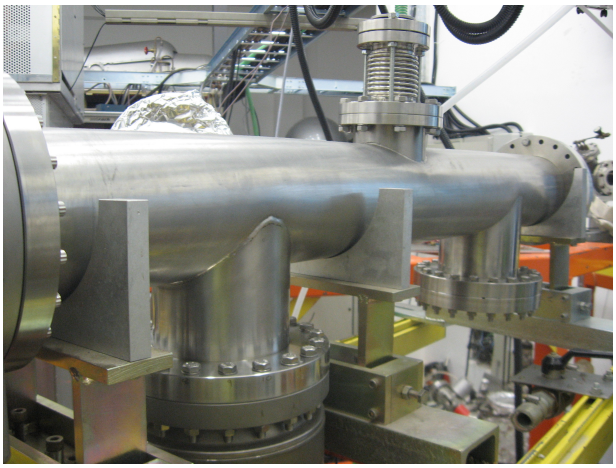


Figura 2.12: Imagem da câmara do *stripper* gasoso.

Na conexão superior desta câmara, um sistema de alinhamento do tubo do *stripper* gasoso foi projetado, disponibilizando quatro graus de liberdade para alinhamento deste tubo com o feixe de íons.

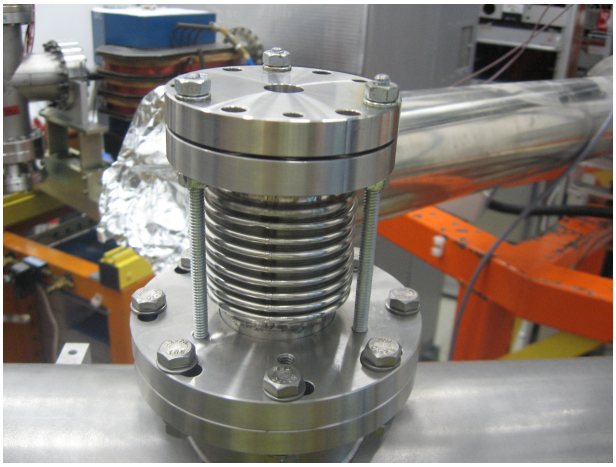


Figura 2.13: Detalhe do sistema de alinhamento do tubo do *stripper* no interior da câmara, que permite ajustes na direção vertical e nos três graus de liberdade de rotação.

O suporte do tubo do *stripper* na região central da câmara é mostrado na figura 2.14. Este suporte pode ser trocado, possibilitando uma eventual troca do tubo do *stripper*. Isso torna possível também a substituição do tipo de geometria do *stripper* (esta possibilidade será discutida no capítulo 8).

Figura 2.14: Tubo suporte para injeção de gás e sistema de fixação do *stripper*. Todo o alinhamento desse sistema é realizado com as facilidades mostradas na figura 2.13. A peça de suporte do tubo pode ser substituída para uma eventual troca do tubo do *stripper*.

Uma válvula agulha, com controle manual de vazão, foi conectada à parte superior deste tubo de injeção de gás, juntamente com o medidor de pré-vácuo. Ela permitia o controle das pressões de injeção de gás no *stripper* e, consequentemente, da quantidade de partículas que haveria no caminho do feixe.

Os desenhos técnicos, apresentados no final desse trabalho no anexo A, constituem o projeto de construção desta câmara. As imagens acima ilustram o resultado final de sua construção e montagem no implantador iônico.

As dimensões do *stripper* serão apresentadas mais adiante, na tabela 3.8.

Neste ponto, o implantador e o *stripper* estavam prontos para serem operados. Maiores detalhes sobre os sistemas de medição de pressão e corrente elétrica de feixe são apresentados na seção a seguir, para complementar a caracterização do arranjo experimental montado no Implantador Iônico.

2.3 Equipamentos de medição

Diversos equipamentos foram utilizados para medir as grandezas físicas envolvidas nos experimentos deste trabalho. Dentre eles, destacam-se aqueles que foram fundamentais para

a extração de dados (medição de corrente dos feixes de íons, de gás no interior do *stripper*, campos magnéticos para seleção de carga/massa). Diversas outras medições relativas ao funcionamento do acelerador, que foram instaladas em sua etapa de montagem, não serão apresentadas aqui pois não produzem efeitos diretos sobre os resultados experimentais deste trabalho.

Assim sendo, uma descrição mais detalhada sobre os principais equipamentos de medição é apresentada a seguir.

2.3.1 Medição de corrente do feixe - copos de Faraday

Os feixes de íons eram medidos em três diferentes pontos do acelerador: no colimador anterior à entrada do *stripper* (uma placa quadrada metálica de 5 cm de lado, com um furo cônico central com diâmetro de 3 mm), em um Copo de Faraday na linha "zero grau" do ímã seletor (após o *stripper*) e em um Copo de Faraday na "linha 30°" deste mesmo ímã. No esquema do acelerador apresentado anteriormente (figura 2.1), estes pontos são representados pelas partes 4, 7 e 8, respectivamente.

A figura 2.15, abaixo, mostra uma foto desses dois últimos Copos de Faraday, posicionados nas linhas do ímã de canalização.

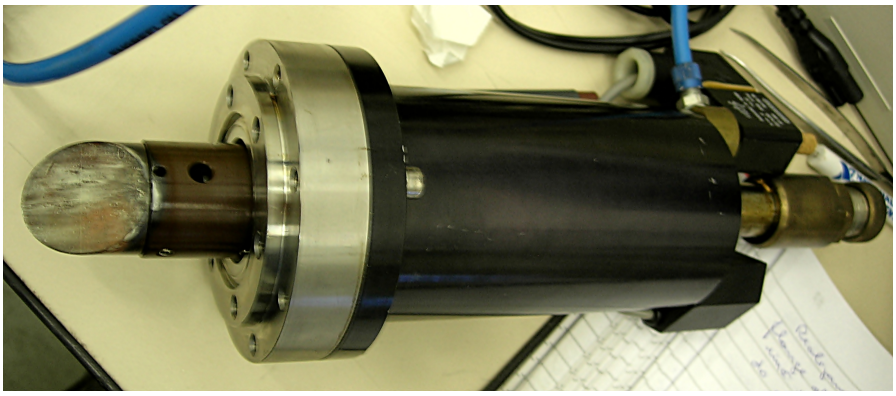


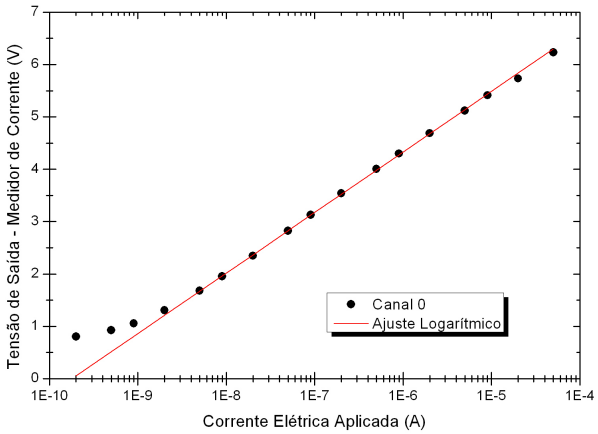
Figura 2.15: Modelo de Copo de Faraday utilizado para medição de corrente de feixe após a passagem pelo *stripper*, posicionados na "linha zero" e na "linha 30 graus" do ímã de canalização

Para a medição da corrente elétrica nesses Copos de Faraday foi utilizado um pico-amperímetro

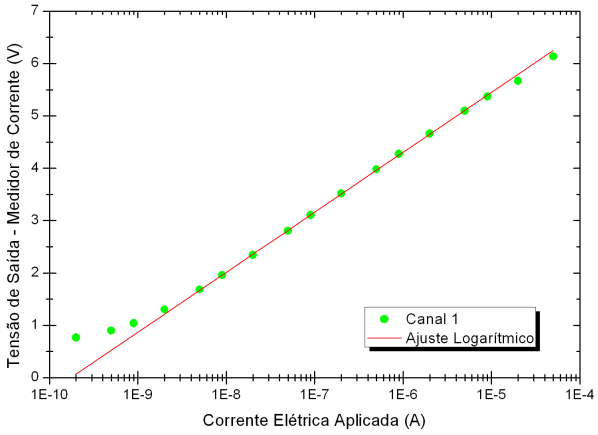
desenvolvido pelo Laboratório Pelletron do Instituto de Física da Universidade de São Paulo. Este medidor possui ganho logarítmico, permitindo que cinco ordens de grandeza pudessem ser lidas - medição no intervalo $[10^{-10}; 10^{-5}]$ A.

A corrente elétrica do copo, lida por um dos cinco canais deste equipamento, gerava então um sinal analógico (em tensão elétrica). Uma instrumentação virtual foi desenvolvida com o software LabView (*National Instruments*) foi desenvolvida para a leitura desse sinal analógico e integração dele ao longo do tempo.

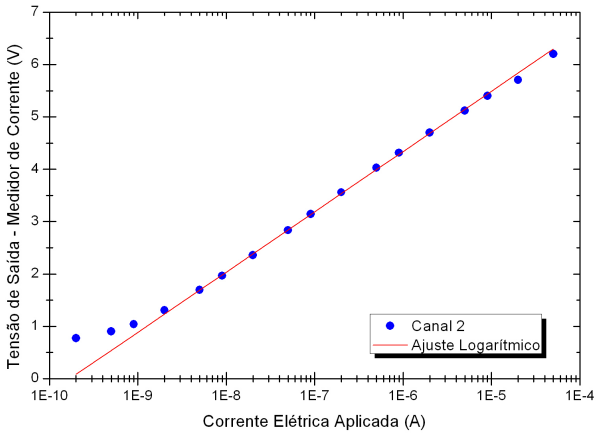
Realizou-se uma calibração deste medidor através de uma fonte padrão de corrente elétrica existente no laboratório Pelletron. Correntes elétricas foram geradas entre 5 nA e $0,9$ μA e inseridas em cada um dos canais do medidor. A tensão elétrica resultante era medida por uma placa A/D na *National Instruments*. A seguir, são mostrados os gráficos resultantes dessa calibração.



(a) Calibração relativa ao Canal 0.



(b) Calibração relativa ao Canal 1.



(c) Calibração relativa ao Canal 2.

Figura 2.16: Calibração do sistema de medição de corrente elétrica nos Copos de Faraday.

É importante observar que correntes inferiores a 2 nA não são adequadamente lidas pelo equipamento utilizado. O tamanho do cabo que liga o Copo de Faraday ao medidor, as condições de aterramento do sistema e fatores ligados à não linearidade do medidor para baixas correntes elétricas tornaram esta faixa de medição inadequada para o trabalho. Alguns dados foram extraídos com essas correntes de feixes e são apresentados no capítulo de Resultados, apenas para mostrar a existência de feixe. No capítulo 5, de Análise dos Resultados, os dados referentes a estas correntes foram desprezados.

Um ajuste logarítmico foi realizado para inserção desses dados no conjunto medidor integrador, conforme apresentados pelas retas da figura 2.16. As equações resultantes destes ajustes, mostradas nos gráficos acima, foram:

- Canal 0 - canal de medição da corrente elétrica na fenda colimadora, posicionada anteriormente à entrada do *stripper* gasoso. Ajuste do gráfico 2.16(a):

$$V = 1,157 \cdot log_{10}(I) + 11,273 \tag{2.1}$$

- Canal 1 - canal de medição da corrente elétrica no Copo de Faraday da "linha zero" do ímã seletor de massa, posicionado após o *stripper* gasoso:

$$V = 1,146 \cdot log_{10}(I) + 11,181 \tag{2.2}$$

- Canal 2 - canal de medição da corrente elétrica no Copo de Faraday da "linha 30 graus" do ímã seletor de massa, posicionado após o *stripper* gasoso:

$$V = 1,151 \cdot log_{10}(I) + 11,245 \tag{2.3}$$

Uma importante consideração deve ser feita com respeito a essa medição. Tipicamente, os Copos de Faraday possuem formato de "copos", isto é, constituem-se de uma base circular envolvida por uma placa em torno de sua circunferência externa. Esse formato propicia a

captura de elétrons e outros íons que saiam do próprio copo pelo processo de *sputtering* (remoção de partículas de material pela incidência de outra partícula). Isso garante que a corrente elétrica medida nesse modelo de Copo de Faraday seja somente devido à carga das partículas do feixe.

Com esse modelo padrão de Copo de Faraday, a incidência de feixe neutro resultaria na medição nula de corrente elétrica do feixe. Porém uma importante parcela do feixe que sai do *stripper* gasoso, para as energias estudadas nesse trabalho (até 30 keV), é constituída de partículas neutras, sem carga elétrica. Não seria possível medir o feixe neutro com Copos de Faraday tradicionais.

Decidiu-se então utilizar placas metálicas como Copos de Faraday para esse trabalho. Com elas, a medição de corrente elétrica pela incidência de feixe de partículas resulta na medição dos dois fenômenos em conjunto: a deposição de carga elétrica ao longo do tempo dos íons do feixe e a remoção de elétrons do Copo de Faraday pelo efeito de *sputtering*. Como o feixe de íons extraídos da fonte de íons era sempre positivamente carregado e a extração de elétrons de uma placa resulta em uma carga espelho positiva na placa, os dois efeitos se somam para formar a corrente elétrica total medida pela eletrônica descrita acima. No caso do feixe neutro (incidindo sobre o Copo de Fadaday da "linha zero" do ímã seletor), somente o efeito de *sputtering* produziu corrente elétrica.

Assim sendo, uma consideração foi realizada neste trabalho: cada partícula incidente sobre o Copo de Faraday extrai um elétron secundário. Assim, os efeitos de deposição de carga elétrica do feixe e de extração de elétrons secundários possuem o mesmo peso para um feixe de carga positiva "+1". Desta maneira, as correntes elétricas medidas nos Copos de Faraday de referência e da "linha 30º" foram divididas por dois (no caso de feixe com carga "+1"), para possibilitarem uma comparação com a corrente medida na "linha zero".

2.3.2 Incertezas devido às leituras dos copos de Faraday

Certamente esta é a etapa com maior dificuldade de estimar a incerteza deste trabalho. As medições de corrente de feixe nos Copos de Faraday foram realizadas de forma indireta, medindo-se, além da carga depositada pelo feixe nestes copos, as cargas ejetadas do sistema quando na colisão do feixe. O principal fenômeno de emissão de partículas de uma placa com a incidência de um feixe é a ejeção de elétrons secundários desta placa.

Além das incertezas nas medições devido ao processo de geração de elétrons secundários, há também de se considerar a estabilidade da fonte de íons.

Uma discussão sobre esses dois fatores é apresentada a seguir.

Considerações sobre elétrons secundários

Este é um processo bastante complicado de ser tratado. Há muitos estudos sobre a emissão de elétrons secundários decorrentes da microscopia eletrônica, onde o processo de formação das imagens depende deste fenômeno.

Destes estudos (referência [33]) é possível verificar a dependência entre o rendimento de extração de elétrons secundários. Um gráfico deste rendimento em função da energia da partícula incidente sobre uma placa de cobre é mostrado abaixo, na figura 2.17.

É interessante observar neste gráfico o comportamento assintótico do rendimento de produção de elétrons secundários.

Porém, em microscopia eletrônica, o feixe é composto de elétrons. No trabalho experimental aqui apresentado, o feixe de partículas é composto de átomos e moléculas. No exemplo da figura 2.17, há também a restrição em energia. O estudo apresentado nesse gráfico foi realizado apenas para feixe de até 3 keV enquanto no experimento realizado utilizou-se energia de 30 keV.

Com base neste gráfico, mesmo se tratando de uma situação experimental diferente das condições deste trabalho, foi assumido que cada partícula incidente nos Copos de Faraday produziam um elétron secundário, independentemente da carga desta partícula. Como dito,

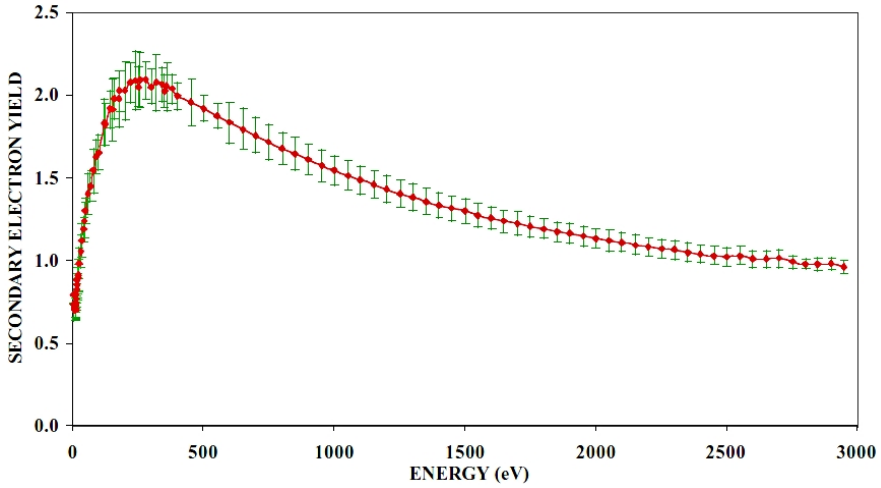


Figura 2.17: Gráfico de rendimento de extração de elétrons secundários de uma placa de cobre, em função da energia da partícula incidente sobre essa placa. Neste caso da referência [33], o feixe de partículas é composto de elétrons.

esta é uma aproximação bastante delicada, passível de um extenso estudo para determinação acurada de sua validade.

Uma simples verificação experimental desta aproximação foi realizada. Com um feixe de íons de Ar^+ incidindo sobre o Copo de Faraday da "linha zero" (condição experimental: sem inserção de gás no *stripper* e campo magnético no imã de canalização ajustado para zero), a corrente elétrica medida neste Copo foi observada. Aproximou-se então um ímã permanente junto ao Copo de Faraday. Observou-se a redução em um fator dois na medida de corrente elétrica.

A aproximação de um ímã ao Copo de Faraday provoca um efeito de retorno dos elétrons secundários ejetados deste copo. Ao saírem da placa de cobre, por possuírem carga e velocidade, esses elétrons sofrem o efeito do campo magnético e retornam à placa. A consequência deste fenômeno é a leitura apenas da carga depositada pelo feixe de íons no Copo de Faraday; o fenômeno do elétron secundário é suprimido neste caso.

A redução da corrente elétrica por um fator dois indica que a aproximação 1:1 (um elétron secundário para cada partícula incidente) é uma boa aproximação para a estimativa da intensidade do feixe.

Por fim, uma segunda verificação foi realizada. Com gás no *stripper* e campo magnético no ímã de canalização, apenas partículas neutras chegavam ao Copo de Faraday da "linha zero". Como apresentado nos gráficos do capítulo 4, a interação de feixe neutro com o Copo de Faraday produz medição neste copo devido à produção de elétrons secundários. A aproximação do ímã permanente a este Copo de Faraday zerou a leitura de corrente elétrica, indicando o retorno de todos os elétrons secundários ao copo.

Mesmo sem valores exatos de rendimento de extração de elétrons secundários dos Copos de Faraday, toda a análise deste trabalho foi encaminhada fundamentada nesta consideração. Uma incerteza grande pode estar associada à esta aproximação. Porém não foi possível avaliá-la quantitativamente.

Estabilidade da fonte de íons

Todas as análises de dados foram realizadas considerando-se a corrente de feixe medida no Copo de Faraday de referência. Esta corrente elétrica referente à parcela do feixe que era parada no colimador foi considerada diretamente proporcional à intensidade total de feixe. Esta proporcionalidade é válida no caso da óptica da fonte e dos elementos do acelerador serem constantes.

Porém, principalmente na geração de feixes que continham Carbono, eram verificadas instabilidades na fonte de íons. Durante a realização das medições, o processo de formação de plasma na parte interna da fonte se modificava e efeitos desta flutuação da fonte eram observados nas medições dos Copos de Faraday. Todas as correntes de feixe dos copos após o *stripper* caíam, enquanto que a corrente do Copo de Faraday de referência aumentava.

Este é um indicativo de flutuação na energia do feixe que resultava em um desvio pelo ímã seletor de carga/massa, tirando-o do centro do acelerador. Estava alterada a proporcionalidade entre a intensidade de feixe que passava pelo colimador e a parcela que era por ele parado.

Quando estas flutuações eram acentuadas, a medição era abortada e o feixe de íons otimizado novamente para obtenção dos maiores valores de corrente nos Copos de Faraday.

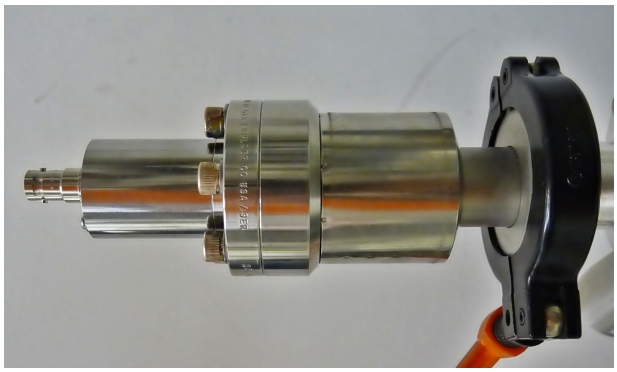
Por fim, procurou-se estimar as incertezas na leitura de corrente elétrica do feixe nos

Copos de Faraday. Baseado na verificação das flutuações da fonte de íons e nos desvios do rendimento de geração de elétrons secundários, estas incertezas devem ser da ordem de 10%. Vale ressaltar que um método mais acurado de medição de corrente elétrica deve ser desenvolvido para trabalhos futuros.

2.3.3 Medição de Gás no *Stripper* - Medidores de Vácuo

Para os cálculos de espessura do *stripper*, quantidade de partículas existentes no caminho do feixe, foram medidas as pressões de injeção de gás no topo do tubo suporte do *stripper* (através de um medidor de pré-vácuo) e na câmara do *stripper* (medidor de alto-vácuo). As fotos desses equipamentos são apresentadas na figura 2.18, abaixo.

(a) Medidor de pré-vácuo.



(b) Medidor de alto-vácuo.

Figura 2.18: Medidores de vácuo utilizados para medição da pressão de injeção de gás no *stripper* e pressão da câmara do *stripper*, para posterior cálculo da espessura do *stripper*.

Através das medidas de pressão no topo do tubo suporte, realizada pelo medidor de pré-vácuo da MKS, a estimativa do perfil de pressão no interior dos tubos cilíndricos pode ser realizada. Foi possível assim calcular a espessura de gás no *stripper* para as diversas condições experimentais, variando-se o tipo de gás e as pressões no interior do *stripper*.

2.3.4 Medição de campos magnéticos nos ímãs - sonda Hall

Uma sonda Hall foi instalada no primeiro ímã após a fonte de íons, para a correta seleção do feixe que se desejava.

Há uma grande proximidade entre os núcleos de ferro e a canalização dos ímãs seletores de massa e energia do acelerador. Isso impossibilitou a medição de campo magnético no ímã na região de campo uniforme (na parte interna deste ímã). Porém, como é sabido que o campo magnético nas bordas de um ímã é proporcional ao campo magnético em seu interior, as medições de campo foram realizadas na borda do ímã seletor.

Foi realizada então uma busca por todos os feixes existentes saindo da fonte de íons. Variava-se a corrente elétrica nas bobinas do ímã até encontrar picos de medições de feixe no Copo de Faraday da "linha zero" do acelerador. Através de estimativas iniciais de quais feixes sairiam mais intensos (por exemplo, para um gás nobre, é esperado para a fonte de íons utilizada um feixe mais intenso de átomos do gás carregados positivamente em uma unidade de carga elétrica) foi possível calcular qual o campo que deveria ser medido para os outros feixes que também deveriam estar saindo da fonte, de acordo com a equação 2.4.

$$B \cdot R = \frac{\sqrt{2 \cdot m \cdot E}}{q} \tag{2.4}$$

Nesta equação, B é o campo magnético necessário para defletir uma partícula de massa m, energia E e carga q por um ímã de raio R.

Assim, uma calibração de feixe de íons em função do campo magnético medido na borda do ímã foi ajustada e é apresentada na figura 2.19.

O ajuste linear destes pontos resulta em uma inclinação de 0,9748(30), isto é, o campo magnético medido na borda do ímã é 3,5% diferente do campo que realmente atua no feixe.

Igualmente para o ímã de canalização, após o *stripper* gasoso, foi utilizado uma sonda Hall. As medições de campo magnético também foram aferidas previamente com a utilização de feixes conhecidos.

Finalmente o campo magnético de um ímã gerado por corrente elétrica em bobinas e

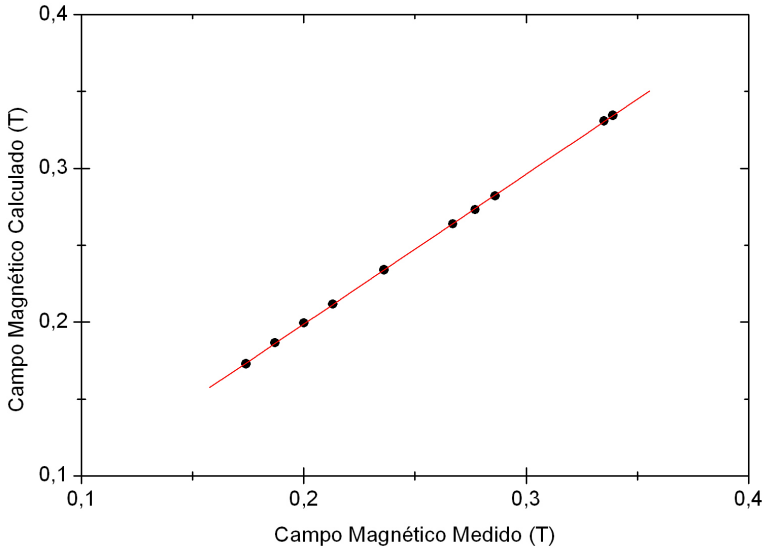


Figura 2.19: Gráfico de calibração do ímã seletor, para os diversos feixes gerados no decorrer deste trabalho.

concentração de campo magnético através de núcleo de ferro apresenta histerese. Para não haver dúvidas relativas à massa e à energia das partículas que saíam do feixe (selecionadas pelo ajuste de corrente elétrica desse ímã), todas as seleções de massas/energias eram realizadas sempre aplicando-se corrente elétrica no sentido crescente. Ao término de uma medição, a corrente elétrica do ímã era totalmente cessada antes da posterior aplicação de nova corrente elétrica. Isso minimizou os efeitos do fenômeno de histerese existente na medição.

Capítulo 3

Estudo do perfil de pressão em *stripper* gasosos

Neste capítulo serão descritas as modelagens utilizadas nos cálculos de perfil de pressão no interior do tubo do *stripper* gasoso, para que a distribuição de gás no caminho do feixe de íons pudesse ser caracterizada.

Partindo das equações de condutância de tubos, o modelo de perfil de pressão para o *stripper* foi desenvolvido, considerando-se injeção de gás no centro do *stripper* e desgaseificação de suas paredes. As condições de contorno utilizadas foram referentes às pressões em seu centro e nas suas extremidades.

Porém, entre o centro do *stripper* e o medidor de vácuo da injeção de gás havia o tubo suporte do *stripper*. Como a medição de pressão foi realizada acima deste tubo suporte, será desenvolvido o modelo de perfil de pressão no *stripper* que leva em consideração este tubo.

Um exemplo de perfil de pressão para esta modelagem será apresentado utilizando-se os parâmetros do *stripper* construído neste trabalho.

Por fim, a caracterização da quantidade de gás (ou espessura do *stripper*) inserida à frente do feixe de íons será apresentada.

3.1 Definição de grandezas

De acordo com [19, 20, 21, 22], dentre as grandezas físicas estudadas em vácuo, destaca-se o *throughput* do sistema, *Q(t)*, que é uma referência à vazão de energia cinética média de translação das moléculas existentes no sistema de vácuo - equação 3.1.

$$Q(t) \equiv kT \cdot \frac{dN(t)}{dt} \tag{3.1}$$

Nessa equação, o *throughput*, em unidade de potência, depende linearmente da temperatura T do meio e da variação temporal da quantidade de partículas N desse sistema. A constante de proporcionalidade entre essas grandezas é a Constante de *Boltzmann* k [20].

Outra grandeza importante para definição do regime de trabalho (e consequente equacionamento do problema) é o *livre caminho médio* λ, definido como o percurso médio de uma partícula entre dois choques consecutivos com partículas do meio - equação 3.2.

$$\lambda = \frac{k \cdot T}{\sqrt{2}\pi d_m^2 p} \tag{3.2}$$

Essa relação, dependente do diâmetro da partícula (ou molécula) d_m e da pressão p do meio, é determinante nas propriedades de transporte de partículas.

O diâmetro das partículas utilizadas neste experimento são, de acordo com [24], 140 pm para o Hélio, 188 pm para o Argônio e 216 pm para o Xenônio.

Finalmente, a determinação do regime de escoamento do vácuo em trabalho, é determinado pelo adimensional *número de Knudsen* K_n - equação 3.3.

$$K_n = \frac{\lambda}{D} \tag{3.3}$$

Nessa equação, o livre caminho médio das partículas é comparado com a dimensão típica D do volume estudado. Em tubos, por exemplo, o livre caminho médio das partículas é comparado ao diâmetro interno do tubo em que o gás se encontra.

3.2 Regimes de Trabalho

Fisicamente, o processo de deslocamento das partículas é estudado pela Teoria Cinética dos Gases.

Segundo essa teoria e os estudos atuais, modela-se o deslocamento das partículas sob circunstância de vácuo segundo quatro regimes: escoamento turbulento, escoamento laminar, regime intermediário e regime molecular. Fundamentalmente, esses regimes se diferenciam entre si pelo livre caminho médio das partículas do gás interno à câmara evacuada.

Os escoamentos turbulentos são decorrentes de pressões próximas à atmosférica e, em geral, não são tratados em estudos de vácuo.

O regime de escoamento laminar, por sua vez, é o processo no qual domina a interação entre partículas do gás. A interação das partículas com as paredes do sistema é o evento de menor freqüência. Esse processo ocorre geralmente em para situações onde $K_n < 0,01$. Nesse regime o meio se comporta como contínuo, como um fluido.

Na região de $K_n \in [0,01; 1]$, classifica-se o escoamento de partículas como regime intermediário, onde as leis que regem o movimento das partículas ainda não estão bem estabelecidas.

Para situações onde a interação das partículas com as paredes do meio é dominante em relação ao choque entre as partículas (isto é, o livre caminho médio das partículas é maior que a dimensão típica do meio), define-se o regime molecular de escoamento. A grande maioria dos experimentos em física de aceleradores acontece nessas condições e, portanto, é o regime mais estudado e melhor estabelecido. Aqui, $K_n > 1$ e as partículas do meio se comportam independentemente do meio. A agitação térmica das moléculas é que determina o transporte de gases. Nessas condições, a distribuição de Maxwell-Boltzmann é o modelo utilizado para descrever a distribuição de velocidades das partículas e é importante para a caracterização do escoamento.

Neste regime, quando uma partícula choca-se contra uma parede, ela é adsorvida e reemitida em uma direção que não guarda relação com a direção incidente. Em uma superfície "absolutamente" lisa, a distribuição angular de reemissão da partícula é proporcional ao cos-

seno do ângulo entre a direção de reemissão e o vetor normal à superfície no ponto de adsorção da partícula. Esse fenômeno é retratado pela *Lei de Knudsen*.

Nas condições de trabalho para AMS, em todo o acelerador a pressão é mantida abaixo dos 10^{-5} *mbar*, desejando-se manter o livre caminho médio das partículas do feixe bastante grande (para preservação das qualidades do feixe) e a região do tubo acelerador, onde o feixe é efetivamente acelerado, com o mais reduzido número de partículas, evitando assim o efeito de faiscamento nas regiões de alto gradiente de potencial elétrico. Assim, o regime molecular é predominante nessa região.

No interior do *stripper* injeta-se gás para modificação das características do feixe. Para evitar que se necessite de grande fluxo de gás, degradando a pressão do acelerador e forçando a operação das bombas turbo-moleculares, o tubo que constitui o *stripper* foi projetado com um grande comprimento. Dessa maneira, o fluxo de gás injetado pode ser menor, pois cada partícula permanecerá mais tempo no caminho do feixe, antes que saia estatisticamente por uma das pontas do tubo. Assim, associando a quantidade de gás ao reduzido diâmetro do tubo, garante-se que o fluxo de partículas em todo o acelerador, mesmo no interior do *stripper*, esteja sob o regime molecular.

3.3 Processo de bombeamento - tratamento discreto

Uma primeira aproximação de modelagem de um sistema de vácuo é através da caracterização de seus constituintes: a câmara de vácuo, a fonte de gases e o bombeamento. Essa aproximação, dita discreta, despreza que possa existir gradiente de pressão dentro da câmara, fazendo uma estimativa temporal da pressão média da câmara.

Os processos de injeção de gás no sistema são caracterizados neste modelo de equacionamento, podendo ser decorrentes de vários fatores: um vazamento real (entrada de ar na câmara por má vedação do sistema de vácuo que, quando identificado, deve ser eliminado), vazamento virtual (decorrente do acúmulo de gás em uma região ligada ao sistema por um meio de alta condutância e, portanto, vai injetando gás no sistema aos poucos - exemplo: rosca

de parafuso), vaporização (de líquidos existentes no meio, resquícios do processo de limpeza, por exemplo), sublimação (de eventuais sólidos no interior da câmara como a própria amostra de estudo), desgaseificação (lento processo de desprendimento - "desorção" - do gás absorvido ou adsorvido na superfície da câmara, sempre presente em sistemas a vácuo), permeação (passagem de partículas do meio externo ao meio interno, através das paredes da câmara devido à agitação térmica das moléculas), particulado da bomba de vácuo (principalmente de óleos provenientes de bombas mecânicas, responsáveis pelo pré-vácuo - até 10^{-3} *mbar* - e *backing* de bombas turbo-moleculares) e, finalmente, injeção controlada de gases, como no caso do *stripper*, onde se injeta o gás que interagirá com o feixe de íons.

O tratamento de cada um desses processos não é o escopo desse trabalho, mas pode ser verificado em [20]. Vale ressaltar que os principais processos aqui envolvidos são a injeção controlada de gás no *stripper* e a desgaseificação do material constituinte do tubo do stripper.

Todo o estudo dos elementos constituintes do acelerador de partículas e as bombas necessárias para sua manutenção foram realizados pelo fabricante do equipamento. Para a câmara do *stripper*, construída para este trabalho, inseriu-se duas bombas de grande vazão (500 l/min cada bomba) nas extremidades da câmara, garantindo a manutenção de baixíssimas pressões (10^{-5} *torr*) mesmo com a operação do *stripper* gasoso.

3.4 Processo de bombeamento - tratamento contínuo

A aproximação de elementos discretos, por sua vez, não é suficiente para tratar geometricamente o sistema de vácuo na região de injeção de gás no *stripper*, um tubo de grande razão comprimento-diâmetro. Como o objeto de estudo desse trabalho é a interação do feixe com as partículas desse meio, um conhecimento mais detalhado da distribuição de pressão no interior desse tubo fez-se necessário.

Para o caso do tubo do *stripper*, é necessário modelar a pressão como função da posição $\vec{r}$ e do tempo t para que se conheça a quantidade de partículas em função da injeção de gás ao longo de todo o caminho do feixe, dentro do tubo.

A modelagem que rege o transporte de gás, nesse caso, é proveniente de equações de difusão - diferenciais de segunda ordem. Nesse caso especificamente, modela-se a pressão em função da posição relativa ao eixo paralelo ao seu comprimento (variável x).

A equação de difusão para a pressão desse sistema, agora unidimensional, é dada por 3.4.

$$c \cdot \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} = -q(x,t) + v \cdot \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} \tag{3.4}$$

Nessa equação 3.4, c é a condutância específica do tubo por unidade de comprimento, *q(x,t)* é o *throughput* por unidade de comprimento e v é o volume por unidade de comprimento ($v = V/L$).

Por fim, o *throughput* em cada ponto do tubo é dado pela equação 3.5.

$$Q(x,t) = -c\frac{\partial p(x,t)}{\partial x} \tag{3.5}$$

As condições de contorno para a solução do problema, no caso de um tubo com injeção de gás no centro, são de três tipos:

- *Primeiro tipo - Dirichlet*: alguns valores de pressão são conhecidos para o sistema, como, por exemplo, a pressão na região central do tubo do *stripper* e a pressão na saída deste tubo.

- *Segundo tipo - Neumann*: valores de *throughput* do sistema são conhecidos, como, por exemplo, a desgaseificação do material de que o tubo é feito e a injeção do gás no centro do tubo é igual em ambas as direções (existe igual probabilidade de uma partícula ir para qualquer um dos lados do tubo, ao ser injetada no *stripper*). Com esta condição dá-se a equação 3.6.

- *Terceiro tipo - Robin*: o valor da pressão e do *throughput* do sistema são correlacionados.

$$\left.\frac{\partial p(x,t)}{\partial x}\right|_{x=centro} = 0 \tag{3.6}$$

Este é o principal equacionamento utilizado neste trabalho para o estudo do número de partículas no caminho do feixe de íons. Aplicando-se as características do *stripper* construído à equação 3.4, o perfil de pressão de gás dentro deste *stripper* foi estudado.

As condições de contorno do problema foram do tipo Dirichlet, medidores de pressão foram posicionados na entrada do tubo suporte do *stripper* e na câmara do *stripper*.

3.5 Condutância de tubos

No estudo de transporte de partículas, a condutância de uma estrutura caracteriza a taxa em que ela é capaz de transportar um fluído. Esta propriedade depende fundamentalmente das características geométricas desta estrutura e das propriedades do fluido em questão.

De acordo com [23], no caso de tubos com razão de forma comprimento/diâmetro (L/d) maior ou igual a dez, a condutância (C_M) é determinada pela equação 3.7a em função da temperatura (T) e da massa molecular M de que se constitui o gás (em unidades de Kelvin e unidades de massa atômica, respectivamente). Já a condutância específica do tubo (c) é definida pela equação 3.7b.

$$C_M = 3,81 \cdot \sqrt{\frac{T}{M}} \cdot \frac{d^3}{L} \tag{3.7a}$$

$$c = C_M \cdot L \tag{3.7b}$$

Essa equação é válida para o regime molecular de escoamento, onde o *Número de Knudsen* é maior que um.

3.5.1 Solução para tubos cilíndricos

Dessa maneira, no regime estacionário (quando a injeção de gás pela válvula no *stripper* e a retirada do gás pelas bombas de vácuo se estabilizam no tempo), é possível desenvolver a equação de difusão 3.4, para o problema unidimensional (com relação ao comprimento do tubo), conforme a equação 3.8.

$$\frac{d^2p(x)}{dx^2} = -\frac{q}{c} \tag{3.8}$$

Para completa solução desse problema, adotou-se o centro do tubo como origem e as condições de contorno adequadas ao experimento deste trabalho. Neste caso, as extremidades do tubo ($x = L/2$ e $x = -L/2$) são definidas com pressão igual à da câmara do *stripper* - p_{out} - e com a pressão no centro do *stripper* é p_{centro}. Como há simetria no sistema, o problema pode ser resolvido apenas para metade do tubo, "espelhando-a" para a outra extremidade.

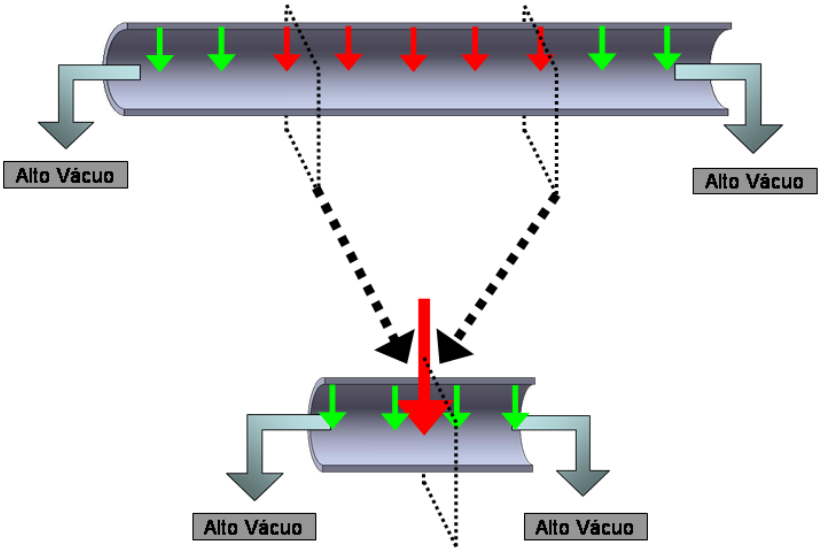
A modelagem do *throghput* q do sistema, no caso do *stripper* gasoso, foi feita considerando-se apenas a taxa de desgaseificação das paredes do tubo (constante ao longo de todo o tubo), uma vez que a condição de contorno é do tipo de Dirichlet (são conhecidas pressões em pontos notáveis do tubo).

Há uma outra maneira bastante interessante de modelar este sistema. O *stripper* pode ser aproximado por um trecho de um tubo bastante longo, com taxa de desgaseificação constante em toda a sua extensão. Nesta modelagem, a única injeção de gás no sistema é através da desgaseificação das paredes do tubo.

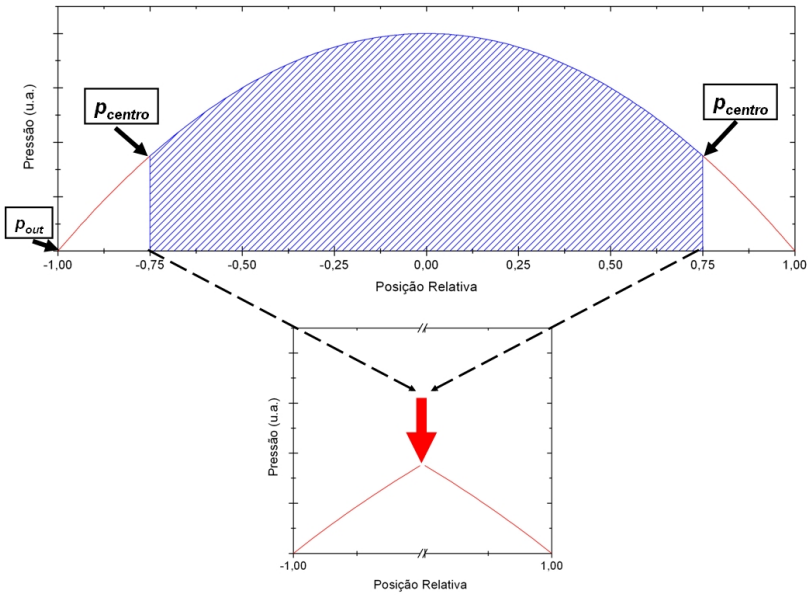
A solução deste problema (tubo longo com apenas desgaseificação das paredes) é a distribuição parabólica de pressão com derivada igual a zero no centro (detalhes do cálculo em [19]). Como o *stripper* gasoso possui condição de contorno de pressão conhecida em seu centro, sua modelagem final é feita através do corte desse modelo de tubo longo nos dois pontos onde as pressões são iguais à pressão no centro do *stripper*.

A parte central do tubo modelo representa a injeção de gás do *stripper* real. Toda a desgaseificação de sua parede é igual à parcela de gás injetada no centro do *stripper*. Para a obtenção do perfil de pressão do *stripper* real, retira-se esta parte central do *stripper* e une-se as extremidades, formando um novo tubo. A desgaseificação desta parte central passa a ser a injeção de gás pontual.

O perfil de pressão do *stripper* consiste então na união do perfil de pressão dos dois trechos das extremidades deste tubo longo. A figura 3.1 mostra um esquema desta modelagem.



(a) Desenho esquemático da modelagem do *stripper* gasoso. A união das extremidades do tubo representa o *stripper*, enquando a desgaseificação da região central do tubo modelo, quando reduzida a um ponto, representa a injeção de gás no *stripper*.



(b) Acima, representação do perfil de pressão de um longo tubo com injeção de gás consistindo apenas na desgaseificação de suas paredes. A secção do perfil nos pontos de pressão do centro do tubo do *stripper* e a união das extremidades desta seção representam o perfil de pressão do *stripper* gasoso com injeção de gás pontual em sua região central.

Figura 3.1: Modelagem utilizada para o cálculo do perfil de pressão no *stripper* com injeção central de gás. As setas vermelhas e verdes representam *throughputs* do sistema; as menores representam a degaseificação das paredes do tubo e a maior representa a injeção central de gás.

Por fim, foi necessário obter a taxa de desgaseificação específica do aço inox. Fatores como rugosidade da superfície, processo de limpeza, incidência de feixe, entre outros, podem fazer com que este parâmetro varie de algumas ordens de grandeza.

De acordo com [19], a taxa de degaseificação de um material é encontrada na literatura por unidade de área de material (q_e). Como o equacionamento de difusão requer a taxa de degaseificação específica do tubo por unidade de comprimento (q), deve-se multiplicar o valor de referência da taxa de desgaseificação do material pela área total da parede do tubo e, por fim dividi-la pelo seu comprimento.

Desta maneira, o valor da taxa de desgaseificação específica por unidade de comprimento de um tubo é dado pela equação 3.9.

$$q = q_e \cdot \pi \cdot D \tag{3.9}$$

3.6 Consideração do tubo de conexão com o *stripper*

A modelagem do sistema não estaria completa se fosse considerado somente o tubo do *stripper*, como descrito acima, uma vez que a pressão na entrada do *stripper* não foi medida diretamente. Entre o *stripper* e o sistema de medição de pressão e injeção de gás, um outro tubo ("tubo suporte") de dimensões não desprezíveis era responsável pelo suporte mecânico do *stripper* e o transporte de gás até ele.

Desta maneira, também foi necessário modelar este tubo no problema para a correta obtenção da pressão no centro do *stripper* (p_{centro}). Esta modelagem foi realizada considerando-se o tubo suporte conectado a um segundo tubo, equivalente à associação em paralelo das duas metades do *stripper* gasoso (que será denominado, a partir de agora, como "tubo equivalente"). Um esquema desta modelagem é apresentado abaixo, na figura 3.2.

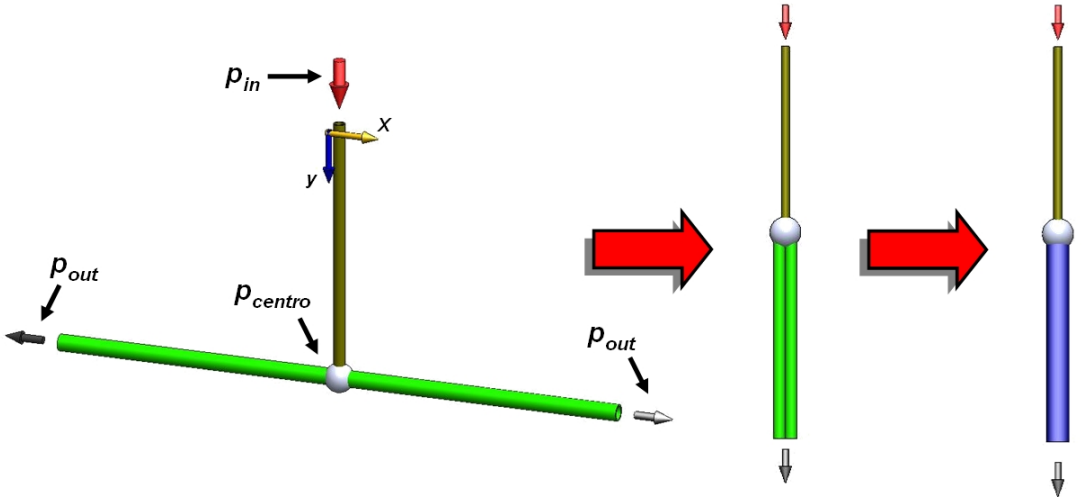


Figura 3.2: Modelagem do *stripper* gasoso em conjunto com o tubo suporte: o *stripper*, em verde, foi reduzido a um tubo equivalente cuja condutância específica é igual à condutância do conjunto dos dois semi-tubos do *stripper*.

Desta maneira, duas equações de perfil de pressão foram desenvolvidas, uma para cada trecho do sistema. Os termos referentes ao tubo suporte serão identificados através do índice 1 nas equações abaixo. Analogamente, os termos que se referem ao tubo equivalente possuirão índice 2. Assim, o perfil de pressão em cada um dos tubos é apresentado nas equações 3.10a e 3.10b.

$$p_1(y) = -\frac{q}{2 \cdot c_1} \cdot y^2 + B_1 \cdot y + C_1 \tag{3.10a}$$

$$p_2(x) = -\frac{q}{2 \cdot c_2} \cdot x^2 + B_2 \cdot x + C_2 \tag{3.10b}$$

Um eixo de coordenadas foi criado para cada um dos tubos. Para o tubo suporte, as coordenadas do eixo do tubo são referenciadas pela letra z e sua origem está situada no ponto de injeção e medição de gás (com pressão p_{in}, resultado de medição experimental). Já para o tubo equivalente, o sistema de coordenadas de seu eixo é referenciado pela letra x, tendo sua origem no ponto de intersecção dos dois tubos.

Para o cálculo da condutância específica do tubo equivalente, foi utilizado o fato de que a associação em paralelo da condutância específica de dois tubos de dimensões iguais resulta em

uma condutância específica equivalente de duas vezes a condutância de cada um dos tubos. Em outras palavras, utilizando a definição de condutância apresentada no início deste capítulo, a taxa de transporte de fluídos por um sistema composto de dois tubos é duas vezes maior que a taxa de transporte de apenas um desses tubos. Assim, para este tubo equivalente, sua contutância específica por unidade de comprimento (c_2) em relação à condutância específica por unidade de comprimento do tubo do *stripper* (c) será: $c_2 = 2.c$.

As condições de contorno para solução das equações de perfil de pressão deste sistema (equações 3.10a e 3.10b) são quatro:

Condição de Contorno	Equação
Pressão na injeção de gás conhecida (p_{in}), relativa a uma medição experimental.	$p_1(0) = p_A$
Pressão na saída do tubo equivalente conhecida, igual à pressão da câmara do *stripper* (também resultado de medição experimental) - p_{out}.	$p_2(L/2) = p_{out}$
Continuidade da pressão na intersecção dos tubos.	$p_1(h) = p_2(0)$
Continuidade do *throughput* na intersecção dos tubos.	$-c_1 \cdot \left(\frac{d}{dz}p_1(y)\right)\Big\vert_{z=h} = -c_2 \cdot \left(\frac{d}{dy}p_2(y)\right)\Big\vert_{y=0}$

Tabela 3.1: Condições de contorno para os cálculos de perfil de pressão do sistema composto pelo tubo suporte e pelo tubo equivalente.

A utilização destas condições de contorno nas equações 3.10a e 3.10b possibilitou a obtenção das constantes B_1, C_1, B_2 e C_2 como função apenas de características geométricas dos tubos e das duas pressões medidas, p_{in} na entrada do tubo suporte e p_{out} na saída do *stripper*. Esses valores são apresentados a seguir.

$$B_1 = \frac{1}{4} \cdot \frac{-4 \cdot q \cdot h \cdot c_1 \cdot L - 4 \cdot q \cdot h^2 \cdot c_2 - c_1 \cdot q \cdot L^2 + 8 \cdot c_1 \cdot c_2 \cdot (p_{out} - p_{in})}{c_1 \left(c_1 \cdot L + 2 \cdot h \cdot c_2\right)} \tag{3.11a}$$

$$C_1 = p_{in} \tag{3.11b}$$

$$B_2 = \frac{1}{4} \cdot \frac{-c_1 \cdot q \cdot L^2 + 4 \cdot q \cdot h^2 \cdot c_2 + 8 \cdot c_1 \cdot c_2 \cdot (p_{out} - p_{in})}{c_2 \cdot (c_1 \cdot L + 2 \cdot h \cdot c_2)} \tag{3.11c}$$

$$C_2 = \frac{1}{4} \cdot \frac{-q \cdot L^2 \cdot h - 2 \cdot L \cdot q \cdot h^2 + 4 \cdot L \cdot p_{in} \cdot c_1 + 8 \cdot p_{out} \cdot c_2 \cdot h}{c_1 \cdot L + 2 \cdot h \cdot c_2} \tag{3.11d}$$

Por fim, foi possível calcular a pressão no centro do *stripper* ($p_{centro} = p_1(h) = p_2(0) = C_2$) e utilizar o equacionamento descrito a seguir para obtenção do perfil de pressão para o *stripper* gasoso.

3.7 A equação do perfil de pressão dentro do *stripper*

A solução para o sistema estacionário com desgaseificação constante do tubo do *stripper* é dado pela equação 3.12. Esta solução considera as pressões no centro do *stripper* (p_{centro}) e nas suas extremidades (p_{out}) como parâmetro de entrada do problema.

$$p(x) = -\left(\frac{q_s}{2 \cdot c}\right) \cdot x^2 + a_1 \cdot |x| + a_0 \tag{3.12}$$

As constantes a_1 e a_0 desta equação são:

$$a_1 = \frac{p_{out} + \frac{q}{2 \cdot c} \cdot (L/2)^2 - p_{centro}}{L/2} \tag{3.13a}$$

$$a_0 = p_{centro} \tag{3.13b}$$

A partir daí, para qualquer[1] *stripper* gasoso construído com um tubo cilíndrico e um tubo suporte também cilíndrico, é possível calcular o perfil de pressão em seu interior em função de suas características geométricas e a medição das pressões notáveis.

3.8 Exemplo de perfil de pressão no *stripper* construído

Um exemplo de perfil de pressão aplicado ao trabalho experimental desenvolvido (o *stripper* gasoso construído) é apresentado para um caso específico de pressões p_{in} e p_{out}, em *stripper* de Argônio.

[1] É impressindível a verificação do regime de escoamento, dado pelas pressões e dimensões do *stripper*, para utilização do equacionamento desenvolvido.

Para tubos de aço inoxidável 304L, o material utilizado para construção do *stripper*, considerou-se a taxa de desgaseificação específica por unidade de área do material igual a $q_e = 1,0.10^{-8}\ mbar.l/(s.cm^2)$ (um valor típico). Uma análise de sensibilidade deste parâmetro será apresentado no capítulo referente às estimativas de incertezas (capítulo 6).

Os parâmetros utilizados neste exemplo são apresentados abaixo, na tabela 3.8.

Variável	Valor	Descrição
q_s	$3,0.10^{-8}\ mbar.l/(s.cm)$	Taxa de degaseificação específica por unidade de comprimento.
L	$40\ cm$	Comprimento total do *stripper*.
ϕ_{in}	$0,953\ cm$	Diâmetro interno do *stripper*.
h	$18\ cm$	Comprimento do tubo suporte.
$\phi_{suporte}$	$0,6\ cm$	Diâmetro do tubo suporte.
T	$294\ K$	Temperatura do experimento.
M	$40\ u.m.a.$	Massa da molécula de Argônio.
p_{in}	$1,0.10^{-3}\ torr = 1,3.10^{-3}\ mbar$	Pressão de injeção de gás na entrada do tubo suporte.
p_{out}	$1.0^{-5}\ torr = 1,3.10^{-5}\ mbar$	Pressão da saída do *stripper*.

Tabela 3.2: Parâmetros utilizados nos cálculos de perfil de pressão da situação exemplo no *stripper* gasoso.

Desta maneira, as condutâncias específicas por unidade de comprimento dos tubos e os parâmetros das equações de perfil de pressão foram calculados. Os resultados são apresentados na tabela 3.8.

Variável	Valor
c_1	$2,23\ l.cm/s$
c_2	$17,9\ l.cm/s$
B_1	$-6,44.10^{-5}\ mbar/cm$
C_1	$1,33.10^{-3}\ mbar$
B_2	$-8,05.10^{-6}\ mbar/cm$
C_1	$1,74.10^{-4}\ mbar$

Tabela 3.3: Parâmetros calculados para o exemplo de perfil de pressão.

Com isso, foi possível obter a pressão no centro do *stripper* (p_{centro}) e calcular os parâmetros do perfil parabólico do *stripper* em questão (equações 3.13a e 3.13b).

Variável	Valor
p_{centro}	$1,74.10^{-4}\ mbar$
a_1	$-8,05.10^{-6}\ mbar/cm$
a_0	$1,74.10^{-4}\ mbar$

Tabela 3.4: Parâmetros para obtenção do perfil de pressão dentro do tubo do *stripper*.

O gráfico de perfil de pressão é apresentado abaixo, na figura 3.3, mostrando a pressão calculada para todos os pontos ao longo do *stripper*.

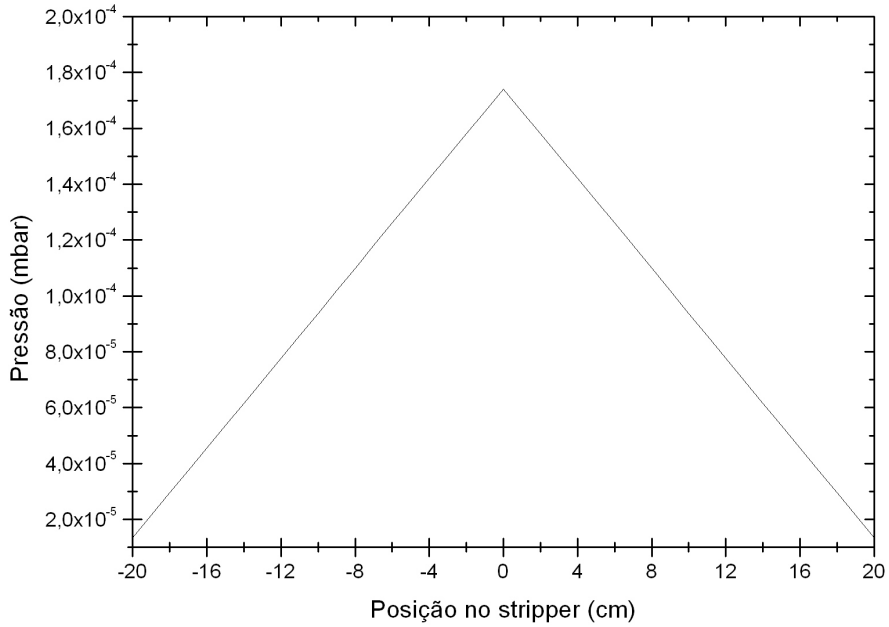


Figura 3.3: Perfil de pressão um para tubo cilíndrico com injeção de gás na parte central e taxa de desgaseificação constante ao longo de todo o tubo. Cálculo realizado para regime estacionário (não dependente do tempo).

É interessante verificar que a contribuição da desgaseificação das paredes não é elevada, fazendo com que o termo quadrático da equação seja bastante reduzido. O termo linear, por sua vez, é predominante. Este é o motívo da concavidade da parábola não ser pronunciada na figura 3.3.

Alguns outros exemplos de perfil de pressão são apresentados abaixo (figura 3.4), para exemplificar a distribuição de gás em função da pressão central do *stripper*.

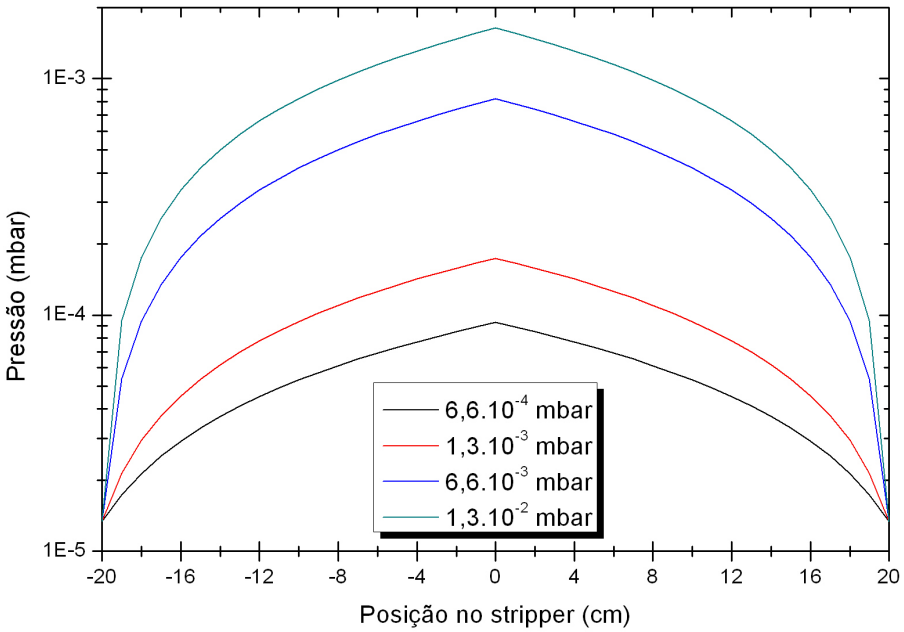


Figura 3.4: Outros exemplos de perfil de pressão parabólico em tubo cilíndrico, em regime estacionário. As curvas diferenciam-se apenas pela pressão medida na injeção de gás (p_{in}), acima do tubo suporte (controlada experimentalmente pela válvula de injeção de gás no sistema).

Nos cálculos referentes aos perfis de pressão apresentados na figura acima, a espessura do *stripper* e o número de Knudsen representativo de cada um dos casos são apresentados na tabela 3.8.

Pressão de Injeção p_{in} (mbar)	Espessura do *stripper* ($\mu g/cm^2$)	Número de Knudsen
$6,7.10^{-4}$	0,0035	292
$1,3.10^{-3}$	0,0061	155
$6,7.10^{-3}$	0,027	6
$1,3.10^{-2}$	0,054	3

Tabela 3.5: Espessura do *stripper* gasoso em função da pressão central do tubo do *stripper*, com perfis de pressão apresentados na figura 3.4. O número de Knudsen deve ser maior que um para evidenciar a validade dos cálculos.

Todas as pressões aqui apresentadas, utilizadas como condições de contorno para os cálculos que resultaram nas figuras 3.3 e 3.4, são pressões típicas do experimento realizado neste trabalho.

3.9 Validade dos cálculos

Outra importante análise realizada diz respeito à validade dos cálculos, através da análise do número de Knudsen (equação 3.3). A figura 3.5 mostra, para o mesmo caso analisado na figura 3.6, o valor deste adimensional em função da pressão do centro do *stripper*.

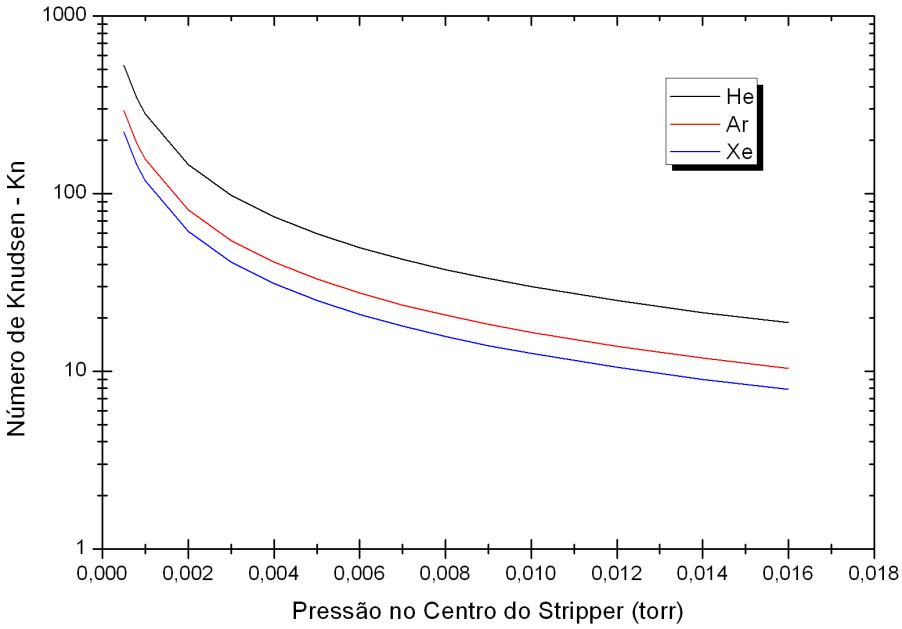


Figura 3.5: Número de Knudsen em função da pressão central do *stripper*, para verificação da validade das equações de escoamento utilizado. No regime molecular, aqui modelado, este número deve ser maior que um.

Esta figura 3.5 mostra a validade de todo o equacionamento aqui mencionado para o cálculo de espessura do *stripper*. É importante mencionar a validade do modelo também para o tubo suporte. Apesar de não mostrado aqui, o número de Knudsen para este tubo foi sempre maior que um, para todas as pressões utilizadas.

Um simples cálculo com a equação 3.3 mostra que, para este *stripper*, é possível utilizar este modelo para espessura de gás em pressões de injeção de até $5,8.10^{-2}$ *torr* para Hélio, $3,2.10^{-2}$ *torr* para Argônio e $2,4.10^{-2}$ *torr* para Xenônio.

3.10 Espessuras do *Stripper* Gasoso

Para obtenção do número total de partículas contidas no *stripper* e posterior cálculo da espessura do *stripper*, utilizou-se a Lei dos Gases Ideais. Obteve-se o número de moles presentes ao longo de todo o *stripper* através da pressão média $\bar{p}$ do *stripper* (equação 3.14) e do volume total V do tubo. Esta equação é apresentada abaixo - equação 3.15.

$$\bar{p} = \frac{1}{(L/2) - (-L/2)} \cdot \int_{-L/2}^{L/2} p(x)dx \tag{3.14}$$

$$n = \frac{\bar{p} \cdot V}{R \cdot T} \tag{3.15}$$

A média da pressão no exemplo descrito acima, calculada através da equação 3.14, é de $9,4.10^{-5}$ $torr$. Desta maneira, através da aproximação de Gás Ideal, o número total de moles dentro do tubo do *stripper* é $1,1.10^{-10}$ mol. Este é um número bastante reduzido, mostrando a possibilidade de se trabalhar com número de partículas no *stripper* realmente pequenos.

Por fim, a "espessura" (densidade superficial de área) E do *stripper*, em $\mu g/cm^2$ pode ser calculada através da equação 3.16.

$$E(\mu g/cm^2) = \frac{n \cdot M}{\pi \cdot (d/2)^2} \cdot 10^6 \tag{3.16}$$

Neste cálculo exemplo, a espessura calculada é de $0,006$ $\mu g/cm^2$).

Vale ressaltar que todas essas formulações são para geometrias de tubos onde o diâmetro é constante, isto é, a condutância ao longo de toda a geometria estudada é constante.

Por fim, para levar esses cálculos à situação experimental, foram feitos gráficos de espessura do *stripper* em função da pressão de gás na região central do tubo, para os diferentes gases utilizados no experimento (He, Ar e Xe).

Abaixo, a figura 3.6 mostra a espessura do *stripper* considerando a pressão de saída do tubo (p_{out}) igual a $1,0.10^{-5}$ $torr$, a temperatura (T) igual a 294 K, a taxa de desgaseificação por unidade de área do aço inox (q_s) igual a $1,0.10^{-8}$ $mbar.l/(s.cm^2)$ e o *stripper* com comprimento

$L = 40\ cm$ e $\phi_{in} = 0,953\ cm$.

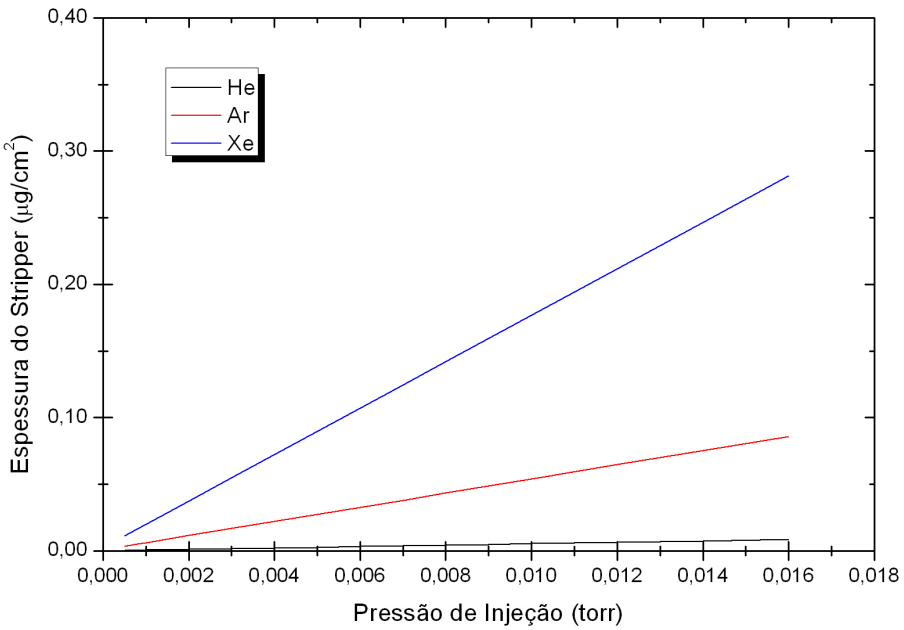


Figura 3.6: Dependência da espessura do *stripper* com a pressão no centro do tubo, para os diferentes tipos de gases utilizados no experimento.

É possível observar a dependência da espessura com a massa do elemento que constitui o gás do *stripper*. Ajustes de retas foram realizados nestas curvas. Após o ajuste, os coeficientes lineares destas retas foram divididos pela massa atômica da partícula que constitui o gás do *stripper*. Isso faz com que estas inclinações representem o número total de átomos por unidade de área, por unidade de pressão de injeção de gás no *stripper*. As inclinações destas puderam ser calculadas então, em função da massa atômica destas partículas, resultando no valor $0,1329(8)\ \mu g/(cm^2 \cdot torr \cdot u.m.a.)$.

Isso mostra que o número total de partículas dentro do *stripper* em função da pressão de injeção de gás (p_{in}) praticamente não depende do tipo de gás utilizado (o efeito da massa molecular do gás, na equação de condutância específica dos tubos - equação 3.7a - é desprezível). No entanto, na interação do feixe com o *stripper*, o tipo de gás utilizado é de grande importância, como será apresentado nos capítulos a seguir.

Finalmente, é importante constatar que o fator predominante no controle da espessura é a pressão de injeção de gás no *stripper* (p_{in}). O medidor utilizado para esta medição mostra sempre dois algarismos significativos. Considerando-se a leitura do último algarismo no mostrador do equipamento como sua incerteza (o que é razoável segundo seu manual, referência [25]), o pior dos casos é quando o medidor refere-se a uma leitura de $1,0.10^x$ torr (onde x é apenas uma referência à escala lida). Com esta consideração, a incerteza de leitura é de $0,1.10^x$ torr, resultando em 10% de incerteza na pressão.

Este é o caso do exemplo apresentado neste capítulo, onde a pressão de injeção é de $1,0.10^{-3}$ torr. Para uma variação da pressão de entrada no *stripper* (nos cálculos apresentados) igual a 10%, a variação de espessura do *stripper* é igual a 9%. Certamente este é o fator de maior sensibilidade nas estimativas de incerteza da espessura do *stripper*.

Outros fatores como as geometrias dos tubos e a pressão da câmara do *stripper* também propagam incertezas na espessura do *stripper*. Os parâmetros geométricos dos tubos foram medidos com incertezas de até 1%. A pressão de saída do *stripper* (p_{out}) tem sua incerteza devido ao medidor utilizado. No exemplo apresentado neste capítulo, uma variação de 10% na pressão p_{out} (uma estimativa de incerteza do medidor utilizado) resulta em uma variação de 1,2% na espessura total do *stripper*.

A combinação destas incertezas, assumindo-se a inexistência de correlação entre estas variáveis, resulta em uma incerteza de 9,2% no valor de espessura medido.

Capítulo 4

Medições experimentais

Diferentes feixes de íons positivos foram gerados na fonte de íons do implantador iônico para interagir com diferentes gases nobres no *stripper* gasoso. Dentre todos os feixes gerados, serão apresentados neste trabalho os resultados dos seguintes feixes:

- Feixe de argônio (Ar^{2+} e Ar^{+}), para estudo de troca de estado de carga;
- Feixe de gás carbônico (CO_2^{+}), com troca de estado de carga e quebra molecular;
- Feixe de monóxido de carbono (CO^{+}), com troca de estado de carga e quebra molecular;
- Feixe de oxigênio molecular (O_2^{+}).

Os feixes foram submetidos aos seguintes gases no *stripper* gasoso: Hélio (He), Argônio (Ar) e Xenônio (Xe).

Para cada uma das medições, a fonte de íons era primeiramente ajustada e aguardava-se pelo menos uma hora para sua estabilização. Em seguida, o gás era inserido no *stripper* através de uma válvula agulha até que se atingisse a pressão de injeção desejada no medidor de pressão. Iniciava-se então o integrador de corrente para que se obtivesse a estatística do feixe durante 100 segundos.

As medidas foram realizadas de acordo com o seguinte procedimento: para cada pressão no *stripper*, a corrente elétrica no ímã seletor de massa era posicionada buscando-se os picos

de corrente no Copo de Faraday da "linha 30°". A carga era integrada em todos os Copos de Faraday (colimador anterior ao *stripper*, Copo de Faraday da "linha zero" e Copo de Faraday da "linha 30°") para todos os picos encontrados com a variação deste imã.

Vale ressaltar que, como apresentado na seção 2.3.1, os valores de corrente elétrica medidos nos Copos de Faraday de referência e da "linha 30°" foram divididos por dois, para os casos de feixe com carga "+1", ou divididos por três, para os feixes com carga "+2". Isso se deve ao fato destes feixes interagirem de duas maneiras com os Copos de Faraday: deposição de sua carga elétrica nos copos e extração de elétrons secundários. Para permitir uma comparação com o feixe neutro, foi considerado apenas o fenômeno de extração de elétrons secundários através da execução desta operação.

Elevou-se as pressões do *stripper* até que as leituras de corrente de feixe nos Copos de Faraday ainda estivessem dentro das escalas de leitura da eletrônica de medição.

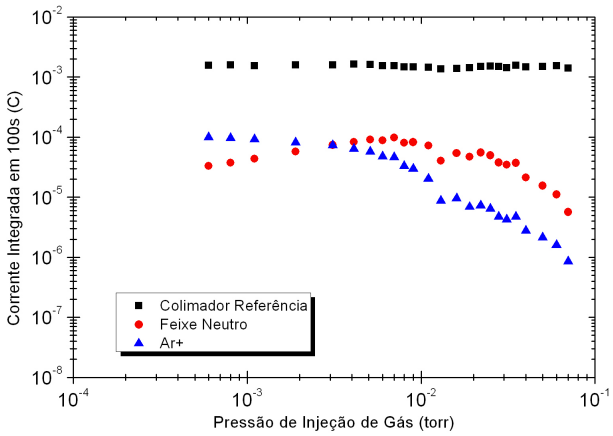
A seguir são mostrados os resultados obtidos para os diferentes feixes e gases utilizados no *stripper*.

4.1 Interação feixe-*stripper*

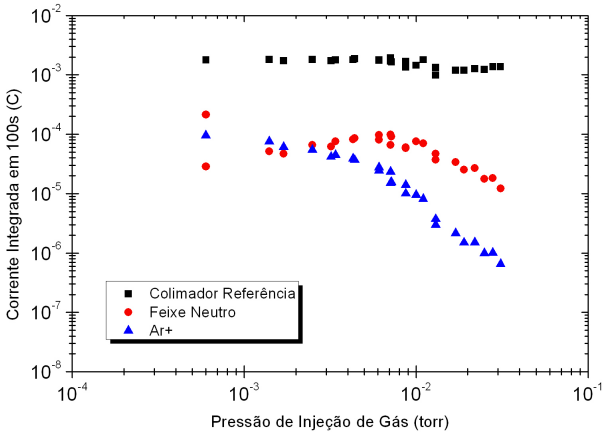
Os dados obtidos de corrente elétrica nos Copos de Faraday integrada durante 100 segundos para cada situação de feixe e gás no *stripper* são apresentados abaixo. Os gráficos foram agrupados nas seções a seguir de acordo com o feixe de partículas analisado.

4.1.1 Feixe de Argônio

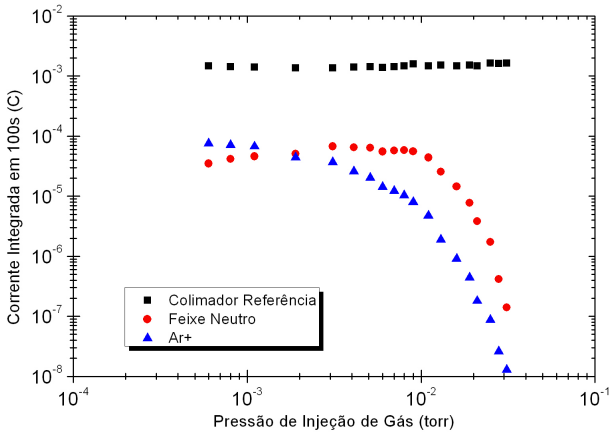
O feixe de Ar^+ foi gerado a partir de um reservatório de Ar (com pressão de 4 bar). Para esse estado de carga do feixe, seguem os resultados em função do tipo de gás no stripper.



(a) *Stripper* de He



(b) *Stripper* de Ar

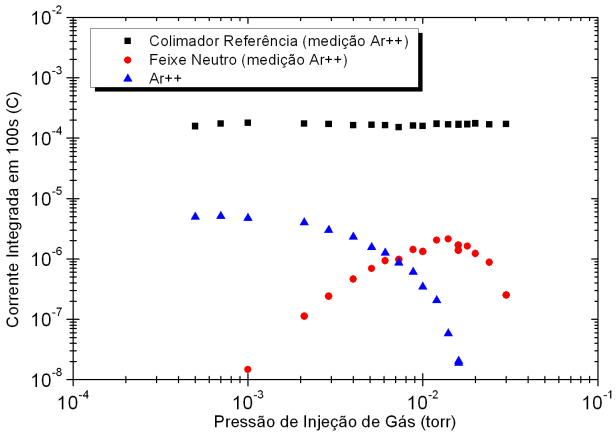


(c) *Stripper* de Xe

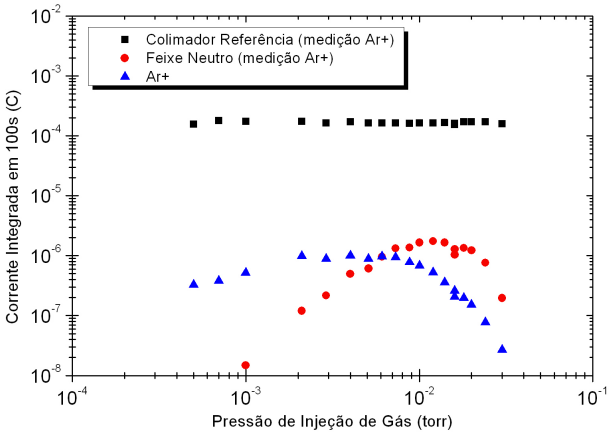
Figura 4.1: Gráficos de carga elétrica medida nos Copos de Faraday em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, para feixe de Ar^+.

É importante ressaltar que, para cada gás de *stripper*, era ajustada consecutivamente cada uma das pressões de injeção de gás, aguardando que estas estabilizassem. Para cada pressão, eram medidas (e integradas) as correntes elétricas geradas nos três Copos de Faraday simultaneamente: o colimador de referência, o Copo de Faraday da "linha zero" (para medição de feixe neutro) e o Copo de Faraday da "linha 30°" (para medição dos feixes carregados). Nos gráficos acima, cada valor de pressão apresenta três pontos correspondentes a cada um destes Copos de Faraday.

Também foi possível extrair feixe de Ar^{2+} da fonte de íons. Para este feixe, somente foi analisada a interação com *stripper* de Argônio. Os gráficos da figura 4.2 mostram os resultados experimentais separados de acordo com o campo magnético do ímã seletor de massa, de acordo com o feixe medido (Ar^{+} ou Ar^{2+}).



(a) *Stripper* de Ar - Medição do Feixe de Ar^{2+}



(b) *Stripper* de Ar - Medição do Feixe de Ar^{+}

Figura 4.2: Gráficos de carga elétrica total medida nos Copos de Faraday em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, para feixe de Ar^{2+}.

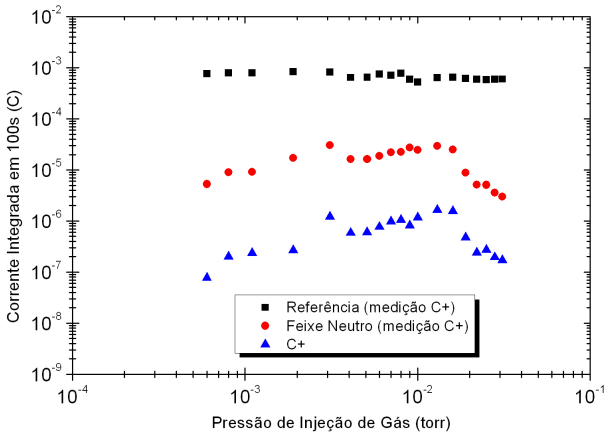
Os gráficos resultantes deste experimento são um pouco diferentes daqueles apresentados para o feixe de Ar^{+} . Na figura 4.2, ambos os gráficos são para um mesmo gás de *stripper* . No entanto, era necessário selecionar qual dos feixes seria medido no Copo de Faraday da "linha 30°", uma vez que eram esperados dois feixes diferentes com carga saindo do *stripper* : o feixe de Ar^{2+} e o feixe de Ar^{+} . Como as condições experimentais (feixe incidente e gás no *stripper*) eram iguais para uma mesma pressão em cada um dos gráficos (apenas a seleção do tipo de feixe medido na "linha 30°" mudava), era esperado que a medição no colimador de referência e a medição do feixe neutro fossem semelhantes em ambos os gráficos.

4.1.2 Feixe de monóxido de carbono - CO^+

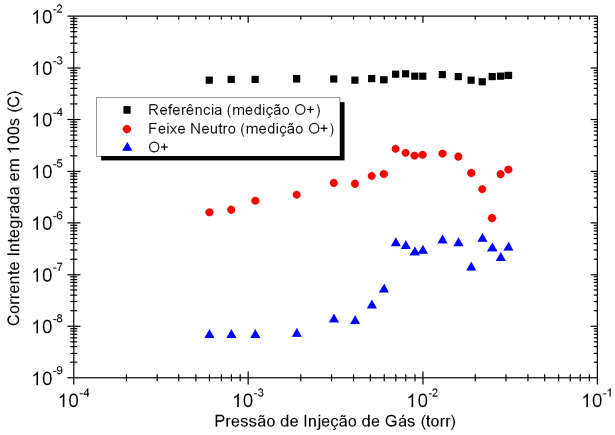
O feixe de monóxido de carbono (CO^+) foi extraído a partir de um reservatório de CO_2. O plasma da fonte de íons é condição suficiente para que diversos fenômenos ocorram na extração de feixe, como a troca de carga do gás e a quebra de molécula.

Assim, selecionando-se a relação carga/massa no ímã seletor, foi possível obter um feixe de CO^+ para o estudo de sua interação com o *stripper* gasoso. Os resultados destas interações são apresentados nas figuras a seguir.

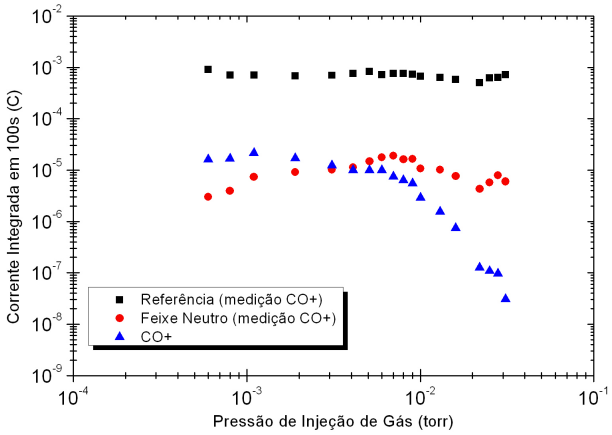
A interação do feixe de CO^+ com *stripper* de Hélio é apresentada nos gráficos da figura 4.3, abaixo.



(a) *Stripper* de He - Medição do Feixe de C^+



(b) *Stripper* de He - Medição do Feixe de O^+

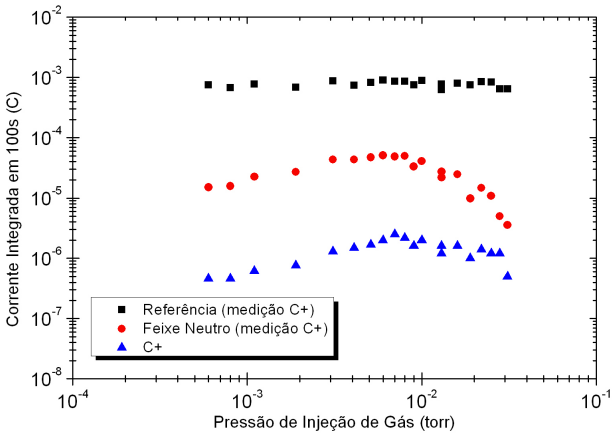


(c) *Stripper* de He - Medição do Feixe de CO^+

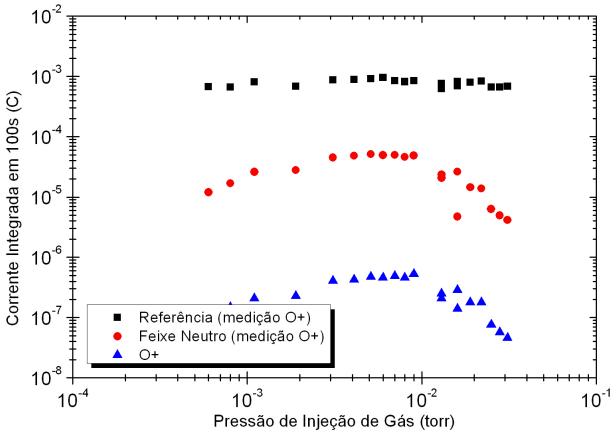
Figura 4.3: Gráficos de carga elétrica total medida nos Copos de Faraday em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, para feixe de CO^+ e *stripper* de Hélio.

Esta medição foi bem semelhante à medição do feixe de Ar^{2+} . Para todos os gráficos da figura 4.3, era esperado um comportamento semelhante entre as curvas do Copo de Faraday de referência e do feixe neutro.

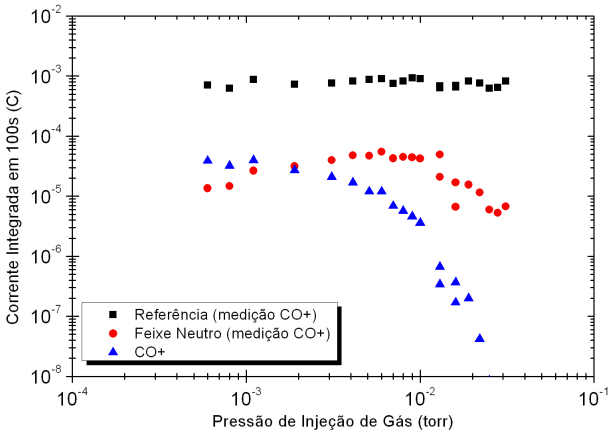
Já para *stripper* de Argônio, a interação do feixe de CO^{+} é apresentado nos gráficos da figura 4.4, abaixo.



(a) *Stripper* de Ar - Medição do Feixe de C^+



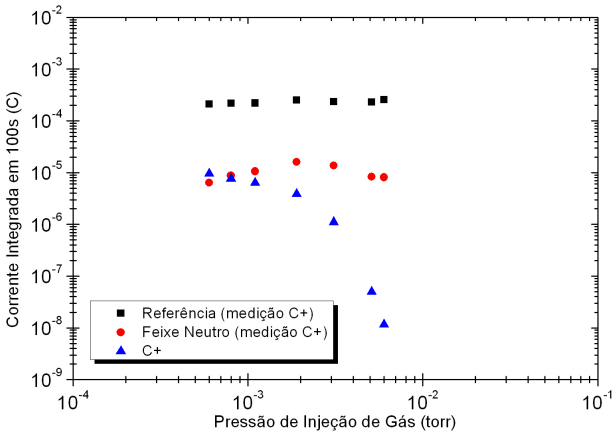
(b) *Stripper* de Ar - Medição do Feixe de O^+



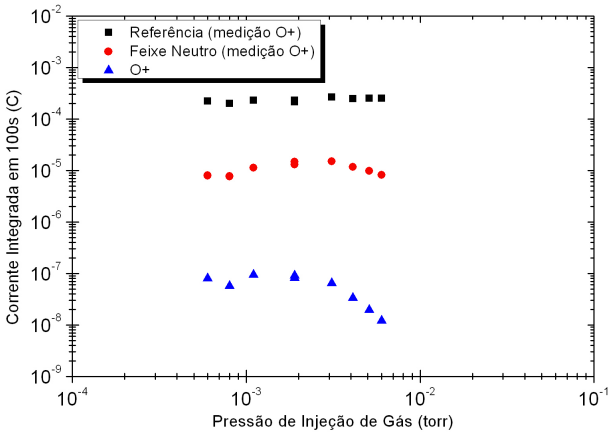
(c) *Stripper* de Ar - Medição do Feixe de CO^+

Figura 4.4: Gráficos de carga elétrica total medida nos Copos de Faraday em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, para feixe de CO^+ e *stripper* de Argônio.

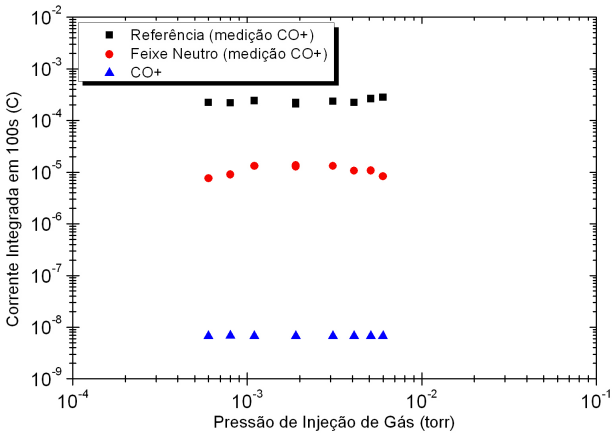
O experimento com *stripper* de Xenônio, para o feixe de CO^+ , é apresentado nos gráficos da figura 4.5, abaixo.



(a) *Stripper* de Xe - Medição do Feixe de C^+



(b) *Stripper* de Xe - Medição do Feixe de O^+



(c) *Stripper* de Xe - Medição do Feixe de CO^+

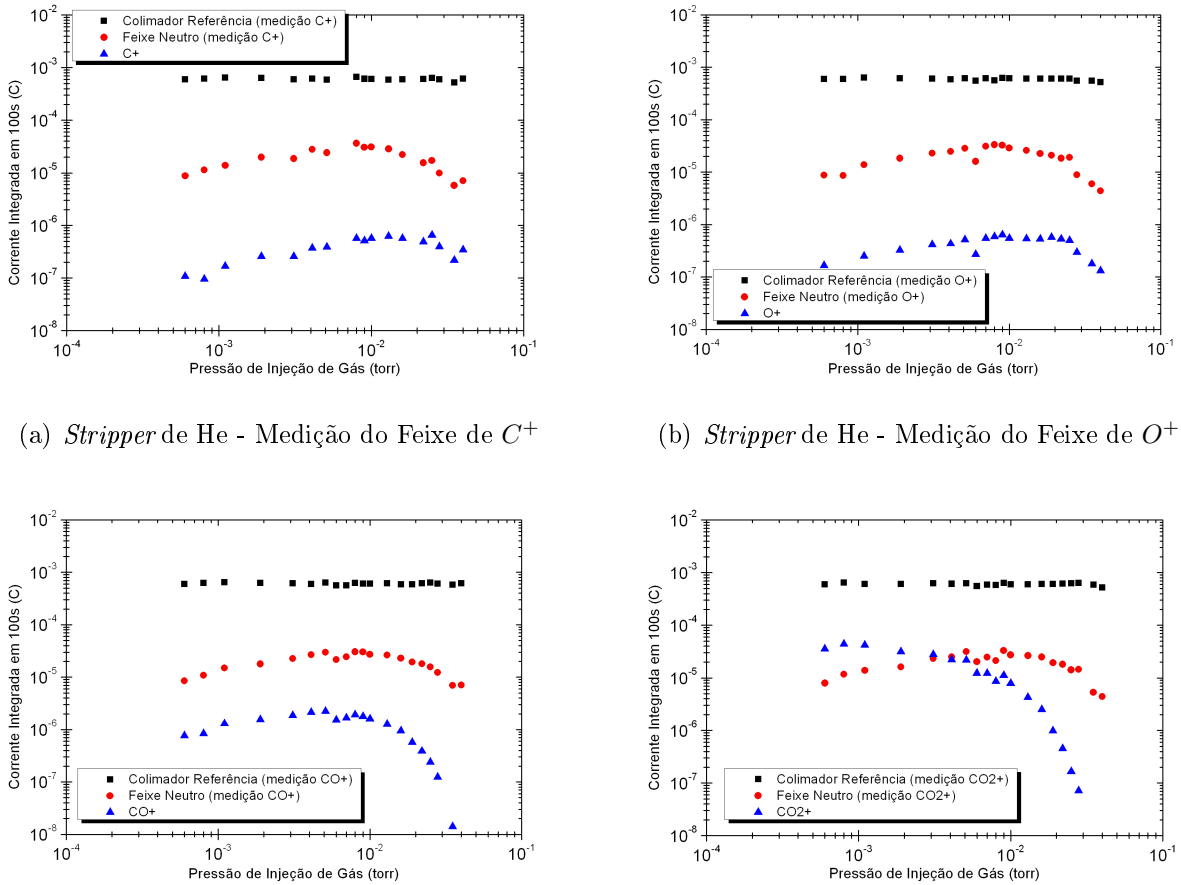
Figura 4.5: Gráficos de carga elétrica total medida nos Copos de Faraday em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, para feixe de CO^+ e *stripper* de Xenônio.

4.1.3 Feixe de dióxido de carbono - CO_2^+

Finalmente, o feixe de CO_2^+ foi selecionado no ímã seletor para interagir com os diferentes *stripper* gasosos.

As medições desses processos são apresentadas nos gráficos das figuras abaixo. Da mesma maneira que para os feixes anteriores, este feixe foi submetido a diferentes pressões em *stripper* dos seguintes gases nobres: Hélio, Argônio e Xenônio.

Para *stripper* de Hélio, os sinais medidos nos Copos de Faraday estão nos gráficos abaixo, da figura 4.6.



(a) *Stripper* de He - Medição do Feixe de C^+

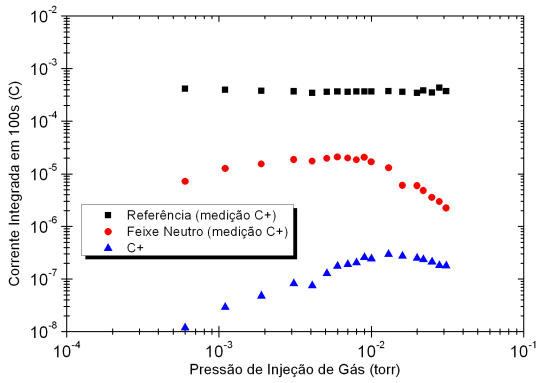
(b) *Stripper* de He - Medição do Feixe de O^+

(c) *Stripper* de He - Medição do Feixe de CO^+

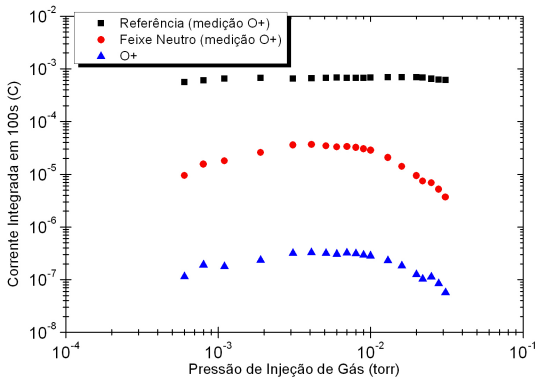
(d) *Stripper* de He - Medição do Feixe de CO_2^+

Figura 4.6: Gráficos de carga elétrica total medida nos Copos de Faraday em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, para feixe de CO_2^+ e *stripper* de Hélio.

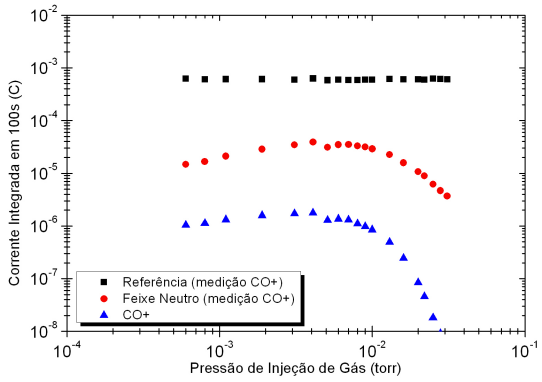
Para o *stripper* de Argônio, os dados são apresentados na figura 4.7, abaixo.



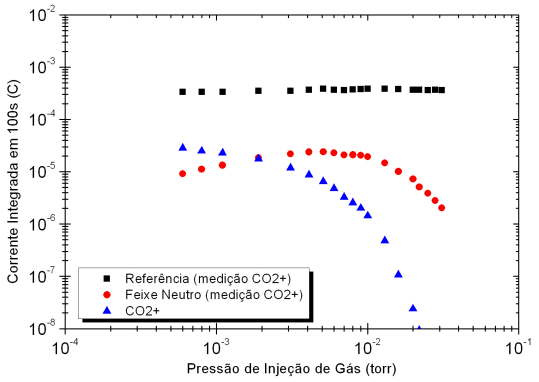
(a) *Stripper* de Ar - Medição do Feixe de C^+



(b) *Stripper* de Ar - Medição do Feixe de O^+



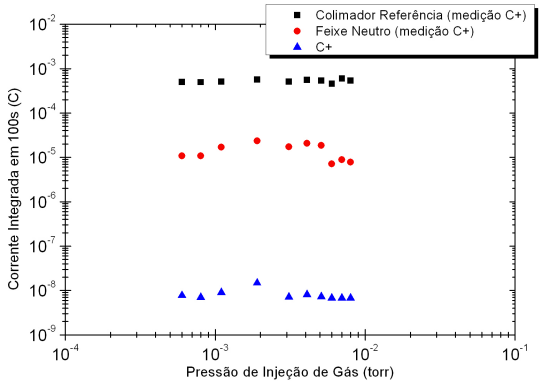
(c) *Stripper* de Ar - Medição do Feixe de CO^+



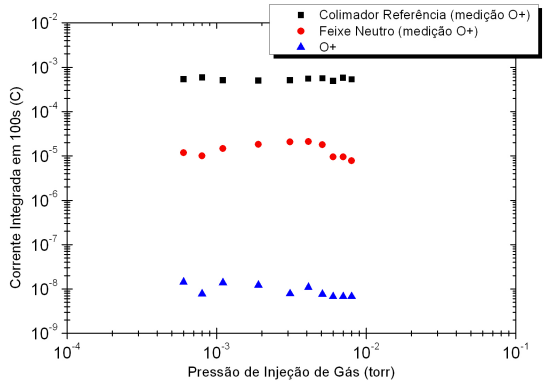
(d) *Stripper* de Ar - Medição do Feixe de CO_2^+

Figura 4.7: Gráficos de carga elétrica total medida nos Copos de Faraday em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, para feixe de CO_2^+ e *stripper* de Argônio.

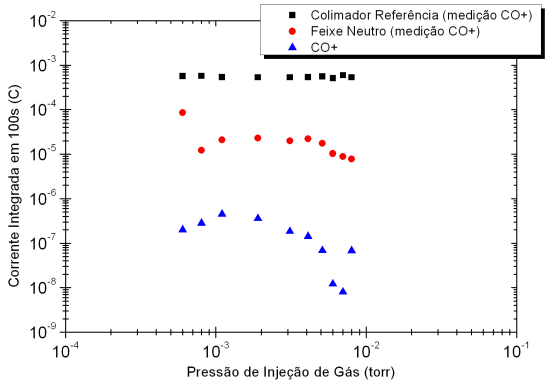
Por fim, a utilização de *stripper* de Xenônio resulta em fenômenos que podem ser analisados através dos dados da figura 4.8.



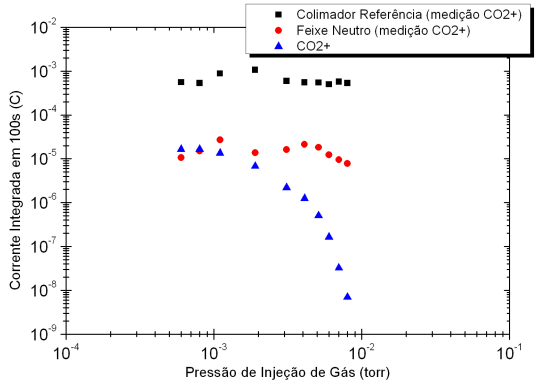
(a) *Stripper* de Xe - Medição do Feixe de C^+



(b) *Stripper* de Xe - Medição do Feixe de O^+



(c) *Stripper* de Xe - Medição do Feixe de CO^+



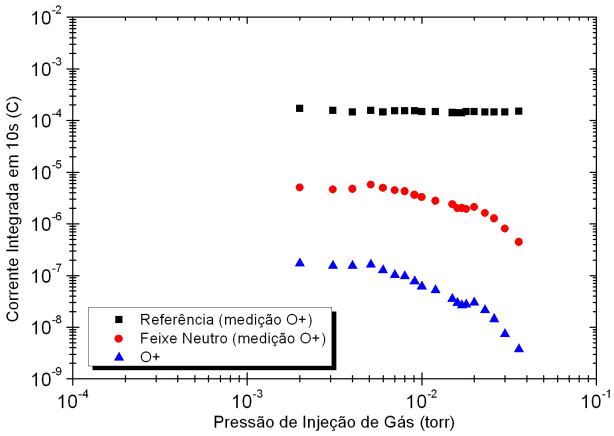
(d) *Stripper* de Xe - Medição do Feixe de CO_2^+

Figura 4.8: Gráficos de carga elétrica total medida nos Copos de Faraday em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, para feixe de CO_2^+ e *stripper* de Xenônio.

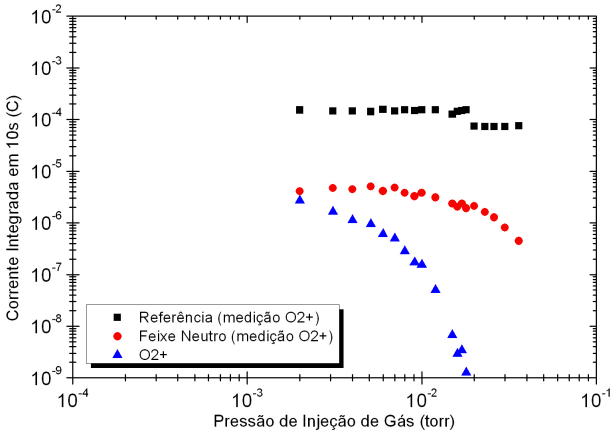
4.1.4 Feixe de oxigênio molecular - O_2^+

O feixe de oxigêncio molecular, O_2^+, foi submetido apenas à interação com *stripper* de Argônio. Uma particularidade desse experimento foi que as cargas nos Copos de Faraday foram integradas por 10 s (ao invés dos 100 s utilizados para os outros feixes).

A seguir são apresentados os resultados experimentais decorrentes desse feixe de íons.



(a) *Stripper* de Ar - Medição do Feixe de O^+



(b) *Stripper* de Ar - Medição do Feixe de O_2^+

Figura 4.9: Gráficos de carga elétrica total medida nos Copos de Faraday em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, para feixe de O_2^+ e *stripper* de Argônio.

Em posse de todos esses dados, análises qualitativas foram realizadas procurando entender os processos físicos que estão envolvidos nesse experimento. Uma discussão mais detalhada dessas análises e as conclusões são apresentadas nos capítulos a seguir.

Capítulo 5

Análise de dados

Com os dados em mãos, foram feitos alguns cálculos para comparação entre os efeitos de interação do feixe de íons com o *stripper*, em função dos diferentes tipos de feixe e de cada gás de *stripper* utilizado.

Primeiramente, foi realizada uma análise do feixe total que chegava aos Copos de Faraday após o *stripper*, tendo em vista o *straggling* angular que o feixe apresentava em função da interação com o *stripper*. Em seguida, é apresentada uma análise comparativa entre as diferentes parcelas do feixe para cada gás utilizado no *stripper* para o estudo das trocas de carga e quebras moleculares das partículas do feixe.

É importante salientar que a análise de sensibilidade dos parâmetros envolvidos no experimento será discutida nos próximos capítulos.

5.1 Análise de feixe total

Uma das possíveis análises dos dados coletados neste trabalho é com relação ao feixe total que passa pelo *stripper* e chega aos Copos de Faraday da "linha zero" e "linha 30º".

Primeiramente fez-se a normalização de todos os feixes pela carga medida no Copo de Faraday de referência, isto é, dividiu-se cada medição de feixe neutro e de feixe carregado pela medição de feixe no colimador de referência. Este procedimento normaliza as medições com

relação à quantidade total de feixe, fazendo com que flutuações de intensidade do feixe ao longo do experimento fossem "corrigidas".

Em seguida somou-se todos os feixes normalizados, medidos para uma mesma pressão de injeção de gás e o mesmo tipo gás no *stripper*. Nessa soma foi incluída a média das medidas do feixe neutro, uma vez que esse feixe foi medido em cada uma das medições de feixe com carga.

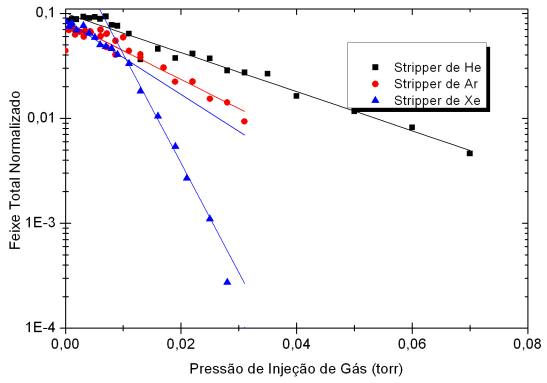
Por exemplo, para o caso do feixe de Ar^{2+}, foram realizadas duas séries de medições, uma para cada estado de carga do feixe resultante (Ar^{2+} e Ar^{+}). Os dados medidos, apresentados nos gráficos da figura 4.2, também apresentam a medição do "feixe neutro" em cada um deles. Desta maneira, como feixe total foram considerados a soma da carga total do feixe de Ar^{2+} (figura 4.2(a)), da carga total do feixe de Ar^{+} (figura 4.2(b)) e a média da carga medida do feixe neutro nestes dois gráficos. Esta soma foi realizada para cada pressão de injeção de gás, para obtenção do comportamento do feixe para cada pressão no *stripper*.

Como os valores de feixe total em função da pressão de injeção de gás caíam para pressões elevadas, curvas de decaimento foram ajustadas nestes dados de maiores pressão. O ajuste aplicado é apresentado na equação 5.1.

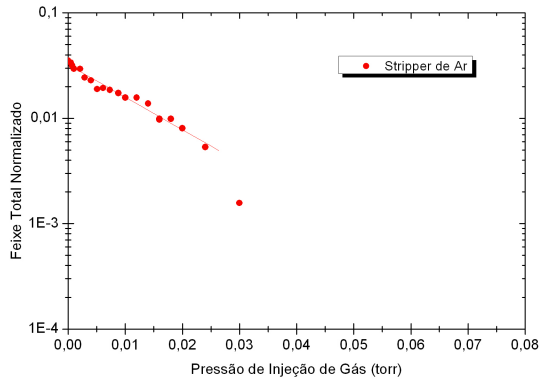
$$F = 10^{-A} \cdot 10^{-\alpha \cdot P} \tag{5.1}$$

Esta equação modela o decaimento da intensidade do feixe (em decorrência do *straggling* angular) de forma exponencial (na base 10) com a injeção de gás. O primeiro termo, 10^{-A}, representa a transmitância do feixe no sistema sem injeção de gás. Já o decaimento da carga total do feixe com o aumento da pressão P do *stripper* é ajustado pela parcela $10^{-\alpha \cdot P}$.

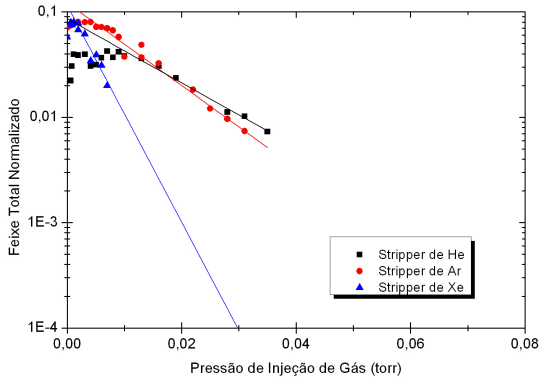
Os gráficos a seguir mostram os valores de feixe total juntamente com ajustes de equações no modelo da equação 5.1.



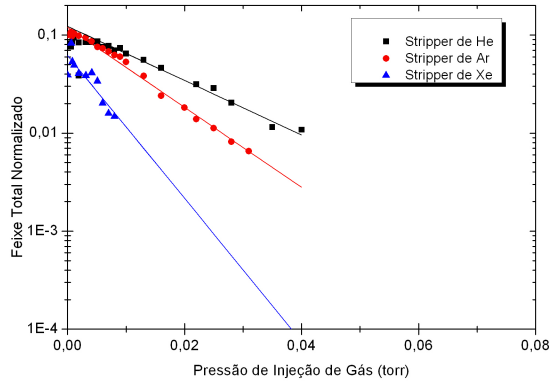
(a) Feixe de Ar^{+}



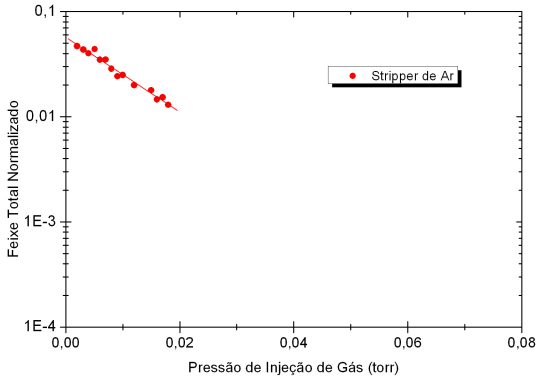
(b) Feixe de Ar^{2+}



(c) Feixe de CO^{+}



(d) Feixe de CO_2^{+}



(e) Feixe de O_2^{+}

Figura 5.1: Soma de todas as parcelas dos feixes para cada tipo de feixe, para análise isolada de *straggling* angular e energético dos feixes.

As constantes ajustadas para a equação 5.1 nesses gráficos são apresentadas abaixo, na

tabela 5.1.

Feixe	*Stripper*	Constante de Decaimento α ($torr^{-1}$)	Constante A
Ar^+	He	18,62(68)	1,002(19)
	Ar	27,6(20)	1,079(25)
	Xe	104,0(54)	0,34(11)
Ar^{2+}	Ar	30,9(12)	1,490(13)
CO^+	He	30,4(15)	1,064(34)
	Ar	39,3(30)	0,913(59)
	Xe	103(14)	0,939(62)
CO_2^+	He	27,7(12)	0,911(22)
	Ar	40,84(93)	0,921(13)
	Xe	73(12)	1,209(54)
O_2^+	Ar	35,4(16)	1,243(18)

Tabela 5.1: Tabela de Ajustes de Decaimento Exponencial dos Feixes Totais

O estudo realizado na tentativa de justificar esta queda de intensidade do feixe total foi relativo ao *straggling* angular. Em outras palavras, uma das possíveis interações das partículas do feixe com as partículas do gás do *stripper* é o choque elástico, onde parte da energia da partícula do feixe é transferida ao átomo do gás. Isso também resulta na mudança de trajetória destas partículas, que depende fundamentalmente da maneira como o choque ocorreu.

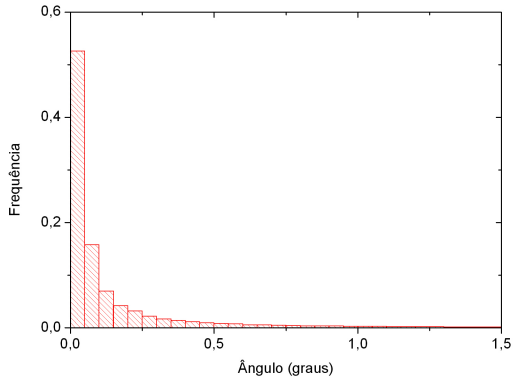
O que caracteriza o *straggling* angular é a mudança da óptica do feixe, isto é, o feixe tende a abrir angularmente. Para verificar a contribuição deste aspecto na modificação do perfil do feixe no *stripper* gasoso, uma simulação computacional foi realizada.

Um software tradicional, amplamente utilizado na literatura de implantação iônica e interação de íons com a matéria, é o SRIM [32]. Neste software é possível simular a interação de um feixe de partículas monoatômicas com materiais, inclusive em um meio gasoso (o *stripper*, no caso), ajustando-se a energia do feixe e a espessura e composição do gás. Por ser possível simular apenas feixe monoatômico, apenas o caso do feixe de Ar^+ pode ser simulado.

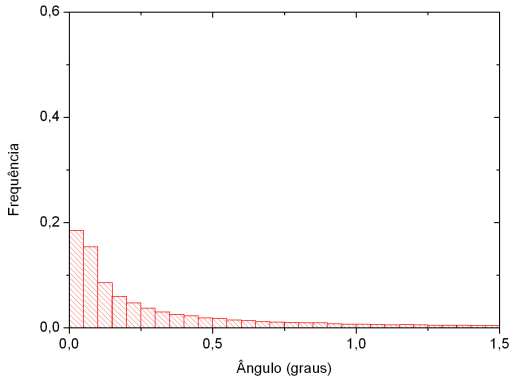
As simulações em função da pressão de injeção no tubo suporte foi realizada, para feixe de Ar^+ com energia de 30 keV. O *stripper* gasoso foi calculado em função do gás utilizado, utilizando os mesmos parâmetros apresentados nos cálculos do perfil exemplo (seção 3.8).

Como o software não admite a inserção de valores tão reduzidos de densidade (ou pressão) nas simulações, foi considerado que o *stripper* era composto de gás com densidade nas *Condições Normais de Temperatura e Pressão*. Foi ajustada então a espessura do gás, para que a quantidade total de átomos no caminho do feixe na simulação fosse semelhante à condição experimental. Estas densidades dos gases utilizadas são do próprio programa de simulação, da referência [32].

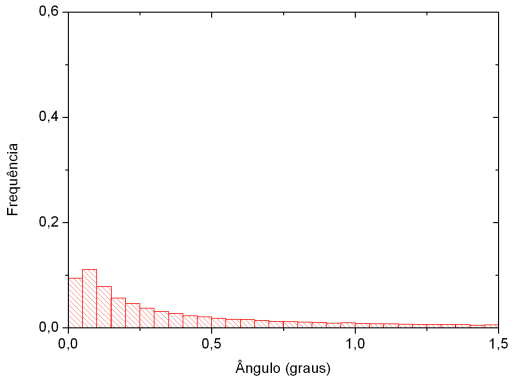
Para exemplificar o perfil do feixe de íons, histogramas de distribuição angular das partículas do feixe (em relação ao eixo de propagação deste feixe) para os diferentes *stripper* gasosos, na condição de injeção de gás $p_{in} = 2,0.10^{-2}$ torr, são apresentados na figura 5.2.



(a) *Stripper* de Hélio.



(b) *Stripper* de Argônio.



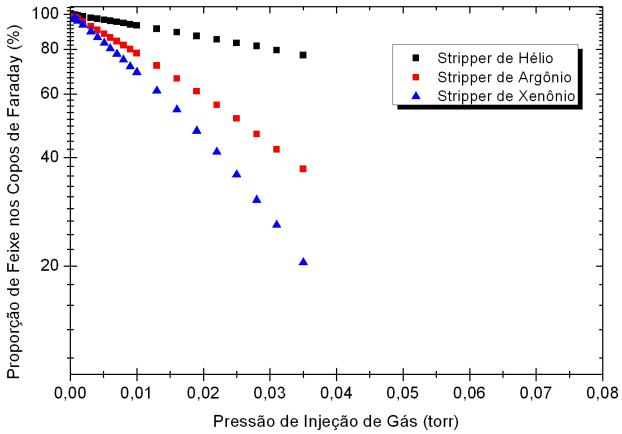
(c) *Stripper* de Xenônio.

Figura 5.2: Simulação da distribuição angular das partículas do feixe de Ar^+ com energia de 30 keV interagindo com diferentes gases de *stripper*. Condição para pressão de injeção no tubo suporte p_{in} de 2.10^{-2} torr.

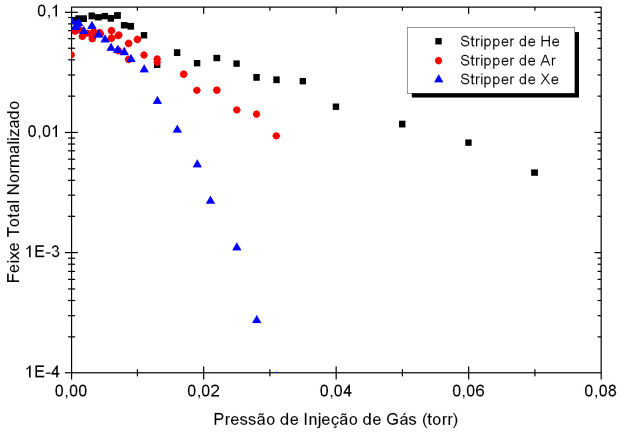
Uma análise estatística mostra que 95% das partículas do feixe estão dentro de um cone com ângulo de 0,62 grau para o *stripper* de He, 1,1 grau para o *stripper* de Ar e 1,2 grau para o *stripper* de Xe.

Considerando a distância entre o Copo de Faraday e o centro do *stripper* gasoso igual a 2100 mm e utilizando a informação de que o diâmetro do Copo de Faraday é 25,4 mm, é possível verificar que o cone máximo medido pelo Copo de Faraday possui ângulo de 0,35 grau.

Realizando a contagem do número de partículas das simulações que saíam com ângulo inferior a 0,35 graus, o gráfico da porcentagem de partículas que chegavam ao Copo de Faraday em função da pressão de injeção no *stripper* é apresentado abaixo. Ao lado, novamente é apresentado o gráfico dos dados experimentais da figura 5.1(a).



(a) Simulações de *Straggling* angular.



(b) Dados experimentais.

Figura 5.3: Número de partículas nos Copos de Faraday em função da pressão de injeção no *stripper*. A queda com o aumento de pressão, na simulação, é referente à análise de *straggling* angular do feixe de íons, ao interagir com o gás do *stripper*.

Estes gráficos mostram que a simulação modela parcialmente os dados experimentais. Ainda há outro fenômeno fazendo com que a queda da intensidade do feixe seja mais acentuada que a simulação realizada. Por exemplo, o fato de que a simulação não considera a distribuição angular de entrada do feixe. Para o cálculo, o software considera que todas as partículas entram com incidência normal ao *stripper* gasoso. Nos experimentos realizados neste trabalho, a distribuição angular de incidência das partículas do feixe sobre o *stripper* não foi medida.

Esta simulação mostra que o principal efeito de queda na leitura do feixe de íons é devido

ao *straggling* angular. As partículas do feixe estão adquirindo uma distribuição angular em sua propagação pelo acelerador, após o *stripper* gasoso. Como os ângulos sólidos definidos pelos Copos de Faraday são pequenos, mostra-se necessária a inserção de um elemento no acelerador para corrigir a óptica do feixe. Um tripleto quadrupolar deve melhorar esta condição de ensaio.

5.2 Análise percentual dos feixes

Com os dados experimentais apresentados na seção 4.1 foi realizada uma análise percentual entre os feixes de íons resultantes do *stripper*.

Primeiramente, normalizou-se todas as cargas coletadas em 100 segundos nos Copos de Faraday das linhas "zero" graus e "trinta" graus em relação à carga coletada no colimador de referência durante a mesma medição.

Em seguida, somou-se todos os feixes resultantes de um mesmo processo (para uma mesma pressão e mesmo gás no *stripper*) para obter o feixe total medido para cada condição de *stripper*. Por exemplo, em um feixe de CO^+ foram realizadas três medições (para cada pressão de injeção de gás): a medição de feixe de C^+, a medição de O^+ e a medição de CO^+. Em cada uma dessas medições, o feixe neutro também foi medido. Assim, o feixe total foi calculado somando-se as correntes integradas (e normalizadas) de cada um dos feixes, adicionando ainda a média da corrente integrada do feixe neutro de cada uma das medições.

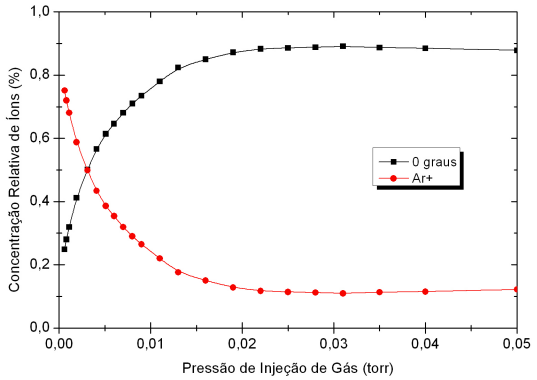
Finalmente, cada medição foi comparada ao feixe total calculado, resultando no percentual daquele feixe na totalidade do feixe resultante do *stripper*.

Os gráficos desta análise são apresentados nas seções a seguir. Cada um dos gráficos também é mostrado em escala logarítimica, para evidenciar a ocorrência de alguns fenômenos que não são perceptíveis no gráfico linear.

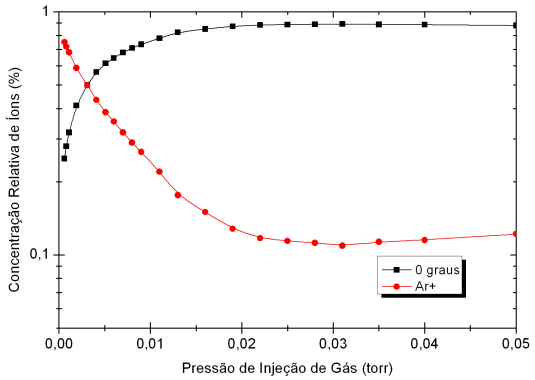
5.2.1 Feixe de argônio

Para o feixe de Ar^+, a análise resulta em somente duas curvas, a curva de feixe neutro e a curva de Ar^+. Os gráficos da interação desse feixe com os diferentes gases utilizados no

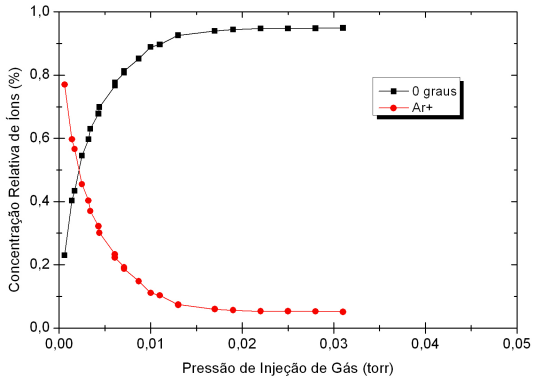
stripper são apresentados na figura 5.4, a seguir.



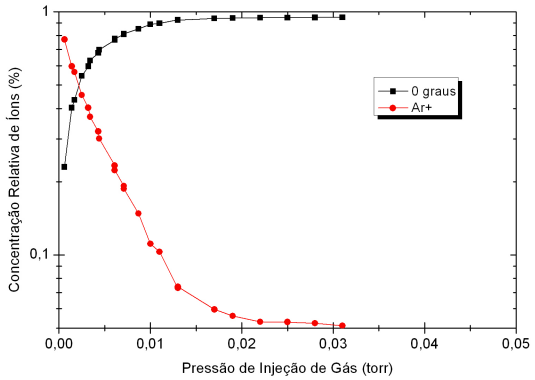
(a) *Stripper* de He - Gráfico Linear



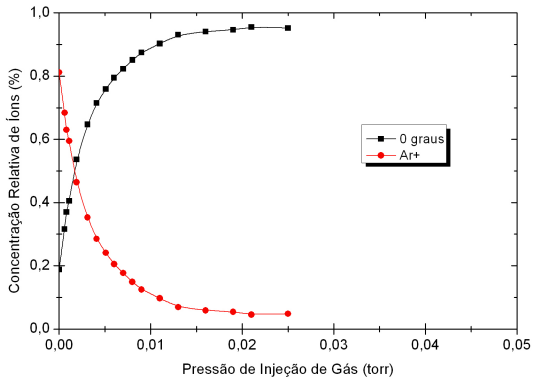
(b) *Stripper* de He - Gráfico Logarítmico



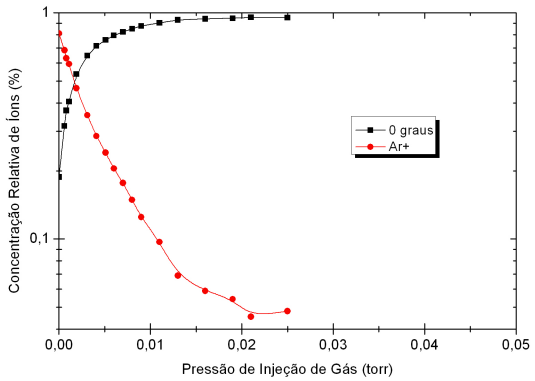
(c) *Stripper* de Ar - Gráfico Linear



(d) *Stripper* de Ar - Gráfico Logarítmico



(e) *Stripper* de Xe - Gráfico Linear



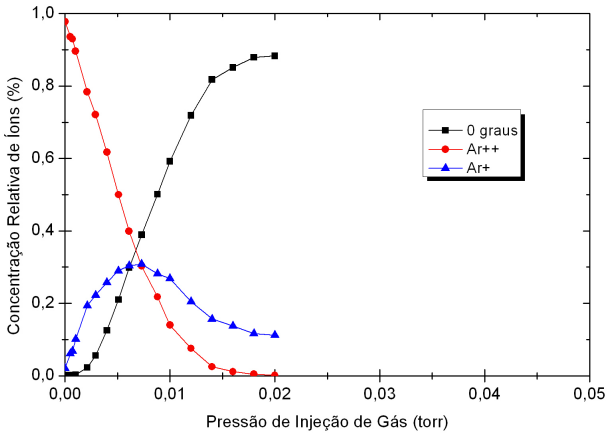
(f) *Stripper* de Xe - Gráfico Logarítmico

Figura 5.4: Gráficos de proporcionalidade de feixe em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, para feixe de Ar^+.

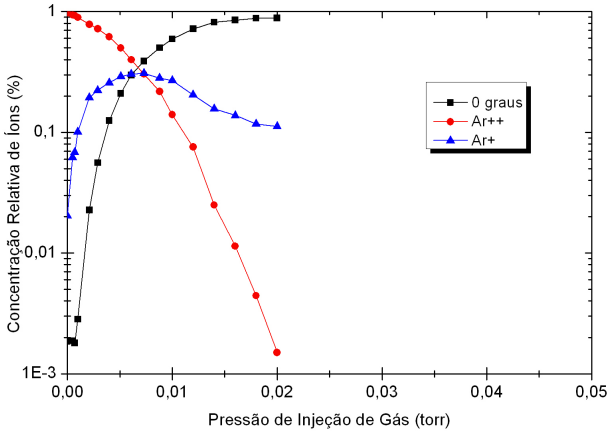
A análise do feixe de argônio é mais simples, pois somente ocorre o fenômeno de troca de estado de carga entre os átomos do feixe e do *stripper*.

É possível observar que a proporção entre feixe carregado e a medição de referência tende a alguns valores para este caso. Por exemplo, na figura 5.4(a), da interação do feixe com *stripper* de Hélio, observa-se uma tendência do feixe a estabilizar em uma proporção de 20%. Da interação com Argônio (figura 5.4(c)), a tendência é inferior, em aproximadamente 10%. Por fim, no *stripper* de Xenônio, a tendência seria também próxima de 10%.

Quando o feixe selecionado foi de Ar^{2+}, apenas o *stripper* de Argônio foi colocado em experiência. Esta interação resultou em três curvas: Ar^{2+}, Ar^{+} e Feixe Neutro. Os gráficos são apresentados na figura 5.5.



(a) *Stripper* de Ar - Gráfico Linear



(b) *Stripper* de Ar - Gráfico Logarítmico

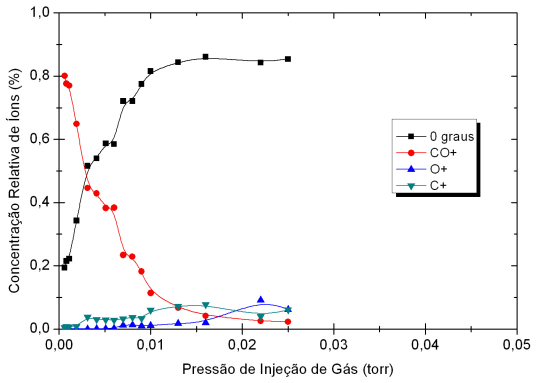
Figura 5.5: Gráficos de proporcionalidade de feixe em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, para feixe de Ar^+.

É importante dizer que devido ao estado de carga mais elevado, a energia de extração do feixe também é maior para uma mesma tensão de extração na fonte de íons. Neste caso, o feixe de Ar^{2+} possui 60 keV.

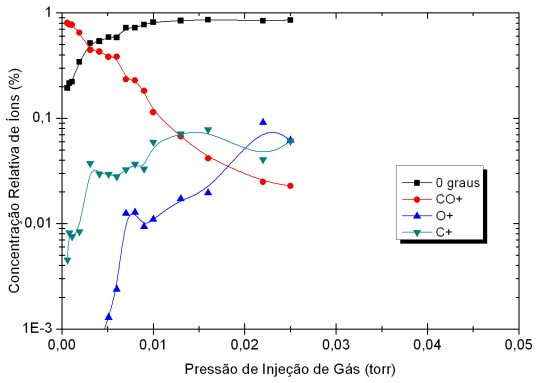
O feixe é de Ar^{2+} é extinto para elevadas pressões (espessuras) de *stripper*. No entanto, o feixe de Ar^+ aparece, passando por um máximo de concentração relativa e tendendo a uma assíntota. Neste caso (onde a energia é de 60 keV) o valor assintótico é aproximadamente 20%, maior que o valor observado para o feixe Ar^+ em 30 keV (figura 5.4(c)).

5.2.2 Feixe de monóxido de carbono - CO^+

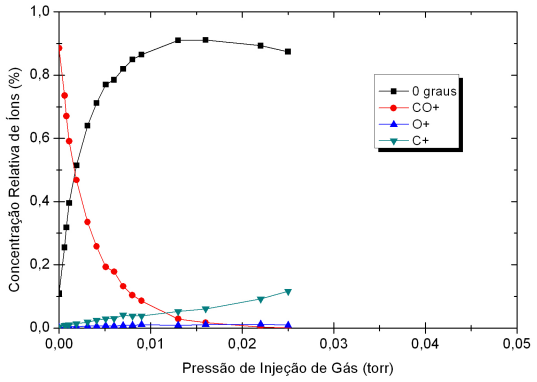
No caso do feixe de CO^+ , os feixes que saíam do *stripper* eram quatro: CO^+ , O^+ , C^+ e Feixe Neutro. Assim, para cada um dos gases inseridos no *stripper* , os gráficos percentuais resultantes desta interação são apresentados abaixo, na figura 5.6.



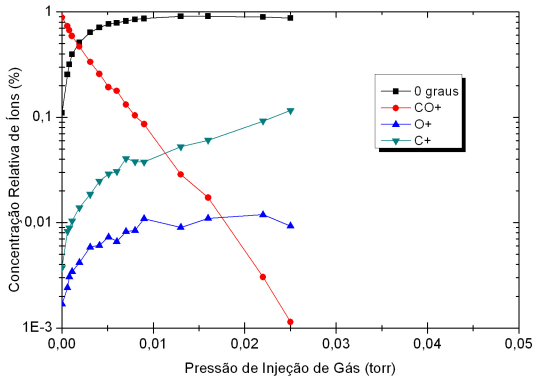
(a) *Stripper* de He - Gráfico Linear



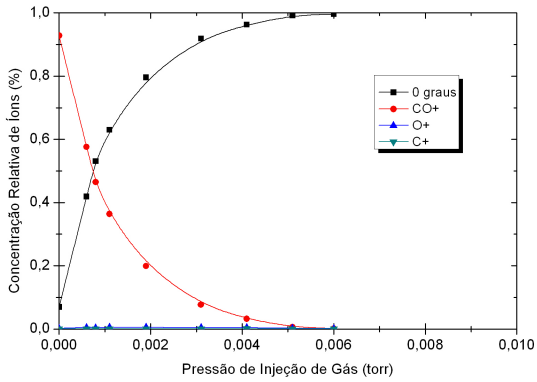
(b) *Stripper* de He - Gráfico Logarítmico



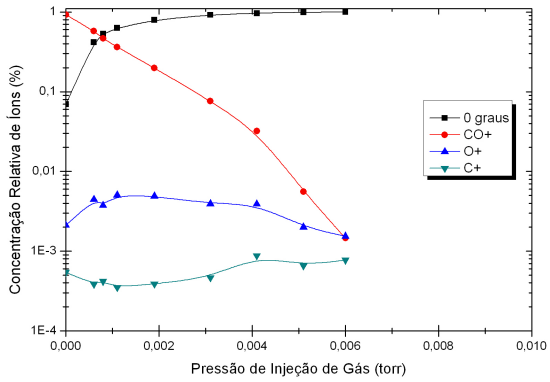
(c) *Stripper* de Ar - Gráfico Linear



(d) *Stripper* de Ar - Gráfico Logarítmico



(e) *Stripper* de Xe - Gráfico Linear



(f) *Stripper* de Xe - Gráfico Logarítmico

Figura 5.6: Gráficos de proporcionalidade de feixe em função da pressão de injeção de gás no *stripper* , para feixe de CO^+ .

Diferentemente do feixe de Ar^+ e Ar^{2+} , neste caso já existe a concorrência entre o processo

de troca de carga e a quebra molecular.

Tanto para o *stripper* de Hélio quando para o de Argônio, é observável que o feixe neutro relativo não tende a 100% em maiores pressões (espessuras) de *stripper*. Apesar do feixe primário de CO^+ tender a se extinguir, os feixes de C^+ e O^+ apresentam um aumento com a elevação do *stripper*. Não é possível dizer que estes terão algum comportamento assintótico, pois até as pressões utilizadas, as intensidades relativas destes feixes cresceram.

Já para o *stripper* de Xenônio, os percentuais de formação de feixe de C^+ e O^+ são bastante baixos comparados ao processo de troca de carga (o feixe neutro cresce muito rápido). A troca de carga realmente é mais acelerada em função da pressão para o *stripper* de Xenônio, como observado no feixe de Ar^+ (figura 5.4(e)).

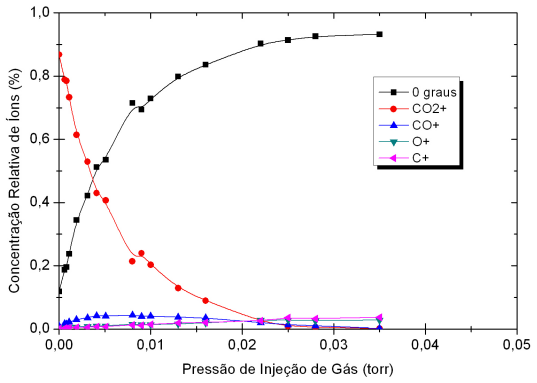
Novamente é observado o comportamento assintótico do feixe neutro para os *stripper* de Hélio e Argônio, tendendo a um patamar de aproximadamente 90%. Isso pode mostrar a estabilização do processo de troca de carga dos feixes.

Porém, o grande fato a ser ressaltado com esta análise é a existência de quebra molecular do feixe de CO^+ . A existência de feixes secundários de C^+ e O^+ só pode ser resultado do processo de quebra molecular deste feixe, uma vez que o feixe incidente no *stripper* constituía-se apenas de CO^+ (selecionado magneticamente pelo primeiro ímã).

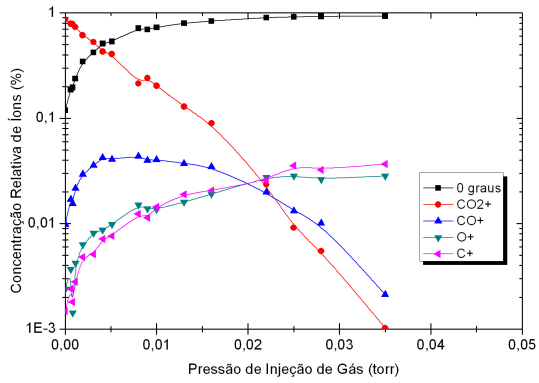
Porém não é possível dizer muito sobre a eficiência de quebra molecular, uma vez que não foi possível diferenciar as parcelas do feixe neutro. O processo de quebra molecular e de troca de estado de carga são concomitantes neste experimento; no feixe neutro há partículas de Oxigênio neutro e Oxigênio molecular neutro em proporções desconhecidas.

5.2.3 Feixe de dióxido de carbono - CO_2^+

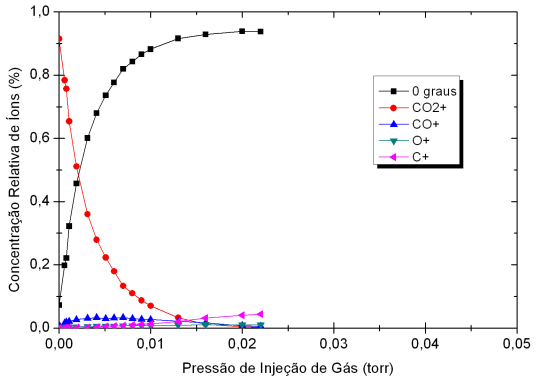
De maneira similar ao feixe de CO^+ , os feixes obtidos do processo de interação do feixe de CO_2^+ com os gases do *stripper* foram cinco: CO_2^+ , CO^+ , O^+ , C^+ e Feixe Neutro.



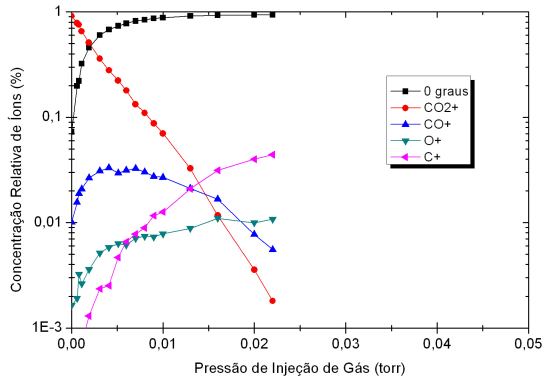
(a) *Stripper* de He - Gráfico Linear



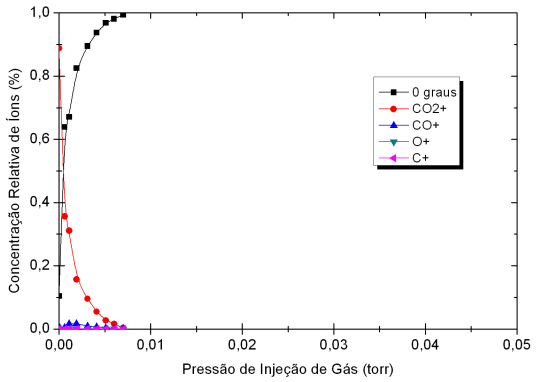
(b) *Stripper* de He - Gráfico Logarítmico



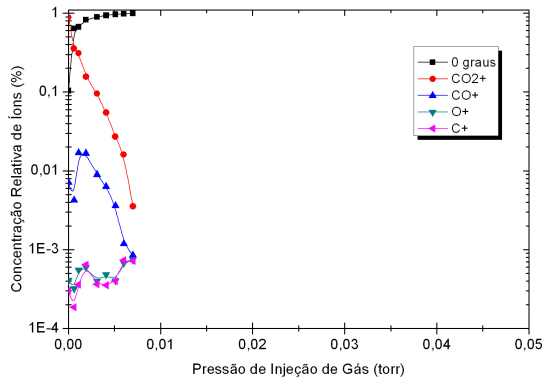
(c) *Stripper* de Ar - Gráfico Linear



(d) *Stripper* de Ar - Gráfico Logarítmico



(e) *Stripper* de Xe - Gráfico Linear



(f) *Stripper* de Xe - Gráfico Logarítmico

Figura 5.7: Gráficos de proporcionalidade de feixe em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, para feixe de CO_2^+ .

Novamente, parece haver um comportamento assintótico do feixe neutro para os *stripper* de

Hélio e Argônio. O valor é próximo de 90%.

O comportamento do feixe de CO^+ é o mesmo para todos os *stripper*, apesar de ser uma ordem de grandeza menor para o caso do Xenônio.

Nos gráficos logarítmicos do *stripper* de Hélio e Argônio, é possível observar duas inclinações de quedas do feixe de CO_2^+ (uma mudança de derivada da curva em 0,02 torr no caso do Hélio e em 0,012 torr no Argônio). Nesta mesma região de pressão do *stripper* é observado o início da queda de intensidade relativa do feixe de CO^+ .

Por fim, novamente a constatação do surpreendente resultado deste trabalho: a constatação de quebra molecular do feixe de íons mesmo para baixas energias, pela observação dos feixes de C^+ , O^+ e CO^+ .

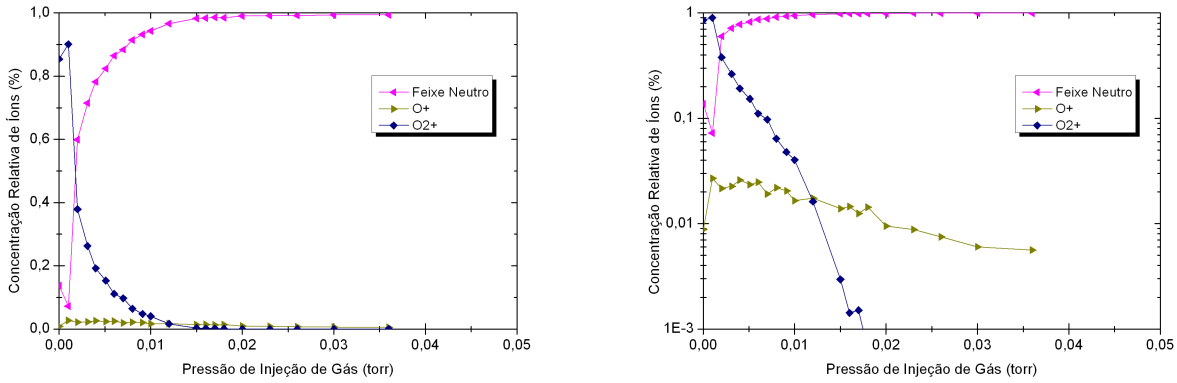
É interessante a observação dos estágios de quebra molecular neste feixe de moléculas com três átomos: sempre com a queda do feixe de CO_2^+ , há o crescimento do feixe de CO^+ e dos feixes de C^+ e O^+ . É uma evidência da quebra molecular.

Com o aumento da pressão de injeção no *stripper*, a intensidade relativa de feixe de CO^+ se estabiliza e, um pouco a seguir, passa a cair. A partir desta situação de queda do feixe de CO^+ , é observado que os feixes O^+ e C^+ elevam-se um pouco mais. Com pressões superiores, verifica-se a tendência de extinção dos feixes moleculares eletricamente carregados.

Novamente, não é possível dizer muito sobre a eficiência da quebra molecular; os processos de quebra de moléculas e troca de carga acontecem simultaneamente no *stripper* gasoso. Não é conhecida a concentração relativa entre feixe molecular e feixe de átomo simples para o feixe neutro.

5.2.4 Feixe de oxigênio molecular - O_2^+

Como o feixe de O_2^+ foi submetido apenas a interação com *stripper* de Argônio, somente dois gráficos são apresentados a seguir.



(a) *Stripper* de Ar - Gráfico Linear

(b) *Stripper* de Ar - Gráfico Logarítmico

Figura 5.8: Gráficos de proporcionalidade de feixe em função da pressão de injeção de gás no *stripper* , para feixe de O_2^+ .

É possível observar a extinção total do feixe de O_2^+ . O proporção de feixe de O^+ , por sua vez, vai caindo gradualmente com o aumento da pressão de injeção do *stripper* .

Assim como nos outros feixes moleculares, dois fenômenos estão concorrendo sobre as moléculas do feixe: a troca de estado de carga e a quebra molecular. Novamente, não é possível dizer se há a quebra de todas as moléculas, pelo desconhecimento da composição do feixe neutro. Mas a observação de que existe o fenômeno de quebra molecular para o feixe de O_2^+ , através da observação de feixe de O^+ , é o resultado a ser mais apreciado deste experimento.

Capítulo 6

Discussões

Uma discussão sobre as análises realizadas nos capítulos anteriores é apresentada a seguir.

Também são apresentadas discussões sobre a aproximação da Lei dos Gases Reais utilizada no cálculo de perfil de pressão no *stripper* gasoso e a influência da taxa de degaseificação na pressão total do *stripper*.

6.1 Análise geral dos dados

Através dos cálculos de perfil de pressão, constatou-se que o número total de átomos em função da pressão de injeção de gás no *stripper* praticamente não depende do tipo de gás utilizado. Porém, a espessura do *stripper* é diretamente proporcional à massa atômica das partículas do gás. Além disso, o tamanho das partículas e o número de elétrons fracamente ligados nestas produzem efeitos significativos na interação do feixe de íons com o *stripper*.

No caso do *stripper* de Xenônio, por exemplo, há 54 elétrons por átomo "disponíveis" para a interação com o feixe de íons. Isso faz com que estes elétrons estejam menos ligados ao núcleo, em comparação com o Hélio e Argônio. Por isso, a troca de estado de carga é muito mais rápida em função da pressão de injeção de gás no *stripper*, se comparados com os *stripper* de Hélio e Argônio. Isso leva a concluir que, para realização de troca de estado de carga do feixe de íons, os *stripper* de partículas com maiores números atômicos (e, consequentemente,

maiores números de elétrons por partícula do *stripper*) são mais eficientes.

Uma outra constatação interessante é a existência de Quebra Molecular de feixes de CO_2^+, CO^+ e O_2^+. Em todos os casos de feixes moleculares, é possível observar a queda com tendência de extinção destes feixes. Não é possível afirmar que todas as moléculas são quebradas com altas pressões de injeção de *stripper*, porque não é conhecida a composição do feixe neutro. Há a possibilidade de que o processo de troca de carga esteja prevalescendo, levando as moléculas do feixe para a medição de feixe neutro. Mas a observação de feixes de partículas resultado do processo de quebra molecular é bastante animadora, mostrando que mesmo em baixas energias há o processo de quebra molecular.

De acordo com [3], a execução de datação por ^{14}C com aceleradores de partículas só foi possível depois de muito desenvolvimento na área de Física de acelerador. Desde a criação da técnica de AMS com ^{14}C, muitos autores enfatizaram que uma condição necessária para a existência desta técnica é a elevada tensão dos aceleradores, sempre na faixa de MV.

Em paralelo a trabalhos bastante recentes na área [26, 28, 29], o resultado apresentado neste estudo mostra a existência de quebra molecular em baixíssimas energias, como os 30 keV dos feixes aqui utilizados. Nenhum dos trabalhos citados apresenta feixes com energia tão reduzida. Novos conceitos sobre AMS estão sendo discutidos recentemente; há mesmo a necessidade de tão elevadas energias? É necessária a utilização de aceleradores tão sofisticados para execução de AMS com ^{14}C?

6.2 Aproximação de gás ideal x gás real

Os cálculos de número de moles e, consequentemente, de espessura do *stripper* estão diretamente ligadas à Lei dos Gases utilizada neste trabalho. Mais especificamente, a equação 3.15 é o modelo utilizado: a Lei dos Gases Ideais.

Esta Lei é obtida pela Mecânica Estatística e resulta da aproximação de que os componentes do gás são partículas pontuais, que não interagem entre si e se movem aleatóriamente pelo espaço.

A Lei dos Gases Ideais é uma boa aproximação para gases reais em condições normais de temperatura e pressão. No entanto, os experimentos aqui realizados foram executados em pressões bastante inferiores à pressão atmosférica. Isso resulta em uma vantagem para a utilização deste equacionamento pois a probabilidade de colisão entre duas partículas (isto é, interação entre as partículas) é reduzida drasticamente com a utilização de vácuo.

Mesmo assim uma análise mais detalhada baseada em gases reais foi realizada no exemplo desenvolvido na seção 3.8. O equacionamento utilizado foi o de *Van der Waals*, que considera que as partículas do gás possuem dimensão e existe algum tipo de interação entre elas.

A equação de Gases Reais de *Van der Waals* é apresentada a seguir:

$$\left(p + \frac{n^2 \cdot a}{V^2}\right) \cdot (V - n \cdot b) = n \cdot R \cdot T \tag{6.1}$$

De acordo com [24], para o Argônio, $a = 0,1363\ m^6.Pa/mol$ e $b = 3,219.10^{-5}\ m^3/mol$. Devido às baixíssimas pressões e ao reduzido volume do experimento, era de se esperar um desvio bastante reduzido na espessura do *stripper* para os diferentes equacionamentos. Neste trabalho, este desvio é da ordem de $10^{-8}\%$.

Certamente esse valor é desprezível frente às outras incertezas. A intensidade do feixe medido pelos Copos de Faraday, de acordo com o explicado anteriormente, é o fator predominante de incertezas neste trabalho.

6.3 Sensibilidade da espessura à taxa de desgaseificação

O valor da taxa de degaseificação do material que constitui o tubo do *stripper* utilizado neste trabalho foi estimado através de valores que constam na literatura (referência [21]). Isso se deve à grande dificuldade de medir esta grandeza.

Este valor depende de diversas características, além da constituição do material, como por exemplo o processo de limpeza, o acabamento da superfície, a temperatura, a incidência de feixe.

Assim sendo, optou-se por utilizar um valor típico de taxa de degaseificação para o aço inox 304L (utilizado no tubo do *stripper*) e fazer uma análise de sensibilidade deste fator aos cálculos de espessura de gás no *stripper*.

Um dos pontos muito importantes neste processo é que este valor seja bastante reduzido quando comparado à quantidade de gás injetado no sistema. Isso porque os gases que são liberados das paredes do *stripper* não necessariamente são da mesma composição do gás injetado no *stripper*. Valores muito próximos de *throughput* de desgaseificação e *throughput* de injeção de gás prejudicariam o experimento, visto que a composição do gás do *stripper* seria significativamente alterada.

Para essa análise é interessante a comparação entre esses valores em função da pressão de injeção na entrada do sistema. O *throughput* de injeção de gás (q_{inj}) é dado pela equação 6.2.

$$q_{inj} = c_1 \cdot \left(\frac{d^2}{dz^2} p_1(z) \right) \Bigg|_{z=0} \tag{6.2}$$

Esta equação, baseada nas equações 3.8 e 3.10a, resulta na seguinte expressão:

$$q_{inj} = c_1 \cdot B_1 \tag{6.3}$$

Com isso, é possível calcular a razão entre os *throughputs* do exemplo da seção 3.8. Esta razão é da ordem de 1.10^{-5} mbar.l/(s.cm).

Capítulo 7

Conclusões

O objetivo inicial deste trabalho foi atingido: projetar e caracterizar um *stripper* gasoso como primeiro passo para a adaptação do Implantador Iônico para a construção de um AMS, para análise de ^{14}C. O *stripper* gasoso foi construído e está à disposição para a continuação do projeto de adaptação do AMS.

A caracterização deste *stripper*, realizada através de injeção de diferentes gases para interação com diferentes feixes de íons, foi estudada para tensão de aceleração do feixe em 30 kV.

A quebra molecular para feixes de CO^+, CO_2^+ e O_2^+ foi observada mesmo para baixas energias. Existe a possibilidade de trabalhar com este acelerador para AMS.

As argumentações sobre os fenômenos que provocaram alterações de concentração relativa das parcelas do feixe foram bastante difíceis de serem conduzidas. Os processos de quebra molecular, de *straggling* angular e de troca de carga do feixe sempre eram concorrentes, acontecendo simultâneamente nos experimentos.

Além disso, a aproximação de que a leitura realizada pelos Copos de Faraday era diretamente proporcional ao feixe incidente também necessita de um estudo mais aprofundado. Os Copos de Faraday deste trabalho indicam a carga depositada pelo feixe e também a carga extraída pelo *sputtering* de átomos e elétrons de seu material. Essa foi a maneira encontrada de realizar a leitura de feixe neutro.

Mesmo assim foi possível uma análise qualitativa fundamentando-se nos dados experi-

mentais, na tentativa de explicar o comportamento geral do feixe de íons ao interagir com o *stripper* gasoso (tipo de gás e espessura de *stripper*).

Observou-se também que gases com maiores massas atômicas necessitam de menores injeções de gás (menores números de partículas) para provocarem efeitos semelhantes no *stripper* gasoso.

Devido à baixa energia do feixe (30 keV), as probabilidades para os estados de carga que saem do *stripper* são muito baixas, uma grande parcela do feixe é neutro. Surge aqui novamente o problema da medição do feixe neutro. Mesmo assim, foi possível estudar comparativamente os resultados entre os diferentes feixes e as diferentes espessuras de *stripper*.

Esta limitação em se trabalhar com energias tão baixas de feixe levou à formação de uma quantidade muito elevado de feixe neutro, dificuldade que se espera ser resolvida com a conclusão da montagem completa do Implantador Iônico, que permitirá trabalhar com mais altas energias. A elevação da energia do feixe e a inserção de elementos que melhorem a sua óptica permitirão maior eficiência de medição de quebra molecular e sua utilização para realizar medidas com a técnica AMS.

Capítulo 8

Possibilidades futuras para este trabalho

O desenvolvimento deste trabalho permitiu ao autor, seu orientador e outras pessoas que acompanharam o desenvolver das etapas aqui realizadas perceber e discutir possibilidades para o avanço da pesquisa na área estudada.

A continuação do processo de adaptação do implantador para a análise de isótopos e o estudo de novos tipos de *stripper* gasosos são as propostas de estudo futuro deixadas por este trabalho. Alguns detalhes sobre estas possibilidades serão apresentados nas seções a seguir.

8.1 Análise de isótopos

A análise de isótopos com o Implantador Iônico, principalmente de ^{14}C (para datação de fósseis) e ^{35}Cl (para estudos de difusão em grandes volumes), foi a ideia geradora deste trabalho.

Um passo foi dado neste sentido, detalhes do acelerador foram estudados e a câmara do *stripper* gasoso foi projetada, construída e estudada.

Ainda há bastante trabalho a ser feito para tornar o objetivo deste *stripper* gasoso uma realidade. Abaixo, uma lista de algumas futuras necessidades é citada, para documentação das ideias e discussões que ocorreram durante a realização do trabalho.

- Troca da polaridade da máquina, permitindo o estudo do ^{14}C. A atual polaridade

positiva produz, em paralelo com o feixe de $^{14}C^{+}$, um feixe de gás residual de $^{14}N^{+}$ (muito abundante na atmosfera), indistinguível para o processo de aceleração utilizada. Pela eletronegatividade do Nitrogênio, não é possível gerar feixe de $^{14}N^{-}$, garantindo que todo o feixe monoatômico de massa 14 seria constituído de Carbono, apenas.

- Montagem do acelerador completo, inserindo-se outros elementos de óptica do feixe na linha, para reduzir os efeitos de *straggling* angular produzidos pelo *stripper*.

- Elevação da tensão de trabalho da máquina, resultando em trabalho dentro de regiões de menor abundância de feixe neutro.

- Utilização da câmara do *stripper* gasoso em uma das canalizações após o ímã seletor de canalização, permitindo que o acelerador possa ser utilizado para outros propósitos, como implantador iônico mesmo. Isso requer a utilização de um outro sistema para seleção de carga/massa após o *stripper*. Já existe no laboratório um defletor eletrostático que permitiria este estudo. Há a preocupação de que a distância entre as placas deste defletor seja muito reduzida para este fim, mas a ideia deste defletor é bastante razoável.

8.2 *Stripper* de Tubos Cônicos

Em colaboração com o Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi, estudou-se a possibilidade de implementação de tubos cônicos para condução do gás, redimensionando as condições de trabalho do *stripper*.

Para situações onde a condutância (dependente do diâmetro) do tubo depende da coordenada espacial, a equação de difusão é descrita pela fórmula 8.1.

$$c(x) \cdot \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} + \frac{dc(x)}{dx} \cdot \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} = \\ = -q(x,t) + v(x) \cdot \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} \tag{8.1}$$

De acordo com Degasperi, é necessária a definição de algumas outras grandezas para encontrar a solução desse problema, que agora dependem da coordenada espacial ao longo do eixo do tubo do *stripper*:

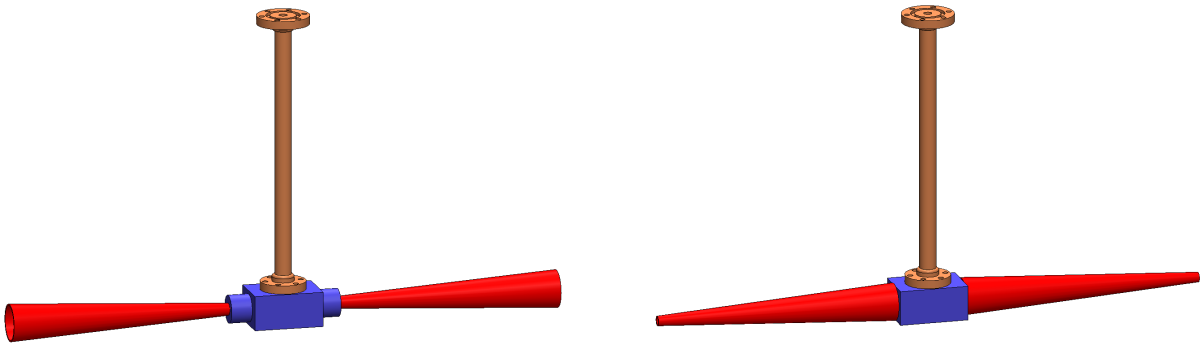
- $c(x) \equiv 96,0 \cdot f^3(x)$, a condutância específica pontual do tubo
- $q(x) \equiv 2\pi \cdot q_0 \cdot f(x)\sqrt{1+\left(\frac{df(x)}{dx}\right)^2}$, a taxa de desgaseificação específica pontual do tubo

Para este caso de estudo, as constantes dessas expressões são definidas para N_2 a 293K. *f(x)* define o lado do tubo, que revolucionado em torno do eixo x, gera o tubo cônico centrado no eixo.

Como o tubo tem simetria em relação ao centro, os cálculos foram realizados para uma metade do tubo. Os resultados da outra metade são um espelho do que fora calculado para essa metade. Define-se então a função que descreve o semi-tubo de acordo com a equação 8.2.

$$f(x) = \left(\frac{d_{Maior} - d_{menor}}{2 \cdot L}\right) \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right) + \frac{d_{menor}}{2} \tag{8.2}$$

Nessa equação, o semi-tubo é parametrizado em função de seu diâmetro maior d_{Maior}, o seu diâmetro menor d_{menor} e o seu comprimento L. Dessa maneira, é possível calcular o comportamento de tubos com o diâmetro nas extremidades maior que o diâmetro central ("tubos de extremidades abertas") ou de tubos com o diâmetro das extremidades menor que o diâmetro central ("tubos de extremidades fechadas"). Um esquema destas duas possibilidades é apresentado na figura 8.1.



(a) *Stripper* de Tubo Cônico de Extremidade Aberta (b) *Stripper* de Tubo Cônico de Extremidade Fechada

Figura 8.1: Desenhos esquemáticos de *stripper* cônico.

A solução desse problema envolve um desenvolvimento das equações muito complexo, que não será reproduzido aqui. O texto de [19] descreve muito bem esses cálculos.

Os resultados obtidos nesses cálculos são apresentados abaixo, no gráfico 8.2.

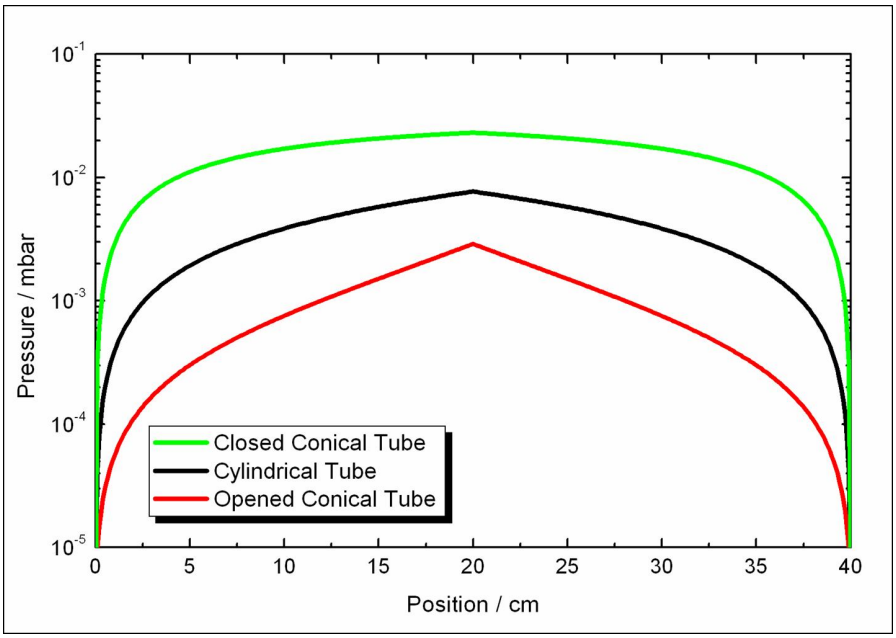


Figura 8.2: Perfil de pressão calculado ao longo de tubos com geometrias diferentes (cônico de extremidades "fechadas", cilíndrico e cônico de extremidades "abertas"), com constante injeção de gás no centro. Condições calculadas para o regime estacionário de pressão - sistema estabilizado temporalmente.

É interessante a comparação dos resultados de tubos cônicos com o tubo cilíndrico. Para

o tubo com extremidades abertas, a quantidade de gás é menor, visto que a probabilidade das partículas escaparem dos limites do tubo se torna maior. Em contrapartida, no tubo com extremidades fechadas (diâmetro das extremidades menor que o diâmetro central), as partículas ficam aprisionadas no interior do tubo com maior eficiência, para uma mesma taxa de injeção de gás.

Dessa maneira, é conclusivo que um possível melhoramento das condições de trabalho para o *stripper* gasoso é através da utilização do tubo cônico com extremidades fechadas. Em um raciocínio inverso, se se desejar uma mesma quantidade de partículas no caminho do feixe, esse tubo requer uma inserção menor de gás. Com essa solução, preservam-se mais as condições de vácuo do acelerador como um todo e os esforços das bombas de vácuo são reduzidos.

Como sugestões para futuros trabalhos nesta linha de raciocínio, ficam dois itens que podem gerar muitos estudos:

- Levantamento experimental do perfil de pressão em tubos cônicos, através da construção de um tubo em grande escala (3 metros aproximadamente), onde os medidores de vácuo, posicionados em algumas seções deste tubo, seriam capazes de medir a pressão do tubo em função de diversos parâmetros, como tipo de gás e pressões de entrada e saída do tubo. A escala elevada é necessária para que os medidores não sejam tão intrusivos ao escoamento.

- Construção de um *stripper* gasoso cônico, para melhoria da eficiência do *stripper* em função da injeção de gás no sistema. A princípio, o primeiro motivo desta proposta seria a preservação do vácuo no restante do sistema para uma mesma espessura de *stripper*, ou até a possibilidade de trabalhar com maiores espessuras de *stripper* para as mesmas condições de vácuo de *stripper* cilíndrico. Esta solução poderia ser pensada até para aceleradores tipo tandem que utilizam *stripper* gasoso para a troca de carga no centro do acelerador. Talvez este estudo permita trabalhar com maiores espessuras de *stripper* nesses aceleradores, possibilitando obtenção de maiores estados de carga do feixe de íons com o mesmo acelerador de partículas.

8.3 AMS de baixíssimas energias

Com este trabalho foi possível verificar a possibilidade de se trabalhar com *stripper* gasoso para a quebra molecular em baixíssimas energias. Isso faz com que seja levantada a hipótese de se construir um sistema AMS com estas energias, desde que sejam bem caracterizadas as proporcionalidades entre feixes carregados e feixe neutro para ^{14}C.

A confirmação da possibilidade de trabalhar com baixas energias, como 30 keV, por exemplo, abriria uma nova linha de pesquisas na área de construção de aceleradores para AMS. Atualmente, os equipamentos comerciais para esse tipo de análise são grandes, de altas energias e requerem alto investimento, mão-de-obra qualificada e elevados gastos com manutenção. Aceleradores com 30 kV de tensão de aceleração podem ser bastante compactos e ocupam pequenos volumes. As fontes de tensão de -30 kV são simples e baratas.

O estudo deste pequeno sistema AMS e uma eventual tentativa de concretizá-lo pode ser um grande avanço para este trabalho.

O prof. Dr. Cayetano Pomar colaborou na discussão dessas ideias durante alguns meses em que esteve visitando o laboratório no auxílio da sua montagem.

8.4 Equipamentos portáteis de quebra de CO_2

Por fim, uma última ideia para utilização dos estudos aqui apresentados é a confecção de sistemas compactos para quebra do gás carbônico atmosférico, causador do efeito estufa.

Aceleradores miniaturizados com fontes pequenas de 30 kV, como os geradores de raio-x utilizados comercialmente na medicina, poderiam ser estudados para selecionar o gás carbônico do ambiente e acelerá-lo em uma câmara com baixo-vácuo (funcionando como *stripper*).

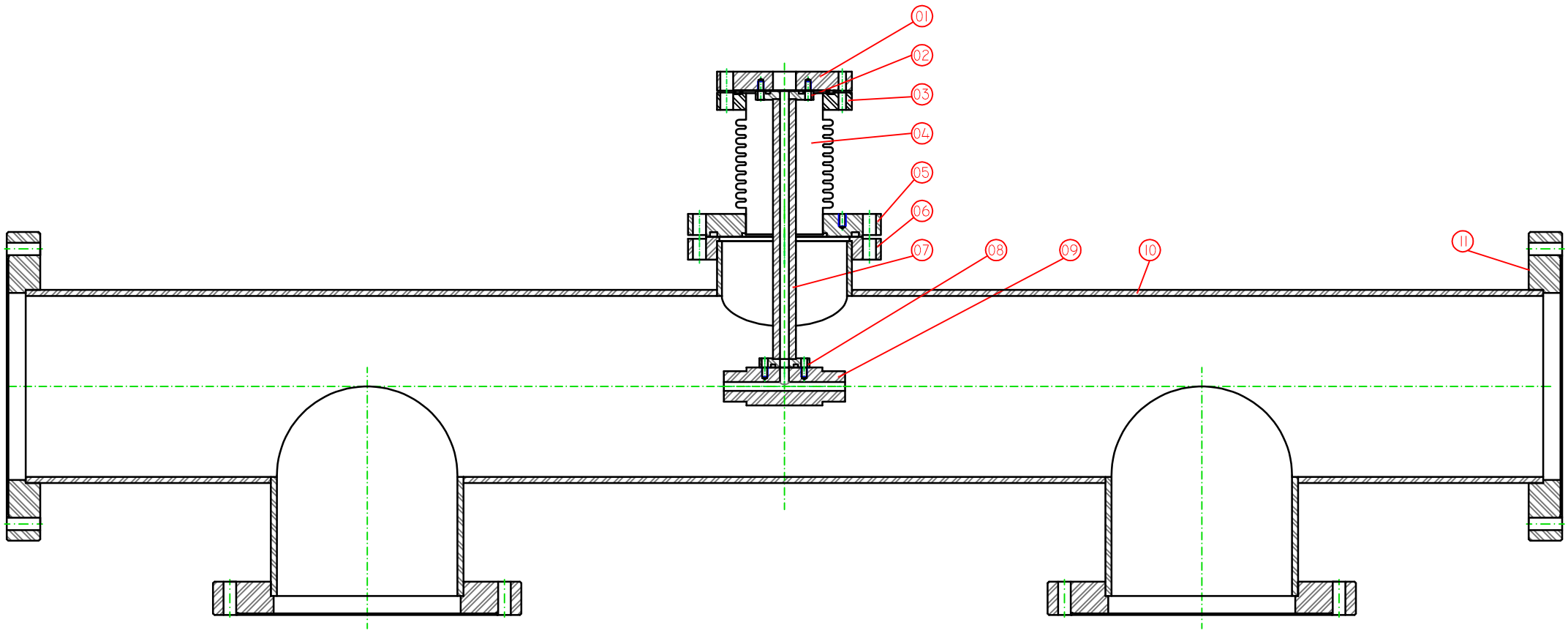
Sistemas baseados nesta ideia poderiam ser implantados em grandes geradores de CO_2, como chaminés de usinas termelétricas, por exemplo.

No entanto, ainda há diversas questões a serem resolvidas para viabilizar esta ideia, como por exemplo a neutralização do C^+ para que não recombine com o Oxigênio.

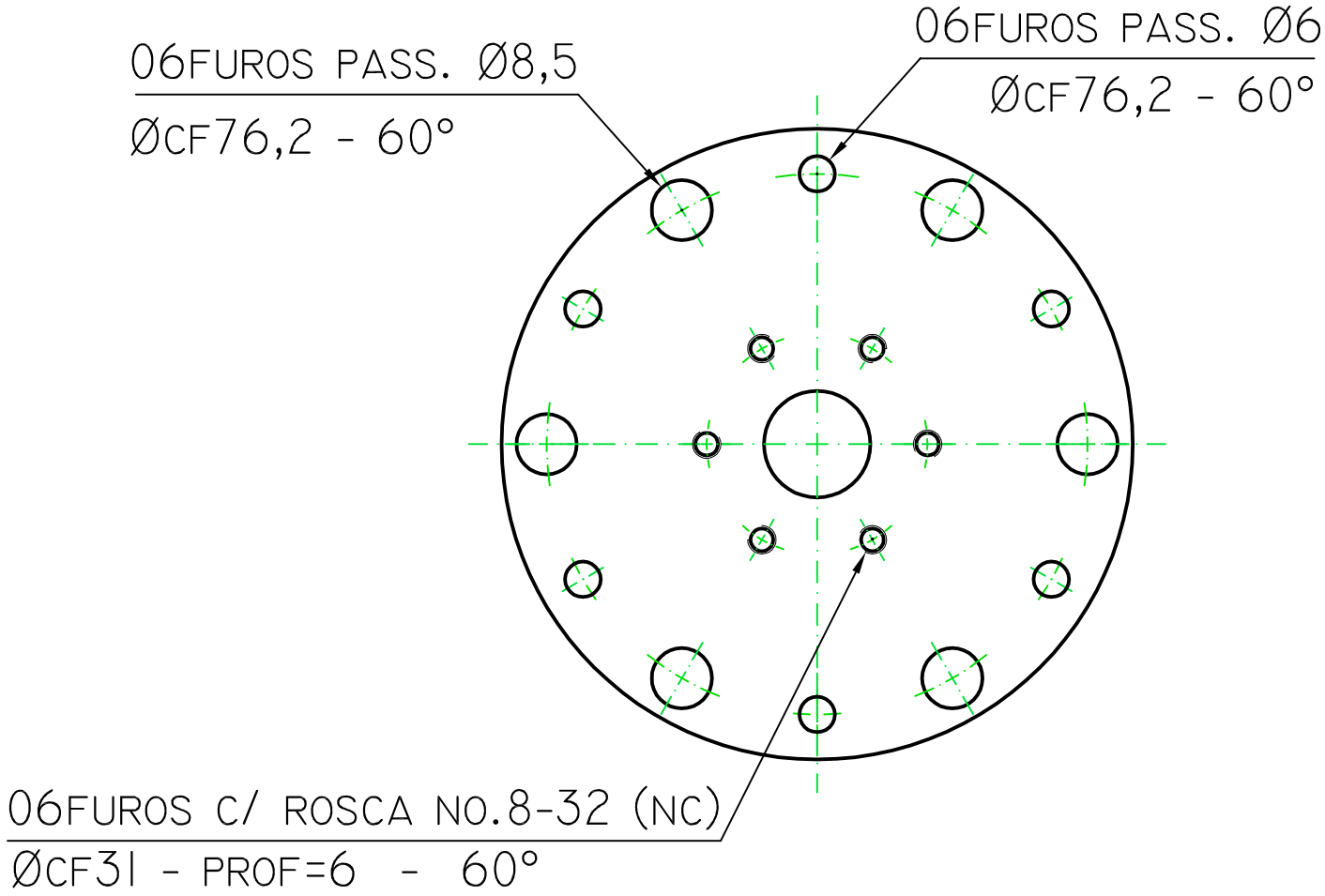
Apêndice A

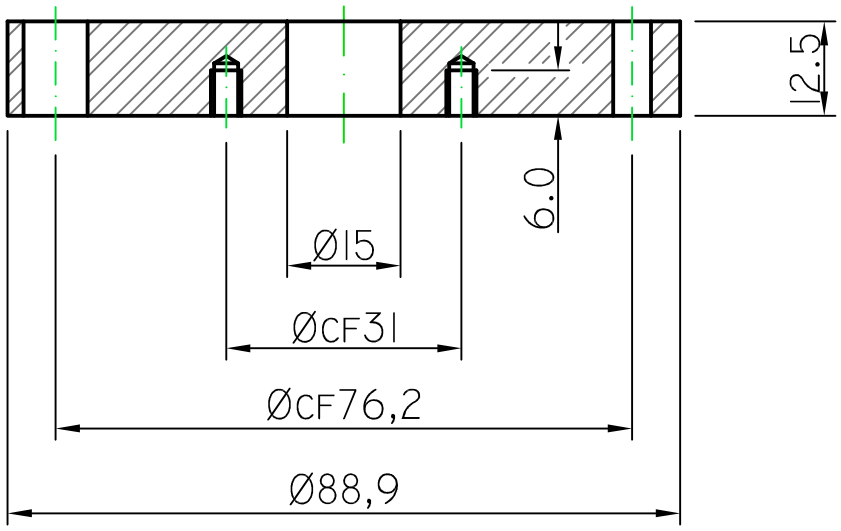
Desenhos da câmara do *Stripper* Gasoso

A seguir são apresentados os desenhos de construção da câmara do *stripper* gasoso, para completude da documentação do projeto desenvolvido.



		MONTAGEM	304SS	1:5
Posição	Quant.	Designação	Material	Escala:
Desenho : JCTERASSI	Conferido : NEMITALA	Aprovado em: 24/NOV/2006	Pasta: D:\DOCUMENTOS\JTERASSI\MDOC\GRUPODETRABELHO\NEMITALA\STRIPPER	
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO INSTITUTO DE FÍSICA PELLETRON-LINAC			Título STRIPPER	
			Observação MEDIDAS EM MM	





01	01	FLANGE Ø3 1/2""	AÇOINOX	1:1
Posição	Quant.	Designação	Material	Escala:

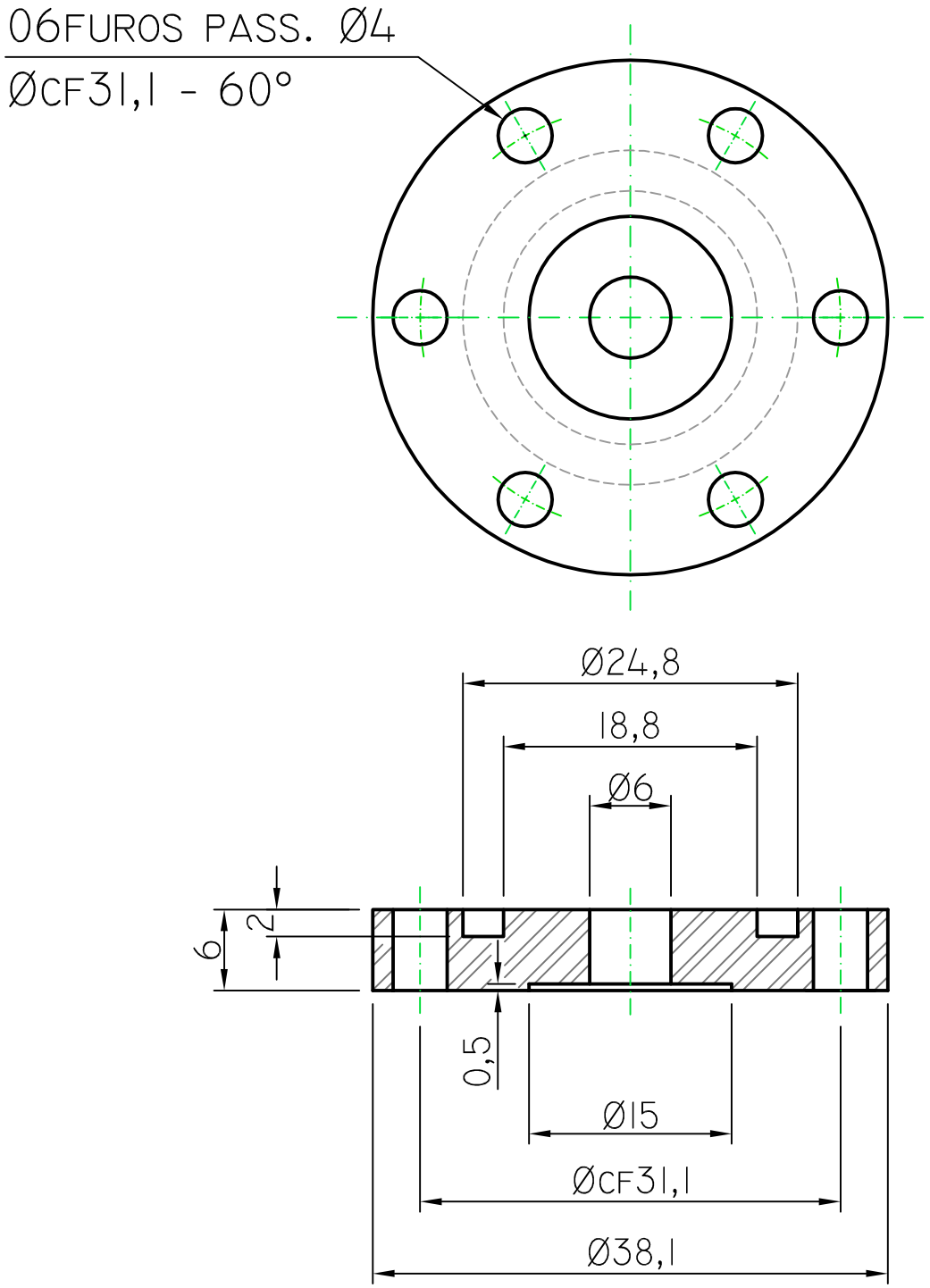
Desenho : JCTERASSI	Conferido : NEMITALA	Aprovado em: 23/NOV/2006

Pasta: D:\DOC\JTER\MEUSDOC\GRUPOSDETRABALHO\NEMITALA\STRIPPER

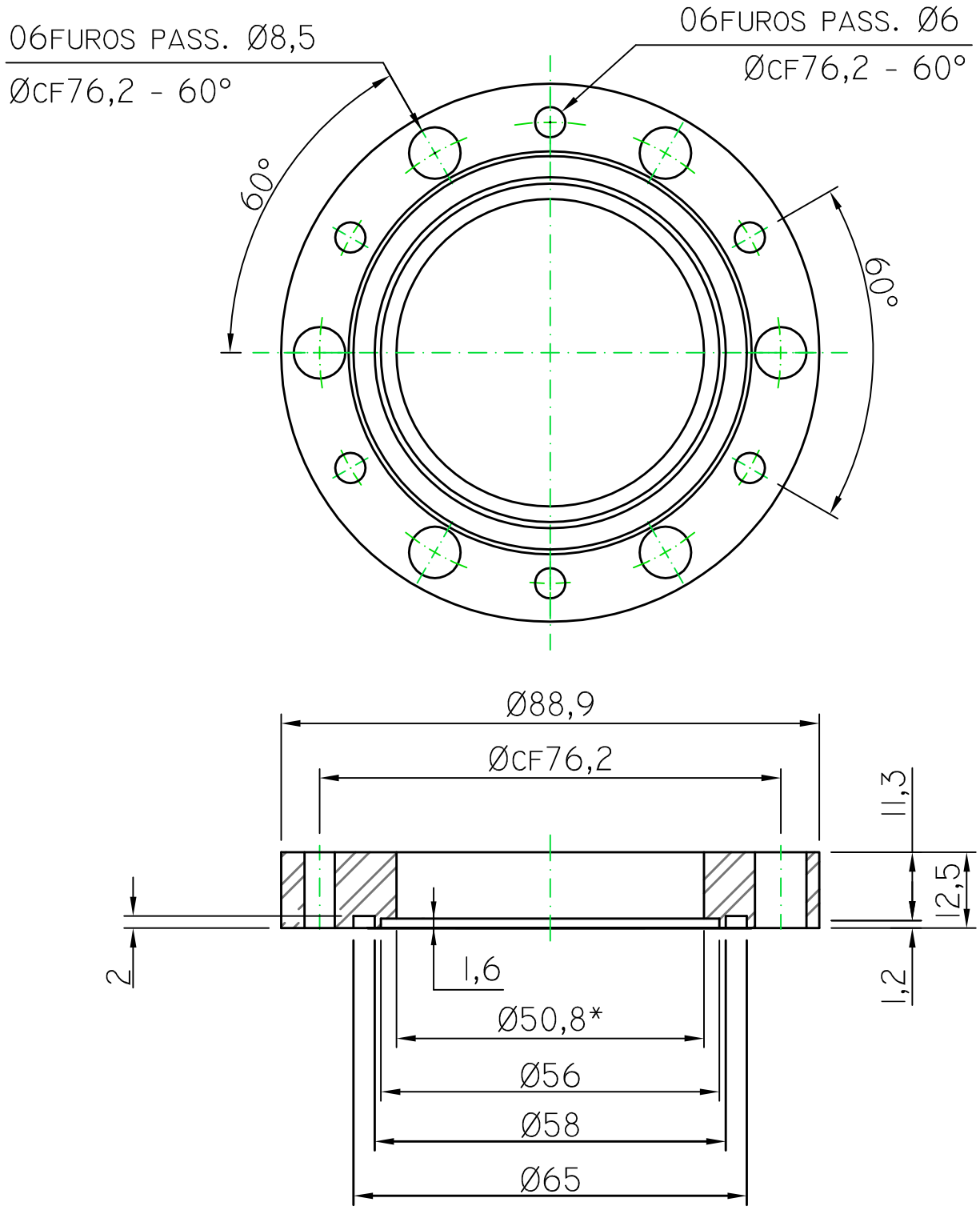
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA
PELLETRON-LINAC

Título: STRIPPER

Observação: MEDIDAS EM MM



02	01	FLANGE Ø1 1/2"	AÇOINOX	2:1
Posição	Quant.	Designação	Material	Escala:
Desenho : JCTERASSI		Conferido : NEMITALA	Aprovado em: 23/NOV/2006	Pasta: D:\DOC\JTER\MEUSDOC\GRUPOSDETRABALHO\NEMITALA\STRIPPER
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO INSTITUTO DE FÍSICA PELLETRON-LINAC			Título STRIPPER	
			Observação MEDIDAS EM MM	



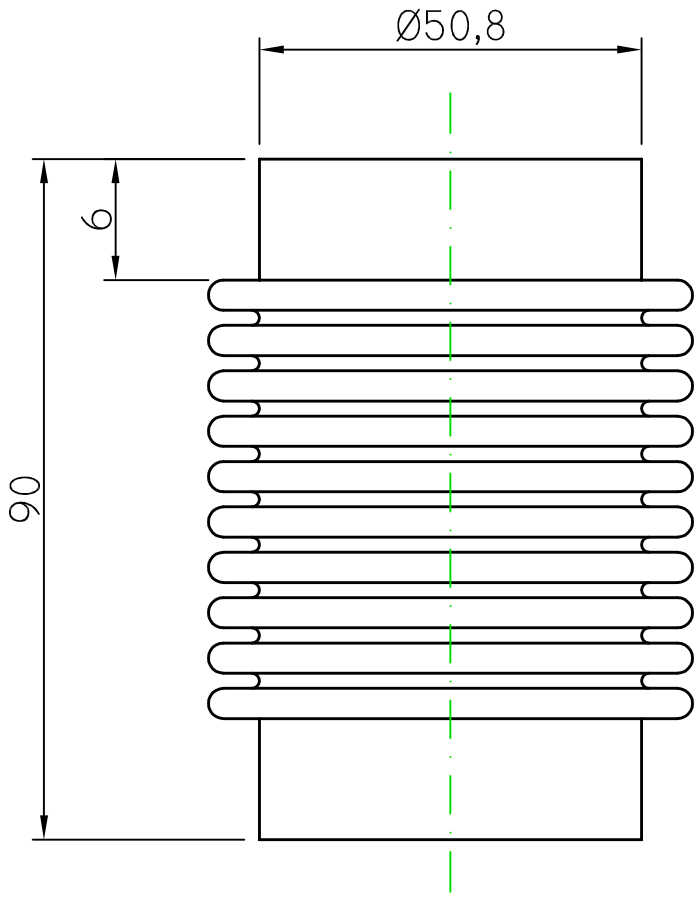
(*) AJUSTAR MEDIDA AO BELLOWS

03	01	FLANGE Ø3 1/2""		AÇOINOX	1:1
Posição	Quant.	Designação		Material	Escala:
Desenho : JCTERASSI		Conferido : NEMITALA	Aprovado em: 23/NOV/2006	Pasta: D:\DOC\JTER\MEUSDOC\GRUPOSDETRABALHO\NEMITALA\STRIPPER	

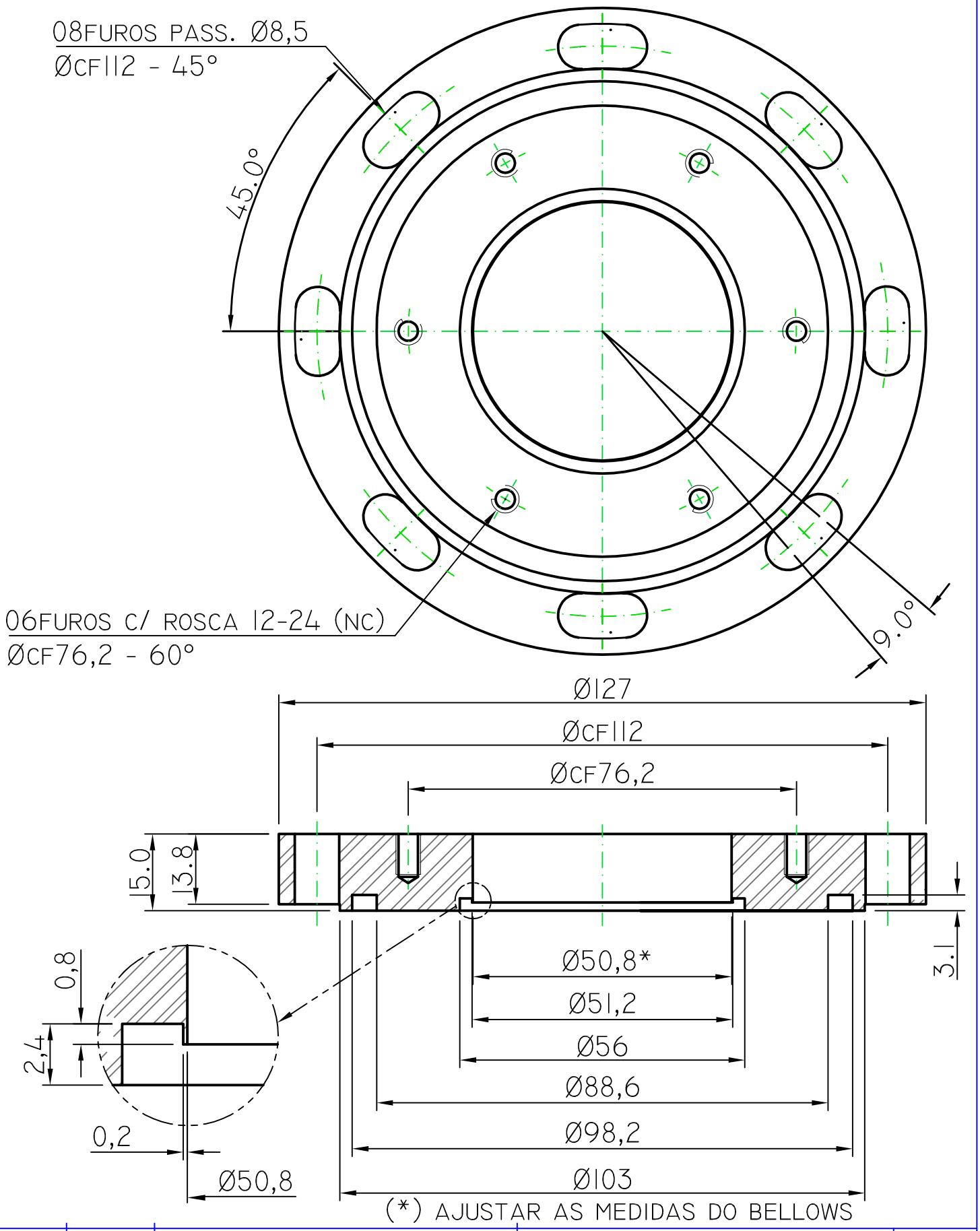
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA
PELLETRON-LINAC

Título: STRIPPER

Observações: MEDIDAS EM MM
DESENHO ALTERADO EM 08/FEV/2007



04	01	BELLOW Ø2"	AÇOINOX	1:1
Posição	Quant.	Designação	Material	Escala:
Desenho : JCTERASSI		Conferido : NEMITALA	Aprovado em: 23/NOV/2006	Pasta: D:\DOC\JTER\MEUSDOC\GRUPOSDETRABALHO\NEMITALA\STRIPPER
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO INSTITUTO DE FÍSICA PELLETRON-LINAC			Título STRIPPER	
			Observação MEDIDAS EM MM	



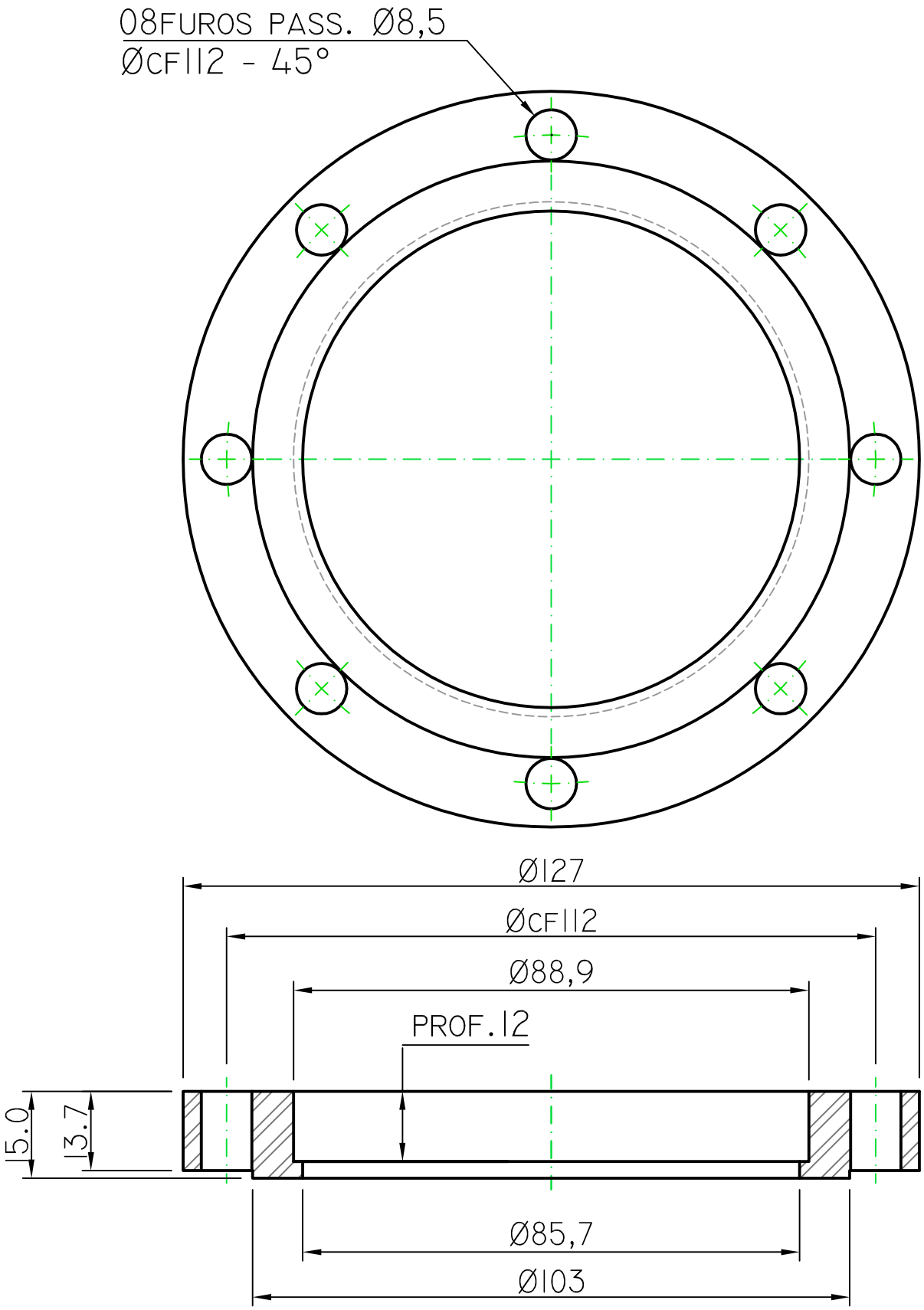
05	01	FLANGE Ø5"	AÇOINOX	1:1
Posição	Quant.	Designação	Material	Escala:

Desenho :	Conferido :	Aprovado em:	Pasta:
JCTERASSI	NEMITALA	23/NOV/2006	D:\DOC\JTER\MEUSDOC\GRUPOSDETRABALHO\NEMITALA\STRIPPER

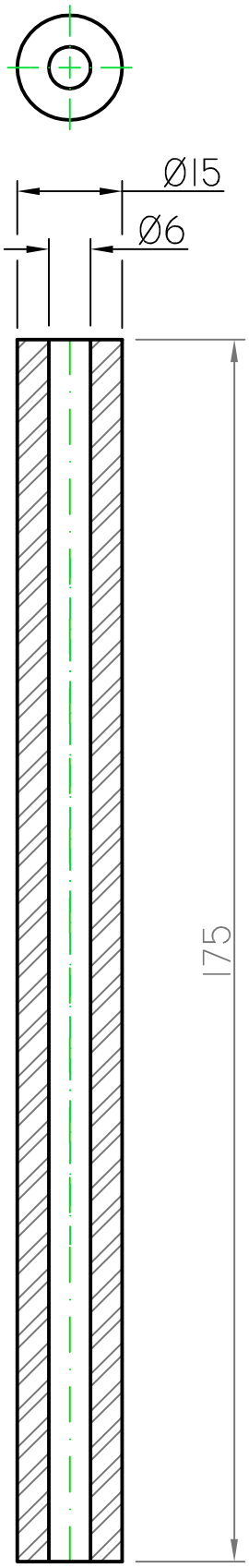
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA
PELLETRON-LINAC

Título: STRIPPER

Observação: MEDIDAS EM MM



06	01	FLANGE Ø5"	AÇOINOX	1:1
Posição	Quant.	Designação	Material	Escala:
Desenho : JCTERASSI		Conferido : NEMITALA	Aprovado em: 23/NOV/2006	Pasta: D:\DOC\JTER\MEUSDOC\GRUPOSDETRABALHO\NEMITALA\STRIPPER
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO INSTITUTO DE FÍSICA PELLETRON-LINAC			Título STRIPPER	
			Observação MEDIDAS EM MM	

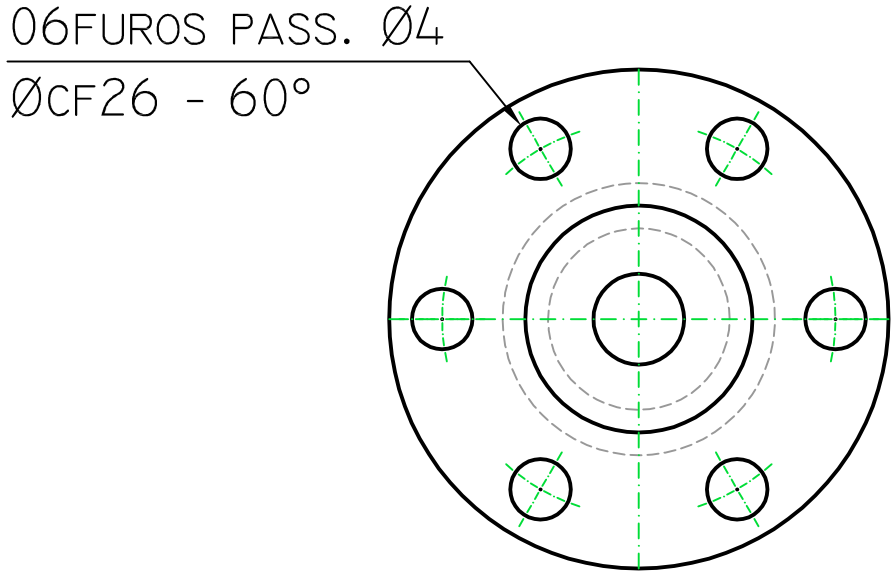


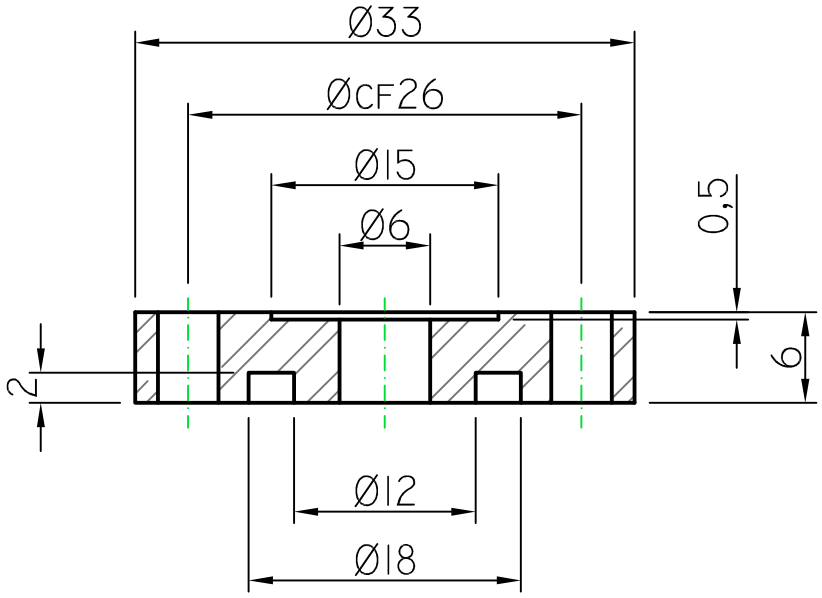
07	01	TUBO	AÇOINOX	1:1
Posição	Quant.	Designação	Material	Escala:
Desenho : JCTERASSI		Conferido : NEMITALA	Aprovado em: 23/NOV/2006	Pasta: D:\DOC\JTER\MEUSDOC\GRUPOSDETRABALHO\NEMITALA\STRIPPER

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA
PELLETRON-LINAC

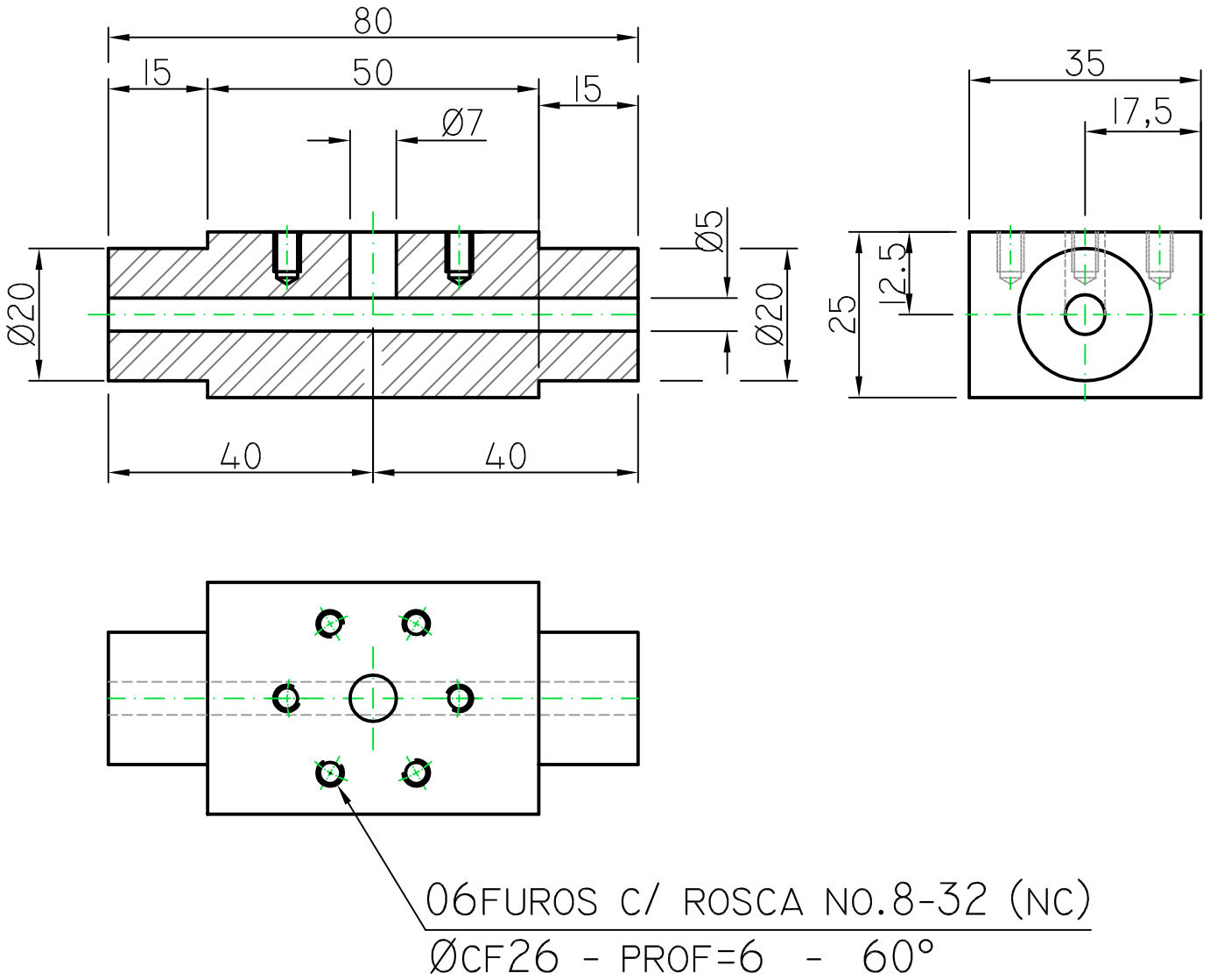
Título: STRIPPER

Observação: MEDIDAS EM MM

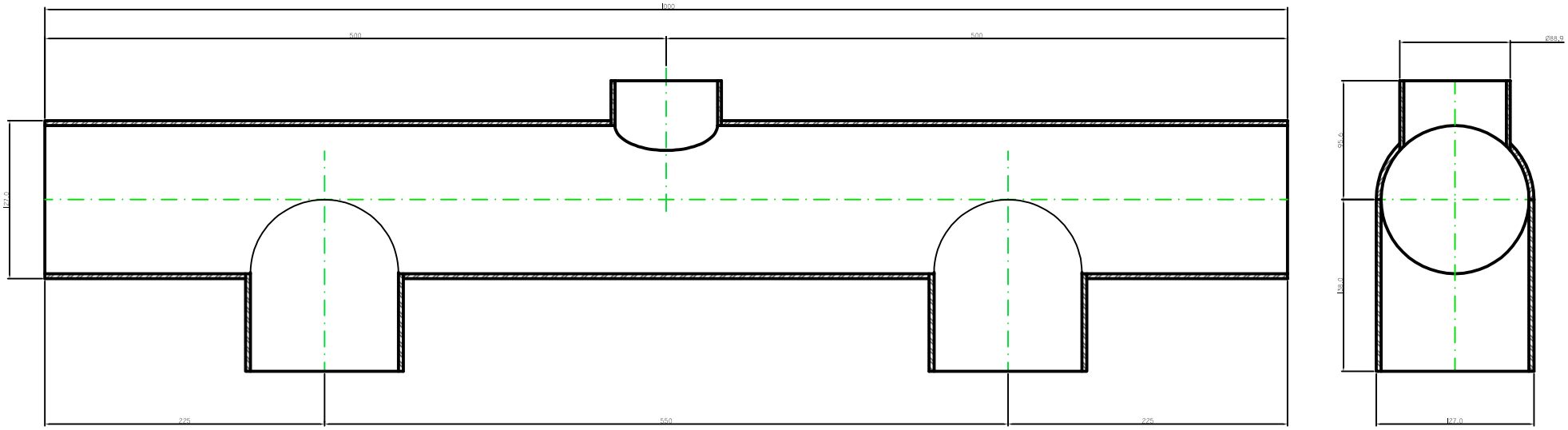




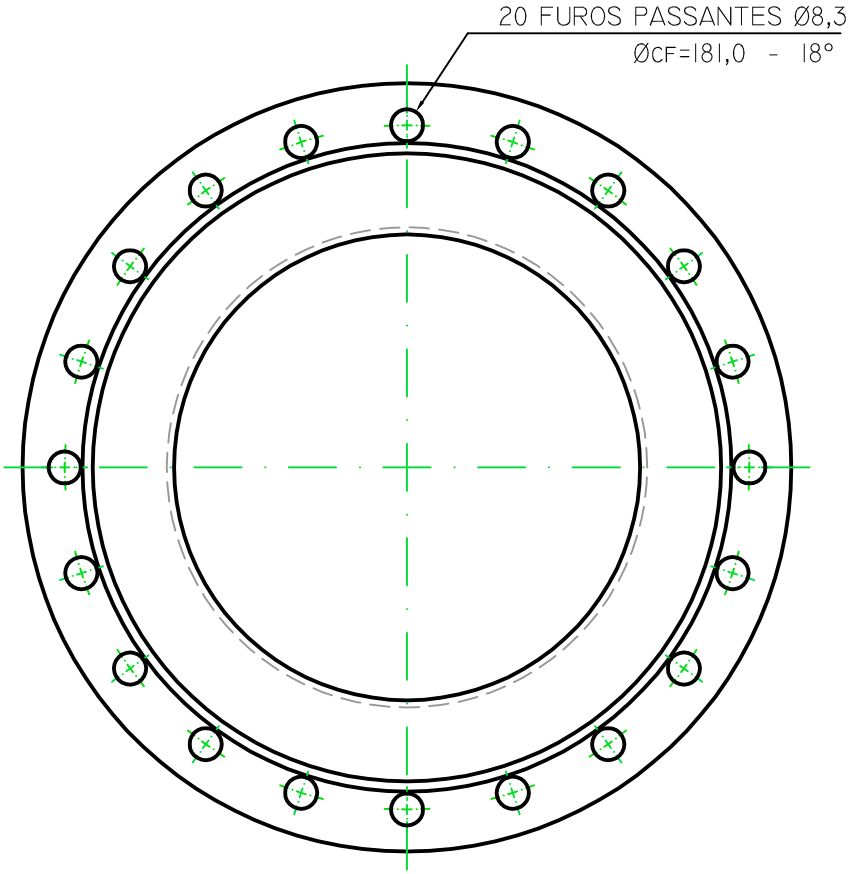
08	01	FLANGE Ø1 5/16"	AÇOINOX	2:1
Posição	Quant.	Designação	Material	Escala:
Desenho : JCTERASSI		Conferido : NEMITALA	Aprovado em: 23/NOV/2006	Pasta: D:\DOC\JTER\MEUSDOC\GRUPOSDETRABALHO\NEMITALA\STRIPPER
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO INSTITUTO DE FÍSICA PELLETRON-LINAC			Título STRIPPER	
			Observação MEDIDAS EM MM	

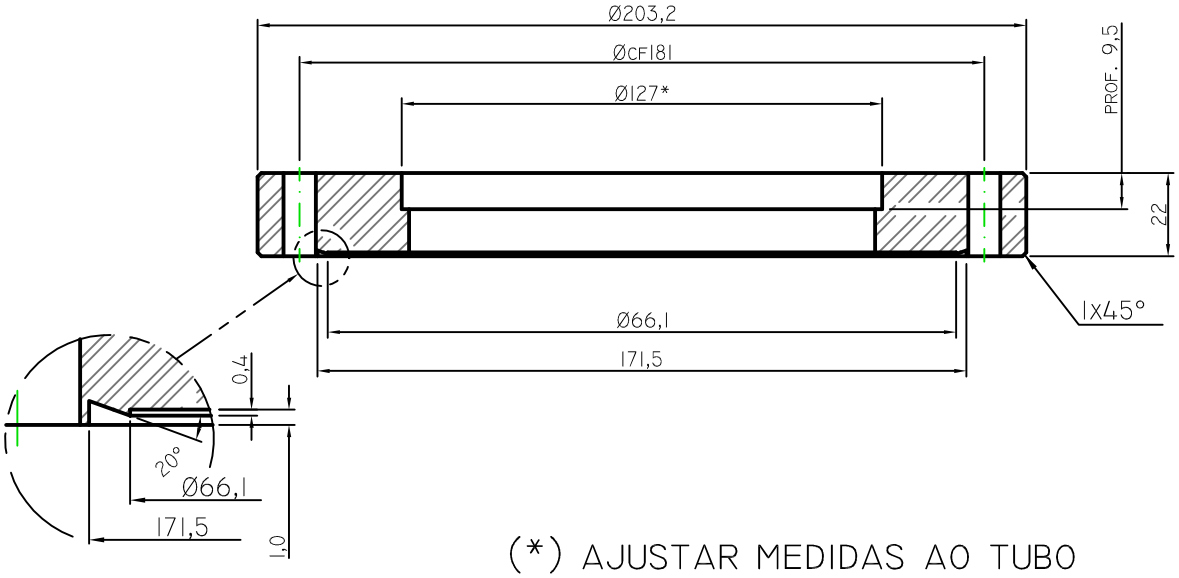


09	01	CORPO CENTRAL	AÇOINOX	1:1
Posição	Quant.	Designação	Material	Escala:
Desenho : JCTERASSI		Conferido : NEMITALA	Aprovado em: 23/NOV/2006	Pasta: D:\DOC\JTER\MEUSDOC\GRUPOSDETRABALHO\NEMITALA\STRIPPER
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO INSTITUTO DE FÍSICA PELLETRON-LINAC			Título STRIPPER	
			Observação MEDIDAS EM MM	



10		CONJUNTO DE TUBOS Ø5" E Ø3 1/2"		304SS	1:5
Posição	Quant.	Designação		Material	Escala:
Desenho : JCTERASSI		Conferido : NEMITALA	Aprovado em: 24/NOV/2006	Pasta: D:\DOCUMENTOS\JTERASSI\MDOC\GRUPODETRABELHO\NEMITALA\STRIPPER	
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO INSTITUTO DE FÍSICA PELLETRON-LINAC				Título STRIPPER	
				Observação MEDIDAS EM MM	





(*) AJUSTAR MEDIDAS AO TUBO

11	04	FLANGE Ø8"	AÇOINOX	1:2
Posição	Quant.	Designação	Material	Escala:
Desenho : JCTERASSI		Conferido : NEMITALA	Aprovado em: 23/NOV/2006	Pasta: D:\DOC\JTER\MEUSDOC\GRUPOSDETRABALHO\NEMITALA\STRIPPER
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO INSTITUTO DE FÍSICA PELLETRON-LINAC			Título STRIPPER	
			Observações MEDIDAS EM MM DESENHO ALTERADO EM 08/FEV/2007	

Referências Bibliográficas

[1] Bromley, D. Allan - *Treatise on Heavy-Ion Science, Volume 7: Instrumentation and Techniques*, Plenum Press New York and London

[2] Aston, Francis W. - *Mass spectra and isotopes*, 1922 - web-site `http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1922/aston-lecture.pdf` consultado em janeiro/2010.

[3] Currie, Lloyd A. - *The Remarkable Metrological History of Radiocarbon Dating [II]*, Journal of Research of the NIST 109:185 (2004)

[4] *World's oldest living tree discovered in Sweden*, web-site `http://www.info.umu.se/NYHETER/PressmeddelandeEng.aspx?id=3061`, consultado em janeiro/2010.

[5] Figura extraída do site `http://www.fs.fed.us/r5/inyo/recreation/bristlecone/images/drama.jpg`, em janeiro/2010.

[6] Figura extraída do site `http://www.msstate.edu/dept/geosciences/CT/TIG/WEBSITES/LOCAL/Summer2003/Harman_Pamela/tree%20rings.JPG`, em janeiro/2010.

[7] Cohen, M.C.L. et al - *Wetland dynamics of Marajó Island, northern Brazil, during the last 1000 years*, Catena 76 (2008), páginas 70-77

[8] Martinho, C.T. et al - *Mid to late Holocene evolution of transgressive dunefields from Rio Grande do Sul coast, southern Brazil*, Marine Geology 256 (2008), páginas 49-64

[9] Angulo, R.J. et al - *Chronostratigraphy and radiocarbon age inversion in the Holocene regressive barrier of Paraná, southern Brazil*, Marine Geology 252 (2008), páginas 111-119

[10] Dias, C.M. et al - *^{14}C content in vegetation in the vicinities of Brazilian nuclear power reactors*, Journal of Environmental Radioactivity 99 (2008), páginas 1095-1101

[11] Behling, H. et al - *Late Quaternary vegetation and climate dynamics in the Serra da Bocaina, southeastern Brazil*, Quaternary International 161 (2007), páginas 22-31

[12] *Grupo de Física Aplicada com Aceleradores* em `http://www.dfn.if.usp.br/pesq/faa/`

[13] *Processo FAPESP número 2002/11286-8*, prof. Dr. Manfredo Harry Tabacniks.

[14] Shixiang, P. et al - *A new gas stripper design for PKUAMS*, Preceesings of the Second Asian Particle Accelerator Conference, Beijing - China (2001)

[15] Barth, W. et al - *The new gas stripper and charge state separator of the GSI high current*

[16] Kiisk, M. et al - *The charge distribution of Be, C, Cl and Al ions at the Lund Pelletron accelerator with the recently modified terminal pumping in use*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 521 (2004)

[17] Hartmann, B. et al - *Energy spread of ion beams passing a gas stripper*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 124 (1997)

[18] Baumann , H. et al - *The Frankfurt Pig Ion Source*, Nuclear Instruments and Methods 189:107 (1981)

[19] Degasperi, F. T. - *Modelagem e Análise Detalhadas de Sistemas de Vácuo*, Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP (2002)

[20] Lafferty, J. M. - *Foundations of Vacuum Science and Technology*, Wiley-Interscience Publication (1998)

[21] Degasperi, F. T. et al - *Pressure Field in a tube with a general and arbitrary time- and position-dependent gas source*, American Vacuum Society (2004) [DOI: 10.1116/1.1778408]

[22] Degasperi, F. T. et al - *Calculation of the vacuum pressure gradient in field emission displays*, Surface and Coatings Technology 146-147 (2001)

[23] Zheng, Sanyi - *Conductance Calculation - Molecular Flow, Long Tube of Circular Cross Section*, GEM TN-93-382 em `http://lss.fnal.gov/archive/other/ssc/ssc-gem-tn-93-382.pdf`.

[24] Bondi, A. - *Van der Waals Volumes and Radii*, J. Phys. Chem. 68: 441. doi:10.1021/j100785a001 (1964)

[25] Manual do Medidor de Pré-Vácuo - *HPS Series 937A, High Vacuum Multi-Sensor System - Operation and Maintenance Manual*, MKS Instruments Inc. (1998)

[26] Synal, H. A. et al - *Radiocarbon AMS towards its low-energy limits*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 223-224 (2004)

[27] Synal, H. A. et al - *The PSI/ETH small radiocarbon dating system*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 172 (2000)

[28] Schroeder, J. B. et al - *Initial Results with Low Energy single stage AMS*, National Electrostatics Corp.

[29] Synal, H. A. et al - *New concepts for radiocarbon detection system*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 161-163 (2000)

[30] Acquadro, J. C. et al - *A simple method for fast negative atomic and molecular ion studies in tandem accelerators*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 171 (2000)

[31] Turiz, C. et al - *Accelerator mass spectrometry: New trends ans applications*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 266:1837 (2008)

[32] Ziegler, J. F. et al - *Software - SRIM 2008*, disponível no site `www.srim.org` em janeiro/2010.

[33] Baglin, V. et al - *Secondary Electron Emission: Experimental Results ans Their Implications*, CERN - LHC/VAC - NH-2STREAMS/01 (2001)