



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

# “Desenvolvimento de Uma Cápsula Selada de $^{22}\text{Na}$ para Produção de Feixe de Pósitrons”

Adriana Nascimento de Souza

Dissertação apresentada ao Departamento  
de Física da Universidade Federal de Juiz  
de Fora, para obtenção do Título de Mestre  
em Física.

Orientadora: **Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria Cristina Andreolli Lopes**

JUIZ DE FORA, 01 DE OUTUBRO DE 2015.

*“O pensamento é apenas um lampejo entre duas longas  
noites, mas este lampejo é tudo.”*

*Henri Poincaré.*

*Ando devagar porque já tive pressa e levo esse sorriso  
Porque já chorei demais  
Hoje me sinto mais forte, mais feliz, quem sabe  
Eu só levo a certeza de que muito pouco sei, ou nada sei.*

*Tocando em Frente (A. Sater e R. Teixeira)*

*Dedico a tese à Deus e aos meus queridos pais: Vicente e Meire (in memoriam),  
pelo exemplo de vida, amor e carinho.*

## **AGRADECIMENTOS**

---

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de minha vida, e não somente nestes anos como mestranda, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

À professora orientadora Maria Cristina Andreolli Lopes, por todas as horas dedicadas à conclusão deste trabalho, sempre com muito empenho, dedicação e bons conselhos e principalmente muita paciência.

Aos colegas do LEAM (Laboratório de Espectroscopia Atômica e Molecular) da UFJF, que fizeram parte também do êxito deste trabalho e pela amizade e colaboração.

Aos professores Eduardo Nascimento, James Sullivan, Michael Brunger e Stephen J. Buckman pela grande ajuda durante a concretização deste trabalho.

A Professora Ana Paula Soares Fontes do Departamento de Química da UFJF pela solução de Na não radiativa e ao Domingos, secretário da Pós-Graduação do DF-UFJF, por toda ajuda e atenção de sempre.

Ao Francisco, Fernando, Leonardo e Lucas, torneiros mecânicos da Oficina Mecânica do DF da UFJF, por toda a ajuda, sem o qual este projeto não teria obtido sucesso.

À minha família, por acreditar em mim e investir nos meus sonhos. Mesmo à distância, estiveram sempre presentes em todos os momentos. E a você, minha flor, minha mamãe, que não conseguiu esperar a realização deste momento, as lembranças de suas palavras foi que me deram, em alguns momentos, a esperança para seguir. E a você, meu primeiro amor, meu paizão, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinha nessa caminhada.

À todos os funcionários e professores do Departamento de Física da UFJF.

Ao Departamento de Física pela infra-estrutura que disponibilizou.

À UFJF pela bolsa de mestrado e ao CNPq, FAPEMIG, CAPES e FINEP pelo suporte financeiro ao Laboratório de Espectroscopia Atômica e Molecular.

## **RESUMO**

---

Este trabalho teve como objetivo a produção de uma cápsula selada de  $^{22}\text{Na}$ , funcionando como fonte emissora de pósitrons, para a nova linha de pesquisa do Laboratório de Espectroscopia Atômica e Molecular (LEAM) da UFJF, que visa a aplicação de feixes de pósitrons lentos, ao invés de elétrons nos aparelhos disponíveis no LEAM, no estudo de átomos ou moléculas. O trabalho englobou várias etapas, tais como a escolha da fonte emissora de pósitrons, o armazenamento do radionuclídeo, o projeto da cápsula selada, sua construção, o desenvolvimento de um sistema de carregamento da cápsula, sua selagem, considerando todos os aspectos inerentes à proteção radiológica. A fonte emissora de pósitron escolhida foi o elemento radioativo  $^{22}\text{Na}$ , radioisótopo de meia vida longa (2,6 anos) e meia vida biológica (11 dias) razoavelmente baixa. Sua aplicação não é imediata e requer seu acondicionamento adequado e seguro em uma cápsula perfeitamente selada, sendo posteriormente, necessário moderar a energia dos pósitrons rápidos emitidos espontaneamente pela fonte. Esta é a primeira cápsula de  $^{22}\text{Na}$  selada produzida no Brasil, colocando-nos no seleto grupo de pesquisadores que dominam esta tecnologia.

Palavras-chave: Cápsula selada de  $^{22}\text{Na}$ , feixe de pósitrons, interação pósitron-molécula.

## ***ABSTRACT***

---

This work aimed to produce a sealed capsule of  $^{22}\text{Na}$ , consisting of a source of positrons for the new line of research of Atomic and Molecular Spectroscopy Laboratory (LEAM) - UFJF, to use optionally slow positron beams, rather than electrons, in the apparatus available in this laboratory to study atoms and molecules. The work encompassed several steps, such as the choice of the emission source of positrons, radionuclide storage, the sealed capsule design, its construction, the development of a charging system of the capsule, sealing, considering all aspects of inherent in radiological protection. The positron source chosen was the radioactive element  $^{22}\text{Na}$ , long half-life radioisotope (2.6 years) and reasonably low biological half-life (11 days). Its application is not immediate and requires its proper and safe packaging in a perfectly sealed capsule, being subsequently necessary to moderate the energy of fast positrons spontaneously emitted by the source. This is the first  $^{22}\text{Na}$  sealed capsule produced in Brazil, placing us in the select group of researchers who have mastered this technology.

Keywords:  $^{22}\text{Na}$  sealed capsule, positron beam, positron-molecule interaction.

## **SUMÁRIO**

---

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	iv
<b>RESUMO</b> .....	v
<b>ABSTRACT</b> .....	vi
<b>SUMÁRIO</b> .....	vii
<b>LISTA DE FIGURAS E TABELAS</b> .....	x
<b>Cap.1 – INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>Cap.2 – ASPECTOS TEÓRICOS</b> .....	6
2.1 A Descoberta do Pósitron.....	6
2.2 Processo de Aniquilação.....	8
2.3 Formação do Átomo de Positrônio.....	10
2.4 Método de Obtenção do Feixe de Pósitrons.....	11
<b>Cap.3 – PROTEÇÃO RADIOLÓGICA E CÁLCULO DE BLINDAGEM</b> .....	16
3.1 Introdução.....	16
3.2 Regras Básicas de Radioproteção.....	18
3.3 Cálculo de Blindagem.....	20
3.3.1 Cálculo de Blindagem para o Pósitron.....	21
3.3.2 Cálculo de Blindagem para a Radiação Gama.....	23
3.3.3 Cálculo da Taxa de Dose.....	26
<b>Cap.4 - ASPECTO EXPERIMENTAL</b> .....	31
4.1 Projeto da Cápsula Selada de $^{22}\text{Na}$ .....	31
4.1.1 Projeto da Cápsula.....	32

4.1.2 Janela Radiotransparente ao Póstron.....	34
4.1.3 Resistência da Película de Kapton a Variação de Pressão.....	36
4.2 Processo de Carregamento da Cápsula.....	39
4.3 Processo de Selagem da Cápsula.....	47
<b>Cap.5 – Conclusões e Perspectivas.....</b>	<b>49</b>
<b>Apêndice A-</b> Manual de Procedimento de Carregamento da Cápsula de $^{22}\text{Na}$ .....	<b>52</b>
<b>Apêndice B –</b> Grandezas e Unidades de Radioproteção.....	<b>58</b>
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>62</b>



## LISTA DE FIGURAS

---

<b>Figura-2.1:</b> Fotografias obtidas por Carl Anderson em experimentos com raios cósmicos.....	7
<b>Figura-2.2:</b> Desenho esquemático do processo de aniquilação pósitron/eletron.....	9
<b>Figura-2.3:</b> O pósitron e o elétron orbitando em torno de um centro de massa comum.....	10
<b>Figura-2.4:</b> Diagrama esquemático do processo de obtenção do par elétron-pósitron (LINACs). Neste caso, elétrons de alta energia ao interagirem com um alvo absorvedor produzem fótons de alta energia, criados pelo efeito Bremsstrahlung. Os fótons energéticos ao interagirem com o núcleo do alvo produzem o par elétron-pósitron.....	12
<b>Figura-2.5:</b> Esquema de decaimento do $^{22}\text{Na}$ . Observa-se que 90,3% decai pela emissão de um pósitron para o estado excitado do $^{22}\text{Ne}$ , seguido em média de 3 ps pela emissão de um gama de $1,274\text{ MeV}$ .....	14
<b>Figura 2.6:</b> Espectro de emissão de energia do radioisótopo $^{22}\text{Na}$ e a faixa de energia após a moderação, utilizando um moderador de W, onde $dN+/dE$ é o número de pósitrons por energia.....	15
<b>Figura-3.1:</b> Dosímetros individuais do grupo de pesquisa e contador Geiger.....	19
<b>Figura-3.2-</b> Representação da perda de intensidade da radiação gama ao interagir com a matéria.....	23
<b>Figura 3.3</b> – Representação do uso de uma camada semi-redutora.....	25
<b>Figura-4.1:</b> Cápsula de $^{22}\text{Na}$ desenvolvida no LEAM/UFJF. Olhando da esquerda para a direita temos: a base inferior da cápsula, o copo de Ta, o corpo de selagem e por último a tampa.....	33
<b>Figura-4.2:</b> Desenho esquemático da cápsula selada de $^{22}\text{Na}$ .....	33

<b>Figura-4.3:</b> Cápsula selada de $^{22}\text{Na}$ presa a um manipulador linear.....	34
<b>Figura-4.4:</b> Corpo de selagem da cápsula com janela fixada pela tampa (à direita). Parte interna da fixação da janela na cápsula, onde se observa de cima para baixo o anel de cobre, a película de kapton, o anel de kapton e a tampa de fechamento da cápsula ( a esquerda).....	36
<b>Figura-4.5:</b> Área de manipulação de armazenamento da cápsula selada. A esquerda tem a vista da capela química, capela de manipulação e cofre de chumbo para armazenamento do $^{22}\text{Na}$ . Na figura central tem-se a capela química e na figura à direita, a capela de armazenamento.....	40
<b>Figura-4.6:</b> Visão superior da mesa de manipulação e vista da barreira de proteção.....	40
<b>Figura-4.7:</b> Vista do frontal da mesa de manipulação.....	41
<b>Figura-4.8:</b> Desenho esquemático da mesa de manipulação com movimento nas direções x,y e z, construída para o processo de carregamento, secagem e selagem da cápsula de $^{22}\text{Na}$ .....	41
<b>Figura-4.9:</b> Espelho redondo usado para visualizar o carregamento. Lâmpada de infravermelho e canhão de calor, ambos usado para secagem a seco da gota de NaCl.....	42
<b>Figura-4.10:</b> 1º Etapa: Uma gota de 10µl da solução radioativa de NaCl foi depositado no copo de tântalo situado no interior da cápsula. Todo o procedimento de descarregamento da pipeta micrométrica foi observado pelo auxílio de um pequeno espelho redondo fixado num suporte na parede de chumbo do castelo.....	43
<b>Figura-4.11:</b> 2º Etapa: A cápsula deslocada com o auxílio do braço mecânico foi colocada sobre o canhão de calor para iniciar o processo de secagem.....	43
<b>Figura-4.12:</b> 3º Etapa: Neste processo o canhão de calor foi acionado durante 50 segundos, e a água contida na solução radioativa de NaCl foi evaporada.....	44
<b>Figura-4.13:</b> 4º Etapa: A cápsula foi novamente posicionada abaixo da pipeta micrométrica e, todo o procedimento acima foi repetido N vezes, até que a cápsula esteja totalmente carregada.....	44
<b>Figura-4.14:</b> Testes iniciais de carregamento e secagem com a solução não radioativa de NaCl.....	45

<b>Figura-4.15:</b> Formação da deposição correta do sódio não radioativo no interior do copo de Ta.....	46
<b>Figura-4.16:</b> Procedimento de selagem e as condutas para a retirada da cápsula após a selagem.....	47
<b>Figura-4.17:</b> Desenho esquemático do processo de fechamento final da cápsula.....	47
<b>Figura-4.18:</b> Recipiente de chumbo para o armazenamento da cápsula e o castelo de chumbo destinado ao armazenamento de elemento radioativo.....	48

## LISTA DE TABELAS

---

<b>Tabela-3.1:</b> Limites primários de doses efetiva e equivalentes por ano, dados retirados da Norma CNEN-NN 3.01.....	17
<b>Tabela-3.2:</b> Limites primários de dose efetiva para o corpo inteiro, dados calculados em cima da Norma CNEN-NN 3.01, considerando que o ano seja composto por 50 semanas de trabalho e, que a semana seja composta por 40 horas de trabalho.....	18
<b>Tabela-3.3:</b> Tabela apresenta a espessura necessária de alguns materiais absorvedores para o pósitron.....	23
<b>Tabela-3.4.</b> Tabela considerando os limites de taxa de dose para o publico em geral, $\dot{D} = 0,0005 mSv/h$ , para uma fonte de $^{22}Na$ com atividade de $6mCi$ .....	28
<b>Tabela-3.5.</b> Tabela considerando os limites de taxa de dose para o trabalhador $\dot{D} = 0,01 \frac{mSv}{h}$ , para uma fonte de $^{22}Na$ com uma atividade de $6mCi$ .....	28
<b>Tabela-3.6.</b> Tabela considerando os limites de taxa de dose para o publico em geral, $\dot{D} = 0,0005 \frac{mSv}{h}$ , para uma fonte de $^{22}Na$ com uma atividade de $1mCi$ .....	29
<b>Tabela-3.7.</b> Tabela considerando os limites de taxa de dose para o trabalhador $\dot{D} = 0,01 \frac{mSv}{h}$ , para uma fonte de $^{22}Na$ com uma atividade de $1mCi$ .....	29
<b>Tabela-B.1.</b> Valores do fator de Qualidade Efetivo Q para os diversos tipos de radiações (CNEN-NE- 3.01 e ICRP-26) [73 - 80].....	60
<b>Tabela-B.2.</b> Valores de fator de ponderação $W_t$ para tecidos ou órgãos (ICRP 60 e CNEN NN 3.01-2011) [73 - 81].....	61

# Capítulo 1

## Introdução

---

A matéria bariônica contida no universo é composta por átomos e moléculas, as quais são formadas por partículas elementares tais como elétrons, quarks, fótons e etc. Sabemos que para cada partícula de matéria, há sempre uma partícula de antimatéria correspondente, denominada antipartícula. Partícula e antipartícula possuem a mesma massa, porém cargas de sinais opostos. É observado experimentalmente que, quando uma partícula e sua antipartícula colidem, elas se aniquilam liberando radiação. O que acontece no meio e os efeitos correlacionados a seus processos de colisão são muito interessantes para o campo científico, e é atualmente o foco de grandes pesquisas em física [1 - 5].

Observar uma antipartícula não é algo trivial, quando comparamos com a quantidade das partículas de matéria correspondente a esta antipartícula. De um modo geral, somente conseguimos fazer sua observação em alguns laboratórios que possuem grandes aceleradores de partículas, como o CERN, na Suíça, e o Fermilab, nos EUA, que se dedicam aos estudos dos átomos exóticos. No entanto, a antipartícula do elétron, o pósitron ( $e^+$ ), também conhecido como radiação  $\beta^+$  (“beta mais”), é uma antipartícula razoavelmente acessível em qualquer ambiente de pesquisa. Sua existência foi prevista teoricamente por Dirac em 1928 [6], sendo observado experimentalmente quatro anos mais tarde por Anderson [7], o que lhe conferiu um prêmio Nobel em 1936 por tal descoberta. O pósitron pode ser facilmente obtido por meio de decaimento natural de radioisótopos ou através de aceleradores de partículas. Os radioisótopos mais comumente empregados para obtenção de pósitrons são o  $^{22}\text{Na}$  e  $^{58}\text{Co}$ . Já nos

aceleradores, pósitrons são obtidos quando elétrons de alta energia atingem a superfície de um alvo de alto número atômico, por exemplo, o tungstênio. Em ambos os casos, usando radioisótopos e ou aceleradores, os pósitrons são emitidos com um amplo espectro de energia, cobrindo a região de energia de zero a 540 MeV. Investigar a incidência de feixes de pósitrons sobre moléculas possibilita o acesso a informações complementares, que não são obtidas através da incidência de feixes de elétrons. No processo de colisão de pósitrons com átomos ou moléculas observam-se canais de reações semelhantes aos observados na colisão com elétrons, como espalhamento elástico, excitações eletrônicas, vibracionais e rotacionais no caso de moléculas, ionização, mas adicionalmente observa-se a formação de positrônio e também processos de aniquilação [8]. Entretanto, para realizar o estudo experimental destes canais, é necessário desacelerar os pósitrons rápidos provenientes de suas fontes e monocromatizá-los, o que é de fato feito ineficientemente, através do uso de “moderadores”. Os moderadores consistem de materiais com uma função trabalho positiva para pósitron, tal que, quando pósitrons rápidos são transmitidos através destes, eles são sucessivamente desacelerados até sua termalização. Quando a termalização ocorre próxima a superfície do material, pósitrons são ejetados para fora deste com energias em torno de 2 eV. O grande desafio de pesquisadores experimentais desta área consiste no fato de que este processo de termalização ou moderação apresenta baixíssima eficiência (~0,0001%) [3, 9 - 13].

Embora muitas questões referentes aos processos de interação de pósitrons com átomos e moléculas vêm sendo estudadas por diversos grupos de pesquisa experimentais, ao redor do mundo [4, 14 - 22], muitos estudos ainda se fazem necessários com o intuito de obtermos um completo entendimento sobre a interação matéria e antimatéria. Existem também uma grande comunidade de pesquisadores teóricos dedicando-se a estas investigações, e neste caso destacamos os grupos brasileiros, da UNICAMP, coordenado pelo Professor Marco Aurélio P Lima, da UFMG, coordenado pelo Professor José Rachid Mohallem, na UFPR pelo Professor Marcio Henrique Bettega e mais recentemente na USP, pelo professor Marcio Varella. As dificuldades experimentais no estudo das interações de pósitrons com átomos e moléculas se devem essencialmente à dificuldade de se produzir feixes intensos e com alta resolução de energia. Como mencionado, há a ineficiência no processo de moderação que produz feixes de baixas intensidades, o que resulta na dificuldade de sua monocromatização,

utilizando elementos ópticos eletrostáticos usuais, aplicados a feixes eletrônicos. A baixa resolução do feixe obtido, também acaba dificultando a realização de muitos outros experimentos, como a análise mais precisa de fenômenos próximos ao limiar de ocorrência. Com o advento de armadilhas magnéticas desenvolvidas por Surko e cols. [23], tem sido possível produzir feixes de pósitrons mais intensos (aproximadamente  $10^6$  pósitrons/s), com resoluções em energia em torno de 20 meV. Entretanto, estas armadilhas produzem feixes de pósitrons pulsados o que pode ser indesejado em alguns experimentos.

Grande parte dos trabalhos publicados na literatura, referentes ao espalhamento de pósitron por alvos gasosos, estão relacionados às determinações de Seção de Choque Total (SCT). Estes experimentos começaram a ser realizados a partir da década de 80 por vários grupos de pesquisas [4, 14, 15, 20, 24 - 26], muitos dos quais ainda permanecem ativos nesta área de pesquisa. Hoje em dia, estes grupos têm como foco principal de suas pesquisas, o estudo e a obtenção de dados de SCT do espalhamento de pósitrons ou de positrônio [27 - 32] por grandes moléculas, bem como a investigação da taxa de aniquilação em função da energia do feixe [33]. Dentre estes, destacamos o grupo de Trento, na Itália, de Zecca *e cols.* que publicou medidas de SCT para uma ampla série de átomos e moléculas, na faixa de energias intermediárias [34 - 41]. Este grupo também realizou estudos comparativos da SC do espalhamento de pósitrons e elétrons para átomos de gases-nobres, e uma variedade de moléculas, na faixa de energias intermediárias a altas. Para seus estudos, o grupo construiu um aparato experimental constituído de um feixe de pósitrons de baixa energia [42] baseado no uso de  $^{58}\text{Co}$  ou  $^{22}\text{Na}$  associados a mono cristais de tungstênio (100) como moderador. O grupo de Laricchia *e cols.* [24, 27, 28, 43, 44] na Inglaterra, aplica feixes de pósitrons lentos nos estudos de colisões com moléculas na região de energias intermediárias. O aparato experimental também utiliza o radioisótopo  $^{22}\text{Na}$  estando associados a moderadores de malhas de tungstênio ou de filmes de argônio, ambos com uma eficiência em torno de  $10^{-4}e^+/s$  [45]. O grupo do Kauppila *e cols.* em Detroit, EUA, reportou estudos de SCT para pósitrons de 1 a 60 eV para átomos alcalinos [46], metais alcalinos e outros átomos [47], bem como medidas de Seção de Choque Diferencial Elástica (SCDE) para o argônio [20]. Destacam-se atualmente os grupos que aplicam armadilhas magnéticas muito eficientes, desenvolvidas pelo grupo de Surko *e cols.* em San Diego, EUA [23, 48], também utilizados pelo grupo de Stephen Buckman, da

Australian National University [49 - 51]. Estas armadilhas fazem uso de acumuladores de pósitrons lentos produzindo feixes pulsados que vem sendo aplicados aos estudos na região de baixa energia, com uma resolução de energia da ordem de 20 meV. Estes aparelhos são de alto custo, empregam uma instrumentação complicada, com detalhes indisponíveis na literatura.

Além do interesse fundamental no estudo da interação de pósitrons com átomos e moléculas, estes estudos também são importantes para numerosas e crescentes aplicações tecnológicas, como por exemplo, na astrofísica, onde processos envolvendo radiação de aniquilação estabelecem uma importante ferramenta com a qual se estuda uma ampla serie de fenômenos, tais como em explosões solares e sua orientação para o centro da Via Láctea [52]; na área da física de superfícies, no controle de qualidade de materiais; na área médica, onde os pósitrons são utilizados na realização de exames na PET (*Positron Emission Tomography*) [53], também conhecida por *PET scan*, procedimento não invasivo e indolor, que permite obter informações não apenas sobre a morfologia, mas também sobre as atividades metabólicas do organismo humano. O PET é uma nova metodologia de diagnóstico que está contribuindo para o avanço na medicina, tanto no entendimento das causas subjacentes de muitas doenças como, no melhoramento e, na forma de detecção e tratamento de outras doenças como, desordem cardiovasculares, cerebrais, do câncer, entre outras doenças.

Em face a todos os interesses apontados na pesquisa de espalhamento de pósitrons por amostras gasosas, está sendo desenvolvido no Laboratório de Espectroscopia Atômica e Molecular (LEAM) da UFJF, um feixe de pósitron com energia variável, na faixa de 10 a 150 eV, baseado na tecnologia de aplicação de cápsulas seladas de  $^{22}\text{Na}$ . Nossa dissertação faz parte deste projeto, e teve como objetivo a produção da cápsula selada. Este será o primeiro feixe de pósitrons lentos do Brasil, colocando-nos no seleto grupo de pesquisadores que dominam esta tecnologia. O trabalho envolveu o projeto da cápsula selada e sua construção e, o desenvolvimento de um sistema de carregamento da cápsula por  $^{22}\text{Na}$ , considerando todos aspectos inerentes à proteção radiológica e também, para o armazenamento do radionuclídeo e da cápsula carregada.

Apresentamos a dissertação em 5 capítulos. O capítulo 1 envolve a presente introdução, onde contextualizamos o tema da dissertação. O capítulo 2 envolve a



apresentação dos conceitos inerentes a produção de feixes de pósitrons baseados em radionuclídeos, onde apresentamos as características necessárias à cápsula selada e seu projeto. No capítulo 3 é apresentado todos os aspectos inerentes à proteção radiológica do trabalho. No capítulo 4 é apresentado a metodologia e o protocolo de carregamento da cápsula. Finalmente no capítulo 5, apresentamos a conclusão da dissertação e perspectivas futuras deste trabalho.

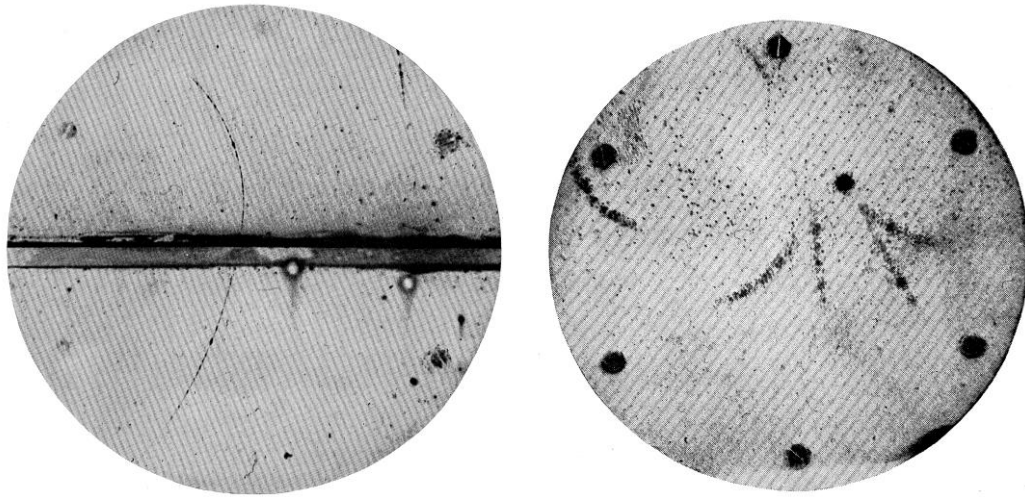
## Capítulo 2

### Aspectos Teóricos

---

#### 2.1-A Descoberta do Pósitron

O pósitron, inicialmente chamado de elétron positivo, foi observado pela primeira vez no ano de 1932 quando, Carl David Anderson (1902-1984) [7], em suas pesquisas realizadas com raios cósmicos, observou a trajetória de uma partícula diferente das que já existiam até o presente momento. Ao fotografar o rastro de uma partícula cósmica em uma câmara de nuvens, Anderson observou que na presença de campo magnético, duas partículas descreviam trajetórias curvas e em direções opostas, indicando que estas apresentavam a mesma massa, da ordem de magnitude da massa do elétron, porém, cargas de sinais opostos, levando-o a concluir que se tratavam do elétron e de sua antipartícula, o pósitron (Figura 2.1). Assim, o pósitron é a antipartícula do elétron, com massa igual a  $9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}$ , carga positiva de  $1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$  e spin  $\frac{1}{2}$ .



**Figura-2.1:** Fotografias obtidas por Carl Anderson em experimentos com raios cósmicos [7].

A importância real da descoberta de Anderson estava na confirmação da teoria formulada em 1928 por Paul Audrien Maurice Dirac [54], de que a solução negativa da famosa equação (Eq. 2.1) proposta por Einstein em 1905 [55] que preconizava a equivalência entre matéria e energia:

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4 \quad (2.1)$$

$$E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}$$

onde,  $E$  representa a energia da partícula,  $p$  seu momento,  $c$  a velocidade da luz e  $m_0$  a massa de repouso do elétron, correspondia a “buracos no mar de energia negativa”, chamando estes buracos de antipartículas [54]. Dirac recebeu o prêmio Nobel em 1933 “pela descoberta de novas e produtivas formas de teoria atômica” [56].

Dirac imaginou inicialmente que tais buracos ou vacâncias fossem prótons, dado que esta era a única partícula positiva que se conhecia até aquela época. Porém, era de conhecimento científico que um próton era cerca de duas mil vezes mais pesado que o elétron e, portanto, a antipartícula do elétron, não poderia ser o próton. Dois anos mais tarde veio a descoberta feita por Anderson, para ratificar a previsão teórica feita por Dirac. Em seguida, estudos teóricos e experimentais mostraram que todas as partículas,

até mesmo as que não apresentam cargas, como os nêutrons, possuem a sua antipartícula, com todas as suas características, mas com carga e momento magnético de mesmo módulo e sinal oposto [57]. Estes estudos revelaram também que a força da gravidade age igualmente sobre a partícula e sua correspondente antipartícula, uma vez que as interações gravitacionais não dependem de suas cargas, mas sim da massa e da energia das partículas.

Dentre as propriedades físicas de correspondência satisfeitas pela partícula e sua antipartícula (energias iguais, massas iguais e cargas invertidas), podemos destacar como a mais importante, o que naturalmente ocorre quando estas se encontram no mesmo ponto do espaço, a aniquilação total destas, resultando na conversão de suas massas na forma de energia. Estudar e observar este “antiuniverso” é algo que impulsiona as pesquisas fundamentais e tecnológicas pelo mundo, através de desafios como, o aprisionamento da antimatéria, ou ainda, a formação de átomos exóticos, como o anti-hidrogênio e o positrônio. Enquanto que, o anti-próton, necessário para a formação do átomo de anti-hidrogênio, somente pode ser obtido em grandes aceleradores como no CERN (Europa), o pósitron pode ser obtido por processo de decaimento radioativo natural de fontes radioativas enriquecidas ou produzidas. Portanto, o pósitron é a partícula de antimatéria mais acessível aos laboratórios de pesquisas, sendo as fontes de pósitrons disponíveis mais utilizadas, o isótopo de sódio ( $^{22}\text{Na}$ ), do flúor ( $^{18}\text{F}$ ) e do iodo ( $^{123}\text{I}$ ), sendo os dois últimos muito utilizados no campo da Medicina Nuclear.

## **2.2 - Processo de Aniquilação**

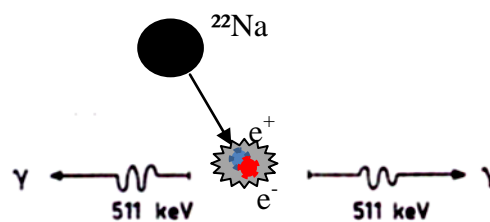
O pósitron é uma partícula estável na ausência de elétrons. Mas ao interagir com a matéria, após perder energia para suas vizinhanças até atingir a energia térmica, ou seja, ser termalizado, ele se choca com um elétron do meio e se aniquila com a emissão de radiação gama. Alternativamente, pode também ocorrer após a colisão, a formação de um estado ligado, o positrônio, que também se aniquila posteriormente.

O termo aniquilação é usado para representar a total destruição de algo. Fisicamente, o termo representa a destruição mútua de uma partícula elementar e sua respectiva

antipartícula, resultante do encontro entre ambas na mesma posição no espaço, gerando conseqüentemente a liberação de energia sobre a forma de radiação eletromagnética, ou seja, radiação gama. Com a comprovação científica da existência da antimatéria, um dos primeiros questionamentos feitos por muitos cientistas foi: O que acontece quando uma partícula elementar encontra sua antipartícula?



O diagrama (2.2) acima representa o encontro entre o elétron e sua antipartícula, quando estes se encontram numa mesma posição no espaço, ocorrendo a total desmaterialização de ambos. Se considerarmos o referencial do centro de massa de um sistema formado por um elétron e por um pósitron, iremos notar que o processo exige a produção de dois ou mais fótons, como podemos ver na Fig. 2.2.



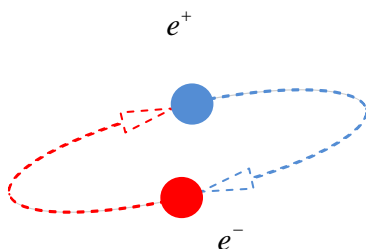
**Figura-2.2:** Desenho esquemático do processo de aniquilação pósitron/elétron.

No processo de aniquilação do par elétron/pósitron, surgirá uma energia eletromagnética compartilhada entre dois fótons gama ( $2\gamma$ ) e, raramente, entre três fótons gama ( $3\gamma$ ) [6, 8]. A emissão dos fótons se deve a lei de conservação dos spins, ou seja, ao acoplamento dos spins do par elétron/pósitron ser antiparalelos ou paralelos. Logo, teremos a emissão de dois fótons quando o acoplamento de spin do par elétron pósitron for antiparalelo, ou seja, resultante do spin total ser igual a zero (acoplamento singlete  $S=0$ ) e a emissão de três fótons, se deve ao acoplamento de spin do par elétron/pósitron ser paralelo, ou seja, resultando no spin total ser igual a 1 (acoplamento

triplete  $S=1$ ). A energia com que os fótons são emitidos corresponde ao valor da energia de repouso do par elétron/pósitron,  $1,022MeV$ .

### 2.3 – Formação do Átomo de Positrônio

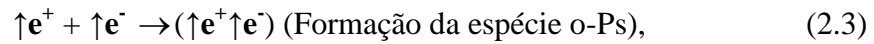
Em 1945, surgiu às primeiras especulações sobre a possibilidade da existência de um “pseudo-átomo”, um composto instável, formado por um elétron e um pósitron, feitas por A. E. Ruark [58] por meio de detecção espectroscópica. Ruark observou que o espectro desta partícula teria linhas de comprimentos de ondas duas vezes maiores que as linhas do átomo de hidrogênio. Se compararmos os níveis de energias entre esses dois átomos, vemos que a massa do átomo positrônio é menor, resultando nas linhas espectrais das frequências associadas serem duas vezes menor do que as do átomo de hidrogênio. Sua descoberta experimental ocorreu em 1951 por Deustsch e cols [5], verificando com isso os prognósticos feitos anteriormente por Dirac, referente à razão de aniquilação de um pósitron na presença de gás. A duração deste “pseudo-átomo” é de aproximadamente  $10^{-10}$  segundos, apresenta uma vida média muito curta, desaparecendo posteriormente através da emissão de dois ou três fótons após sua formação. O Estudo do átomo de positrônio (Fig. 2.3), é uma área de pesquisa bastante ativa [15, 28], possibilitando com isso uma melhor compreensão referente ao processo de aniquilação e a formação de átomos exóticos. O potencial de ionização do átomo de positrônio, corresponde à metade do que seria para o átomo de Hidrogênio, ou seja,  $6,8eV$ .



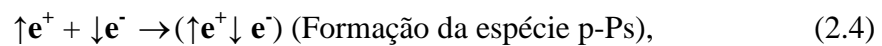
**Figura-2.3:** O pósitron e o elétron orbitando em torno de um centro de massa comum.

No surgimento do átomo de positrônio pode ocorrer à formação de dois estados de spin distintos, onde a principal diferença se refere ao tempo de vida média. Os dois estados de spin estão relacionados com as possíveis orientações relativas dos spins, isto

é, se os spins do pósitron e do elétron encontram-se paralelos ou antiparalelos. Caso os spins se encontrem paralelos, ocorre a formação de um estado tripleto  $S=1$ , denominado ortopositrônio (*ortho-Ps*), que irá se desintegrar num período curto de vida de  $142ns$  pela emissão de três fótons.



Se os spins possuírem orientação antiparalela é formado um estado singlete  $S=0$ , denominado parapositrônio (*para-Ps*), o qual também irá se desintegrar num período curto de vida de  $0,125ns$  pela emissão de dois fótons.



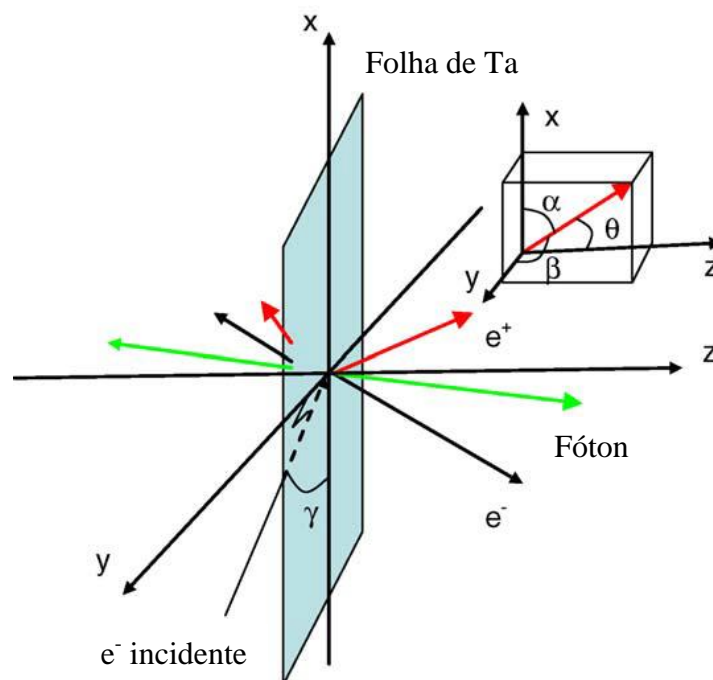
A probabilidade de ocorrência do átomo ortopositrônio é muito maior que do átomo parapositrônio, pois este apresenta três possíveis números quânticos ( $m = -1,0,1$ ), enquanto que o p-Ps apresenta somente um ( $m = 0$ ). A multiplicidade ( $2S + 1$ ) define o peso estatístico de cada estado.

#### 2.4 - Método de Obtenção do Feixe de Pósitrons.

Existem vários esforços contínuos sendo investidos ao redor do mundo para desenvolver fontes geradoras de pósitrons com alto fluxo e baixo custo. A obtenção do feixe de pósitrons pode ser feita de diferentes maneiras, como pela produção do par elétron-pósitron, por meio de aceleradores de elétrons ou por meio de reatores nucleares, ou de forma natural, pelo decaimento radioativo de fontes emissoras de pósitrons. Abaixo iremos detalhar cada um destes métodos de produção e obtenção do feixe de pósitrons.

A produção dos pares elétrons-pósitrons a partir de fótons de alta energia é um dos métodos alternativos, usado em alguns laboratórios, onde se aplica aceleradores lineares (LINACs) para obter feixes de pósitrons com alto fluxo e alta intensidade. Neste caso,

um feixe de elétrons de alta energia é desacelerado ao se chocar com um alvo absorvedor de alto número atômico, como o Ta e o W, chamado de conversor [59], gerando fótons de alta energia devido ao efeito *Bremsstrahlung*, como mostra a Fig. 2.4. Os fótons, ao interagirem com o núcleo atômico do alvo, produzem o par elétron-pósitron, tendo o espectro de energia dos pósitrons gerados um máximo centrado em torno de  $1,2MeV$ , estendendo-se até  $8MeV$  [60].



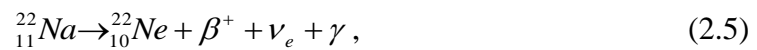
**Figura-2.4:** Diagrama esquemático do processo de obtenção do par elétron-pósitron (LINACs) [61]. Neste caso, elétrons de alta energia ao interagirem com um alvo absorvedor produzem fótons de alta energia, criados pelo efeito Bremsstrahlung. Os fótons energéticos ao interagirem com o núcleo do alvo produzem o par elétron-positron. Desenho retirado da referência [62].

Outro processo de obtenção de pósitrons é através do uso de reatores nucleares, propostos por Stein e cols [63], onde um feixe de prótons de alta energia bombardeia diretamente um alvo neutro de boro, produzindo pósitrons. Pode-se também produzir pósitrons pela aplicação de raios gamas de alta energia, emitidos por radioisótopos de meia vida curta, que ao interagir com um núcleo de um alvo absorvedor de alto Z produz o par elétron-pósitron. De maneira semelhante, pode-se empregar o processo de



decaimento do  $^{113}\text{Cd}$  [3], que emite três raios gamas com uma energia total de  $9,041\text{MeV}$ . Estes raios ao serem direcionados diretamente sobre um alvo absorvedor produzem também o par elétron-pósitron. Todos estes métodos apontados acima produzem feixes intensos em torno de  $10^7 - 10^8 e^+ / s$ , mas apresentam um custo extraordinariamente alto, já que se trata de grandes aparelhos, ou seja, sistema de multi-usuários.

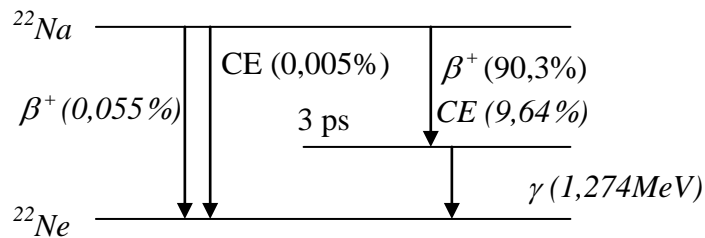
Já o método amplamente utilizado por muitos pesquisadores em pequenos laboratórios, envolvendo menor custo, é a obtenção de pósitrons de forma natural, por meio do decaimento radioativo  $\beta^+$  de elementos instáveis como  $^{22}\text{Na}$ , o  $^{64}\text{Cu}$ , o  $^{58}\text{Co}$ , entre outros. A desvantagem deste método é a baixa intensidade do feixe produzido. O elemento radioativo  $^{22}\text{Na}$  é uma das fontes mais utilizadas em linhas de pesquisa com pósitrons, devido ao seu baixo custo comercial, a sua meia vida de  $2,6$  anos e sua ampla e contínua distribuição de energia dos pósitrons com pico máximo em torno de  $540$  keV [8], como mostra a Figura 2.5. O Decaimento deste radioisótopo obedece a seguinte reação de decaimento (Eq. 2.5):



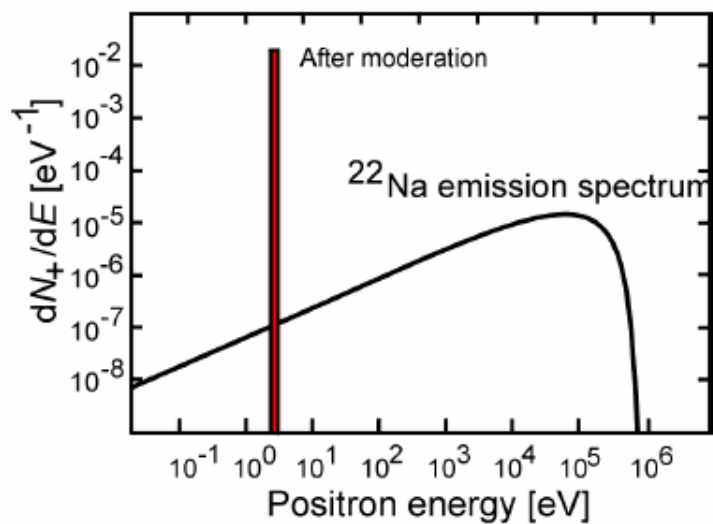
onde  $\nu_e$  é um neutrino,  $\gamma$  é um raio gama, emitido com energia de  $1,274\text{MeV}$ ,  $^{22}\text{Ne}$  é o gás neônio, que surge no processo de decaimento do  $^{22}\text{Na}$ , e  $\beta^+$  a antipartícula do elétron, ou seja, o pósitron. Na Figura abaixo 2.5, apresentamos o diagrama esquemático de decaimento do  $^{22}\text{Na}$ , onde podemos observar uma taxa de emissão de pósitrons relativamente alta, em torno de  $90\%$ .

Ao se trabalhar com este elemento na forma de solução de NaCl, a contaminação acidental em casos de contato direto com o elemento NaCl é pouco danosa para o ser humano, pois além de ser um elemento bastante hidrossolúvel, a sua meia vida biológica é relativamente curta, ou seja, a substância é facilmente eliminada pelo organismo em torno de uma semana.

Outra vantagem encontrada em se usar o  $^{22}\text{Na}$  é que, no seu decaimento, ele emite pósitrons seguido pela emissão de um gama de  $1,274\text{MeV}$ , permitindo desta forma, medir sua meia vida no meio antes de se aniquilar com a matéria, através da detecção do gama de  $1,274\text{MeV}$  e da detecção em coincidência de dois gamas de  $511\text{KeV}$ , provenientes da aniquilação do par. Além do  $^{22}\text{Na}$ , outros radioisótopos, como o  $^{64}\text{Cu}$  e o  $^{58}\text{Co}$ , podem também ser usados em experimentos de Física Atômica e Molecular, sendo porém pouco utilizados devido às dificuldades encontradas em obtê-los comercialmente, e principalmente, ao seus elevados preços comerciais. Na figura 2.6 esta representado o espectro de emissão contínuo de energia do radioisótopo  $^{22}\text{Na}$  e a faixa de energia após a moderação.



**Figura-2.5:** Esquema de decaimento do  $^{22}\text{Na}$ . Observa-se que 90,3% decai pela emissão de um pósitron para o estado excitado do  $^{22}\text{Ne}$ , seguido em média de 3 ps pela emissão de um gama de  $1,274\text{ MeV}$ .



**Figura-2.6:** Espectro de emissão de energia do radioisótopo  $^{22}\text{Na}$  e a faixa de energia após a moderação, utilizando um moderador de W, onde  $dN_+/dE$  é o número de pósitrons por energia.

A manipulação em laboratório do  $^{22}\text{Na}$  é extremamente simples, uma vez que o radioisótopo pode ser adquirido na forma de diferentes sais de sódio em soluções aquosas, tais como cloreto de sódio ou acetato de sódio.

## Capítulo 3

### Proteção Radiológica e Cálculo de Blindagem

---

#### 3.1 - Introdução

É de conhecimento geral que uma exposição descontrolada e prolongada a fontes emissoras de radiação ionizante pode causar danos e efeitos maléficos a tecidos vivos. Estas consequências começaram a ser observadas nas primeiras décadas após a descoberta dos raios-X, que se deu no ano de 1895-1896 [64]. A demora na observação destes danos e efeitos biológicos causados pela exposição se deve ao fato de que, estes não aparecem imediatamente, mas sim tardiamente, o que levou ao alerta da comunidade científica, a discutir a necessidade de se regulamentar a exposição dos indivíduos ocupacionalmente expostos a fontes emissoras de radiação ionizante. As necessidades compreendem em formular normas e recomendações de radioproteção de âmbito mundial. Neste sentido, no Segundo Congresso Internacional de Radiologia, realizado em Estocolmo em 1928, surge a International Commission on Radiological Protection (ICRP) [65], responsável pela elaboração das Normas e Diretrizes Internacionais de Radioproteção. Nascia-se naquele momento as recomendações e normas vigentes, ou seja, recomendações quanto às espessuras mínimas da blindagem de chumbo para as áreas restritas, a elaboração de normas de procedimentos, condutas e condições adequadas para trabalhadores e para o público em geral [66].

A ICRP, por meio de estudos e pesquisas referentes a riscos e danos causados aos tecidos biológicos, estabeleceu valores de doses de radiação máxima permissíveis, tanto para o indivíduo, ocupacionalmente exposto como para o público em geral, conforme

mostra a Tabela 3.1. No Brasil, o órgão responsável por regulamentar, controlar e fiscalizar o uso de fontes de radiações ionizantes é a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA).

**Tabela-3.1:** Limites primários de doses efetiva e equivalentes por ano, dados retirados da Norma CNEN-NN 3.01 [67].

Limites de Dose Anuais <sup>(a)</sup>			
Grandeza	Órgão	Indivíduo que Trabalha	Indivíduo do Público
<i>Dose Efetiva</i>	<i>Corpo Inteiro</i>	20 mSv/ano <sup>(b)</sup>	1 mSv/ano <sup>(c)</sup>
<i>Dose Equivalente</i>	<i>Cristalino</i>	20 msv/ano <sup>(b)</sup> <small>(Alterado pela Resolução CNEN 114/2011)</small>	15 mSv/ano
	<i>Pele <sup>(d)</sup></i>	500 mSv/ano	50 mSv/ano
	<i>Mãos e pés</i>	500 mSv/ano	----

(a) Para fins de controle administrativo efetuado pela CNEN, o termo dose anual deve ser considerado como dose no ano calendário, isto é, no período decorrente de janeiro a dezembro de cada ano.

(b) Média aritmética em 5 anos consecutivos, desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano. (Alterado pela Resolução CNEN 114/2011)

(c) Em circunstâncias especiais, a CNEN poderá autorizar um valor de dose efetiva de até 5 mSv em um ano, desde que a dose efetiva média em um período de 5 anos consecutivos, não exceda a 1 mSv por ano.

(d) Valor médio em 1 cm<sup>2</sup> de área, na região mais irradiada.

Para a condução dos cálculos de blindagem deste trabalho, foram utilizados os limites primários de dose efetiva para o corpo inteiro permitidos, preconizados pelas Normas CNEN-NN 3.01, mostrados na Tabela 3.2. A tabela considera que em um ano tenha 50 semanas, e que uma semana seja composta por 40 horas de trabalho.

**Tabela-3.2:** Limites primários de dose efetiva para o corpo inteiro, dados calculados em cima da Norma CNEN-NN 3.01, considerando que o ano seja composto por 50 semanas de trabalho e, que a semana seja composta por 40 horas de trabalho.

<b>Limites de Dose Anuais</b>			
<b>Grandeza</b>	<b>Órgão</b>	<i>Indivíduo que Trabalha</i>	<i>Indivíduo do Público</i>
<i>Dose Efetiva</i>	<i>Corpo Inteiro</i>	0,4 mSv/semana	0,02 mSv/semana
<i>Dose Efetiva</i>	<i>Corpo Inteiro</i>	0,01 mSv/h	0,0005 mSv/h

### **3.2 - Regras Básicas de Radioproteção**

Quando se pretende trabalhar com um elemento radioativo, precisamos lembrar sempre que, o uso e o armazenamento de qualquer fonte radioativa em Laboratório deve se basear nas normas brasileiras de radioproteção, fundamentadas nas recomendações da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (publicação nº26 e 60, ICRP 1977 e 1990) e nas normas reguladoras da CNEN [68]. A radioproteção tem seus pilares ,fundamentados em três princípios básicos [69.70]:

1- Justificação: Qualquer atividade envolvendo o uso ou exposição à radiação ionizante deve ser justificada em relação às outras atividades, trazendo um benefício líquido positivo ao indivíduo exposto e a sociedade.

2- Otimização: Devem se manter tão baixas quanto razoavelmente exequível qualquer exposição à radiação ionizante, levando sempre em conta fatores sociais e econômicos disponíveis.

3- Limitação da dose individual: As doses individuais de trabalhadores e/ou indivíduos do público não devem exceder os limites anuais de dose equivalente definidas na norma CNEN-NN 3.01 [67].

O manuseio de fontes radioativas envolve procedimentos de segurança rigorosos e criteriosos. Apesar disso, sempre haverá risco de danos à saúde das pessoas que trabalhem diretamente com a fonte radioativa. Por este motivo, torna-se necessário a

constante monitoração dos níveis de radiação das dependências onde está sendo manuseado e utilizado o radionuclídeo, bem como da exposição do grupo de pesquisa envolvido diretamente no seu manuseio. Neste sentido, quando da manipulação do  $^{22}\text{Na}$  no LEAM/UFJF, todo o procedimento foi realizado utilizando dosímetros pessoais (Fig. 3.1), visando um controle de exposição radiológica da equipe. A taxa de exposição em diferentes locais foi controlada através de um Contador Geiger (Fig. 3.1).



**Figura-3.1:** Dosímetros individuais do grupo de pesquisa e Contador Geiger.

Durante o procedimento de carregamento da cápsula, ficamos expostos a uma dose de radiação que pode ser minimizada se observamos três fatores importante: tempo de exposição, distância da fonte radioativa e blindagem. Ou seja, quanto menor for o tempo de exposição, quanto maior for à distância mantida da fonte e quanto maior for à blindagem usada entre o trabalhador e a fonte, ou uma combinação de todos os fatores, menor será a dose de radiação recebida pela equipe envolvida no projeto. Assim, durante o desenvolvimento deste trabalho, procurou-se sempre manter o material devidamente acondicionado em castelos ou recipientes de chumbo e a utilização de uma distância razoável, evitando com isso uma exposição desnecessária e prolongada durante o procedimento de carregamento da cápsula de  $^{22}\text{Na}$ . De acordo com as Normas de Radioproteção da CNEN, foi construída uma sala própria para o armazenamento da fonte e de rejeitos, bem como montado um plano de radioproteção, contendo condutas e procedimentos de trabalho para o manuseio da solução radioativa de  $^{22}\text{Na}$ .

### 3.3 - Cálculo de Blindagem

Objetivando a proteção radiológica do público em geral que venha a ter acesso ao LEAM/UFJF e da equipe que trabalha com o  $^{22}\text{Na}$ , foram feitos os cálculos de blindagem para o armazenamento e acondicionamento de uma fonte radioativa de  $^{22}\text{Na}$  de baixa intensidade em um cofre de chumbo, uma vez que atualmente a atividade da nossa fonte está em torno de 1 mCi. A espessura da barreira de proteção usada foi calculada de tal forma que a “dose equivalente no ponto de interesse seja tão baixa quanto razoavelmente exequível (princípio ALARA: **As Low As Reasonably Achievable**)”, não ultrapassando os limites de dose aplicáveis ao público e ou trabalhador. Estes cálculos foram feitos de tal forma a considerar as dependências do LEAM uma área livre, com acesso restrito somente às regiões de armazenamento e manuseio da fonte radioativa.

Ao realizarmos os cálculos de blindagem devemos levar em conta a distância mantida da fonte (sem barreira de proteção), a atividade da fonte radioativa, a energia e o tipo de radiação ionizante emitida. Como apresentado no Capítulo 2, o  $^{22}\text{Na}$  decai emitindo um pósitron, um gama e um neutrino (Eq. 2.5). Isto se deve a elevada instabilidade nuclear do elemento químico sódio 22. Quando o número de prótons em um núcleo é relativamente grande, para que o núcleo se torne novamente estável, este irá converter um próton em um nêutron com a emissão de um **pósitron** e um **neutrino**, como podemos observar no diagrama esquemático do decaimento radioativo da fonte de  $^{22}\text{Na}$  (Eq. 2.5). Porém, ao realizamos os cálculos de blindagens para a fonte de  $^{22}\text{Na}$ , nossa principal preocupação é o gama emitido com uma energia de 1,274 MeV. Isto se deve ao fato de o pósitron apresentar um poder de penetração em materiais muito menor quando comparado à radiação gama, enquanto o neutrino, partícula sem carga e sem massa, sofre uma interação com a matéria muito pequena, mas com alto poder de penetração em relação ao pósitron [71]. Ambas as partículas tem um poder de penetração inferior quando comparado com os raios gama. Logo, a barreira de atenuação usada para o gama de 1,274 MeV, também irá funcionar como barreira de atenuação tanto para o pósitron como para o neutrino, não sendo, em princípio, necessário calcular a blindagem para estas partículas. Adicionalmente às partículas mencionadas, no processo de decaimento radioativo do  $^{22}\text{Na}$  pode ocorrer a geração de



fótons de alta energia, devido aos processos de aniquilação. Neste caso, os fótons gerados são emitidos com uma energia de 511 KeV que, automaticamente, também são barrados na blindagem feitas para os gamas de 1,274 MeV.

Os cálculos da barreira de atenuação para os pósitrons são, entretanto, importantes neste trabalho, para a confecção da janela radiotransparente da cápsula, fazendo-se necessário conhecer a espessura mínima para atenuar o pósitron, nossa principal preocupação, uma vez que o feixe produzido é de baixa intensidade, implicando na necessidade de se usar um material mais transparente possível para esta partícula.

### **3.3.1 Cálculo de Blindagem para o Pósitron**

A atenuação do pósitron ou qualquer outra partícula carregada se dá por meio de sucessivas colisões com as partículas dos átomos que compõem o material de blindagem. O quanto esta partícula irá percorrer desde sua entrada no material até sua parada é denominado de alcance. Definimos o alcance,  $R$  (do inglês, “range”), como sendo a distância média percorrida por uma partícula carregada em uma direção qualquer no meio absorvedor [72]. Este é específico para cada tipo de partícula carregada e se relaciona linearmente com sua energia inicial, podendo chegar a uma absorção total desta.

Devido ao baixo poder de penetração do pósitron, podemos concluir que a intensidade de um feixe de pósitrons quando interpomos um elemento absorvedor com espessura superior ao alcance, será reduzida a zero. Deve-se estar atento, entretanto, a natureza deste elemento absorvedor, para que seja minimizada a produção indesejada de radiação de freamento. Normalmente, utiliza-se um material com baixo  $Z$ , como acrílico, teflon, alumínio e, muito raramente o chumbo e ou concreto. Evita-se o uso do chumbo devido à produção de radiação de freamento, embora esta radiação, se produzida, também será atenuada pela barreira de proteção para o gama de 1,274 MeV. Devido ao fato do pósitron ser uma partícula leve, diferente de partículas pesadas, como radiação alfa que descrevem trajetórias retilíneas ao penetrem em um elemento absorvedor [72], ele descreve uma trajetória irregular dentro deste mesmo elemento absorvedor, podendo ser defletido em qualquer direção e até mesmo na direção de origem. Quando se trata do

pósitron, podemos dizer que ele não possui um alcance preciso. Assim, o cálculo de seu alcance é feito por varias relações semi-empíricas, envolvendo sua energia de emissão  $E_\beta$ , isto é, de entrada no meio [73]:

$$R = 0,542E_\beta - 0,133 \quad (g/cm^2) \quad \text{para } E_\beta > 0.8MeV$$

$$R = 0,407(E_\beta^{1.38}) \quad (g/cm^2) \quad \text{para } 0,15 < E_\beta < 0.8MeV$$

$$R = 0,530E_\beta - 0,106 \quad (g/cm^2) \quad \text{para } 1 < E_\beta < 20MeV$$

onde:

$R$  é o alcance das partículas beta em um material;

$E_\beta$  corresponde a energia com que o pósitron foi emitido;

Como o pósitron é emitido pelo  $^{22}Na$  com uma energia máxima em torno de  $\cong 0,6MeV$ , pode-se facilmente calcular seu alcance dentro de intervalo de energia correspondente, isto é, entre  $0,15 < E_\beta < 0.8MeV$ :

$$R = 0,407(E_\beta^{1.38}) \quad (g/cm^2) \quad \text{para } 0,15 < E_\beta < 0.8MeV \quad (3.1)$$

$$R = 0,2011 \frac{g}{cm^2} \quad (3.2)$$

Assim, a determinação da espessura  $x$  de elemento absorvedor de densidade  $\rho$ , para barrar pósitrons rápidos emitidos de uma fonte é feita considerando a expressão (3.3) e o valor alcance obtido acima [74]:

$$x = \frac{R}{\rho} \quad (3.3)$$

onde:

$x$  corresponde a espessura da barreira atenuadora para o pósitron em  $cm$ ;

$R$  é o alcance do pósitron;

$\rho$  é a densidade do material absorvedor a ser usado em  $g/cm^3$ ;

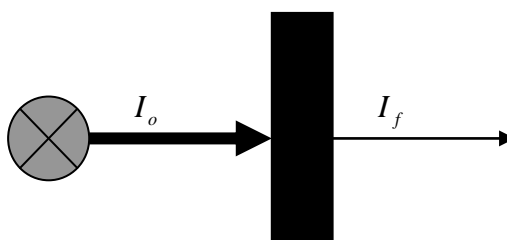
Na Tabela 3.3 estão relacionados os valores das espessuras de atenuação para diferentes materiais. Considerando os dados da tabela, *uma vez que o material utilizado na confecção da capsula de  $^{22}\text{Na}$  foi aço inoxidável, com densidade de  $7,85 \text{ g/cm}^3$ , uma camada de  $0,026 \text{ cm}$  é suficiente para atenuar os pósitrons emitidos por uma fonte de  $^{22}\text{Na}$ . Logo, o corpo da nossa cápsula faz a blindagem dos pósitrons rápidos emitidos, enquanto a janela de kapton de  $3 \mu\text{m}$  é praticamente transparente a estas partículas.*

**Tabela-3.3:** Tabela apresenta a espessura necessária de alguns materiais absorvedores para o pósitron.

Espessura da barreira de atenuação para pósitrons		
Material	Densidade ( $\text{g/cm}^3$ )	Espessura atenuadora (cm)
Aço Inoxidável	7,85	0,026
Titânio	4,55	0,044
Alumínio	2,70	0,0745
Kapton	1,42	0,142

### 3.3.2 Cálculo de Blindagem para Radiação Gama.

Ao se propagar através da matéria, o feixe de radiação gama emitido pela fonte de  $^{22}\text{Na}$ , sofre redução de intensidade, ou seja, parte do feixe é absorvido pelo meio e parte é transmitido, como está esquematizado na Figura 3.2:



**Figura-3.2-**Representação da perda de intensidade da radiação gama ao interagir com a matéria.

A espessura do material absorvedor utilizado pode funcionar com uma Camada Semi-Redutora (CSR), reduzindo a intensidade do feixe de fóton pela metade como mostra a Figura 3.3, ou como uma Camada Deci-Redutora (CDR), reduzindo a

intensidade a um fator 10 (dez) vezes do feixe inicial. Ambos são conceitos importantes e amplamente utilizados em radioproteção [75]. Em nossos cálculos de blindagem, usamos o conceito de CSR, do inglês “*Half Value Layer*” (HVL). Assim, uma espessura  $dx$  de certo material reduz a intensidade do feixe estreito de uma quantidade  $dI$ , proporcional à intensidade  $I$  e a espessura  $dx$ , matematicamente expressa por:

$$dI = -kIdx$$

onde o sinal negativo, na expressão acima, representa o decréscimo da intensidade do feixe, sendo  $k$  a constante de proporcionalidade. Essa constante é denominada de coeficiente de atenuação linear ou coeficiente total de atenuação e, representa a redução fracional da intensidade do feixe por unidade de espessura do material absorvedor. É representado simbolicamente por  $\mu$ , dado em  $cm^{-1}$ . Fisicamente, o coeficiente de atenuação linear representa a probabilidade de um fóton ser removido do feixe. Logo, para cada energia do feixe de radiação gama emitido e para cada material absorvedor há um coeficiente de atenuação específico correspondente, com seu valor tabelado [72].

$$dI = -\mu.I.dx$$

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -\mu \int_0^x dx$$

Resolvendo a integral acima, obtemos a equação que nos dá a intensidade de um feixe estreito e monoenergético após atravessar a espessura  $x$  de um meio de coeficiente de atenuação linear  $\mu$ .

$$I = I_0 e^{-\mu x} \tag{3.4}$$

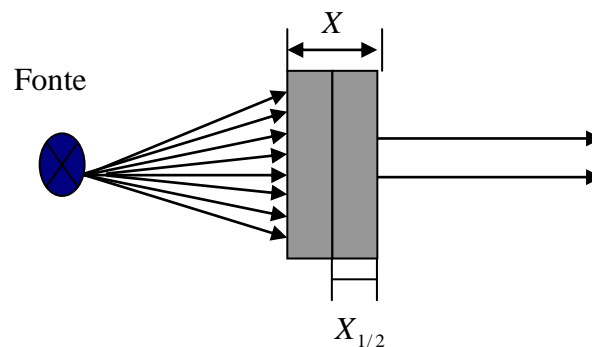
Onde  $I_0$  é a intensidade do feixe de radiação gama antes de atravessar o material absorvedor. Os métodos de cálculos de barreira para fontes gama são baseados na sobreposição de certa espessura particular de materiais absorvedores (em nosso caso, o chumbo), reduzindo a intensidade de radiação primária em 50%. Usamos a notação  $X_{1/2}$  para denominar o valor da CSR usada para reduzir a metade do feixe primário de

radiação gama. Usando a equação (3.4) e substituindo  $I$  por  $I_o/2$ , o qual irá corresponder á uma redução de 50% e, resolvendo esta equação obtemos a expressão que nos permite calcular o valor da CSR:

$$X_{1/2} = \frac{0,693}{\mu} \quad (3.5)$$

Logo a meia espessura particular de um material absorvedor é inversamente proporcional ao coeficiente linear de atenuação. Sendo  $n$  o número de meias-espessuras a serem sobrepostas a fim de reduzir a intensidade de radiação do feixe primário a níveis determinados, a espessura da barreira é obtida pela equação 3.6:

$$X = nX_{1/2} \quad (3.6)$$



**Figura 3.3** – Representação do uso de uma camada semi-redutora.

Assim, ao aumentarmos o número de meias-espessuras na barreira de proteção, reduziremos cada vez mais em 50% a intensidade de radiação do feixe primário, como podemos ver esquematicamente representado na Figura 3.3. Considerando:

$$n = 1 \quad , \text{temos } I = \frac{I_o}{2}$$

$$n = 2 \quad , \text{temos } I = \frac{I_o}{4}$$

$$n = 3 \quad , \text{temos } I = \frac{I_0}{8}$$

ou seja para:

$$n = n \quad \text{temos } I = \frac{I_0}{2^n} \Rightarrow 2^n = \frac{I_0}{I} \quad (3.7)$$

Conhecido o valor de  $I_0$  e estimando o valor atenuado de  $I$  desejado, podemos determinar o valor de  $n$ , ou seja, o número de camadas semi-redutoras a ser usado, que irá atenuar o feixe de radiação gama a valores de dose efetiva aceitável. Substituindo o valor de  $n$  encontrado na equação (3.6), encontramos o valor da espessura  $X$  para nossa barreira física de radioproteção.

### 3.3.3 Cálculo da Taxa de Dose

Para calcularmos a taxa de dose admitiremos, por hipótese, uma fonte puntiforme cujas dimensões possam ser consideradas desprezíveis em relação à distância entre a fonte e o ponto de interesse a ser calculado. A equação matemática usada para o cálculo da taxa de dose se constitui na lei fundamental da dosimetria, denominada “lei do inverso do quadrado das distâncias”. Enunciada como: “Dose-Rate” de uma fonte gama puntiforme num dado ponto é diretamente proporcional à atividade da fonte e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre a fonte e o ponto considerando na medida, expressa matematicamente como:

$$\dot{D} \propto \frac{A}{d^2} \quad (3.8)$$

ou explicitamente:

$$\dot{D} = \Gamma \frac{A}{d^2} \quad (3.9)$$

onde  $A$  é a atividade da fonte que estamos trabalhando,  $\Gamma$  é o fator característico da emissão gama da fonte, ou simplesmente, fator gama, calculado e tabelado para cada fonte radioativa emissora de radiação gama ( $\Gamma = 1,2 R.m^2/h.Ci$  para a fonte de  $^{22}Na$  ou

$\Gamma = 3,24 \times 10^{-4} \text{ mSv.m}^2/\text{MBq.h}$ ; considerando  $1R \approx 0,01 \text{ Sv}$  e  $1 \text{ Ci} = 37 \times 10^3 \text{ MBq}$  [75,76], e  $d$  é a distância da fonte sem blindagem. Usando a equação 3.9 podemos conhecer o valor da taxa de dose  $\dot{D}_0$  a uma distancia  $d$ , sem o uso de uma barreira física de radioproteção.

Atualmente, a nossa fonte de  $^{22}\text{Na}$  apresenta uma atividade de aproximadamente 1 mCi ou 37 MBq. Quando adquirida em 3/01/2008, apresentava uma atividade de 6 mCi ou 222 MBq. A sua aquisição se deu em três frascos distintos, contendo em cada um uma atividade de 2 mCi ou 74 MBq. Tendo em vista a proteção radiológica, os cálculos de blindagem foram feitos considerando que a fonte estivesse a varias distâncias distinta, como podemos ver nas Tabelas 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7.

Considerando a atividade da fonte no momento de sua aquisição, 222 MBq e, a atividade atual da fonte, 37 MBq, atenuamos a taxa de dose, sem o uso de barreiras de proteção, aos valores recomendados pela CNEN,  $\dot{D}_E = 0,0005 \text{ mSv/h}$  para o publico e de  $\dot{D}_E = 0,01 \text{ mSv/h}$ , para o trabalhador.

O valor do coeficiente linear de atenuação ( $\mu$ ) para o chumbo, em função da energia do fóton emitido com uma energia de 1,274 MeV é de  $0,588 \text{ cm}^{-1}$  [77]. Portanto, substituindo este valor na equação (3.5) obtivemos o valor da camada semi-redutora para o elemento absorvedor do feixe de radiação gama de 1,274 MeV:

$$X_{1/2} = 1,18 \text{ cm} \quad (3.9)$$

As Tabelas 3.4 e 3.5 leva em consideração uma fonte com uma atividade de 6 mCi, ou seja, 222 MBq, considerando os limites de dose para o publico em geral e para o trabalhador.

**Tabela-3.4.** Tabela considerando os limites de taxa dose para o publico em geral,  $\dot{D}_E = 0,0005mSv/h$ , para uma fonte de  $^{22}Na$  com atividade de  $6mCi$ .

<b>Distância</b> $d$ (m)	<b>Taxa de Dose</b> $\dot{D}_0 = \Gamma \frac{A}{d^2} \left( \frac{mSv}{h} \right)$	<b>Número de meias</b> <b>espessuras usadas</b> $n = \frac{\ln\left(\frac{\dot{D}_0}{\dot{D}_E}\right)}{\ln(2)}$	<b>Blindagem</b> $X = nX_{\frac{1}{2}}(cm)$ , <b>usando</b> $X_{\frac{1}{2}} = 1,18cm$
0,1	7,199	13,814	16,30
0,2	1,799	11,813	13,94
0,3	0,799	10,642	12,56
0,4	0,449	9,811	11,58
0,5	0,288	9,170	10,82

**Tabela-3.5.** Tabela considerando os limites de taxa dose para o trabalhador,  $\dot{D}_E = 0,01 \frac{mSv}{h}$ , para uma fonte de  $^{22}Na$  com atividade de  $6mCi$ .

<b>Distância</b> $d$ (m)	<b>Taxa de Dose</b> $\dot{D}_0 = \Gamma \frac{A}{d^2} \left( \frac{mSv}{h} \right)$	<b>Numero de meias</b> <b>espessuras usadas</b> $n = \frac{\ln\left(\frac{\dot{D}_0}{\dot{D}_E}\right)}{\ln(2)}$	<b>Blindagem</b> $X = nX_{\frac{1}{2}}(cm)$ , <b>usando</b> $X_{\frac{1}{2}} = 1,18cm$
0,1	7,199	9,492	11,20
0,2	1,799	7,491	8,84
0,3	0,799	6,320	7,46
0,4	0,449	5,489	6,48
0,5	0,288	4,848	5,72

Considerando agora a fonte com uma atividade de 1 mCi, ou seja, 37 MBq, temos os novos valores de da barreira de radioproteção para a nossa fonte de  $^{22}Na$ .



**Tabela-3.6.** Tabela considerando os limites de taxa dose para o publico em geral,  $\dot{D}_E = 0,0005 \frac{mSv}{h}$ , para uma fonte  $^{22}Na$  com atividade de  $1mCi$ .

<b>Distância <math>d</math> (m)</b>	<b>Taxa de Dose</b> $\dot{D}_0 = \Gamma \frac{A}{d^2} \left( \frac{mSv}{h} \right)$	<b>Numero de meias espessuras usadas</b> $n = \frac{\ln\left(\frac{\dot{D}_0}{\dot{D}_E}\right)}{\ln(2)}$	<b>Blindagem</b> $X = nX_{\frac{1}{2}}(cm)$ , usando $X_{\frac{1}{2}} = 1,18cm$
0,1	1,199	11,228	13,25
0,2	0,299	9,224	10,88
0,3	0,133	8,055	9,50
0,4	0,124	7,954	9,38
0,5	0,048	6,585	7,77

**Tabela-3.7.** Tabela considerando os limites de taxa dose para o trabalhador,  $\dot{D}_E = 0,01 \frac{mSv}{h}$ , para uma fonte de  $^{22}Na$  com atividade de  $1mCi$ .

<b>Distância <math>d</math> (m)</b>	<b>Taxa de Dose</b> $\dot{D}_0 = \Gamma \frac{A}{d^2} \left( \frac{mSv}{h} \right)$	<b>Numero de meias espessuras usadas</b> $n = \frac{\ln\left(\frac{\dot{D}_0}{\dot{D}_E}\right)}{\ln(2)}$	<b>Blindagem</b> $X = nX_{\frac{1}{2}}(cm)$ , usando $X_{\frac{1}{2}} = 1,18cm$
0,1	1,199	6,906	8,15
0,2	0,299	4,902	5,78
0,3	0,133	3,733	4,40
0,4	0,124	3,632	4,28
0,5	0,048	2,263	2,67

Mediante os cálculos de blindagem acima, construímos uma barreira de proteção considerando nossa fonte a uma distância de 40 cm. Nosso castelo de armazenamento foi confeccionado em duas barreiras de blindagem. Uma barreira externa, que compreende as paredes externas do castelo, com 5,1 cm de espessura e, uma barreira interna, confeccionada ao entorno do recipiente contendo a fonte de  $^{22}Na$ , também construída com tijolos de chumbo, com 5,1 cm e espessura. Recebemos nossa fonte no interior de recipiente confeccionado de chumbo com 2 cm de espessura. Mantendo

nossa fonte no interior destes recipientes de chumbo, em uma sala com acesso restrito, podemos afirmar que as dependências do LEAM é uma região livre de radiação. A sala restrita foi totalmente adaptada para o armazenamento e carregamento da cápsula radioativa de  $^{22}\text{Na}$ , dentro das normas de segurança exigidas pela CNEN. No local consta uma capela de manipulação e armazenamento do radionuclídeo  $^{22}\text{Na}$ , com dois compartimentos distintos como será detalhadamente discutido no Capítulo 4.

## Capítulo 4

### Aspectos Experimentais

---

Esta seção é dedicada à descrição detalhada do projeto de carregamento da cápsula selada de  $^{22}\text{Na}$ , que consiste na fonte emissora do feixe de pósitrons e do canhão de pósitrons que está sendo desenvolvido no LEAM.

#### 4.1 - Projeto da Cápsula Selada de $^{22}\text{Na}$ .

O projeto iniciou-se com a escolha da fonte emissora de pósitrons, usada na montagem do feixe de pósitrons de baixa energia que está sendo desenvolvido no LEAM/UFJF. Optou-se pela utilização do elemento radioativo  $^{22}\text{Na}$ , radioisótopo de meia vida física longa (2,6 anos) e meia vida biológica razoavelmente baixa (11 dias). Entretanto, sua aplicação não é imediata e requer primeiramente seu acondicionamento adequado e seguro em uma cápsula perfeitamente selada, sendo posteriormente, necessário moderar a energia dos pósitrons rápidos emitidos espontaneamente da fonte, para então obter o feixe de pósitrons de baixa energia. Existe a possibilidade da cápsula selada de  $^{22}\text{Na}$  ser adquirida comercialmente, porém, além de seu alto custo, da possibilidade de demora demasiada na entrega pelo fabricante, algumas cápsulas comercialmente adquiridas podem apresentar vazamento da substância radioativa. Dentro deste contexto, optamos por desenvolver e construir nossa própria cápsula selada de  $^{22}\text{Na}$  no LEAM/UFJF.

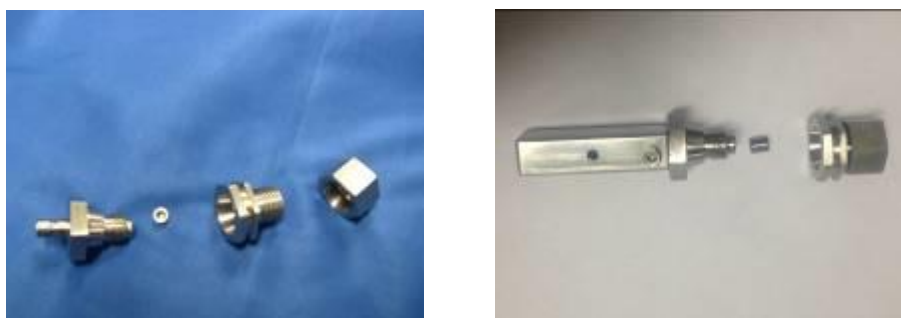
O projeto da cápsula foi baseado na proposta de Krause-Rehberg e cols. [78] da Universidade de Halle, Alemanha, utilizado pelo reconhecido fabricante de cápsulas seladas de  $^{22}\text{Na}$ , da África de Sul, iThemba Labs. O  $^{22}\text{Na}$  em uso no LEAM

encontra-se sobre a forma de cloreto de sódio em solução aquosa, adquirido comercialmente da Perkin Elmer Life and Analytical Sciences, USA. A solução foi depositada na cápsula com uma atividade total de aproximadamente 1mCi ou 37 MBq.

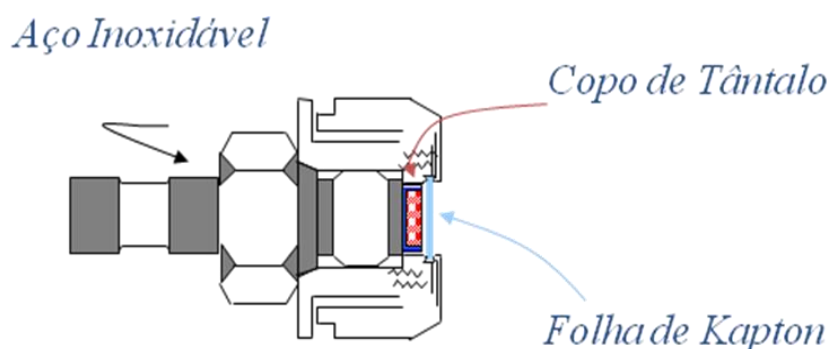
#### **4.1.1 – Projeto da Cápsula**

A cápsula selada foi projetada e desenvolvida para o acondicionamento da fonte radioativa de  $^{22}\text{Na}$ , composta por quatro repartições distintas, como podemos ver nas Figura 4.1, 4.2 e 4.3. Ela é composta por uma base inferior de sustentação que possui uma pequena câmara para o armazenamento do  $^{22}\text{Ne}$  liberado, contendo uma conexão de encaixe para o manipulador, por um reservatório cilíndrico de tântalo onde é acondicionado o radioisótopo, por um corpo de selagem da cápsula onde é instalado uma janela radiotransparente, e por uma tampa responsável pela fixação da janela radiotransparente. As repartições externas, da cápsula, foram cuidadosamente projetadas e confeccionadas em aço inoxidável não magnético, visando uma perfeita selagem do conjunto na montagem final, garantindo que não ocorra possíveis vazamentos do radioisótopo e do gás neônio, liberado espontaneamente no processo de decaimento do  $^{22}\text{Na}$ .

Todo projeto da cápsula de  $^{22}\text{Na}$  foi elaborado visando dar segurança quando da sua manipulação pelo pesquisador, no processo de carregamento, secagem do radioisótopo, selagem e posterior manipulação no interior da câmara de vácuo.



**Figura-4.1:** Cápsula de  $^{22}\text{Na}$  desenvolvida no LEAM/UFJF. Olhando da esquerda para a direita temos: a base inferior da cápsula, o copo de Ta, o corpo de selagem e por último a tampa.



**Figura-4.2:** Desenho esquemático da cápsula selada de  $^{22}\text{Na}$ .

O radioisótopo  $^{22}\text{Na}$  em solução aquosa de NaCl radioativa, foi depositado num pequeno reservatório de tântalo. O reservatório confeccionado no formato cilíndrico de 3,2 mm de diâmetro, por 4 mm de altura, foi fixado na parte superior da base da cápsula. O volume deste reservatório é suficiente para comportar cerca de  $32 \text{ mm}^3$  da solução radioativa de NaCl na sua forma solidificada. Durante o processo de carregamento da cápsula, a solução radioativa de NaCl foi depositada de forma fracionada em pequenas gotículas de  $10 \mu\text{l}$ , passa pelo processo de secagem, repetida vezes, até que o copo de Ta esteja totalmente preenchido com o NaCl solidificado. A superfície interna do reservatório cilíndrico de tântalo foi confeccionada de forma que a

solução radioativa de NaCl seque de maneira homogênea e uniforme. A parte inferior da cápsula possui uma pequena câmara, visando o armazenamento do gás neônio advindo do processo de decaimento natural da fonte radioativa de  $^{22}\text{Na}$ . A tampa da cápsula possui uma fenda circular de 4 mm de diâmetro para permitir a saída do feixe de pósitrons emitidos. Esta tampa tem o propósito de fixar sobre a fenda, a janela radiotransparente de kapton, de  $3\mu\text{m}$  de espessura por 11,5mm de diâmetro.



**Figura-4.3:** Cápsula selada de  $^{22}\text{Na}$  presa a um manipulador linear.

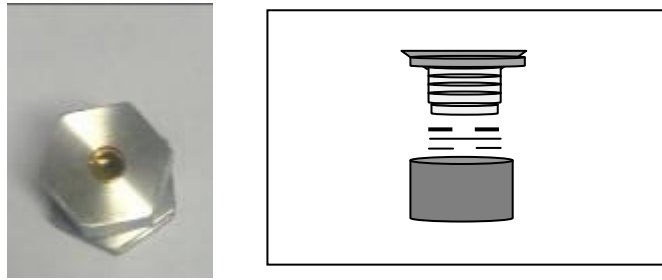
#### **4.1.2 – Janela Radiotransparente ao Pósitron.**

Nas fontes encapsula das comercialmente pela iThemba Labs na África do Sul [78] é reportado o uso de uma janela radiotransparente de titânio de  $5\mu\text{m}$  de espessura. Esta janela é soldada no corpo da cápsula. O Ti apresenta uma densidade de  $4,55\text{ g/cm}^3$ , altíssima temperatura de fusão ( $1.668\text{ }^\circ\text{C}$ ), porém moderado Módulo de Elasticidade e Cisalhamento, inferiores por exemplo, ao cobre. O processo de soldagem da folha de Ti não é uma tarefa simples, com risco ainda de apresentar problemas, levando ao vazamento de material da fonte. Diante desta dificuldade, decidimos por fazer a fixação da janela mecanicamente e também buscar outro material alternativo para esta, dado os baixos coeficientes de Elasticidade e Cisalhamento do Ti. Para confecção da janela da cápsula, teríamos que optar por um material que fosse resistente a torção, a distensão, a radiação e as altas temperaturas, com densidade menor ou próxima a do Ti e disponível

no mercado com espessura em unidades de  $\mu\text{m}$ , uma vez que, tanto a densidade do material, como a sua espessura, estão diretamente relacionadas com o poder de atenuação da radiação corpuscular ionizante emitida.

Nosso objetivo seria trabalhar com um material que fosse totalmente transparente aos pósitrons emitidos, minimizando as possíveis perdas de partículas que iriam compor o feixe inicial de pósitrons rápidos, e que, não se degradaria ao ser exposto a radiação ionizante. O kapton, elemento escolhido para utilizarmos como janela radiotransparente da cápsula de  $^{22}\text{Na}$ , pode ser encontrado como película plástica de poliamida, que possui altas propriedades físicas, químicas e elétricas, resistente a radiação atômica, corrosão e solvente. Ele apresenta uma densidade de  $1,42 \text{ g/cm}^3$  e pode ser facilmente encontrado com uma espessura de  $3\mu\text{m}$ . O kapton se mantém estável em uma ampla faixa de temperatura, desde próximo do zero absoluto ( $-269^\circ\text{C}$ ) até  $400^\circ\text{C}$  [79], apresentando também excelente elasticidade quando tensionado no momento de sua fixação no corpo da cápsula. Assim optamos por esta película, altamente transparente ao pósitron, com propriedades físicas e químicas adequadas para substituir a folha de Ti.

Ao iniciarmos os testes de fixação da película de kapton no corpo da cápsula, nos deparamos com a dificuldade de fazer com que a película de kapton permanecesse com uma superfície uniforme, apresentando uma leve rugosidade na janela. Isto levou-nos a vários ensaios, utilizando diferentes técnicas e anéis metálicos de vedamento. Finalmente chegou-se a uma montagem ideal, onde a película permanecia uniforme após sua fixação na cápsula. A condição ideal encontrada é baseada num sistema composto por três superfícies sanduichadas, onde a janela é colocada no meio de dois anéis, o primeiro de kapton e o outro de cobre. Estes dois anéis foram confeccionados com um diâmetro interno de 4 mm e um diâmetro externo de 11,5 mm, permitindo que a película de kapton deslizasse livremente quando pressionada pela tampa superior da cápsula, como podemos ver no desenho esquemático apresentado na Figura 4.4.

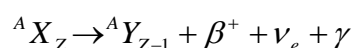


**Figura-4.4:** Corpo de selagem da cápsula com janela fixada pela tampa (a direita). Parte interna da fixação da janela na cápsula, onde observa-se de cima para baixo o anel de cobre, a película de kapton, o anel de kapton e a tampa de fechamento da cápsula ( a esquerda).

A base do corpo de selagem é estriada de 3/8" para que o selamento desta, com a janela e tampa da cápsula fosse realizado de uma forma simples, utilizando-se uma chave estriada associada a um torquímetro. Na otimização deste processo observamos que a película de kapton é altamente resistente à torção e tração, não apresentando rompimento ou indício de possíveis rasgos após a selagem. Foi obtida uma perfeita fixação da janela e selagem do conjunto, assegurando que não ocorra vazamentos do gás neônio, contido no interior da câmara interna da cápsula, bem como, do elemento radioativo. Também observamos uma resistência da película da janela às condições distintas de variação de pressão, como é descrito no item a seguir.

#### 4.1.2 – Resistência da Película de Kapton a Variação de Pressão

De modo geral, núcleos radioativos tendem a decair produzindo núcleos estáveis. No caso do elemento radioativo usado, o  $^{22}\text{Na}$ , teremos a produção do elemento estável  $^{22}\text{Ne}$ . Neste caso, o núcleo pai ao decair, irá produzir um núcleo filho, com o mesmo número de massa, porém com um próton a menos, levando a um número atômico com uma unidade a menos:



Devido a este fato, ao projetarmos as dimensões da cápsula selada de  $^{22}\text{Na}$ , foi levado em consideração o número de átomos de  $^{22}\text{Ne}$  produzido no processo de decaimento do



radionuclídeo pai durante o tempo de vida útil da cápsula. Este número foi calculado levando em consideração a atividade da fonte. Dado que, a unidade padrão Becquerel é definido como sendo a quantidade de material radioativo que sofre uma desintegração por segundo (dsp), ou seja,

$$1Bq = 1dps,$$

como a fonte utilizada neste trabalho possui atividade de  $1mCi$ , onde

$$1Ci = 3,7 \times 10^{10} Bq = 3,7 \times 10^{10} dps,$$

teremos a produção de  $37 \times 10^6$  átomos de  $^{22}Ne$  por segundo. Assim, em um ano o número  $N$  de átomos de  $^{22}Ne$  que será produzido devido ao decaimento do  $^{22}Na$ , será de:

$$N = 1,17 \times 10^{15} \text{ átomos de Ne por ano.}$$

Como a atividade  $^{22}Na$  não é constante, mas decai exponencialmente com o tempo com uma meia-vida física do de 2,6 anos, isso leva à uma queda da produção do número de  $^{22}Ne$  também exponencial. Logo, o valor calculado acima foi superestimado. Considerando que o volume ocupado por um mol de moléculas ( $6,0022 \times 10^{23}$  moléculas / mol) de um gás ideal é de aproximadamente 22,4 litros, ou seja,  $22,4 \times 10^{-3} mm^3$ , em Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP), o volume ocupado por  $1,17 \times 10^{15}$  átomos de  $^{22}Ne$  produzidos em um ano é igual a:

$$V_{Ne} = 4,35 \times 10^{-2} mm^3$$

Como o volume interno da cápsula é de  $V = 213,62 mm^3$ , ele comporta perfeitamente o número de átomos de  $^{22}Ne$  produzidos em um ano de decaimento do  $^{22}Na$ .

Porém, a cápsula foi selada em condições ambiente, ou seja, no momento da selagem, havia nesta certo número de moléculas de ar. Para determinar este número de moléculas foi utilizado a Lei dos Gases Ideias:

$$PV = NKT \tag{4.1}$$

onde  $P$  é a pressão ambiente,  $P = 101,325 \text{ kPa}$ ,  $V$  é o volume interno da cápsula,  $V = 213,62 \text{ mm}^3$ ,  $N$  é o número de moléculas contidas no interior da cápsula,  $K$  é a constante de Boltzmann,  $K = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$  e  $T$  é a temperatura,  $297 \text{ K}$ , chegando-se ao valor de:

$$N_1 = 5,281082930756 \times 10^{24} \text{ moléculas} \quad (4.2)$$

Contudo, após um ano selada, tem-se a este número, um acréscimo correspondente ao número de átomos de  $^{22}\text{Ne}$  produzido no decaimento radioativo do  $^{22}\text{Na}$ :

$$N_2 = N_1 + 1,17 \times 10^{15} = 5,281082931926 \times 10^{24} \text{ moléculas/átomos} \quad (4.3)$$

Após o acréscimo de moléculas no interior do reservatório, qual seria a pressão exercida por este acréscimo na película que funciona como janela radiotransparente da cápsula.

Para nos certificar que este aumento de pressão não seria alto o suficiente para a película de kapton rompesse, foi determinado a variação da pressão usando a relação:

$$\frac{P_1}{N_1} = \frac{P_2}{N_2} \quad (4.4)$$

onde  $P_1$ ,  $N_1$  é a pressão e o número de moléculas no momento da selagem e,  $P_2$ ,  $N_2$  é a pressão e o número de moléculas mais o número de átomos de  $^{22}\text{Ne}$  acrescido. O acréscimo de pressão após uma ano será dê:

$$P = 101,325,00002245 \text{ kPa} \quad (4.5)$$

Logo, podemos concluir que depois de decorrido um ano de selagem, considerando um fonte com uma atividade de  $1 \text{ mCi}$ , o aumento da pressão no interior da cápsula corresponde a um acréscimo insignificante no interior da cápsula.

Adicionalmente a estes cálculos, foram realizados testes empíricos com a película, submetendo-a a uma variação de pressão positiva e negativa de  $2 \text{ atm}$ . Observou-se uma

grande resistência da película suportando estas diferenças de pressão, levando-nos a concluir que mesmo após 6 anos de carregamento da cápsula, esta ainda preservará suas características de contenção do  $^{22}\text{Ne}$  e do  $^{22}\text{Na}$  no interior da cápsula.

## 4.2 – Processo de Carregamento da Cápsula.

Todo o processo de carregamento e selagem da cápsula foi projetado e desenvolvido no LEAM. Com este objetivo, construímos uma capela revestida com argamassa baritada, parede impermeável e mesa de mármore revestida com lençol plástico, com cantos arredondados. Preocupados sempre com a possibilidade de ocorrência de contaminações radioativas acidentais, todos os elementos da mesa de carregamento foram revestidos de filme plástico e, nos locais onde há aquecimento, por folhas de alumínio, possibilitando fácil descontaminação das superfícies. A capela de manipulação possui duas bancadas como mostra a Figura 4.5, com uma parte superior onde está instalado a mesa de carregamento e selagem da cápsula e, uma parte inferior, onde foi instalado um castelo de chumbo para o armazenamento da fonte radioativa de  $^{22}\text{Na}$  e, da cápsula carregada quando não estiver sendo utilizada e também, dos rejeitos radioativos. O piso da sala utilizada para a manipulação da solução radioativa foi revestido com um tapete plástico, seguindo normas e condutas para se trabalhar com fontes radioativas não seladas.

Ao lado da capela de manipulação, uma capela química de exaustão foi adaptada para o carregamento da pipeta micrométrica com a solução radioativa de  $^{22}\text{Na}$ , utilizada para preencher a cápsula. Nesta capela química, igualmente revestida por lençol de plástico, papel absorvente, foi construído uma barreira física de chumbo, revestida internamente com filme plástico e papel alumínio nas regiões de maior contato. Nesta capela foi realizado o carregamento da pipeta micrométrica, procedimento realizado n vezes durante o processo de carregamento da cápsula, com o auxílio de um espelho inclinado afixado na parte superior da capela, observando de forma indireta o carregamento da pipeta micrométrica, como se pode ver na foto abaixo.



**Figura-4.5:** Área de manipulação de armazenamento da cápsula selada. A esquerda tem a vista da capela química, capela de manipulação e cofre de chumbo para armazenamento do  $^{22}\text{Na}$ . Na figura central tem-se a capela química e na figura á direita, a capela de armazenamento.

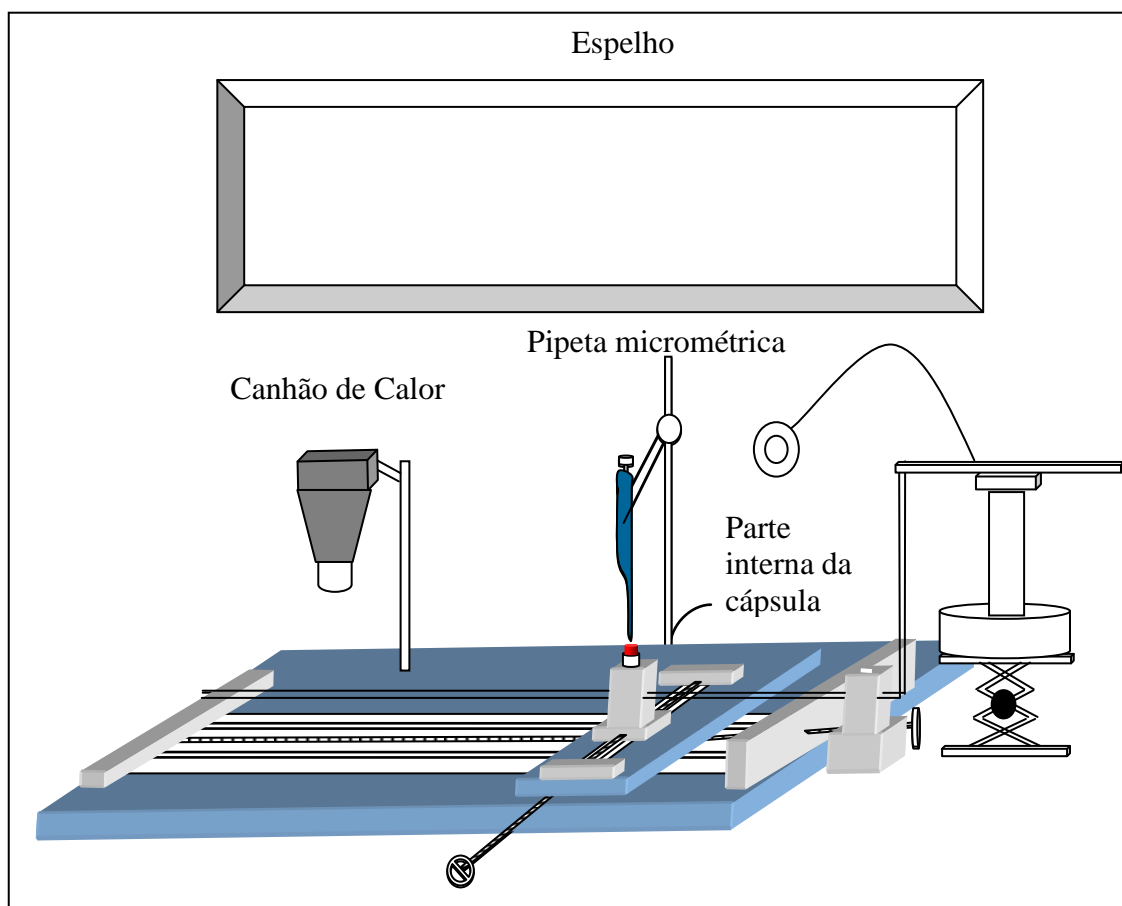
Para o processo de carregamento e secagem da cápsula, foi projetado e construído uma mesa com movimentos nas direções X,Y e Z, controlada por braços mecânicos. A mesa é instalada no interior de um castelo de chumbo como pode ser vista nas Figura 4.6. Todo o procedimento realizado dentro desta região é observado pela utilização de dois espelhos, um colocado na parte superior da capela e outro afixado por um suporte na lateral da parede de chumbo, como pode ser visto nas Figura 4.6 e 4.7.



**Figura-4.6:** Visão superior da mesa de manipulação e vista da barreira de proteção.



**Figura-4.7:** Vista do frontal da mesa de manipulação.

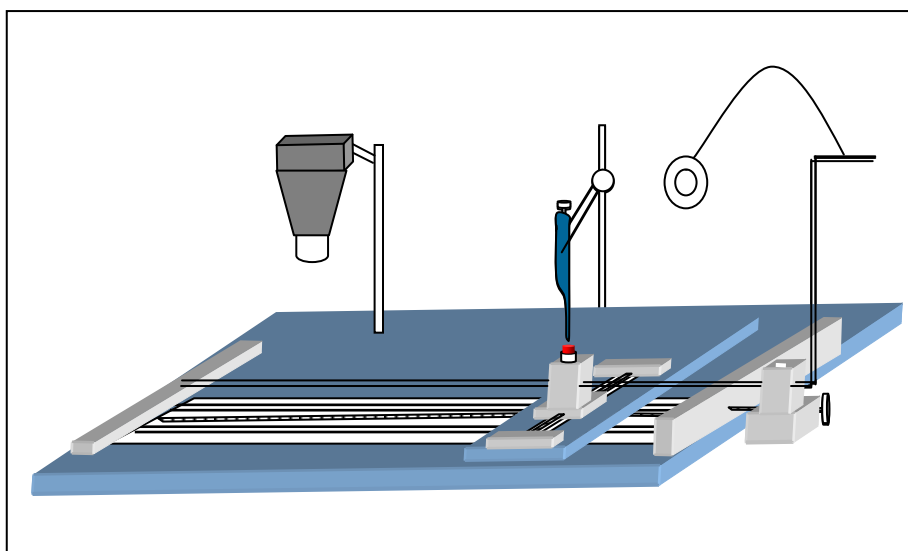


**Figura-4.8:** Desenho esquemático da mesa de manipulação com movimento nas direções x,y e z, construída para o processo de carregamento, secagem e selagem da cápsula de  $^{22}\text{Na}$ .

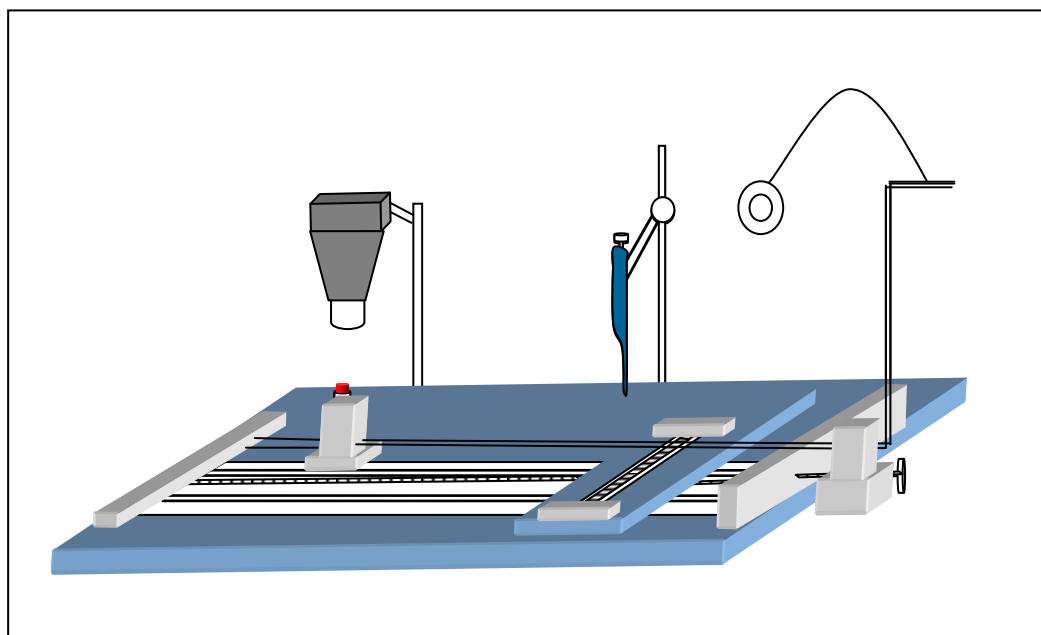
A parte interna da cápsula de  $^{22}\text{Na}$ , vazia, é presa em um suporte especial que se encontra sob a mesa de manipulação, mantendo a mesma na direção vertical e, no mesmo nível, durante toda a etapa de carregamento e de evaporação da solução radioativa. Um volume de  $10\mu\text{l}$  da solução de NaCl radioativa foi depositado no reservatório de tântalo por um pipeta micrométrica. Este procedimento foi observado por um pequeno espelho, preso por um suporte na parede lateral do castelo de chumbo, como pode ser visto no Figura 4.9. Preenchida, a cápsula passa posteriormente para o processo de secagem, sob um canhão de calor, durante o tempo de 50 segundos (Figura 4.9). Observamos que na etapa de secagem a temperatura na parte superior do copo de tântalo foi de  $60^{\circ}\text{C}$ . Terminado o tempo de secagem, a cápsula, foi então novamente posicionada no suporte da mesa de carregamento. Iniciando novamente todo o procedimento de carregamento e secagem. Todas as etapas foram repetidas várias vezes até que a atividade desejada estivesse depositada no recipiente de tântalo, veja as Figuras 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 que ilustram cada etapa do processo de carregamento e secagem da cápsula.



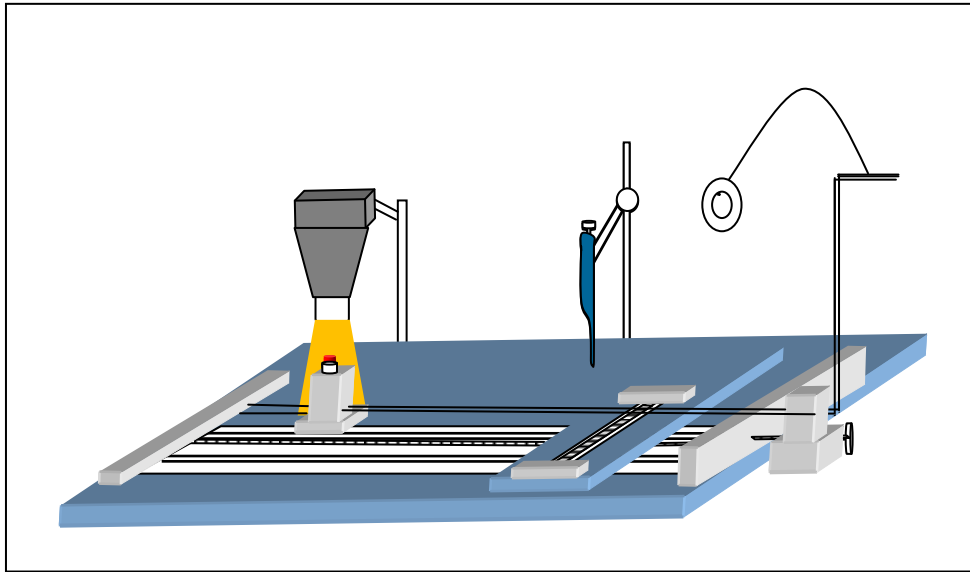
**Figura-4.9:** Espelho redondo usado para visualizar o carregamento. Lâmpada de infravermelho e canhão de calor, ambos usado para secagem da gota de NaCl.



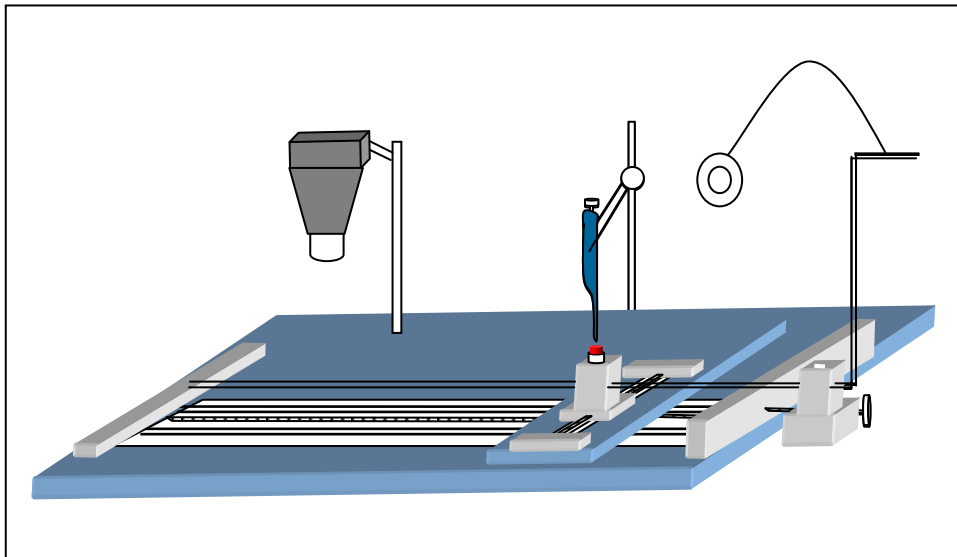
**Figura-4.10:** 1º Etapa: Uma gota de 10 $\mu$ l da solução radioativa de NaCl foi depositado no copo de tântalo situado no interior da cápsula. Todo o procedimento de descarregamento da pipeta micrométrica foi observado pelo auxílio de um pequeno espelho redondo fixado num suporte na parede de chumbo do castelo.



**Figura-4.11:** 2º Etapa: A cápsula deslocada com o auxílio do braço mecânico foi colocada sobre o canhão de calor para iniciar o processo de secagem.



**Figura-4.12:** 3º Etapa: Neste processo o canhão de calor foi acionado durante 50 segundos, e a água contida na solução radioativa de NaCl foi evaporada.



**Figura-4.13:** 4º Etapa: A cápsula foi novamente posicionada abaixo da pipeta micrométrica e, todo o procedimento acima foi repito N vezes, até que a cápsula estivesse totalmente carregada.



Cada etapa de carregamento da pipeta micrométrica, de preenchimento da cápsula e secagem da solução radioativa NaCl foi antecipadamente feito usando uma solução de NaCl não radioativa. Neste momento simulamos inúmeras vezes condutas que deveriam ser adotadas durante o processo de carregamento da cápsula radioativa  $^{22}\text{Na}$ , observando e corrigindo os possíveis problemas e as prováveis dificuldades que poderiam ocorrer. Mediante estas simulações foi desenvolvido um roteiro de procedimentos a ser seguido durante todo o processo de carregamento, secagem e selagem da cápsula radioativa de  $^{22}\text{Na}$ , conforme está apresentado no Apêndice.

Nossos testes iniciais de carregamento e secagem da cápsula foram feitos com uma substância aquosa salina não radioativa, com as mesmas especificações químicas da solução radioativa. No procedimento de carregamento da cápsula, verificamos que devido à tensão superficial do líquido, a pipeta micrométrica deveria produzir gotas com um volume de 10  $\mu\text{l}$ . Verificou-se que o descarregamento da gota no copo de Ta se dá de forma uniforme e rápida, não ocorrendo explosões desta ao ser expelida pela pipeta micrométrica. Para o procedimento de secagem, foi utilizado inicialmente uma lâmpada de raio infravermelho. Entretanto verificou-se a formação de uma aureola de NaCl na parte superior do copo de Ta, como pode ser visto na Figura 4.14.



**Figura-4.14:** Testes iniciais de carregamento e secagem com a solução não radioativa de NaCl.

A formação desta aureola começou a ser notada ao término do procedimento de secagem da terceira gota da solução de NaCl não radioativo. Outro problema encontrado foi o tempo de secagem: secando-se uma gota por vez, o menor tempo para a secagem completa é em torno de 10 minutos, implicando em um tempo de exposição

demasiado longo para o carregamento total do copo de Ta, quando se pretende trabalhar com fonte radioativa. A temperatura de secagem medida diretamente sobre o copo de Ta, com o uso de um termômetro ótico, é em torno de 60°C, após os 10 minutos de exposição à lâmpada infravermelha.

Visando resolver a deposição homogênea da solução de sódio no fundo do copo de Ta, foi trocada a lâmpada infravermelha por um canhão de calor. A temperatura do copo durante o processo de secagem com o canhão se mostrou muito semelhante àquela verificada utilizando-se a lâmpada infravermelha, isto é, em torno de 60 °C. Com este novo método a solução é empurrada pelo ar para o fundo do copo e o processo de secagem tornou-se mais rápido e mais eficiente, produzindo uma deposição uniforme no fundo o copo de Ta. Outra vantagem que foi verificada utilizando-se o canhão de calor foi a diminuição do tempo de secagem da amostra, passando de 10 minutos para 50 segundos, minimizando o tempo de exposição à fonte radioativa no procedimento de carregamento e secagem da cápsula. Para aumentar ainda mais a eficiência do processo de secagem, a profundidade do copo de tântalo foi aumentada, de 2 mm para 4 mm, reduzindo a probabilidade da solução solidificada de cloreto de sódio se formar na borda superior do copo. Com estas alterações, verificou-se que o processo de secagem se tornou mais seguro, envolvendo menos tempo. A solução solidificada de cloreto de sódio se formou nas paredes internas do copo, crescendo de forma uniforme e em camadas, como podemos ver na Figura 4.15.



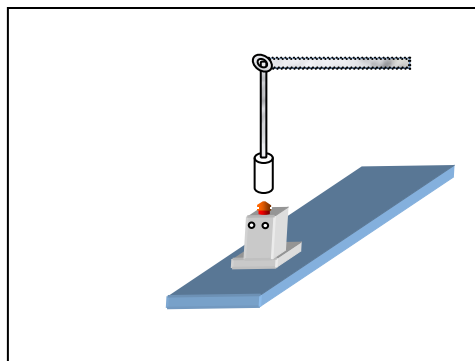
**Figura-4.15:** Formação da deposição correta do sódio não radioativo no interior do copo de Ta.

### 4.3 - Processo de Selagem da Cápsula

Finalizado todo o procedimento de carregamento e secagem da solução radioativa de NaCl, a cápsula é então devidamente posicionada sob a mesa de selagem. Com o auxílio de um soquete estriado de 3/4" com o extensor de 10" a cápsula é selada, como mostram as Figuras 4.16 e 4.17 abaixo.



**Figura-4.16:** Procedimento de selagem e as condutas para a retirada da cápsula após a selagem.



**Figura-4.17:** Desenho esquemático do processo de fechamento final da cápsula.

Ao termino desta etapa, a cápsula é removida da mesa de carregamento com o auxílio de uma pinça tenaz para cadinho de ponta curva de 40 cm de comprimento, como podemos ver na Figura 4.16, possibilitando assim o seu deslocamento sem a necessidade de um contato direto com a fonte radioativa, trabalhando desta forma dentro das regras e normas de radioproteção estabelecidas pela CNEN. A cápsula após ser carregada foi colocada no interior do cofre de chumbo (Fig. 4.18) dentro de um castelo de chumbo (Fig. 4.18).



**Figura-4.18:** Recipiente de chumbo para o armazenamento da cápsula e o castelo de chumbo destinado ao armazenamento de elemento radioativo.

## Capítulo 5

### Conclusões e Perspectivas Futuras

---

Neste trabalho foi desenvolvido uma cápsula selada de  $^{22}\text{Na}$  com o objetivo de produzir feixes de pósitrons de baixas energias para serem utilizados, futuramente, nos equipamentos disponíveis no LEAM atualmente aplicados nos estudos de colisões de elétrons com moléculas. Diferentemente de se trabalhar com elétrons, trabalhar com pósitron, envolve uma série de dificuldades e desafios, começando pelo alto custo das fontes emissoras de pósitrons, a baixa intensidade do feixe produzido e ainda perdas significativas do feixe no processo de moderação e transmissão. Todos os métodos descritos na literatura são fragmentários, seja para a obtenção e produção do feixe de pósitrons lentos seja por meio de aceleradores de partículas, reatores nucleares ou fonte radioativa, consistindo o desenvolvimento desta tecnologia um grande desafio.

O projeto iniciou com a escolha da fonte geradora de pósitrons, no caso uma solução aquosa radioativa de  $^{22}\text{Na}$ . A atividade da fonte utilizada foi de aproximadamente 1 mCi. Foi projetado e desenvolvido uma cápsula selada, para o acondicionamento da fonte radioativa de  $^{22}\text{Na}$ , composta por quatro repartições distintas. Ela é composta por uma base inferior de sustentação que possui uma pequena câmara para o armazenamento do  $^{22}\text{Ne}$  liberado e conexão de encaixe para o manipulador, por um reservatório cilíndrico de tântalo onde é acondicionado o radioisótopo, por um corpo de selagem da cápsula, onde é instalada uma janela radiotransparente, e por uma tampa, responsável pela fixação da janela. As repartições externas da cápsula foram cuidadosamente projetadas e confeccionadas em aço inoxidável não magnético, visando uma perfeita selagem do conjunto na montagem final, garantindo que não ocorra possíveis vazamentos do radioisótopo e do gás neônio, liberado espontaneamente no processo de decaimento do  $^{22}\text{Na}$ .

Todo o projeto da cápsula de  $^{22}\text{Na}$  foi elaborado visando dar segurança quando da sua manipulação pelo pesquisador, no processo de carregamento, secagem do radioisótopo, selagem e posterior manipulação no interior da câmara de vácuo. Cada etapa do processo foi desenvolvida enfrentando diversas dificuldades, sendo muitas vezes necessário a mudança de projetos e metodologias até se chegar ao estado final da cápsula.

Dado que o material utilizado na confecção da cápsula de  $^{22}\text{Na}$  foi aço inoxidável, o corpo da cápsula faz a blindagem dos pósitrons rápidos emitidos, enquanto a janela de kapton é praticamente transparente a estas partículas. Atenuamos a taxa de dose a valores recomendados pela CNEN,  $\dot{D}_E = 0,0005 \text{ mSv/h}$  para o público e de  $\dot{D}_E = 0,01 \text{ mSv/h}$ , para o trabalhador. Obtivemos o valor da Camada Semi-Redutora para chumbo do feixe de radiação gama de  $1,274 \text{ MeV}$  de  $1,18 \text{ cm}$ .

O trabalho foi desenvolvido de forma segura, com a construção de barreiras físicas de radioproteção e a elaboração de um plano de radioproteção, contendo normas de condutas de trabalho e procedimentos em casos de emergências. Foi também elaborado um manual de procedimento de condutas, a serem realizadas durante o encapsulamento da fonte radioativa de  $^{22}\text{Na}$ , de forma segura e, sem gerar qualquer dano à equipe de pesquisa e/ou a terceiros. A construção do plano de radioproteção e a elaboração do manual de condutas de trabalho basearam-se em estudo detalhado das normas da CNEN.

Ao finalizarmos todo o procedimento de encapsulamento da fonte, envolvendo as etapas de carregamento, secagem e selagem, a cápsula foi devidamente armazenada no interior de um castelo de chumbo. Todos os objetos que tiveram contato direto com a solução radioativa foram considerados rejeitos radioativos, seguindo as condutas descritas no plano de radioproteção, sendo armazenados em local apropriado, no interior do castelo de chumbo.

Para conhecer a intensidade do feixe produzido pela capsula selada é necessário utilizar uma moderador de pósitrons, passo posterior a este trabalho. Assim, no momento, podemos apenas estimar a intensidade do feixe produzido. Foi utilizado uma janela

transparente de kapton e sabe-se da literatura que para cada 1mCi de  $^{22}\text{Na}$  encapsulado tem-se um feixe de 1000 e<sup>+</sup>/s.

Como perspectivas futuras, está sendo desenvolvido um feixe de pósitrons lentos para ser associado em um aparelho de Seção de Choque Total da UFJF visando obter medidas de espalhamento de pósitrons por moléculas. A fonte encapsula de  $^{22}\text{Na}$  desenvolvida neste trabalho será instalada numa câmara de alto vácuo, revestida por  $\mu$ -metal, bombeada por uma bomba turbo molecular e por uma bomba mecânica. Os pósitrons emitidos pela cápsula serão termalizados por um moderador de tungstênio em construção, extraídos e focalizados posteriormente na entrada de um analisador cilíndrico 127°. Os pósitrons de baixa energia serão transmitidos através da câmara de dispersão, com e sem gás, sendo detectados por um coletor de Faraday, sendo o sinal gerado tratado pela contagem de pulsos eletrônicos habituais rápidos e registrado por um contador.

## Apêndice A

### Manual de Procedimento de Carregamento da Cápsula de $^{22}\text{Na}$

---

Este manual cobre os procedimentos de carregamento e manipulação da cápsula de  $^{22}\text{Na}$  no LEAM. Todo o procedimento deve ser executado com extremo cuidado, onde somente três pessoas devem estar presentes no laboratório, e treinadas para executar todos os procedimentos necessários, a saber: uma que faz a manipulação do radioisótopo, um auxiliar de carregamento da micropipeta e uma que fica nas proximidades da área onde é realizado o carregamento da cápsula. Esta terceira pessoa, faz a leitura em voz alta de todos os passos a serem executados e observa a execução de cada passo dos procedimentos. Cada passo deve ser totalmente lido em voz alta antes de ser iniciado. Cada passo deve ser totalmente concluído antes da próxima etapa, a ser lida em voz alta.

No dia da manipulação é sinalizada a operação na porta externa do laboratório, listando-se os nomes das pessoas envolvidas no carregamento e proibindo a entrada de terceiros. Todos os presentes devem fazer uso de dosímetro, bem como roupas e sapatos fechados, jaleco e duas luvas de látex, descartáveis, durante todo o processo de preenchimento da cápsula radioativa.

Em linhas gerais a produção da cápsula de  $^{22}\text{Na}$  no LEAM envolve três áreas distintas, próximas, localizadas em uma sala própria:

1. Castelo de chumbo para armazenamento do radioisótopo e resíduos;
2. Capela química de carregamento da pipeta micrométrica;
3. Capela de carregamento da cápsula de  $^{22}\text{Na}$ .



Cada uma destas áreas está descrita detalhadamente no Capítulo 4 desta dissertação.

Antes de iniciar os procedimentos para o carregamento da cápsula é necessário certificar-se que todos os itens para realização deste trabalho estão perfeitamente atendidos, ou seja:

- Mesa de carregamento da cápsula funcionando precisamente, isto é, todos os movimentos do suporte da cápsula podem ser realizados com suavidade e com posições de movimentos e paradas definidas e calibradas;
- Cápsula posicionada no suporte de carregamento da mesa: verificar se a cápsula está bem fixada no suporte de encaixe da mesma na mesa de carregamento.
- Verificar se a cápsula encontra-se na posição 1 do braço mecânico responsável pelo seu movimento vertical;
- Verificar se a caixa de rejeito revestida por duas camadas de plástico está localizada na área interna do castelo da mesa de carregamento;
- Na área de carregamento da pipeta micrométrica localizada na Capela Química, verificar se está revestido com plástico coberto por papel absorvente e/ou papel alumínio, com biombo de chumbo para manipulação da pipeta micrométrica e espelho de observação;
- Atrás do biombo da área de carregamento da pipeta micrométrica deve estar: a pipeta micrométrica, pinça, caixa de lenços absorventes, castelo de armazenamento temporário do frasco de  $^{22}\text{Na}$  e caixa de rejeito.
- Em uma bancada ao lado da capela de carregamento da cápsula de  $^{22}\text{Na}$  deve estar o monitor de radiação, calibrado e com as ponteiras para o uso de monitoração de área e superfície; a tampa de fechamento da cápsula; chaves de boca numero 19 apropriadas para selagem da cápsula;

As seguintes instruções são lidas em voz alta pelo observador e seguidas pela pessoa que manipula a fonte. Cada passo deve ser executado e confirmado antes do próximo passo ser realizado.

## **A.1-Carregamento da pipeta micrométrica**

Iniciar carregamento da pipeta micrométrica com extremo cuidado, sempre com o uso de uma barreira de proteção, luvas descartáveis e dosímetro.

**Passo P1:** Retirar o radioisótopo do castelo de chumbo de armazenamento.

**Passo P2:** Colocar o cofre contendo o frasco do radioisótopo sobre a bancada da capela química, atrás do biombo, evitando provável contaminação e minimizando a exposição direta.

**Passo P3:** Retirar o frasco do cofre do chumbo e colocar o cofre ao lado da capela.

**Passo P4:** Posicionar o frasco em posição de fazer o carregamento da pipeta micrométrica.

**Passo P5:** Abrir o frasco.

**Passo P6:** Posicionar a pipeta micrométrica já regulada para o tamanho da gota a ser utilizada e carregar a pipeta micrométrica.

**Passo P7:** Transferir a pipeta micrométrica para o suporte da mesa de carregamento, protegendo a ponta com um lenço de papel.

**Passo P8:** Deixar o frasco radioativo aberto na posição que a pipeta micrométrica foi carregada, no interior de uma da barreira de proteção.

**Passo P9:** Monitorar as mãos, garantindo que não ocorreu contaminação das luvas.

## **A.2-Carregamento da cápsula de $^{22}\text{Na}$**

Iniciar o processo de carregamento, sempre com o uso de barreira de proteção e visualizando todo o procedimento de maneira indireta, pelos espelhos.

**Passo C1:** Certificar se a cápsula está na posição 1 de carregamento.

**Passo C2:** Posicionar a pipeta micrométrica no suporte da mesa de carregamento sobre a cápsula vazia, certificando-se que a ponta está centrada pela sua imagem no espelho circular pequeno.

**Passo C3:** Acionar a pipeta micrométrica liberando a solução radioativa.

**Passo C4:** Levantar a cápsula para a posição 2, com o uso do braço mecânico.

**Passo C5:** Mover a cápsula cuidadosamente até o canhão de calor através do movimento das hastes externas ao castelo, monitorando o movimento pelo espelho retangular superior.

**Passo C6:** Ligar o canhão de calor, esperar o processo de secagem por 50 segundos, se ausentando da sala de carregamento por 30 segundos.

**Passo C7:** Desligar o canhão de calor.

**Passo C8:** Mover novamente a capsula até a posição de carregamento através das hastes externas, até a marca A feita na barreira de chumbo.

**Passo C9:** Descer a cápsula à posição 1 com o uso do braço mecânico.

**Passo C10:** Carregar a pipeta micrométrica e repetir os passos P6 a P9 do procedimento de carregamento da pipeta micrométrica.

**Passo C11:** Acionar a pipeta micrométrica liberando a solução radioativa.

**Passo C12:** Voltar ao passo C1 e realizar os procedimentos até passo C9, até que a cápsula esteja preenchida com a solução radioativa e seca.

**Passo C13:** Mover a cápsula até a posição de selagem através das hastes externas.

**Passo C14:** Descer a cápsula à posição 1 com o uso do braço mecânico deixando-a pronta para ser selada.

**Passo C15:** Monitorar as mãos, evitando que o contato com outros objetos provoque contaminação.

### **A.3- Selamento da Cápsula de $^{22}\text{Na}$**

**Passo S1:** Conectar o soquete estriado de 3/4" com o extensor 10".

**Passo S2:** Ajustar a tampa da cápsula ao soquete estriado de 3/4" usando fita de kapton.

**Passo S3:** Conectar a tampa da cápsula à cápsula, fixada na base da mesa de carregamento, usando o cabo extensor e rotacionar a tampa até que se observe resistência (por 6 voltas) até o início da selagem.

**Passo S4:** Selar a cápsula.

**Passo S5:** Remover o soquete estriado da cápsula.

**Passo S6:** Remover a cápsula da mesa de carregamento utilizando uma pinça Tenaz para cadinho de ponta curva de 40 cm de comprimento.

**Passo S7:** Acondicionar a cápsula carregada em cofre de chumbo.

**Passo S8:** Armazenar o cofre com a cápsula carregada no interior do castelo chumbo de armazenamento.

**Passo S9:** Monitorar mãos, pés, vestimentas, superfícies, bancadas e chão.

**Passo S10:** Monitorar bancada e mesa, usando monitor de superfície, e comparar os dados obtidos anteriormente, garantindo com isso que não houve contaminação na sala de manipulação.

Os possíveis rejeitos radioativos, gerados, são devidamente acondicionados em suas caixas e armazenados no interior do castelo de chumbo de armazenamento.

## Apêndice B

### Grandezas e Unidades de Radioproteção

---

#### B.1-Grandezas Radiológicas.

##### B.1.2- Atividade.

A atividade de um material radioativo representa o número de desintegração que a amostra irá sofrer por unidade de tempo, representada matematicamente por:

$$A = \frac{dN}{dt}$$

onde  $dN$  é o valor esperado do número de desintegrações nucleares espontâneas no intervalo de tempo  $dt$ . A unidade atual de medida da grandeza atividade é o becquerel (Bq) e, 1 Bq corresponde a uma desintegração por segundo (s). A unidade antiga, o curie (Ci), corresponde a  $3,7 \times 10^{10}$  desintegrações por segundo, ou seja:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ dps} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq.}$$

##### B.1.3 – Exposição.

A grandeza exposição, representada pelo símbolo  $X$ , foi à primeira grandeza definida para fins de radioproteção. Definida como sendo a grandeza que quantifica o total de cargas elétricas produzidas em ar seco por unidade de massa, ou seja, a medida da quantidade de carga elétrica total produzida por raios X ou raios gama em um quilograma de ar, expresso matematicamente por:

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

A unidade atual da grandeza exposição é o coulomb por quilograma (C/kg). A unidade antiga é o roentgen (R) que se relaciona no SI com a unidade atual por,  $1R=2,58 \times 10^{-4}$  C/kg. Os instrumentos utilizados para medir a radiação registram a taxa de exposição, que representa a medida por unidade de tempo, ou seja, C/kg.s.

### **B.1.3 – Dose absorvida.**

O conceito de dose absorvida D, foi introduzido para representar a quantidade de energia depositada à matéria pela radiação ionizante em um determinado volume conhecido de massa de material dm, matematicamente expresso por:

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm}$$

onde  $d\bar{\varepsilon}$  é a energia média depositada pela radiação no ponto de interesse de massa  $dm$ . A unidade atual da grandeza dose absorvida é o gray (Gy) que equivale a 1 J/kg. A unidade antiga é o rad que equivale a  $10^{-2}$  J/kg, ou seja,  $10^{-2}$  Gy.

### **B.1.4 – Dose Equivalente.**

As grandezas radiológicas definidas até agora levaram em conta a energia absorvida no ar e ou tecido humano, não dando uma ideia dos efeitos biológicos causados ao tecido biológico por diferentes tipos de radiação ionizante. Tornando se necessário a definir a grandeza dose equivalente H, com sendo a equivalência entre doses de diferentes radiações para produzir o mesmo efeito biológico, sendo expresso por:

$$H=D.Q,$$

onde D é a dose absorvida e Q o fator de qualidade que relaciona o efeito produzidos por diferentes tipos de radiação em termos de danos produzidos nos tecidos biológicos. Representando na realidade o poder de ionização dos diferentes tipos de radiação ionizante no meio, os valores efetivos para Q estão representados na tabela abaixo.

**Tabela B.1.** Valores do fator de Qualidade Efetivo Q para os diversos tipos de radiações (CNEN-NE-3.01 e ICRP-26) [73 - 80].

<b>Tipo de Radiação</b>	<b>Q</b>
Raio X, Radiação Gama e Elétrons.	1
Prótons e partículas com uma (1) unidade de carga e com massa de repouso maior que uma unidade de massa atômica e de energia desconhecida.	10
Nêutrons com energias desconhecidas.	20
Radiação $\alpha$ e demais partículas com carga superior a uma (1) unidade de carga.	20

A unidade de medida da dose equivalente no Sistema Internacional é o sievert (Sv) que equivale a  $1 \text{ J.kg}^{-1}$ .

### **B.1.5 – Dose Efetiva.**

Em 1991, foi introduzido internacionalmente (ICRP-60, Internacional Comissão on Radiological Protection 60) um novo conceito de dose, a dose efetiva E, definida como sendo a soma ponderada do produto da dose equivalente pelo respectivo fator de ponderação  $w_t$ , do órgão ou tecido biológico irradiado. Os valores do fator de ponderação para os respectivos órgãos, adotados no Brasil está representado na tabela B-2 abaixo. Os valores tabelados do fator de ponderação dos tecidos biológicos esta associado à radiosensibilidade dos órgãos ou tecidos. Expresso matematicamente por:

$$E = \sum_t W_t \cdot H$$

onde E é a dose efetiva,  $W_t$  o fator de ponderação devido ao órgão irradiado, grandeza adimensional. A unidade de medida da dose efetiva será a mesma da dose equivalente, ou seja, o sievert,  $1 \text{ Sv}=\text{J/kg}$ .



**Tabela B-2.** Valores de fator de ponderação  $W_t$  para tecidos ou órgãos (ICRP 60 e CNEN NN 3.01-2011) [73 - 81].

<b>Órgão ou Tecido</b>	<b>Fator de ponderação <math>W_t</math></b>
Gônadas	0,20
Medula óssea (Vermelha)	0,12
Cólon	0,12
Pulmão	0,12
Estômago	0,12
Bexiga	0,05
Mama	0,05
Fígado	0,05
Esôfago	0,05
Tireoide	0,05
Pele	0,01
Superfície Óssea	0,01
*Restantes	0,05
*Cérebro, intestino grosso superior, intestino delgado, rins, útero, pâncreas, vesículas, timo, adrenais e músculos.	

## Referências Bibliográficas

---

- [1] G. P. Karwasz, “Positrons — an alternative probe to electron scattering,” *Eur. Phys. J. D*, vol. 35, no. 2, pp. 267–278, Aug. 2005.
- [2] C. M. Surko, “Positron atomic physics – A look to the future,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 247, no. 29, pp. 1–4, Jun. 2006.
- [3] C. M. Surko, G. F. Gribakin, and S. J. Buckman, “Low-energy positron interactions with atoms and molecules,” *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.*, vol. 38, pp. R57–R126, Mar. 2005.
- [4] M. Charlton, “Experimental studies of positrons scattering in gases,” *Reports Prog. Phys.*, vol. 48, no. 6, p. 737, 1985.
- [5] M. Deutsch, “Evidence for the Formation of Positronium in Gases,” *Phys. Rev.*, vol. 82, no. 3, pp. 455–456, 1951.
- [6] R. Eisberg, *R. Resnick Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles*, 1985.
- [7] C. D. Anderson, “The Positive Electron,” *Phys. Rev.*, vol. 43, no. 6, pp. 491–494, Mar. 1933.
- [8] J. W. H. M. Charlton, “Positron Physics,” Livro, 2003.
- [9] J. P. Marler, L. D. Barnes, S. J. Gilbert, J. P. Sullivan, J. A. Young, and C. M. Surko, “Experimental studies of the interaction of low energy positrons with atoms and molecules,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 221, pp. 84–92, Jul. 2004.
- [10] V. V. Men’shenin, V. V. Plokhoi, G. A. Ivanov, S. Y. Kuz’minykh, Y. Z. Kandiev, V. P. Nikitin, Y. V. Osejev, A. B. Trofimov, and V. N. Kharitonov, “Investigation of positron moderator efficiency by the time of flight technique using isotopic sources,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 470, no. 1–2, pp. 53–55, Sep. 2001.
- [11] A. P. Mills, P. M. Platzman, and B. L. Brown, “Slow-Positron Emission from Metal Surfaces,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 41, no. 15, pp. 1076–1079, 1978.
- [12] A. P. Mills, “Chemistry and physics with many positrons,” *Radiat. Phys. Chem.*, vol. 76, no. 2, pp. 76–83, Feb. 2007.
- [13] B. L. B. Mills, P. Allen, P. M. Platzman, “Slow-Positron Emission from Metal Surfaces,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 41, no. 8–9, pp. 1076–1079, 1978.

- [14] P. G. Coleman and J. D. McNutt, "Measurement of Differential Cross Sections for the Elastic Scattering of Positrons by Argon Atoms," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 42, no. 17, pp. 1130–1133, 1979.
- [15] M. Charlton, G. Clark, T. C. Griffith, and G. R. Heyland, "Positronium formation cross sections in the inert gases," *J. Phys. B At. Mol. Phys.*, vol. 16, no. 15, pp. L465–L470, Aug. 1983.
- [16] H. Gao, A. J. Garner, J. Moxom, G. Laricchia, and Á. Kövér, "An electrostatic beam for positron–gas scattering measurements," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 143, no. 1–2, pp. 184–187, Aug. 1998.
- [17] S. Gilbert, R. Greaves, and C. Surko, "Positron Scattering from Atoms and Molecules at Low Energies," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 82, no. 25, pp. 5032–5035, Jun. 1999.
- [18] D. E. Groce, D. G. Costello, J. W. McGowan, and D. F. Herring, "Time-of-flight observation of low-energy positrons," in *Bulletin of the American Physical Society*, 1968, vol. 13, no. 11, p. 1397.
- [19] E. M. Gullikson and A. P. Mills, "Positron Dynamics in Rare-Gas Solids," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 57, no. 3, pp. 376–379, Jul. 1986.
- [20] G. M. A. Hyder, M. S. Dababneh, Y.-F. Hsieh, W. E. Kauppila, C. K. Kwan, M. Mahdavi-Hezaveh, and T. S. Stein, "Positron Differential Elastic-Scattering Cross-Section Measurements for Argon," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 57, no. 18, pp. 2252–2255, Nov. 1986.
- [21] G. P. Karwasz, R. S. Brusa, D. Pliszka, and Z. Idziaszek, "Positron Scattering on Atoms and Molecules in the Limit of Low Energy," vol. 110, no. 5, pp. 605–614, 2006.
- [22] A. Kovtri, G. Laricchia, and M. Charlton, "Doubly differential cross sections for collisions of 100 eV positrons and electrons with argon atoms," vol. 27, pp. 2409–2416, 1994.
- [23] S. Gilbert and C. Kurz, "Creation of a monoenergetic pulsed positron beam," *Appl. Phys.*, vol. 70, no. 14-April, p. 1944–1946, 1997.
- [24] D. A. Cooke, D. J. Murtagh, and G. Laricchia, "Ionization cross-sections for positron collisions with N<sub>2</sub>," *Eur. Phys. J. D*, vol. 68, p. 66, 2014.
- [25] P. J. Schultz and K. G. Lynn, "Interaction of positron beams with surfaces, thin films, and interfaces," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 60, no. 3, pp. 701–779, Jul. 1988.
- [26] L. Chiari, A. Zecca, S. Girardi, E. Trainotti, G. García, F. Blanco, R. P. McEachran, and M. J. Brunger, "Positron scattering from O<sub>2</sub>," *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.*, vol. 45, no. 21, p. 215206, 2012.

- [27] S. Armitage, J. Beale, D. Leslie, and G. Laricchia, "Production and scattering of a positronium beam," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 233, no. 1–4, pp. 88–94, 2005.
- [28] G. Laricchia, S. Armitage, D. E. Leslie, M. Szuińska, and P. Van Reeth, "Positron and positronium interactions with atoms and molecules," *Radiat. Phys. Chem.*, vol. 68, no. 1–2, pp. 21–31, 2003.
- [29] W. E. Kauppila, T. S. Stein, E. G. Miller, and E. Surdutovich, "Positron scattering by molecules," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 221, no. 0, pp. 48–55, 2004.
- [30] T. Stein, M. Harte, J. Jiang, W. Kauppila, C. Kwan, H. Li, and S. Zhou, "Measurements of positron scattering by hydrogen, alkali metal, and other atoms," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 143, no. 1–2, pp. 68–80, Aug. 1998.
- [31] D. J. Murtagh, D. A. Cooke, and G. Laricchia, "Excited-State Positronium Formation from Helium, Argon, and Xenon," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 102, no. 13, p. 133202, 2009.
- [32] M. Shipman, S. J. Brawley, L. Sarkadi, and G. Laricchia, "Collimated positronium production from gases," *Eur. Phys. J. D*, vol. 68, p. 75, 2014.
- [33] P. Van Reeth and J. W. Humberston, "The energy dependence of the annihilation rate in positron - atom scattering," *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.*, vol. 31, no. 5, p. L231, 1998.
- [34] A. Zecca, L. Chiari, G. García, F. Blanco, E. Trainotti, and M. J. Brunger, "Total cross sections for positron and electron scattering from pyrimidine," *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.*, vol. 43, no. 21, p. 215204, 2010.
- [35] A. Zecca, G. Karwasz, R. S. Brusa, and R. Grisenti, "Absolute total cross section measurements for intermediate-energy electron scattering. IV. Kr and Xe," *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.*, vol. 24, no. 11, p. 2737, 1991.
- [36] A. Zecca, L. Chiari, A. Sarkar, K. L. Nixon, and M. J. Brunger, "Low-energy positron scattering from methanol and ethanol: Total cross sections," *Phys. Rev. A*, vol. 78, no. 2, p. 22703, 2008.
- [37] A. Zecca, L. Chiari, A. Sarkar, S. Chattopadhyay, and M. J. Brunger, "Procedures for conditioning W- and Ni-moderators for application in positron-scattering measurements," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 268, no. 5, pp. 533–536, 2010.
- [38] A. Zecca, E. Trainotti, L. Chiari, M. H. F. Bettega, S. A. Sanchez, M. T. do N. Varella, M. A. P. Lima, and M. J. Brunger, "Positron scattering from the cyclic ethers oxirane, 1,4-dioxane, and tetrahydropyran," *J. Chem. Phys.*, vol. 136, no. 12, p. 2012.

- [39] A. Zecca, L. Chiari, E. Trainotti, A. Sarkar, S. d'A. Sanchez, M. H. F. Bettiga, M. T. do N. Varella, M. A. P. Lima, and M. J. Brunger, "Positron scattering from methane," *Phys. Rev. A*, vol. 85, no. 1, p. 12707, Jan. 2012.
- [40] A. Zecca, L. Chiari, E. Trainotti, D. V Fursa, I. Bray, A. Sarkar, S. Chattopadhyay, K. Ratnavelu, and M. J. Brunger, "Positron scattering from argon: total cross sections and the scattering length," *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.*, vol. 45, no. 1, p. 15203, 2012.
- [41] A. Zecca, L. Chiari, A. Sarkar, and M. J. Brunger, "Positron scattering from the isoelectronic molecules  $N_2$ , CO and  $C_2 H_2$ ," *New J. Phys.*, vol. 13, no. 11, p. 115001, 2011.
- [42] G. P. Karwasz, M. Barozzi, M. Bettonte, R. S. Brusa, and A. Zecca, "A very low-energy apparatus for positron scattering on atoms and molecules," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 171, no. 1–2, pp. 178–181, 2000.
- [43] H. Gao, A. J. Garner, J. Moxom, G. Laricchia, and Á. Kövér, "An electrostatic beam for positron–gas scattering measurements," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 143, no. 1–2, pp. 184–187, 1998.
- [44] D. A. Cooke, D. J. Murtagh, and G. Laricchia, "Positronium formation cross-sections for Xe,  $CO_2$  and  $N_2$ ," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 199, no. 1, p. 12006, 2010.
- [45] A. Özen, A. J. Garner, and G. Laricchia, "Rare gas solid moderator for Ps beam at {UCL}," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 171, no. 1–2, pp. 172–177, 2000.
- [46] E. Surdutovich, W. E. Kauppila, C. K. Kwan, E. G. Miller, S. P. Parikh, K. A. Price, and T. S. Stein, "Measurements of cross-sections for positrons and electrons scattered by Cs atoms," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 221, no. 0, pp. 97–99, 2004.
- [47] T. S. Stein, M. Harte, J. Jiang, W. E. Kauppila, C. K. Kwan, H. Li, and S. Zhou, "Measurements of positron scattering by hydrogen, alkali metal, and other atoms," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 143, no. 1–2, pp. 68–80, 1998.
- [48] C. M. Surko and R. G. Greaves, "Emerging science and technology of antimatter plasmas and trap-based beams," *Phys. Plasmas*, vol. 11, no. 5, p. 2333, 2004.
- [49] A. C. L. Jones, C. Makocheke, P. Caradonna, D. S. Slaughter, J. R. Machacek, R. P. McEachran, J. P. Sullivan, S. J. Buckman, A. D. Stauffer, I. Bray, and D. V Fursa, "Positron scattering from neon and argon," *Phys. Rev. A*, vol. 83, no. 3, p. 32701, Mar. 2011.

- [50] J. P. Sullivan, J. Roberts, R. W. Weed, M. R. Went, D. S. Newman, and S. J. Buckman, "A trap-based positron beamline for the study of materials," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 8, p. 85702, 2010.
- [51] J. P. Sullivan, S. J. Gilbert, S. J. Buckman, and C. M. Surko, "Search for resonances in the scattering of low-energy positrons from atoms and molecules," *J. Phys. B At. Mol. Opt. Phys.*, vol. 34, no. 15, p. L467, 2001.
- [52] N. Guessoum, P. Jean, and W. Gillard, "The lives and deaths of positrons in the interstellar medium," p. 16, Apr. 2005.
- [53] A. C. B. Machado, V. Pleitez, and M. C. Tijero, "Usando a antimatéria na medicina moderna," *Rev. Bras. Ensino Física*, vol. 28, no. 4, pp. 407–416, 2006.
- [54] P. A. M. Dirac, S. J. College, "A Theory of Electrons and Protons," *Commun. By R. H. Fowler, F. R. S.*, pp. 360–365, 1930.
- [55] EINSTEIN, A. **Ann. der Physik**, 18, 639, 1905
- [56] P. A. M. Dirac, "Nobel Lecture: Theory of electrons and positrons," *Nobelprize.org. Nobel Media AB 2013.*, vol. 12, no. i, pp. 320–325, 1933.
- [57] M. A. Moreira, "O Modelo Padrão da Física de Partículas," vol. 1306, pp. 1–11, 2009.
- [58] A. Ruark. *Phys. Rev.* 68 (1945) 278.
- [59] R. H. Howell, R. A. Alvarez, and M. Stanek, "Production of slow positrons with a 100-MeV electron linac," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 40, no. 8, 1982.
- [60] I. Kanazawa, Y. Ito, M. Hirose, H. Abe, O. Sueoka, S. Takamura, A. Ichimiya, Y. Murata, F. Komori, K. Fukutani, S. Okada, and T. Hattori, "Production of an intense slow positron beam by using an electron {LINAC} and its applications," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 85, no. 0, pp. 124–131, 1995.
- [61] P. Perez and A. Rosowsky, "Intense source of slow positrons," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 532, no. 3, pp. 523–532, 2004.
- [62] H. M. Chen, Y. C. Jean, C. D. Jonah, S. Chemerisov, A. F. Wagner, D. M. Schrader, and A. W. Hunt, "Intense slow positron production at the 15MeV LINAC at Argonne National Laboratory," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 252, no. 9, pp. 3159–3165, Feb. 2006.
- [63] T. S. Stein, W. E. Kauppila, and L. O. Roellig, " Production of a monochromatic, low energy positron beam using the 11B (p, n) 11C reaction", *Rev Sci. Instrum.*, Vol. 45, no. 7, 1945.
- [64] R. D. S. Lima, J. C. Afonso, and L. C. F. Pimentel, "Raios-X: Fascinação, medo e ciência," *Quim. Nova*, vol. 32, no. 1, pp. 263–270, 2009.

- [65] R. H. Clarke, “A summary of the draft recommendations of ICRP, 1990,” *J. Radiol. Prot.*, vol. 10, no. 2, p. 143, 1990.
- [66] F. A. P. Soares, A. G. Pereira, and R. D. C. Flôr, “Utilização de vestimentas de proteção radiológica para redução de dose absorvida: uma revisão integrativa da literatura,” *Radiol. Bras.*, vol. 44, no. 2, pp. 97–103, 2011.
- [67] CNEN, “Diretrizes básicas de proteção radiológica,” vol. 05, pp. 1–22, 2014.
- [68] <http://www.cnen.gov.br/normas-tecnicas>,
- [69] E. Okuno, “Efeitos biológicos das radiações ionizantes . Acidente radiológico de Goiânia,” vol. 27, no. 77, pp. 185–200, 2013.
- [70] G. L. Azzi, “Radioproteção para Laboratórios de Pesquisa: Instruções e Procedimentos,” pp. 17–23, 2013.
- [71] E. M. Yoshimura, “Física das Radiações: interação da radiação com a matéria Radiation Physics: interaction of radiation with matter,” *Rev. Bras. Física Médica*, vol. 3, no. 1, pp. 57–67, 2009.
- [72] L. Tauhata, R. Di Prinzio, and A. R. Di Prinzio, “Radioproteção e Dosimetria: fundamentos,” p. 254, 2003.
- [73] L. Tauhata, I. Salati; R. Di Prinzio, “RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA:,” *IRD/CNEN*, p. 345, 2013.
- [74] F. H. ATTIX, “INTRODUCTION TO RADIOLOGICAL PHYSICS AND RADIATION DOSIMETRY.” pp. 1–607, 1986.
- [75] E. M. Nascimento, F. J. L. Filho; M. T. B. de Souza, G. L. A. Filho, “ESTUDOS PARA CÁLCULOS DAS ESPESSURAS DE BLINDAGEM NECESSÁRIAS PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UM SERVIÇO DE MEDICINA NUCLEAR COM PET-CT,” *Int. Nucl. At. Conf. - Ina.*, vol. 24–29, p. 12, 2013.
- [76] M. Mattos, O. Ramos, and L. Tauhata, “Grandezas e Unidades para Radiação Ionizante,” *Laboratório Nac. Metrol. das Radiações Ioniz.*, 2011.
- [77] Thomaz Bitelli, *Dosimetria e Higiene das Radiações*, Editora Grêmio Politécnico, 1982.
- [78] R. Krause-Rehberg, N. van der Walt, L. Büttner, and F. Börner, “A  $^{22}\text{Na}$  positron source for use in UHV,” *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, vol. 221, pp. 165–167, Jul. 2004.
- [79] DuPont, “Kapton properties,” *Int. Immunol.*, vol. 26, p. NP, 2014.
- [80] ICRP 26, "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection". *Annals of ICRP*, 1, No. 3 (1977)

[81] ICRP 60; "1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection". Annals of ICRP, 21, Nos. 1-3 (1991)