

**INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR**

**MICHEL DE ALMEIDA FRANÇA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA APLICAÇÕES COM  
ATIVAÇÃO POR CAMADA FINA**

**Rio de Janeiro**

**2018**

MICHEL DE ALMEIDA FRANÇA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA APLICAÇÕES COM  
ATIVAÇÃO POR CAMADA FINA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares do Instituto de Engenharia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Ciências e Tecnologias Nucleares.

Orientador: César Marques Salgado, D.Sc

Orientador: Julio Cezar Suita, D.Sc

Rio de Janeiro

2018

FRAN de Almeida França, Michel

Desenvolvimento de um Sistema para Aplicações com  
Ativação por Camada Fina / Michel de Almeida França. -- Rio de  
Janeiro: CNEN/IEN, 2018.

xv, 59 f.: il.; 31cm

Orientadores: César Marques Salgado e Julio Cezar Suita  
Dissertação (mestrado) – Instituto de Engenharia Nuclear,  
PPGIEN, 2018

1. TLA 2. Desgaste 3. Aplicações.

*Dedico este trabalho a todos que me ajudaram ser o que sou hoje,  
como pessoa e cientista.*

# Agradecimentos

Sempre achei esses agradecimentos uma mera formalidade, pois faço a devida questão de mostrar minha gratidão a cada gesto positivo (e aos negativos também, já que contribuem de uma forma ou de outra para nosso crescimento) que são oferecidos a minha pessoa. Mas para fins de registro, para daqui a algumas décadas quando encontrarem este trabalho em algum lugar obscuro, constam abaixo as pessoas que não só são caras a mim, mas que também contribuíram de forma generosa a este trabalho.

Primeiramente, aos meus pais, estes que sempre foram encorajadores mesmo frente às minhas escolhas de caminho não tão fáceis de compreender. A minha amada também, fonte de tantas felicidades, meu agradecimento simplesmente por estar ao meu lado, sempre. Meus orientadores, pela quantidade de conhecimento fornecida, e pela quantidade de paciência necessária. Aos meus amigos, cada um deles, é nós. Ao Instituto de Engenharia Nuclear pela oportunidade e pelas contribuições sempre presentes e tão úteis, incluindo todos os colaboradores, cada um com sua contribuição para o progresso geral de todos nós. Por fim, agradeço ao café, álcool, jogos e séries, sempre prontos para me dar aquele ânimo quando necessário. Por último, agradeço a CNEN pela bolsa concedida cuja qual me possibilitou realizar o curso.

*“It’s the questions we can’t answer that teach us the most.  
They teach us how to think.”*  
*(“The Wise Man’s Fear”, Patrick Rothfuss)*

# Resumo

O desgaste e seus efeitos são alvos de diversas pesquisas, geralmente com o intuito de minimizá-los. Nestes estudos há algumas opções para medir o desgaste sobre um material e/ou sistema, e assim definir como ele será tratado. Porém, a maioria dos métodos sofre de limitações como necessidade de parada, ou até desmonte do sistema e condições de operação distantes das reais. Uma técnica atenta para estes contratemplos e entrega resultados de alta precisão: A Ativação de Camada Fina (TLA). O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento e construção de um sistema de medição e a definição de todos os parâmetros envolvidos em torno da aferição de desgaste a partir da TLA. Para obter um sistema adequado a nossos objetivos diferentes abordagens foram utilizadas: a construção do aparato Desbastador, onde o desgaste ocorre, esta etapa é focada na adequação das características mecânicas e químicas às nossas necessidades; definição e otimização de parâmetros de cunho nuclear utilizando da ferramenta MCNP-X, aqui foca-se nas blindagens, quando necessárias, e nas geometrias de contagem a fim de obter um experimento seguro e preciso; testes experimentais da funcionalidade do sistema de detecção; análise das condições de ativação e do resultado da mesma e; resultados práticos acerca das taxas de desgaste obtidas neste sistema. Após estas etapas o resultado é um sistema completo e pronto para aplicações utilizando da ativação de camada fina, com todo o sistema de contagem testado, além de uma metodologia específica para analisar a ativação efetiva.

**Palavras-chave:** Desgaste, dispositivo, TLA, ativação de camada fina, aço.

# Abstract

Wear and its effects are the targets of many researches, mostly with the intent of minimizing them. In those studies there are a few options on how to measure wear over a material and/or system, and thus, define how it should be addressed. However, most of those methods suffer from limitations such as necessity of stopping or even disassembling the system of study and unrealistic operational conditions. One technique addresses all of those issues and delivers precise results: the Thin Layer Activation (TLA). The objective of this work is the development and construction of a system capable of measuring wear rate using TLA and also the acquisition of all parameters needed for such application. To obtain an adequate system for our objectives different approaches were made: construction of the Wearer Device, responsible for wearing the analyzed metal piece and carrying the fillings, this step is focused on the mechanical and chemical needs of that device; definition and optimization of nuclear related parameters using the MCNP-X code, here the focus are the counting geometry and the shieldings, when needed, for safe and reliable experiments; experimental tests on the detection systems' reliability; analysis of activation conditions and results and; practical experiments of wear rate. After these steps the result is a complete and ready for use system for Thin Layer Activation applications, with a tested counting system and also a specific methodology for the analysis of the effective activation.

**Keywords:** Wear, device, TLA, Thin Layer Activation, steel.

# **Lista de ilustrações**

Figura 1 – Lista de exemplos de reações de ativação via TLA. (AIEA, 2017c).	21
Figura 2 – Seção de choque (mb) X Energia (MeV) para prótons em $^{56}Fe$ . (AIEA, 2017b).	22
Figura 3 – Distribuição das atividades das lâminas por profundida. (ANTUNES et al., 2016).	23
Figura 4 – Atividade específica por profundidade. (AIEA, 2017a).	24
Figura 5 – TLM e CMM aplicadas em um motor de combustão interna. (FEHSENFELD; KLEINRAHM; SCHWEICKERT, 1992).	25
Figura 6 – Visualização 3D do aparato simulado. O Autor.	34
Figura 7 – Geometria e sistema de contagem para ambos os detectores. O Autor.	38
Figura 8 – Geometria de medição, sistema de contagem. O Autor.	39
Figura 9 – Disco Principal (esquerda) e pistão já com os rolamentos (direita). O Autor.	43
Figura 10 – Carapaça, parte inferior (a) e parte superior (b). O Autor.	44
Figura 11 – Engate e mola em detalhe. O Autor.	44
Figura 12 – Esquema 2D do Aparato Desbastador. O Autor.	45
Figura 13 – Desbastador e sistema de lubrificação/transporte de limalha. O Autor.	46
Figura 14 – Definição janela de contagem, NaITl 2x2". O Autor.	49
Figura 15 – Atividade (Bq) X Contagens para folhas ativadas. O Autor.	50
Figura 16 – Atividade específica ( $kBq/\mu m$ ) X Profundidade ( $\mu m$ ) para folhas de aço inox. (AIEA, 2017a).	51
Figura 17 – Curva de ajuste com área integrada, folha 3 em 19,1MeV. O Autor.	52
Figura 18 – Curva de ativação efetiva com feixe de 18,4 MeV para folhas de aço inox. (AIEA, 2017a).	53
Figura 19 – Curva de ativação efetiva com feixe de 18,4 MeV para a fonte principal. (AIEA, 2017a).	53
Figura 20 – Oxidação na fonte principal. O Autor.	54
Figura 21 – Espectro encontrado no filtro. O Autor.	55

# **Lista de tabelas**

Tabela 1 – Cartões <i>de</i> e <i>df</i> para parâmetros de dose para fôtons.	28
Tabela 2 – Atividade individual das folhas	38
Tabela 3 – Atividade das folhas de aço inox.	51

# Listas de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica
ALARA	<i>As Low As Reasonable Achievable</i> , (Princípio de Otimização)
AP	<i>Antero-Posterior Geometry</i> , (Posição Frontal)
CMM	<i>Concentration Measuring Method</i> , (Método de Medição por Concentração)
CPS	Contagens por Segundo
DAP	Distribuição de Altura de Pulso
IEN	Instituto de Engenharia Nuclear
MCNP-X	Monte Carlo N-Particle X
NaITl	Iodeto de Sódio com dopagem de Telúrio
OMS	Organização Mundial da Saúde
PIB	Produto Interno Bruto
TLA	<i>Thin Layer Activation</i> , (Ativação de Camada Fina)
TLM	<i>Thin Layer Difference Method</i> , (Método de Medição Direta-Diferencial)
USD	Dólar Americano

# List of symbols

$\alpha$  Greek letter Alpha

$\gamma$  Greek letter Gamma

$p$  pico

$\mu$  micro

$k$  kilo

$M$  Mega

" Polegada

# Sumário

<b>Introdução</b>	<b>15</b>
<b>1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>17</b>
<b>1.1 Desgaste</b>	<b>17</b>
<b>1.2 Métodos de Análise de Desgaste</b>	<b>18</b>
1.2.1 Métodos Não Nucleares	18
1.2.2 Métodos Nucleares	18
1.2.3 Ativação de Camada Fina (TLA)	20
1.2.3.1 O Desafio Primário da TLA	21
1.2.3.2 Modo de Ativação Uniformizada	22
1.2.3.3 Modo de Ativação Convencional	23
1.2.3.4 Métodos de Contagem de Eventos	25
<b>1.3 Monte Carlo N-Particle (MCNP)</b>	<b>26</b>
1.3.1 Arquivo de Entrada	26
1.3.2 Obtenção de Resultados Através do MCNP	27
1.3.3 Cartões <i>de</i> e <i>df</i> e Cálculo de Dose	27
<b>1.4 Cíclotron CV-28</b>	<b>28</b>
<b>2 MATERIAIS E METODOLOGIA</b>	<b>30</b>
<b>2.1 Construção do Aparato Desbastador</b>	<b>30</b>
<b>2.2 Definição de Blindagem e Geometria de Contagem</b>	<b>32</b>
2.2.1 Variáveis a Analisar	34
2.2.2 Parâmetros de Otimização	35
<b>2.3 Sistema de Contagem</b>	<b>37</b>
2.3.1 Materiais e Especificações do Sistema	37
2.3.2 Metodologia	38
<b>2.4 Ativação da Fonte</b>	<b>40</b>
2.4.1 Procedimento de Ativação da Fonte	40
<b>2.5 Experimento de Análise de Desgaste</b>	<b>41</b>
<b>3 RESULTADOS</b>	<b>43</b>
<b>3.1 Construção do Desbastador</b>	<b>43</b>
<b>3.2 Geometria de Contagem e Blindagem</b>	<b>46</b>
<b>3.3 Sistema de Contagem</b>	<b>48</b>
<b>3.4 Ativação da Fonte</b>	<b>50</b>
<b>3.5 Experimento de Análise de Desgaste</b>	<b>54</b>

4	CONCLUSÃO	56
	REFERÊNCIAS	58

# Introdução

Minimizar o atrito é um recurso útil para diversos setores da indústria, e isto fica evidente pelos gastos relacionados a este efeito, como: anualmente no Reino Unido há um prejuízo de aproximadamente USD28bi (1,6% do PIB) relacionado ao desgaste ([WOOD, 2012](#)); mundialmente, o gasto com combustíveis fósseis poderia ser reduzido em USD120bi anualmente se os conceitos de atrito e desgaste fossem aplicados concisamente ([INGOLE et al., 2013](#)); já na parte ambiental e no Brasil temos a produção de gás carbônico na cidade de São Paulo, que é acrescida de 187.500 toneladas devido apenas ao atrito e desgaste ([SINATORA, 2005](#)).

Estes números são obtidos e minimizados através de estudos específicos e da aplicação dos mesmos. Um ótimo exemplo, tanto do estudo quanto da aplicação, são os óleos lubrificantes utilizados em automóveis. A composição, assim como densidade, viscosidade e todos os parâmetros dos mesmos são otimizados para fornecer maior desempenho e longevidade. Estes estudos pertencem a uma área específica da ciência, a Tribologia. Esta área conta com algumas técnicas diferentes para realizar suas análises, porém, a Ativação de Camada Fina (TLA) possui algumas vantagens sobre outras técnicas nucleares e não-nucleares, como por exemplo não necessitar de múltiplas desmontagens do sistema analisado, destruição de amostras ou altas taxas de ativação. Esta técnica proporciona uma relação direta entre a taxa de contagem registrada nos detectores utilizados e a quantidade de material desbastado na peça ativada.

O objetivo deste trabalho é definir as ferramentas, sistemas e procedimentos adequados para a medição da taxa de desgaste gerada em uma das peças de um dispositivo. Esse, por sua vez, emula as condições de um motor e também possibilita a alteração dos parâmetros relacionados ao desgaste. Obter tais resultados exigiu algumas etapas, elas estão relacionados e descritas abaixo:

A primeira etapa do trabalho consistiu do projeto e construção do Desbastador, que é o dispositivo responsável por gerar o desgaste e onde está a peça que será desbastada e analisada (chamada Disco Principal). Esta parte tem um foco mais mecânico e químico, porém, as características definidas na mesma são orientadas em torno das necessidades das próximas etapas, como dimensões adequadas às medições, e estas são em sua maioria de cunho nuclear.

Já a segunda etapa definimos a geometria de contagem adequada ao Desbastador e à TLA. Além da análise da dose efetiva em torno do sistema para mantê-lo adequado ao ponto de vista de proteção radiológica. Para isto o código MCNP-X foi utilizado para simular e analisar a geometria e as blindagens adequadas.

A terceira etapa contou com o teste do sistema de contagem utilizando de folhas de aço inox previamente ativadas em um trabalho anterior ([ANTUNES et al., 2016](#)). Emulando as condições que serão obtidas nas medições de taxa de desgaste finais foi possível comprovar que este sistema está adequado aos objetivos de aferição.

Então, foi feita a análise dos parâmetros de ativação pois a TLA requer uma energia específica para ser efetiva. A análise foi feita em duas partes, utilizando da base de dados da IAEA e também efetuado uma ativação experimental em folhas de aço inox para verificar se o resultado obtido está de acordo com o esperado. Após esta análise a ativação da fonte foi realizada.

Na parte final do trabalho realizamos experimentos de análises de desgaste utilizando todos os parâmetros definidos nas etapas anteriores. Mostrando assim a eficácia de nossa aplicação da técnica.

# 1 Fundamentação Teórica

## 1.1 Desgaste

Este é o ponto no qual se baseia este trabalho, nossas medições serão feitas em prol de se obter valores referentes a este fenômeno. Logo, é de interesse distinguir as diferentes possibilidades dentro deste assunto. A definição da ABNT tem dois pontos chave, “degradação superficial” e “remoção de partículas”. Esses podem ser proporcionados através de diferentes mecanismos, todos com natureza mecânica e química (mesmo que indiretamente). O ponto de maior interesse neste trabalho, como será explicado a frente é o segundo, a remoção, e subsequente transporte de material. Porém, é necessário saber como esse será arrancado do corpo de estudo. A seguir, temos a descrição dos tipos de desgaste de maior intensidade no atrito aço-aço, que será nosso alvo de estudo, assim como suas causas e consequências.

Desgaste adesivo é aquele proporcionado pelo contato e atrito entre duas superfícies onde há uma ligação, ou adesão, entre as mesmas. Isto resulta em material sendo removido de um dos corpos e carregado pelo outro na continuação de seu movimento. Isso pode ser percebido na forma de fraturas, onde houve uma remoção parcial de uma parte substancial do corpo, ou na redução do volume deste corpo. O material removido pode continuar incorporado ao segundo corpo, ou ser liberado de volta ao meio, imerso no lubrificante por exemplo. ([RADI et al., 2007](#))

O desgaste abrasivo ocorre entre duas superfícies de diferentes durezas em contato e movimento relativo, onde a superfície de maior dureza desprende partículas da outra através de protuberâncias de tamanhos micro ou macroscópicos. Essas, por sua vez, abrem duas subclassificações dentro do desgaste abrasivo: abrasivo de dois ou três corpos. O primeiro sendo o mais facilmente interpretável, onde uma superfície mais dura desbasta outra superfície, como uma furadeira. Já o segundo diz respeito à deposição de partículas duras entre duas superfícies, estas partículas podem até mesmo terem sido desprendidas de uma das superfícies e depois permanecerem depositadas no local de fricção. ([RADI et al., 2007](#))

A partir dessas descrições e estudos físico-químicos é possível fazer suposições e obter alguns resultados analíticos. Porém, apenas com este tipo de resultado é impossível trabalhar em prol da otimização que buscamos. Logo, se faz necessária a criação de

ferramentas para aferir este desgaste de forma experimental.

## 1.2 Métodos de Análise de Desgaste

Temos uma variedade de métodos de análise de desgaste disponíveis. A maioria ainda persiste em uso por alguma característica na qual se sobressai frente aos outros, e assim têm ao menos uma aplicação onde ele é a opção mais viável, seja por questões econômicas, de precisão ou simplesmente representam a única opção para aquela determinada atividade. Abaixo estão listadas as técnicas mais comumente utilizadas, suas aplicações preferenciais, quando existentes, e uma breve explicação sobre as mesmas. Elas foram divididas em duas categorias essenciais, Nucleares e Não-Nucleares, sendo que a técnica alvo do nosso estudo recebeu uma seção a parte.

### 1.2.1 Métodos Não Nucleares

Aqui se enquadram os métodos sem utilização de princípios nucleares, que são os mais comuns, apesar de alguns deles serem tão complexos quanto os nucleares. Esses se subdividem em duas categorias: com ou sem contato. Os métodos com contato incluem as seguintes técnicas: microscópio de interferência a luz branca; perfilômetro de varredura; microscopia de força atômica (AFM); entre outros. Já os métodos sem contato incluem as seguintes técnicas: *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT), Máquina de Medir as três Coordenadas (MM3C) e balança, além de medições diretas com instrumentos de medição de uma dimensão. ([MORAES et al., 2013](#))

Todas as técnicas mencionadas acima sofrem de um problema que os inviabiliza para algumas aplicações, elas necessitam desmontar o sistema diversas vezes para aferir o desgaste, o que além de possivelmente alterar as condições de funcionamento, algumas vezes é simplesmente inviável.

Há, também, uma outra categoria, a de medições indiretas utilizando de recursos químico-espectrais. Essa analisa o fluido lubrificante do sistema. Porém, este método não possibilita a análise de peças específicas, mas sim o desgaste geral do sistema. ([SUMIYA et al., 2000](#))

### 1.2.2 Métodos Nucleares

De modo geral, os métodos nucleares possuem a vantagem de não necessitarem do desmonte do sistema para a análise de desgaste, porém possuem a desvantagem de produzir radioatividade neste mesmo sistema com mais ou menos intensidade dependendo da técnica. Aqui também podemos fazer uma subdivisão, neste caso ela se refere ao método

de inserção de átomos instáveis, pois a partir da atividade na peça ou em determinados pontos do sistema é que podemos fazer aferições acerca do desgaste.

Na primeira subdivisão colocamos os métodos de inserção de material previamente ativado no local/sistema de estudo. Entre os disponíveis se destacam os seguintes ([SUMIYA et al., 2000](#)):

- Método de inserção de marcador radioativo – Neste método há a inserção mecânica de uma cavilha previamente ativada na superfície da peça a ser estudada;
- Método de marcador radioativo fundido – Neste, a inserção de átomos instáveis se dá durante a fundição da liga metálica antes da usinagem da peça de estudo;
- Método de revestimento de zinco radioativo – Aqui, a inserção ocorre revestindo a peça a ser desbastada com uma camada de zinco ativado e assim fornecendo a superfície de átomos instáveis mencionada.

Já na segunda subdivisão temos os métodos onde as peças já produzidas são submetidas a um campo de radiação para produzir uma determinada densidade de átomos instáveis, esta densidade é sempre baixa o suficiente para não alterar as condições de operação ou mesmo as propriedades físicas das ligas metálicas ou cerâmicas em níveis perceptíveis mecanicamente. Isto tem a vantagem de ser mais viável em uma gama de aplicações, pois mesmo nos casos onde as técnicas anteriores não alteram as condições de operação a ponto de inviabilizar o sistema, essa alteração sempre causará um certo impacto na taxa de desgaste real.

Nessa subdivisão a primeira técnica em destaque é a ativação por fluxo de nêutrons. Esta técnica submete a peça alvo do estudo a um fluxo de nêutrons (a partir de reatores) e utilizando das reações nucleares  $(n, \gamma)$ ,  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$  e  $(n, xn)$  os isótopos estáveis contidos no material serão ativados (assumindo uma distribuição isotópica natural à densidade de isótopos instáveis inicialmente é vestigial). Como citado anteriormente, este trabalho foca no estudo do desgaste em peças metálicas, mais precisamente ligas de aço com altas concentrações de ferro. Para efeitos de comparação, uma reação possível utilizando desta técnica é fornecida pela Equação 1.1.



Porém, esta técnica sofre com duas limitações: ela submete toda a peça a ativação (o resultado final não propicia o estudo sobre uma pequena área da peça, mas sim sobre toda ela) e; também conta com uma atividade bem acima dos níveis considerados seguros. Logo, o estudo sobre o desgaste em si deve sempre ser conduzido em um laboratório seguindo restritas condições de segurança radiológica. ([SUMIYA et al., 2000](#))

Esses dois contratemplos, a necessidade de ativar apenas uma pequena região da superfície da peça de estudo e produzir pequenas doses para facilitar o estudo (até mesmo possibilitar o mesmo nos próprios locais onde os maquinários e motores estão alocados durante operação regular sem necessidade de grande alteração na rotina do local) levaram à criação de uma alternativa que cumpra estes dois pontos. Esta é a Ativação de Camada Fina (TLA – *Thin Layer Activation*), discutida em separado na próxima seção.

### 1.2.3 Ativação de Camada Fina (TLA)

A TLA é uma técnica que produz ativação semi-homogênea em um material alvo a partir de um feixe de partículas carregadas incidindo sobre o mesmo. Ela é eficaz à partir da superfície até uma determinada profundidade da ordem de algumas dezenas de micrões até décimos de milímetros, dependendo da variação utilizada. A partir desta profundidade de ativação constante é possível medir a atividade presente na amostra, seja ela um pistão, duto ou qualquer tipo de peça ativada submetida a desgaste, e assim aferir o desgaste, ou a taxa de desgaste, utilizando-se dois métodos distintos que veremos mais a frente. ([DITRÓI et al., 1997](#))

Essa técnica possui vantagens sobre os métodos convencionais não nucleares e também sobre os nucleares, essas estão listadas abaixo:

- Monitoração remota do alvo de estudo;
- Aferições não destrutivas;
- Medições *in loco*;
- Medições simultâneas dos efeitos do desgaste em diferentes peças ou partes em um mesmo sistema;
- Alta sensibilidade para pequenas taxas de desgaste;
- Nenhuma influência sobre as condições de operação do sistema;
- Ativação total e atividade da mesma consideravelmente mais baixas que as obtidas pelo método de Ativação por Fluxo de Nêutrons;

- Barata e rápida, se comparada aos métodos convencionais.

Assim como na ativação por fluxo de nêutrons há uma grande variedade de reações possíveis para a ativação da fonte, inclusive para o mesmo tipo de núcleo alvo, o que possibilita a aferição simultânea do desgaste em duas peças do mesmo sistema, uma das vantagens listadas acima. A Figura 1 mostra algumas das reações possíveis de interesse para a TLA e com base de dados estabelecida, com a reação utilizada neste trabalho já em destaque.

<b>Al</b>	$^{27}\text{Al}(\text{d},\text{x})^{24}\text{Na}$	<b>Fe</b>	$\text{nat}_{\text{Fe}}(\text{d},\text{x})^{57}\text{Co}$	<b>Zn</b>	$\text{nat}_{\text{Zn}}(\text{p},\text{x})^{65}\text{Zn}$
	$^{27}\text{Al}({}^3\text{He},\text{x})^{22}\text{Na}$		$\text{nat}_{\text{Fe}}(\text{p},\text{x})^{56}\text{Co}$		$\text{nat}_{\text{Zn}}(\text{d},\text{x})^{65}\text{Zn}$
<b>Ti</b>	$\text{nat}_{\text{Ti}}(\text{p},\text{x})^{48}\text{V}$		$\text{nat}_{\text{Fe}}(\alpha,\text{x})^{58}\text{Co}$	<b>Y</b>	$^{89}\text{Y}(\text{p},2\text{n})^{88}\text{Zr}$
	$\text{nat}_{\text{Ti}}(\text{d},\text{x})^{48}\text{V}$	<b>Ni</b>	$\text{nat}_{\text{Ni}}(\text{p},\text{x})^{57}\text{Ni}$	<b>Zr</b>	$\text{nat}_{\text{Zr}}(\text{d},\text{x})^{92m}\text{Nb}$
	$\text{nat}_{\text{Ti}}({}^3\text{He},\text{x})^{48}\text{V}$		$\text{nat}_{\text{Ni}}(\text{d},\text{x})^{56}\text{Co}$		$\text{nat}_{\text{Zr}}(\text{p},\text{x})^{92m}\text{Nb}$
	$\text{nat}_{\text{Ti}}(\alpha,\text{x})^{51}\text{Cr}$	<b>Co</b>	$^{59}\text{Co}(\text{d},\text{x})^{60}\text{Co}$	<b>Nb</b>	$^{93}\text{Nb}(\text{p},\text{x})^{92m}\text{Nb}$
<b>V</b>	$\text{nat}_{\text{V}}(\text{p},\text{x})^{51}\text{Cr}$		$^{59}\text{Co}(\text{p},\text{x})^{58}\text{Co}$		$^{93}\text{Nb}(\text{d},\text{x})^{92m}\text{Nb}$
	$\text{nat}_{\text{V}}(\text{d},\text{x})^{51}\text{Cr}$	<b>Cu</b>	$\text{nat}_{\text{Cu}}(\text{p},\text{x})^{65}\text{Zn}$	<b>Mo</b>	$\text{nat}_{\text{Mo}}(\text{p},\text{x})^{96}\text{Tc}$
<b>Cr</b>	$\text{nat}_{\text{Cr}}(\text{p},\text{x})^{52}\text{Mn}$		$\text{nat}_{\text{Cu}}(\text{d},\text{x})^{65}\text{Zn}$		$\text{nat}_{\text{Mo}}(\text{d},\text{x})^{96}\text{Tc}$
	$\text{nat}_{\text{Cr}}(\text{d},\text{x})^{51}\text{Cr}$		$\text{nat}_{\text{Cu}}(\alpha,\text{x})^{65}\text{Zn}$	<b>Rh</b>	$^{103}\text{Rh}(\text{p},\text{n})^{103}\text{Pd}$
<b>Mn</b>	$^{55}\text{Mn}(\text{p},\text{x})^{54}\text{Mn}$		$\text{nat}_{\text{Cu}}(\alpha,\text{x})^{67}\text{Ga}$	<b>Pd</b>	$\text{nat}_{\text{Pd}}(\text{d},\text{x})^{110m}\text{Ag}$

Figura 1 – Lista de exemplos de reações de ativação via TLA. (AIEA, 2017c).

Esta técnica utiliza a relação entre o livre caminho médio da partícula utilizada no feixe e a energia da mesma. Há também uma dependência clara das propriedades do alvo, sua densidade, composição química e isotópica. Porém, em condições controladas, o alvo mantém suas propriedades inalteradas. Contudo, esta ativação constante na superfície não é algo trivial e requer uma explicação dos fenômenos envolvidos. O modo como este aspecto interferiria e como ele é contornado são descritos abaixo.

### 1.2.3.1 O Desafio Primário da TLA

O estudo da Ativação de Camada Fina é, primordialmente, um estudo do livre caminho médio das partículas do feixe incidente no material alvo. Este aspecto faz com que haja uma profundidade preferencial para a captura do próton pelos núcleos de  $^{56}\text{Fe}$ , por exemplo. Em termos práticos, isso faz com que uma determinada região, ou profundidade, do alvo tenha uma densidade de isótopos  $^{56}\text{Co}$  maior do que as outras, novamente seguindo nosso exemplo base, que será melhor detalhado ao decorrer do trabalho. A Figura 2 conta com dados de diversas fontes sobre a relação entre a seção de choque e a energia do feixe para esta reação.

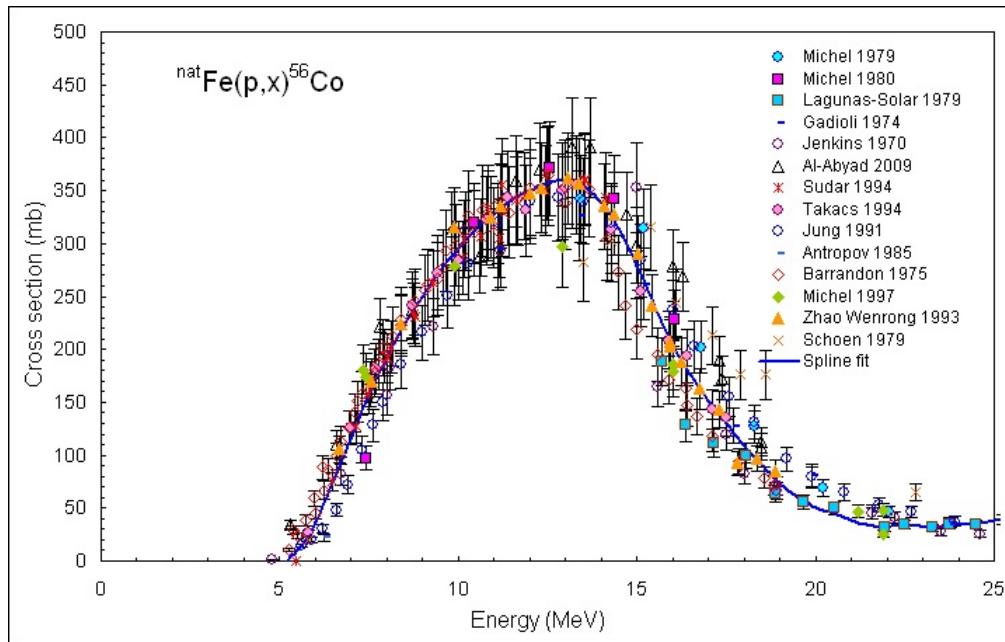


Figura 2 – Seção de choque (mb) X Energia (MeV) para prótons em  $^{56}Fe$ . (AIEA, 2017b).

O problema dessa inconstância na densidade de ativação se dá devido a uma necessidade do experimento: a homogeneidade (ou o mais próximo disso) da ativação dos núcleos de  $^{56}Fe$ , pois a queda na taxa de emissão gama deve ser diretamente proporcional a quantidade de material, ou profundidade, desbastada. Em um cenário ideal, nossa peça de aço ativado (fonte) possui densidade de isótopos  $^{56}Co$  constante até uma determinada profundidade. Assim, quando houver um desbaste de 0,1mm o decréscimo da taxa de emissão gama será metade do resultante de um desbaste de 0,2mm. Caso isso não aconteça, nossos resultados finais, ou seja, quantos milímetros foram desbastados da peça de aço ou qual foi a taxa de desgaste ocorrida em um intervalo de tempo, serão sempre defasados ou terão maiores incertezas pela necessidade de correções analíticas baseadas na estatística do caminho médio dos prótons no material da peça.

Assim, a TLA conta com alguns artifícios para obter o resultado desejado, uma ativação constante até determinada profundidade, conciliado com todas as vantagens listadas no início desta seção. Estes artifícios são descritos abaixo em duas técnicas propícias para utilização em nosso trabalho, sendo a primeira delas descartada por hora e a segunda descrita mais detalhadamente, além da motivação da escolha.

### 1.2.3.2 Modo de Ativação Uniformizada

Em seu trabalho, Antunes et al. (2016) partem da variação da energia dos prótons incidentes na peça alvo para obter uma ativação homogênea com a sobreposição das

ativações. Essa superposição é de fácil visualização na Figura 3 e, como também é possível notar, produz uma região semi-homogênea da ordem de décimos de milímetros.

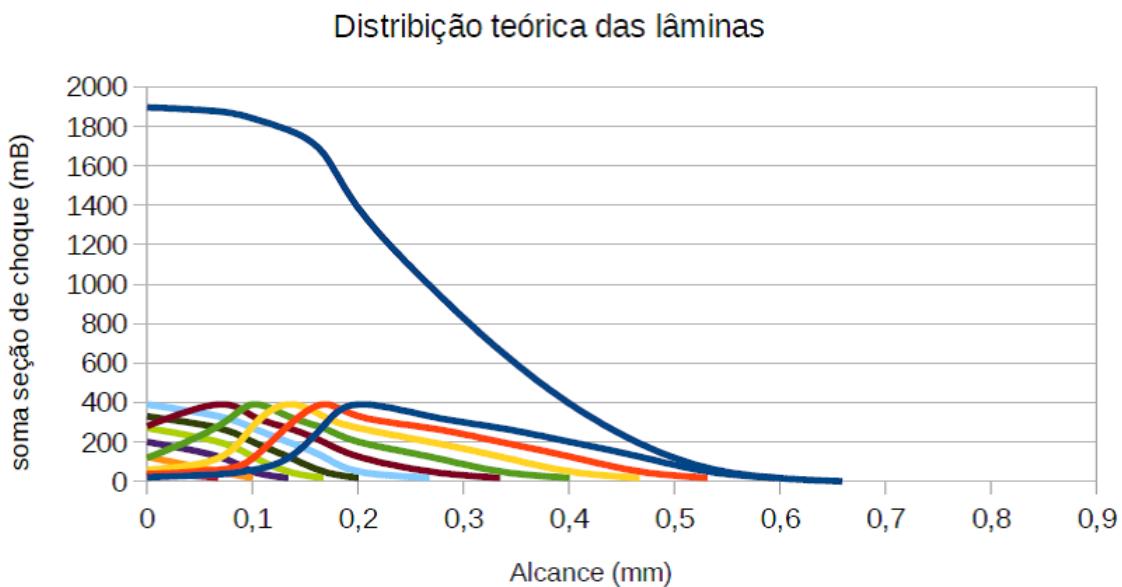


Figura 3 – Distribuição das atividades das lâminas por profundida. (ANTUNES et al., 2016).

Essa variação da energia do feixe incidente foi alcançada com a construção da Roda Degradadora, que consiste de um disco com placas de alumínio de diversas espessuras. Esse disco é posto para rotacionar e assim o feixe passará por diferentes espessuras de alumínio antes de atingir o alvo da ativação.

Mas, para o propósito do nosso trabalho, essa profundidade de ativação constante é demasiada, pois nosso experimento tem como pretensão desbastar apenas algumas dezenas de micrões. Sendo assim, optamos por uma forma de ativação menos dispendiosa, que possui uma profundidade efetiva menor, mas que atende nossas necessidades.

#### 1.2.3.3 Modo de Ativação Convencional

Este é o método utilizado para a produção da fonte, ele é referenciado pela AIEA em sua área designada para a tribologia e está bem estabelecido, com ampla referência e base de dados. (AIEA, 2017a)

É possível ver no gráfico da Figura 2 há um platô para a seção de choque em torno de 13 MeV, aproximadamente. Sabe-se também, que a energia da partícula incidente em um meio é reduzida, à medida que ela atravessa o meio. Deste fenômeno é possível notar que a medida que os prótons incidentes alcançam maiores profundidades, eles terão menor

energia e assim, a sua chance de produzir a ativação desejada também é alterada (seguindo a curva fornecida na Figura 2).

Portanto, incidindo prótons com energia equivalente a do fim do platô, estes prótons terão suas energias reduzidas. Mas, pelo fato desta região possuir uma seção de choque semi-constante para energias levemente abaixo de 13,3 MeV (o fim do platô, valor também obtido através da ferramenta *TLA2* disponível em [AIEA \(2017a\)](#)), os prótons que forem freados ao invés de absorvidos continuarão com uma probabilidade de absorção equivalente, e o mesmo acontecerá por algumas dezenas de micrões até que a energia média dos prótons nesta profundidade alcance o início do platô.

A Figura 4, produzida a partir dos dados disponíveis na base de dados da TLA utilizando a ferramenta presente em [AIEA \(2017a\)](#), fornece a representação gráfica do resultado da aplicação desta técnica para o nosso cenário inicial, ou seja, incidência de um feixe de prótons de 13,3 MeV sobre aço 1010. O resultado é uma ativação semi-constante (com coeficiente angular  $a=-0,001440$ ) com uma profundidade de aproximadamente  $50 \mu\text{m}$  com atividade específica de  $13 \text{ kBq}/\mu\text{m}$ , já a atividade total da peça é de 3 MBq. Vale lembrar que estes valores são prospecções iniciais, serão utilizados como base para os primeiros estudos feitos neste trabalho e avaliados quanto a viabilidade, e posteriormente, se necessário, alterados.

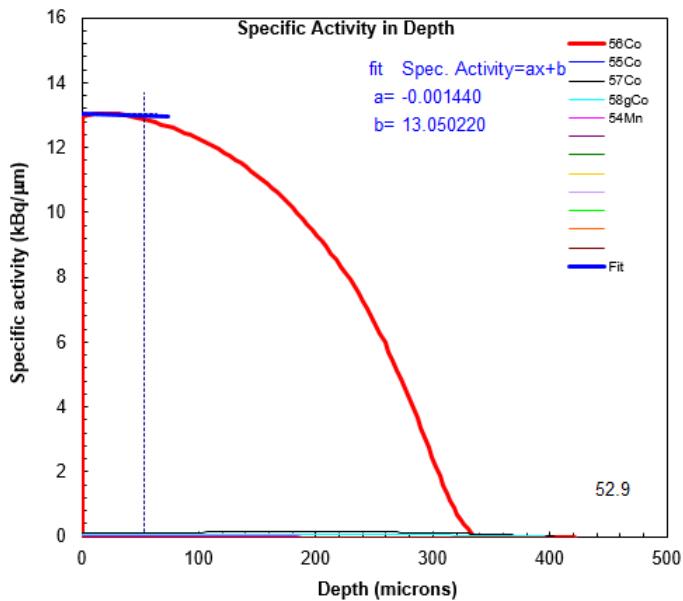


Figura 4 – Atividade específica por profundidade. ([AIEA, 2017a](#)).

Esta parte é importante, pois uma das etapas do desenvolvimento posterior é reduzir a energia do feixe de prótons dos 24 MeV produzidos pelo CV-28 para os 13,3 MeV

definidos acima e também a análise sobre a ativação resultante. Agora que temos o método para a produção de uma camada de ativação constante definido, podemos trabalhar sobre como medir o desgaste, ou taxa de desgaste a partir da variação da atividade registrada.

#### 1.2.3.4 Métodos de Contagem de Eventos

Para realizar a aferição da atividade presente e consequentemente o desgaste e/ou a taxa de desgaste produzidos temos duas opções: a medição direta (TLM – *Thin Layer Difference Method*) e a medição indireta (CMM – *Concentration Measuring Method*).

Na TLM temos a medição direta sobre a área ativada. À medida que esta será desbastada haverá uma redução da atividade naquele ponto, pois parte dos núcleos ativados serão removidos, como descrito anteriormente. Este método é o mais simples dos dois, pois requer um fator a menos que o segundo. Já na CMM, a medição se baseia na quantidade de material desbastado e na deposição do mesmo em algum ponto do sistema. Este método de medição é dependente de uma refrigeração ou lubrificação líquida, pois o fluido serve como transporte para o ponto de medição, este por sua vez é composto de algum filtro ou, em alguns casos, um ponto de acúmulo natural de partículas mais pesadas. Este método possui uma variante, a contagem sobre o caminho do fluido, que contará com um fluxo constante do material ativado desbastado e, assim é possível de contagens.

Para uma melhor visualização de ambos os métodos podemos utilizar um exemplo clássico de aplicação desta técnica: um motor de combustão interna e a análise de desgaste sobre o anel de segmento do pistão e a camisa do cilindro.

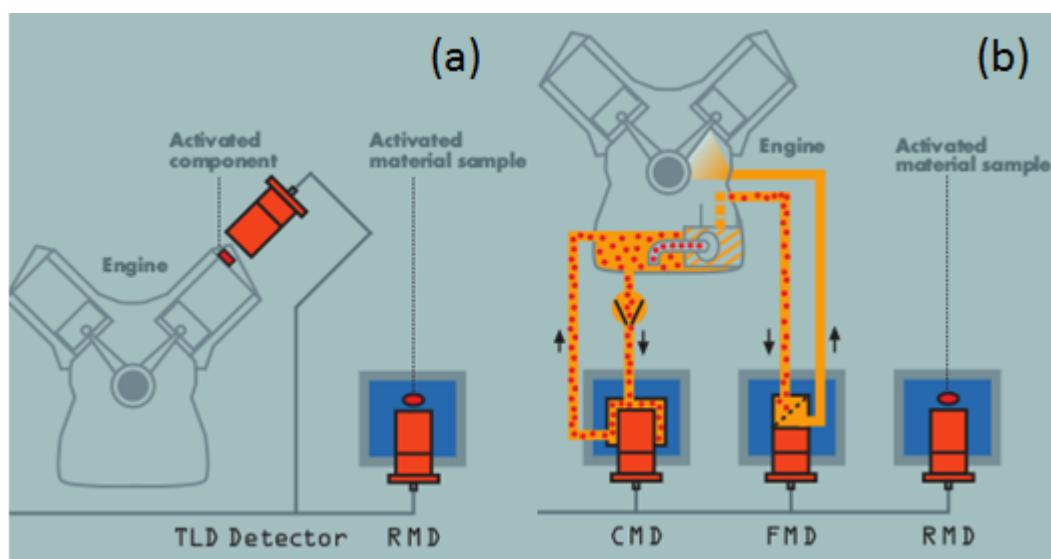


Figura 5 – TLM e CMM aplicadas em um motor de combustão interna. (FEHSENFELD; KLEINRAHM; SCHWEICKERT, 1992).

Em nosso exemplo da Figura 5(a), o TLM, haverá decréscimo da atividade registrada à medida que o desgaste ocorre. Já no CMM, presente na Figura 5(b), durante o percurso do óleo até o ponto de acúmulo podemos utilizar a variante deste método, e obter uma atividade constante, e por fim, obter também atividades crescentes no ponto de acúmulo (filtro ou depósito natural). Esses três pontos de medição de atividade serão a partir daqui denominados Pontos de Contagem Um, Dois e Três.

Além disso, temos três possibilidades para cada um dos casos: realização de medidas relativas e aferir apenas acréscimos e decréscimos na taxa de desgaste, isto é especialmente útil na comparação de condições de operação, como o óleo lubrificante a ser utilizado neste motor para minimizar os danos no mesmo; a segunda possibilidade diz respeito a medições absolutas, caso seja feita uma aferição da eficiência absoluta da geometria utilizada, comparando-se o decréscimo na atividade com os valores calculados de densidade de átomos ativados para cada profundidade da amostra, é possível obter com alta precisão acerca da profundidade desbastada; já a terceira possibilidade neste método é uma variação do segundo, que, ao invés de recorrer a cálculos analíticos acerca da densidade de átomos, é produzida uma calibração prévia com curvas Atividade x Profundidade Desbastada. Estas duas últimas são especialmente úteis para a previsão de desgaste futuro. Um ótimo exemplo é a redução dos gastos com verificações programadas de tubulações submarinas, ou também, a definição do número de quilômetros percorridos antes da manutenção preventiva de um motor de automóvel.

## 1.3 Monte Carlo N-Particle (MCNP)

O MCNP é um método computacional que utiliza do Método Monte Carlo para simular interações nucleares de diversas partículas diferentes, com energias que variam de 1keV a 100GeV (para fótons). É possível criar geometrias tão complexas como o próprio corpo humano, e depois analisar como se dão as interações de nêutrons, fótons, elétrons, prótons e diversas outras partículas com todos os elementos dentro do ambiente simulado, seja o próprio ar, detectores, pessoas ou qualquer tipo de material que seja inserido. A estatística envolvida é processada utilizando do Método de Monte Carlo, simulando interação por interação. Como é próprio deste método, a precisão aumenta de acordo com o número de histórias. Este parâmetro, assim como todos os outros, deve ser inserido em um arquivo de entrada. ([LANL, 2016](#))

### 1.3.1 Arquivo de Entrada

O funcionamento do MCNP (sendo utilizada a versão MCNP-X) se dá a partir da entrada de um arquivo de texto composto de três partes. A primeira delas sendo a de

células, onde constam as geometrias envolvidas, uma tubulação e um detector NaITl por exemplo, contendo também a densidade do material e qual é o material de cada célula. Já na segunda parte constam as superfícies. Estas superfícies com formatos pré-definidos como esferas e planos funcionam como limites e compõem as células. Por último temos a parte de dados, nela ficam as informações acerca da fonte, como seu espectro e direção de emissão, a composição química e isotópica dos materiais que compõem as células, alumínio, ar seco e etc. e o tipo de resultado que será obtido ao fim da simulação.

### 1.3.2 Obtenção de Resultados Através do MCNP

Dois tipos de funções referentes aos resultados foram utilizadas: a primeira delas sendo a função F8. Esta função retorna uma distribuição similar a uma Distribuição de Altura de Pulsos (DAP), porém, no lugar de contagens temos uma distribuição de eficiência de absorção em função da energia em uma determinada célula, comumente um detector. Se corretamente utilizada, basta multiplicar este resultado pelo número de eventos emitidos pela fonte em um determinado tempo e teremos a distribuição de contagens para cada caixa de energia, utilizando a faixa de energia desejada, ou o pico desejado, o resultado são contagens por segundo (CPS) referentes ao fenômeno estudado; já a segunda função utilizada na obtenção de resultados é a F5, esta função retorna o fluxo de partículas em detector pontual (na forma de  $\text{eventos}/\text{cm}^2$ ), porém, tal função, em nosso caso, foi utilizada em paralelo com duas funções secundárias que modificam o resultado desta primeira, os cartões “*de*” e “*df*”.

### 1.3.3 Cartões *de* e *df* e Cálculo de Dose

Estes cartões têm como função multiplicar o vetor resposta que seria obtido normalmente, através da função F5 por exemplo, por um vetor de constantes, alterando assim o resultado final. O funcionamento é similar ao de uma função peso em uma distribuição de probabilidades. De fato, neste caso é exatamente isso, sendo a distribuição de probabilidade referente à fração dos eventos emitidos que passarão pelo detector ou, à eficiência do detector pontual da função F5, e os cartões *de* e *df* à função peso. Esta função peso tem um fundamento teórico e experimental responsável pela determinação de seus valores.

Cada faixa de energia das partículas incidentes carrega uma probabilidade diferenciada de causar danos ao indivíduo. Isso ocorre por conta das diferentes seções de choque entre a partícula incidente e os tecidos do corpo humano, além de fatores biológicos, como a sensibilidade de cada órgão a danos genéticos e a taxa de divisão das células afetadas. Assim, com base em estudos destes fatores são determinadas as funções peso referidas aqui, que, serão diferenciadas para cada tipo de partícula. ([HINE; BROWNELL, 2013](#)).

Neste trabalho foi utilizada uma fonte de radiação gama, logo, todo o cálculo de dose levou em conta apenas fótons, além disso, o cálculo dos parâmetros também leva em conta a posição do indivíduo em relação à fonte de radiação, utilizaremos os parâmetros referentes à dose frontal (AP – *Antero-Posterior Geometry*) para o homem padrão. Os parâmetros utilizados nos cartões *de* e *df* seguem na Tabela 1. Outro ponto importante a ressaltar é que estes já estão ajustados para um detector pontual, e funcionam a partir do resultado do mesmo para retornar a dose efetiva correta. (PETOSSI-HENSS et al., 2010)

Tabela 1 – Cartões *de* e *df* para parâmetros de dose para fótons.

Energy(MeV)	cte.( $pSv.cm^2$ )	Energy(MeV)	cte.( $pSv.cm^2$ )
0,01	0,0685	0,6	2,91
0,015	0,156	0,662	3,17
0,02	0,225	0,8	3,73
0,03	0,312	1,0	4,49
0,04	0,350	1,117	4,90
0,05	0,369	1,133	5,60
0,06	0,389	1,5	6,12
0,07	0,411	2	7,48
0,08	0,443	3,0	9,75
0,1	0,518	4,0	11,7
0,2	0,747	5,0	13,4
0,3	1,00	6,0	15,0
0,4	1,51	6,129	15,1
0,5	2,00	8,0	17,8
0,511	2,52	10,0	20,8

## 1.4 Cíclotron CV-28

A TLA necessita de um feixe de partículas colimado para produzir a ativação em um local específico da fonte de forma constante até determinada profundidade. Este feixe, em nosso caso, será produzido pelo Acelerador Cíclotron CV-28 do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN). (FURLANETTO et al., )

A linha de aceleração que utilizamos foi a linha multipropósito, porém, mesmo esta linha não possui algumas das características necessárias para ativação de alvos sólidos, os

mesmos necessários ao nosso estudo. Assim, deu-se início a esta linha de pesquisa sobre Análise de Desgaste Utilizando da TLA, e o primeiro trabalho consistiu justamente na criação de uma linha para o ciclotron onde a ativação nos parâmetros necessários fosse possível.

Este trabalho realizado anteriormente no IEN é o *Projeto e Desenvolvimento de um Sistema de Irradiação Multipropósito com Diagnóstico de Feixes para o Ciclotron CV-28 do IEN* ([LEMOS et al., 2016](#)). Claro, apesar de possuir um foco nesta área, a nova linha também abre possibilidades para outros experimentos. Ele, em suma, consiste da construção de uma câmara de irradiação em uma das linhas do ciclotron CV-28 no IEN. Nesta câmara um feixe colimado de prótons ou déuterons, de acordo com a necessidade, incide sobre um alvo sólido, fornecendo também um diagnóstico sobre o feixe resultante.

## 2 Materiais e Metodologia

### 2.1 Construção do Aparato Desbastador

Esta seção trata da construção do Desbastador, nome que deriva da sua função principal, gerar desgaste ou desbastar uma peça de aço. Aqui se faz necessária a distinção do Desbastador e do Sistema de Desgaste, o primeiro é apenas onde a peça que será ativada e sofrerá desgaste se encontra e o conjunto puramente mecânico voltado para esta função. Já a denominação Sistema de Desgaste diz respeito a essa parte acrescida do sistema de circulação de lubrificante, de detecção de radiação, blindagens e todo o restante necessário para se obter os resultados acerca do desgaste.

Com o problema definido, - gerar desgaste sobre uma peça de aço de alta concentração de ferro - podemos desenvolver uma solução. Contudo, para determinar o melhor método e materiais precisamos definir alguns pontos fundamentais. As funções e características essenciais ao Desbastador são descritas, de forma geral, nos seguintes pontos:

- Geometria adequada aos três pontos de medição;
- Gerar desgaste constante e em proporções mensuráveis;
- Transportar e filtrar a limalha de aço gerada de forma efetiva;
- Suportar as próprias condições de operação (vibração, aquecimento e etc).

Nesta etapa as escolhas são, em sua maioria, de cunho mecânico ao invés de nuclear, e nosso objetivo é adequar esta parte do Sistema de Desgaste aos pontos listados acima, utilizando materiais, dimensões e também certos artifícios disponíveis na literatura que nos retornem um aparato compatível não só com os pontos descritos acima, mas também prático para a utilização em nível comercial. ([BENSON; WHITEHOUSE, 2013](#))

Abaixo temos uma lista com descrições mais específicas das necessidades e escolhas tomadas neste processo, após cada definição a próxima parte do Desbastador será produzida em cima da anterior e assim por diante. A construção em si consiste de usinagem própria

em uma das instalações do IEN e utilização de peças adquiridas de fontes externas, como rolamentos e dutos.

- Como descrito anteriormente, as partes principais, uma delas sendo a própria fonte (após ser ativada utilizando da TLA), devem ser de uma liga de aço rica em ferro, pois a reação de interesse de nosso estudo é baseada no isótopo  $^{56}Fe$ . Estas peças têm como principal função atritarem-se uma contra a outra, para então gerar o desgaste que será mensurado, logo, elas devem possuir um movimento entre si, sendo rotação o mais facilmente obtido, assim, formatos circulares e cilíndricos são privilegiados;
- O lubrificante utilizado, que também terá a função de carregar a limalha até o filtro, deve ficar confinado ao interior do aparato, tanto por questões de precisão de contagem, quanto pela proteção radiológica. Sendo assim, a construção de uma carapaça em torno das peças principais se faz necessária. Suas dimensões devem ser tão pequenas quanto possíveis para minimizar a quantidade de rejeitos, já seu material deve suportar as condições de operação necessárias, em especial possíveis vibrações. Outro ponto importante acerca do lubrificante é que pontos de acúmulos de limalha indesejados devem ser evitados, assim, a utilização de geometrias que dificultem esse fenômeno, e possivelmente uma forma de forçar a circulação devem ser consideradas;
- Desgaste constante é uma das principais necessidades de nosso aparato. O meio mais viável de atender a isso é fornecer pressão constante, logo, devemos incluir algum dispositivo que force as duas peças principais uma contra a outra sem prejudicar a rotação relativa das duas;
- Três grandes possibilidades de prospecção utilizando este aparato são a aferição da influência do óleo lubrificante, da velocidade de rotação utilizada e da liga metálica utilizada. Assim como descrito na introdução o estudo desses fatores retorna ganhos em diversas áreas. Sendo assim, o sistema lubrificante deve ser tão compacto quanto possível, a variação da taxa de rotação deve ser possível e controlada e as peças principais devem ser de fácil remoção do restante do aparato;
- As dimensões e posições devem ser tais que seja possível posicionar os três detectores referentes aos pontos de contagem de forma que seja possível também adicionar formas de blindagem entre eles, caso sejam necessárias e;
- Por fim, todos as partes anteriores devem ser quimicamente inertes entre si, pois a produção de depósitos ou reações indesejadas prejudicaria a segurança do experimento assim como a confiabilidade nos resultados. A liga de aço a ser ativada também deve ser escolhida de forma a não produzir isótopos indesejados, com meias-vidas altas.

Com todos estes parâmetros requisitados definidos, pudemos levar os projetos bases que atendiam nossas necessidades para a oficina, estes foram feitos utilizando de alguns softwares de desenho 3D. Após levar os projetos à oficina os mesmos sofreram alterações de adequação a praticidade de fabricação e finalizados.

## 2.2 Definição de Blindagem e Geometria de Contagem

Com o Aparato Desbastador completo trabalhou-se nas condições de contagem, como quais e quantos detectores utilizar e formas de controle do *background*. Assim como na seção anterior, começou-se com condições básicas necessárias ao experimento e projeto desse sistema com base nesses parâmetros. Para essa parte há três condições:

- Seguir o princípio ALARA;
- Manter os níveis de ruídos e *background* adequados ao experimento;
- Geometria adequada aos três pontos de contagem;

Nesta etapa três pontos foram abordados, o primeiro sendo o princípio ALARA. A fonte principal foi definida com uma atividade relativamente intensa (inicialmente, 3 MBq para o Ponto de Contagem Um) com meia-vida de 77,2 dias. Apesar de haver formas de controlar o risco ao qual o pessoal será submetido, como controle do tempo de exposição e o confinamento do sistema a uma área controlada ou restrita, um dos objetivos deste trabalho é tornar o aparato aplicável para fins comerciais, e um experimento com altas doses sempre se torna menos atraente neste sentido. Esta blindagem deve ser dimensionada de tal forma a manter os níveis de radiação dentro dos limites adequados ao ambiente seguindo as diretrizes de proteção radiológica. ([PRASAD; COLE; HAASE, 2004](#))

O segundo ponto a exigir cuidados com a blindagem, e possível colimação, do sistema é o controle de *background*. Esta fonte relativamente intensa acarreta uma preocupação maior com o controle de contagens gerado pela própria fonte sobre os Pontos de Contagem Dois e Três. Este controle é essencial, pois os dois pontos de contagens exteriores trabalharão com atividades significativamente menores que a presente na fonte principal.

Como descrito na seção referente a TLA, uma atividade de 3 MBq na fonte principal equivale a de  $13 \text{ kBq}/\mu\text{m}$  no Ponto de Contagem Três, estes valores trabalhados para obter-se resultados mesmo à partir do primeiro micrôn desbastado. Não há como prever qual será a quantidade de material ativado em trânsito na espiral (Ponto Dois), usaremos o mesmo valor do Ponto Três.

Esta etapa poderia ter sido feita de forma experimental, mas isso seria contrário ao objetivo de otimização de custos em tempo e recursos, assim, a ferramenta MCNP-X, descrita na introdução deste trabalho, foi utilizada para simular diferentes cenários e possibilidades de como seriam a blindagem e a geometria de contagem. A partir dos resultados destas simulações cenário-a-cenário, que foram analisados segundo os parâmetros definidos abaixo, foram escolhidos os melhores parâmetros.

Uma confirmação experimental dos resultados obtidos através da simulação é necessária. Para isto, um experimento acerca da confiabilidade dos resultados de dose efetiva das simulações foi realizado (sobre o sistema de contagem, os testes são descritos na próxima seção). Aqui, foi desenvolvida uma geometria simples, para se obter resultados mais confiáveis entre simulações e experimento. Esta geometria consta na consiste do posicionamento da fonte de  $^{56}Co$  diretamente em frente ao dosímetro eletrônico de corpo inteiro com distâncias que variam de 10cm a 25cm. Também foram utilizados os mesmos valores e funções do cálculo de dose principal. Foram realizados 5 experimentos, aproximando a fonte do detector a cada experimento, em 3cm. Por fim, os resultados das simulações foram comparados com os experimentais na forma de erro relativo.

A posição dos detectores utilizados foi um dos parâmetros mais trabalhados, ao todo foram três detectores simulados simultaneamente. Para os detectores dois e três, diversas posições foram utilizadas, todas a uma distância entre 10cm e 50cm da Fonte Principal, referentes ao mínimo de distância possível rente ao Desbastador e o ponto mais próximo fora da mesa onde ficará o aparato com os propósitos de analisar o *background* para os Detectores Dois e Três que podem ficar na mesa, e analisar a dose que um operador receberá ao ficar ao lado da mesa.

Já o Detector Um, em frente à fonte, teve sua posição variada apenas em alguns centímetros de acordo com a necessidade de aumentar ou diminuir o ângulo sólido e também controlar o espaço ocupado pelo sistema. Outros parâmetros fixos são os que dizem respeito a como o MCNP-X trabalha em suas simulações como vimos na seção sobre o programa. De maior interesse temos os seguintes parâmetros: fonte volumétrica isotrópica, caixas de energias de 10keV e as composições e densidades dos materiais utilizados (alumínio industrial, aço 1010, ar seco e etc) que foram extraídos do *Compendium* do MCNP-X e de fontes externas referentes aos materiais utilizados no próprio aparato. ([MCCONN et al., 2011](#); [ARNOLD, 1996](#); [AZOM, 2012a](#))

A Figura 6 ilustra toda a parte fixa da geometria nas simulações, com a ressalva do Detector Um, como explicado no parágrafo anterior.

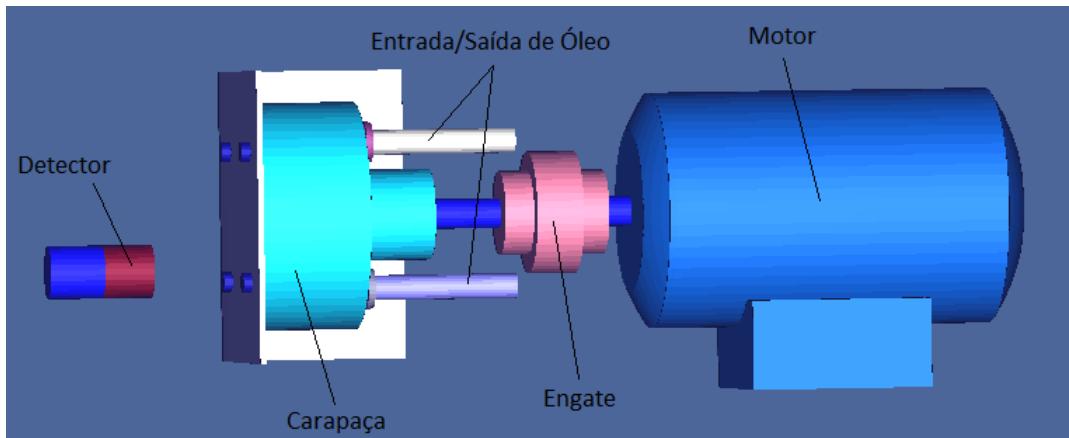


Figura 6 – Visualização 3D do aparato simulado. O Autor.

### 2.2.1 Variáveis a Analisar

Na construção dos diferentes cenários avaliados foram utilizadas combinações de variáveis, onde a diferença entre o cenário um e o cenário dois poderia ser na variável “a”, porém, as variáveis “b” e “c” serem mantidas. Um exemplo que ajudará na visualização desses cenários é a diferença entre o cenário um e o cenário dois, onde ambos possuem detectores de 2x2” não colimados, mas o cenário um possui a blindagem principal. Abaixo estão listadas e detalhadas as variáveis utilizadas:

- Utilização da blindagem principal – A blindagem principal consiste em uma parede de chumbo com 5,1cm de espessura em torno de todo o Desbastador e do Detector Um. Essa blindagem é uma simplificação do modelo de blindagem utilizado (com placas de fixação e parafusos, que não interferem de forma significativa na atenuação). A espessura de 5.1 cm foi escolhida por ser a mesma espessura dos blocos de chumbo utilizados para blindagem nas instalações do Instituto, estes são de fácil aquisição e construção no formato desejado. O intuito desta variável é verificar se a mesma será eficaz em manter os níveis de radiação, provenientes da fonte principal, adequados, tanto para o controle da dose nos operadores do sistema quanto para manter o *background* nos pontos de medição dois e três dentro do limite proposto.
- Detectores de 1x1” ou 2x2” – Detectores de NaITl nestes dois tamanhos são os mais utilizados no Instituto e ambos são opções viáveis do ponto de vista de logística. Porém, utilizar um detector subdimensionado pode gerar contagens insuficientes para um resultado estatisticamente confiável, em contrapartida, um detector superdimensionado tende a aumentar o tempo morto e susceptibilidade a ruídos, o que também pode nos retornar resultados não confiáveis.

- Colimação nos detectores – Esta colimação consiste de um cilindro fechado feito de chumbo em torno dos detectores. Estas colimações podem ter de 2cm a 3cm de espessura com um orifício de abertura frontal que pode variar de 1mm até o diâmetro do próprio detector (no caso, sendo uma blindagem lateral e traseira) e podem ser construídos com certa facilidade no próprio instituto. A colimação nos nossos cenários tem duas funções, a primeira delas é o controle de *background* nos detectores dos Pontos Dois e Três (e para o detector do Ponto Um no caso de não utilizarmos a blindagem principal), já a segunda função é a de diminuir a taxa de contagem no detector do Ponto Um e evitar um aumento expressivo do tempo morto no mesmo. Isso pode ser necessário, pois, como foi comentado anteriormente, a atividade nos Pontos Dois e Três será apenas uma pequena fração da existente no Ponto Um, isto pode exigir uma atividade alta na Fonte Principal. Assim, colimar o Detector Um possibilita uma alta ativação da fonte principal ao mesmo tempo que o tempo morto desse detector se manterá em limites aceitáveis.
- Blindagem principal em formato cilíndrico – Esta variável é uma alternativa à blindagem principal em formato cúbico do primeiro item. Esta versão cilíndrica, com espessura de 3cm a 5cm, seria uma opção mais sofisticada e funcionaria como uma colimação em torno do próprio Desbastador, além de ser construída do mesmo jeito que faríamos a colimação, fundindo chumbo e moldando o mesmo no formato desejado utilizando um molde.

### 2.2.2 Parâmetros de Otimização

Simulando todos os cenários e combinações propostos, obtive-se resultados na forma de eficiências e após aplicar nossa atividade da fonte (3 MBq para o Ponto de Contagem Um e 13 kBq para os Pontos de Contagem Dois e Três), em contagens por segundo (CPS) ou dose efetiva ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ) para o caso dos resultados baseados na função F5. Com base nesses valores foram tomadas decisões acerca das variáveis propostas, o uso de detectores 1x1" ou 2x2", por exemplo. Porém, essas decisões devem ser embasadas em limites de otimização. Estes limites de otimização remetem aos objetivos listados no início deste capítulo, listados e justificados abaixo, com base na literatura ou dados fornecidos por fabricantes.

O primeiro limite proposto é o de CPS máximo. Este é necessário para manter o tempo morto em níveis adequados, em geral abaixo de 3%. Todo aparato de contagem possui um tempo de processamento ou conversão. Do aparato de contagem como um todo, o que exige maior tempo entre um evento e outro é o processamento de sinal pela eletrônica, no monocanal, por exemplo. Logo, o limite máximo de CPS será definido pelos parâmetros da eletrônica, estes são fornecidos pelos fabricantes. Para a aparelhagem de

contagem utilizada em nosso experimento (descrita em maior detalhe a frente), este limite máximo é de 100.000 CPS.

O segundo ponto é contrário ao primeiro, e diz respeito ao limite mínimo de CPS para se obter uma estatística de contagem adequada. Este ponto é mais facilmente contornado, utilizando uma contagem prolongada do *background* no local para obter um valor confiável a ser subtraído da contagem real e realizando contagens prolongadas afim de obter um número de eventos expressivos, por exemplo. Logo, a escolha de um CPS mínimo consiste em um equilíbrio subjetivo entre as opções disponíveis. Porém, em se tratando de experimentação, nem sempre os recursos necessários estão disponíveis, o tempo de contagem pode ser limitado pela utilização de algum maquinário grande no local de medição, gerando ruídos na rede elétrica, por exemplo. Logo, é comum, e aconselhável, manter uma margem de segurança. Para este experimento fixamos o mínimo desejado em 10 CPS. Assim, mantemos a incerteza descrita pela Equação 2.1 abaixo de 1% mesmo para contagens de apenas 30 minutos.

$$\% = \frac{\sqrt{N}}{N} * 100 \quad (2.1)$$

O terceiro parâmetro diz respeito às contagens nos Detectores Dois e Três por parte da Fonte Principal. O método consiste da simulação da Fonte Principal e observação das contagens nos detectores externos em suas posições em diferentes cenários com diferentes recursos. O limite máximo não é exatamente fixo, pois deve levar em consideração o número de contagens reais que conseguiremos nos Pontos Dois e Três, sendo assim, será discutido um limite relativo após o resultado sobre as contagens.

Já o último parâmetro é a dose efetiva fora da blindagem principal. O objetivo desta contagem é verificar se a dose recebida pelos profissionais envolvidos está dentro dos limites estabelecidos pelos órgãos responsáveis. Para trabalhadores da área nuclear o limite estabelecido pela CNEN é de 20 *mSv/ano* e de 1 *mSv/ano* para o público comum ([CNEN, 2014](#)). Este trabalho almeja a possível aplicação deste dispositivo ou um similar na indústria. Logo, faz-se uso do cenário onde haverá operários do público geral presentes no ambiente do maquinário ativado. Assim, a dose máxima por hora, considerando um mês de operação, é de 0,85  $\mu\text{Sv}/\text{h}$ .

Para calcular a dose efetiva utilizaremos a função F5 aliada dos cartões *de* e *df*, descritos anteriormente. Assim, a soma total das eficiências ajustadas a partir dos cartões *de* e *df* deve ser multiplicada pelo número de desintegrações da fonte em uma hora, o

que nos retorna a dose efetiva por hora (aqui vale lembrar que nossa fonte de  $^{56}Co$  não é monoenergética apesar de no restante do trabalho utilizarmos apenas o fotópico de 846,7 keV). Assim, a dose total é a soma das contribuições de todos os fotópicos. Porém, devido a quantidade de linhas de emissão gama, durante a simulação houve uma escolha de fundir fotópicos com probabilidades de emissão baixas com outras linhas mais proeminentes utilizando de médias ponderadas. Para avaliarmos o peso desta decisão sobre a dose final um dos picos foi considerado na dose, e de forma qualitativa é, dentro de nossos objetivos, apropriado afirmar que a dose efetiva final seria acrescida em não mais que 10% do valor obtido sem o restante dos fotópicos de baixa probabilidade.

## 2.3 Sistema de Contagem

Na seção anterior um dos principais pontos abordados foi a definição da geometria e de parte do sistema de contagem, em especial o uso de detectores NaITl 1x1" e 2x2". Nesta seção abordaremos especificamente a aparelhagem utilizada nas contagens.

Abaixo seguem as especificações deste sistema, assim como procedimentos de caracterização e aferição das melhores condições de operação para este experimento, por fim também serão feitas contagens utilizando de geometrias e fontes que emulem o experimento real, ou seja, o desgaste e consequente redução e o aumento (respectivamente) de atividades nos Pontos de Contagem Um e Três a fim de testar nosso sistema de contagem antes de ativarmos a Fonte Principal e iniciarmos o desgaste sobre a mesma.

### 2.3.1 Materiais e Especificações do Sistema

Adiantando parte do resultados, temos para o Ponto de Contagem Um temos um detector NaITl de 1x1". Porém, este detector não é capaz de fornecer resultados confiáveis para fontes de baixa atividade, que é nosso caso, detalhado abaixo.

Nesta etapa do trabalho, como ainda não realizamos a ativação da Fonte Principal e o desgaste sobre a mesma, utilizamos folhas de aço inox, ativadas em [Antunes et al. \(2016\)](#), para simular o acréscimo e decréscimo de atividade de uma fonte assim como a variação da espessura da própria fonte. Estas folhas foram ativadas a aproximadamente um ano e no momento de nossas medições contam com atividades relativamente baixas, mesmo para os  $13 kBq/\mu m$  propostos. Essas atividades e as incertezas (para um nível de confiança de 95%) encontram-se na Tabela 2 aferidas em 29/06/2017, estas foram obtidas através de uma calibração que realizamos utilizando um detector HPGE.

Tabela 2 – Atividade individual das folhas

Folha	Atividade (Bq)	Incerteza (Bq)
1	289	6
2	304	6
3	236	4

Já para o Ponto de Contagem Três utilizaremos um detector NaI(Tl) 2x2" com uma blindagem lateral e traseira de chumbo de 3cm de espessura, neste detector o pré-amplificador é acoplado. Como analisador temos um Espectrômetro MOD-13002, este modelo conta com um ajuste de ganho interno, não podendo ser alterado, porém este ganho já está adequado ao estudo de nossa linha de emissão gama em 846keV.

Além do espectrômetro e das folhas de aço inox ativado, também foi utilizado um osciloscópio, uma fonte de  $^{137}Cs$  de  $(122,1 \pm 0,3)\text{kBq}$  (nível de confiança de 95%) e estruturas de suporte para auxílio e definição dos parâmetros. Todo o aparato montado para as medições consta na Figura 7.

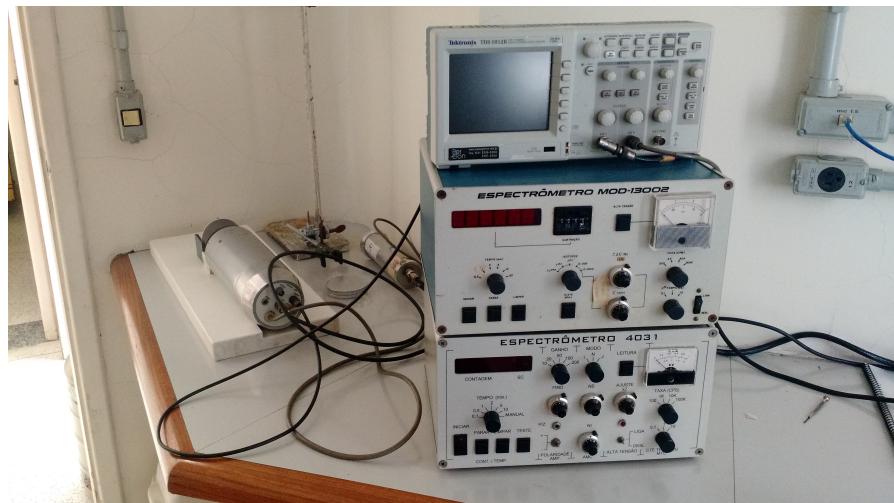


Figura 7 – Geometria e sistema de contagem para ambos os detectores. O Autor.

### 2.3.2 Metodologia

Um ponto fundamental é a definição das janelas de contagem, já que utilizaremos analisadores monocanais. A metodologia utilizada foi a realização de uma varredura do espectro com janelas de 0,2 V e determinação qualitativa do fim dos fotópicos, esta determinação menos criteriosa é possível pois faremos medidas relativas. Primeiramente, trabalhamos com a fonte de  $^{137}Cs$ , pois é monoenergética e possui uma atividade muito superior à da fonte de  $^{56}Co$  disponível. Realizamos esta varredura utilizando de experimentos

de mesma geometria realizados com horas e até dias entre si, a fim de aferir a estabilidade e sensibilidade do sistema, e obtivemos variações menores que 1%. Após isso, repetindo o processo para a fonte de  $^{56}Co$  com experimentos de 5min realizados três vezes para cada janela obtivemos a janela de operação para o isótopo que utilizaremos no experimento final.

Com a janela de contagem definida, pudemos realizar os experimentos de contagem para a nossa geometria simulando o acúmulo de limalha ativada no filtro. A metodologia utilizada foi a adoção de uma geometria fixa e, a partir dessa, realizar experimentos de 20 minutos cada, tendo 2 (duas) repetições para cada configuração. As configurações são definidas pelo número de folhas ativadas utilizadas, bem como quais folhas foram utilizadas. De início, fizemos contagens sem folhas, para obtenção do background, depois acrescentamos as folhas uma a uma, realizando também contagens com o mesmo número de folhas, porém em combinações diferentes.

A geometria escolhida possui 6 cm entre a face posterior da última folha (nossa fonte) e a face do detector, esta geometria foi escolhida por ter o melhor equilíbrio entre dois fatores, o primeiro deles sendo a obtenção de um número suficiente de contagens do ponto de vista estatístico, já que se aumentássemos a distância diminuiríamos estas contagens consideravelmente, já o segundo ponto é sobre o acréscimo de espessura da fonte a cada folha que adicionamos a nossa fonte, caso usássemos uma distância menor entre fonte e detector, a alteração na geometria da fonte (sua espessura) teria um impacto maior sobre as contagens. A Figura 8 ilustra esta geometria.



Figura 8 – Geometria de medição, sistema de contagem. O Autor.

## 2.4 Ativação da Fonte

Este experimento se baseia no desgaste sobre uma peça de aço (fonte) e na subsequente queda na taxa de emissão gama da mesma. Esta emissão gama por sua vez, será proporcionada pela ativação do material presente na peça de aço, mais precisamente o ferro, utilizando da reação descrita na Equação 2.2.



Apesar de estarmos interessados principalmente na reação descrita na Equação 2.2, também é importante fazer uma descrição da composição química e isotópica da fonte, em especial para observar quais isótopos serão produzidos na ativação. A fonte é feita de aço 1010, em formato de disco com dimensões que serão discutidas nos resultados. A composição química aproximada é: 99,4 % de ferro, 0,5 % de manganês, 0,1 % de carbono e traços de fósforo e enxofre. Já a composição isotópica antes da ativação segue a distribuição natural de isótopos dos elementos químicos listados.

### 2.4.1 Procedimento de Ativação da Fonte

Nesta seção temos a descrição do processo de ativação da fonte principal e de uma análise conduzida para verificar a ativação resultante na mesma, através de 4 folhas de aço inox. A ativação da fonte foi feita de acordo com a atividade esperada, descrita anteriormente, com um feixe de  $2 \mu A$  com uma duração de 1 hora. Já as folhas de aço inox foram ativadas com uma corrente de  $0,5 \mu A$  por 11 minutos, as mesmas são de aço inox AISI 304 ([AZOM, 2012b](#)) e possuem  $100 \mu m$  de espessura. Ambas as ativações foram feitas utilizando do feixe de prótons de  $24 MeV$  do CV-28 em um suporte de alumínio industrial para ambos os alvos.

Primeiramente, obtivemos a energia média esperada que o feixe de prótons terá ao atingir o alvo. Essa ocorre após o mesmo atravessar a janela de Tântalo e o espaço entre a janela e o alvo em si, preenchido por ar. Para isso, foi feita uma análise utilizando dos dados de poder de frenagem para prótons em tântalo e ar disponíveis em [SRIM \(2017\)](#) e [NIST \(2018\)](#), estes dados foram utilizados na construção de uma equação de ajuste (com erro inferior a 1%) e através dessa, foram obtidos os valores de energia após cada micrôn de frenagem tanto para o Tântalo quanto para o ar. Utilizando dos valores medidos de espessura, de  $210 \mu m$  para a janela de Tântalo e  $185 mm$  de ar, foi obtido o valor esperado para a energia com a qual a fonte principal foi ativada.

Essas folhas, por sua vez, tiveram suas atividades determinadas com experimentos de 4 horas cada, utilizando da mesma geometria utilizada anteriormente através do detector HPGe, e obtivemos as respectivas atividades, também utilizando da equação de eficiência obtida anteriormente.

Após a obtenção da energia esperada de ativação e as atividades para cada folha de aço inox, conduziu-se a análise sobre a atividade resultante nas 4 folhas para confirmar se essa é a energia efetiva de ativação. Para isso utilizamos a ferramenta *TLA2*, os parâmetros utilizados na própria ativação foram inseridos e a mesma nos retorna o perfil de ativação em *atividade específica ( $kBq/\mu m$ ) X Profundidade( $\mu m$ )*. Porém, os dados desse perfil são esparsos e foi necessário utilizar os mesmos para construir 4 curvas de ajuste, uma para cada  $100 \mu m$  de profundidade, referente a cada folha. Após a obtenção das curvas de ajuste uma integração das áreas das curvas foram realizadas. O método de confirmação é a razão entre a atividade e a área integrada de cada folha, se o perfil de ativação real e o projetado pela *TLA2* estiverem de acordo, os quatro valores obtidos através desta razão serão os mesmos.

Após confirmada a energia efetiva através deste procedimento, obtemos o perfil de ativação efetivo na fonte principal (a mesma possui composição química diferente das folhas) inserindo esta energia.

Por último, a energia que o feixe de prótons possui ao atingir o alvo, mesmo após ser reduzida pela janela de Tântalo, é superior àquela definida em  $13,3 MeV$  para se obter uma ativação semi-constante na região superficial da fonte. Assim, é necessário utilizar de algum método para reduzir esta energia para o valor desejado. O método proposto aqui é a utilização de uma placa de alumínio com a espessura adequada. Essa, por sua vez, foi definida utilizando dos dados de alcance disponíveis na ferramenta PStar do NIST ([NIST, 2016](#)).

## 2.5 Experimento de Análise de Desgaste

As etapas anteriores compõem a obtenção dos equipamentos e parâmetros necessários, da construção dos próprios sistema de desgaste, passando pela definição do sistema de contagem e sua geometria até o perfil de ativação efetiva da fonte e a realização da mesma. Logo, esta etapa final consiste da utilização desses, para então obter a taxa de desgaste sobre nosso disco principal.

Primeiramente, experimentos de 20 minutos foram realizados para obter o *back-*

*ground* utilizando da geometria final, com a blindagem em torno da fonte. Após isso, esta blindagem foi retirada para a obtenção do valor experimental da contagem registrada no Detector 3 proveniente da fonte principal. Estes valores foram comparados para uma confirmação experimental das simulações obtidas anteriormente. Porém, no caso do experimento alguns fatores foram alterados em relação às simulações anteriores: menor distância entre a fonte principal e o Detector 3; maior atividade da fonte; existência de linhas de emissão mais energéticas que a de estudo e; existência de background. Portanto, a coincidência dos valores não é esperada. Porém, a proporção da redução das contagens registradas no Detector 3 provenientes da fonte principal deve se manter, considerando uma certa margem. Esta proporção foi de 1/10, com uma redução de 20 *CPS* para 2 *CPS* após a inclusão da blindagem nas simulações.

Em seguida, com ambos os sistemas de contagem prontos, o sistema de lubrificação foi ligado e posterior a isso, o motor principal (responsável por atritar o pistão e o disco principal). A metodologia nesta parte consiste em manter o atrito constante, com mesma frequência e fluxo lubrificante por um determinado período, então a realização de novas contagens de 20 minutos cada e a repetição deste processo em intervalos fixos. Tendo como resultado esperado a retirada de material ativado da fonte principal e, consequentemente, o acúmulo do mesmo no filtro de forma a ser registrado pelos dois detectores presentes e, por fim, a obtenção da correlação entre contagens e taxa de desgaste.

Porém, durante a operação do sistema, a rotação do pistão cessou e foi constatado um problema mecânico dentro da carapaça e esta parte do experimento não pôde prosseguir, e com apenas, aproximadamente, 40 minutos de operação/desgaste forçado não foi possível arrancar uma quantidade mensurável de material radioativo da fonte principal para o filtro.

Nesse caso, foi necessário um novo procedimento que atestasse a eficácia do sistema em desbastar e transportar a limalha. Assim, o óleo lubrificante foi drenado, sendo forçado no sentido correto, para que toda a limalha arrancada fosse concentrada no filtro. Esse, por sua vez, foi colocado dentro de um detector HPGe, com blindagem em formato de poço, para uma contagem de 3 horas. A geometria utilizada nesta contagem não possui uma eficiência mensurada, porém, seu objetivo é atestar a existência do isótopo  $^{56}Co$  no interior do filtro.

# 3 Resultados

## 3.1 Construção do Desbastador

As peças principais do aparato, em torno das quais o restante foi projetado e construído são o disco principal, um disco de aço 1010 de meio vazado, e um pistão com a cabeça no mesmo formato do disco principal, esses podem ser vistos em detalhes e com os rolamentos fixados, na Figura 9. Esses dois rolamentos, que fazem a ligação entre o pistão e a carapaça possibilitando a rotação do pistão, são os modelos 6002 SNK e 6301-Z, ambos produzidos pela empresa Lishui Rolamentos Trade ([LISHUI, 2017](#)), esses rolamentos foram escolhidos por suportar o regime de rotação e serem de dimensões adequadas ao aparato.



Figura 9 – Disco Principal (esquerda) e pistão já com os rolamentos (direita). O Autor.

O Disco Principal será nossa fonte principal, após a ativação através da TLA, logo, a escolha do aço 1010 foi feita por gerar isótopos de baixa meia vida, exigindo um período menor de resfriamento da fonte quando ativada, ser prático para a produção dos discos e pelo alto teor de ferro.

Estas peças principais estão localizadas dentro de uma carapaça de alumínio industrial cilíndrica, dividida em parte inferior e superior. Na Figura 10 (a) e (b) temos as duas metades da carapaça (inferior e superior, respectivamente), separadas, com o anel de vedação e o retentor já fixados.

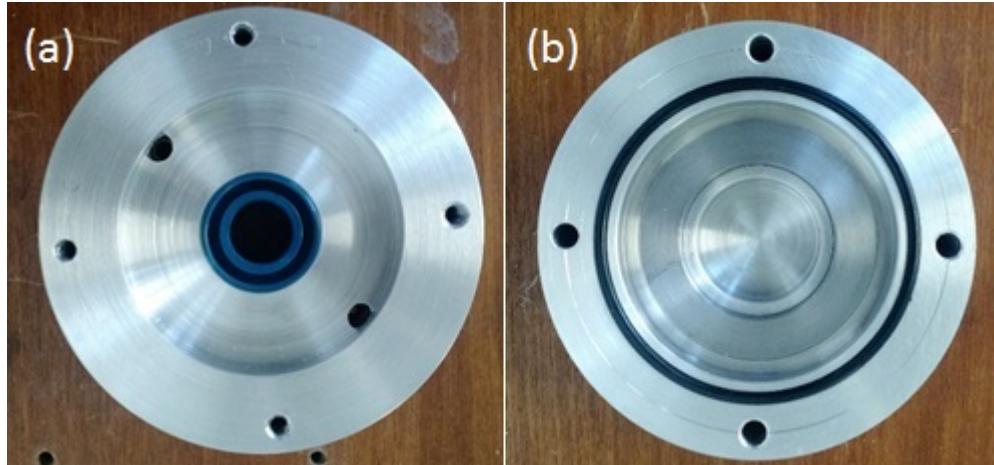


Figura 10 – Carapaça, parte inferior (a) e parte superior (b). O Autor.

Um dos pontos essenciais descritos anteriormente é o desgaste constante. A solução encontrada foi a utilização de uma mola em aço inox. Esta mola está posicionada dentro do engate entre o pistão e o motor. Assim, teremos o pistão sendo forçado contra o disco constantemente, mesmo após ambos sofrerem desgastes, esse fator também contribui para o aumento da taxa de desgaste, um ponto interessante para o experimento. Por sua vez, esta parte do equipamento é mostrada na Figura 11.

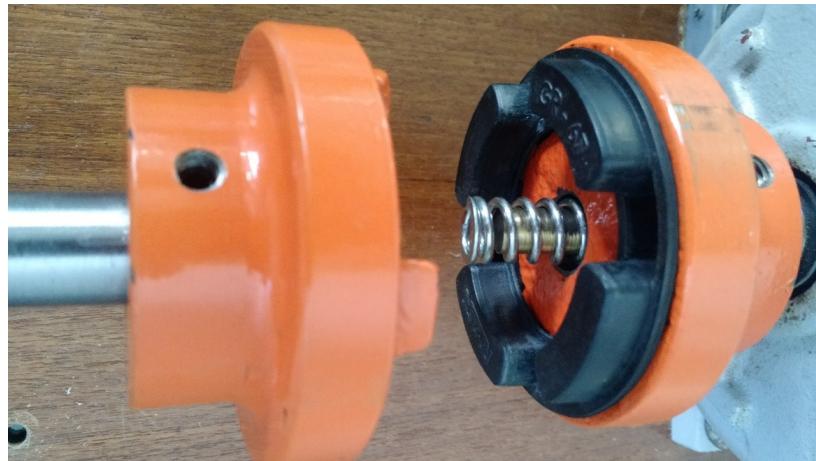


Figura 11 – Engate e mola em detalhe. O Autor.

O motor utilizado é um motor industrial comum e se conecta à parte mencionada no parágrafo anterior. Sua rotação será controlada por um controlador de frequência, isso nos dá uma boa versatilidade em relação a frequência de rotação do pistão, e consequentemente abre espaço para uma análise nesse quesito e um maior controle do desgaste em si.

Assim, temos a parte mecânica de desbaste completa, porém, essa é apenas a parte do aparato responsável pela produção do desgaste, ou fazendo uma alusão aos três pontos

de contagens, apenas o primeiro ponto, ainda sem o transporte de lubrificante ou outros fatores da geometria de contagem. A Figura 12 é um esquema que fornece as dimensões do aparato em corte 2D.

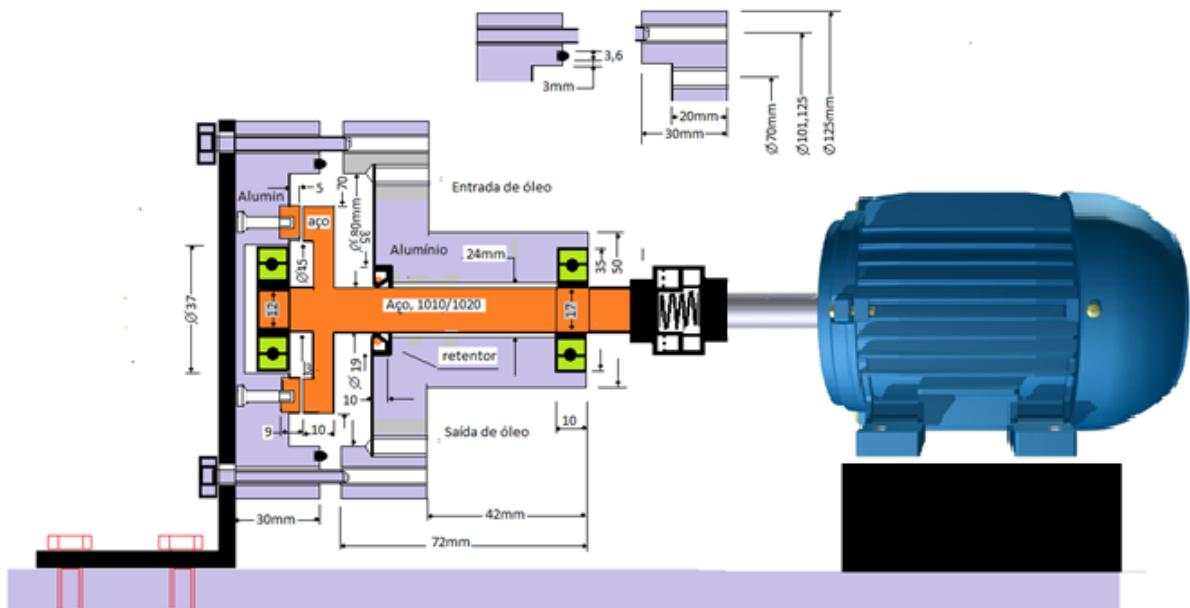


Figura 12 – Esquema 2D do Aparato Desbastador. O Autor.

Para o sistema de lubrificação temos - além das precauções já tomadas acima - uma lubrificação forçada por um motor que agirá sobre uma espiral (também utilizada para concentrar limalha, sendo o Ponto de Contagem Dois através da CMM), o movimento dessa espiral por sua vez irá proporcionar a circulação do óleo lubrificante. Cuidados com os níveis de altura também foram tomados para contarmos com a gravidade como fator positivo.

Dutos de silicone foram utilizados e mantidos tão compactos quanto possível. Nesses dutos, somente uma seção conterá limalha ativada, a que vai da parte inferior do Desbastador até o filtro. Este filtro será nosso ponto de acúmulo principal da limalha, ou o Ponto de Contagem Três, também referente ao CMM, e é feito de dutos de PVC e material poroso prensado de forma a reter a limalha e não o óleo. A Figura 13 mostra todo o aparato Desbastador já montado nas devidas posições.



Figura 13 – Desbastador e sistema de lubrificação/transporte de limalha. O Autor.

### 3.2 Geometria de Contagem e Blindagem

Os resultados são novamente escolhas entre as opções possíveis. Estas, assim como descrições sobre as motivações para as mesmas estão listadas abaixo.

Após obter os resultados das simulações pôde-se ponderar a necessidade de uma blindagem principal, descrita anteriormente. Sem uma blindagem a contagem de *background* gerada pela fonte principal sobre os Pontos de Detecção Dois e Três seria aproximadamente a mesma da registrada no próprio Detector Um, descontando apenas o fator do ângulo sólido. Assim, se fez necessário o uso da blindagem, pois esta contagem estaria, no mínimo, na mesma ordem das contagens que esses dois detectores registrarão para as Fontes Dois e Três. Pode-se argumentar que poderíamos fazer uma contagem de *background* e subtrair este valor das contagens registradas nestes pontos, mas isso seria mais uma fonte de incerteza, especialmente se realizadas contagens em tempos mais curtos. Além disso, a atividade da fonte principal irá variar de acordo com o desgaste, que é exatamente o que queremos medir, logo essa influência irá variar com o tempo em uma proporção que não podemos prever. Com esta blindagem, o *background* proveniente da Fonte Principal sobre os Pontos de Contagem Dois e Três ficaram em 6 CPS, um valor mais plausível de se

trabalhar, porém ainda não ideal.

O mesmo estudo foi feito para a segunda opção de blindagem, a versão cilíndrica. Os resultados foram na mesma ordem da versão retangular, e a escolha entre as duas opções foi feita por questões de logística, já que a versão cilíndrica exigiria fundir chumbo e a utilização de um molde.

A utilização de detectores 1x1” e 2x2” foi determinada utilizando os parâmetros de contagens mínima e máxima. Para o Detector Um foi utilizado um detector de NaITl de 1x1”, isso se deve ao número de contagens registradas para este modelo, que variou de aproximadamente 300 a 700 CPS, dependendo da colimação (discutida mais a frente), um ótimo nível para obter uma contagem total de eventos estatisticamente suficiente. O modelo de 2x2” também atenderia a ambos os requisitos, porém dificultaria a construção da blindagem, já que possui um comprimento maior. O maior resultado em número de eventos registrado, considerando todas as energias, foi de 4500 CPS, bem abaixo do limite da eletrônica. Logo, o tempo morto ficará sob controle independente da opção utilizada.

Já para os Ponto de Contagem Dois e Três, os detectores de 1x1” se mostraram inadequados devido ao baixo número de contagens, aproximadamente 3 CPS. Assim, temos por definida a utilização de um detector NaITl de 1x1” na posição Um, e dois detectores NaITl de 2x2” nas posições Dois e Três, estes retornam aproximadamente 20 CPS para cada  $\mu m$  desbastado.

Em relação a colimação, também se faz necessária a separação entre o Ponto de Contagem Um e os Pontos Dois e Três. Acerca do Ponto Um, já sabemos que o mesmo contará com uma blindagem em formato de caixa protegendo o detector do background, então a necessidade de uma colimação seria para o controle do tempo morto devido a uma alta taxa de contagem, mas como foi visto no ponto anterior, isso não é necessário. Logo, a colimação no Ponto de Contagem Um foi dispensada. Já nos Pontos de Contagem Dois e Três, há a necessidade do controle de background, pois não haverá uma blindagem em torno dos mesmos. Porém, a existência de uma colimação irá diminuir a taxa de contagens destes detectores, e como foi descrito anteriormente, esta taxa de contagem já está relativamente próxima do limite mínimo estabelecido. Assim, a melhor opção é a utilização de uma blindagem em formato cilíndrico nos Detectores Dois e Três, semelhante a uma colimação, porém, sem a parte frontal, protegendo o detector do *background* lateral e traseiro, sem reduzir a eficiência absoluta em relação a atividade da fonte. Com este modelo, reduzimos as contagens provenientes da fonte principal de 6 para menos de 2 CPS.

As simulações retornaram uma dose efetiva registrada ao lado do aparato, local onde haverá um operador, de  $8,32 \mu\text{Sv}/\text{h}$  sem a blindagem. Este valor está consideravelmente acima do limite máximo relacionado. Logo, se fez necessária a blindagem do aparato. Como foi estabelecido no primeiro item, uma blindagem em formato de caixa com espessura de 5,1cm é a solução mais viável para tratar da influência da fonte principal sobre os pontos de contagem Dois e Três, assim, uma nova rodada de simulações foi realizada, dessa vez, utilizando da mesma geometria, porém com a blindagem incluída. Desta vez, a dose efetiva no mesmo ponto ao lado do aparato é de  $0,29 \mu\text{Sv}/\text{h}$ . Assim, este modelo de blindagem atende também ao controle da dose efetiva. O experimento de comparação entre simulações e experimentos reais retornaram erros relativos abaixo de 10%, com o resultado das simulações sendo sempre menores que os do experimento real, o que é esperado, sabendo que dosímetros são regulados para mostrar uma dose maior que a real (por questões de segurança). (HINE; BROWNELL, 2013)

Outro resultado, porém, esse não cogitado anteriormente é sobre a viabilidade do Ponto de Contagem Dois. Este ponto conta com uma espiral para concentrar a limalha e fornecer uma maior contagem, já que ele conta apenas com a limalha em trânsito do Ponto Um ao Três, assim, a atividade no Ponto Dois será vestigial mesmo se comparada ao Ponto Três. Com base na atividade registrada no Ponto Três, podemos deduzir que a taxa de contagem no Ponto Dois será baixa demais para se manter em níveis úteis e confiáveis, e sobretudo, este ponto contribui pouco para o experimento, sendo mais um complemento do que algo vital. Logo, manter este ponto tem uma relação custo x benefício injustificável no momento, podendo ser considerado em trabalhos futuros com maiores recursos ou atividade da fonte principal, por exemplo. Para este trabalho ele será descontinuado e não mais tratado adiante. Por questão de continuidade lógica, os Pontos de Contagens continuarão a ser tratados como Um, Dois (este extinto) e Três.

### 3.3 Sistema de Contagem

O procedimento de levantamento da janela de operação resultou no gráfico da Figura 14. Neste constam os resultados para o centroide da janela assim como os limites inferior e superior para a mesma. Assim, definimos o centroide como 8,7 V e uma janela de 1,6 V.

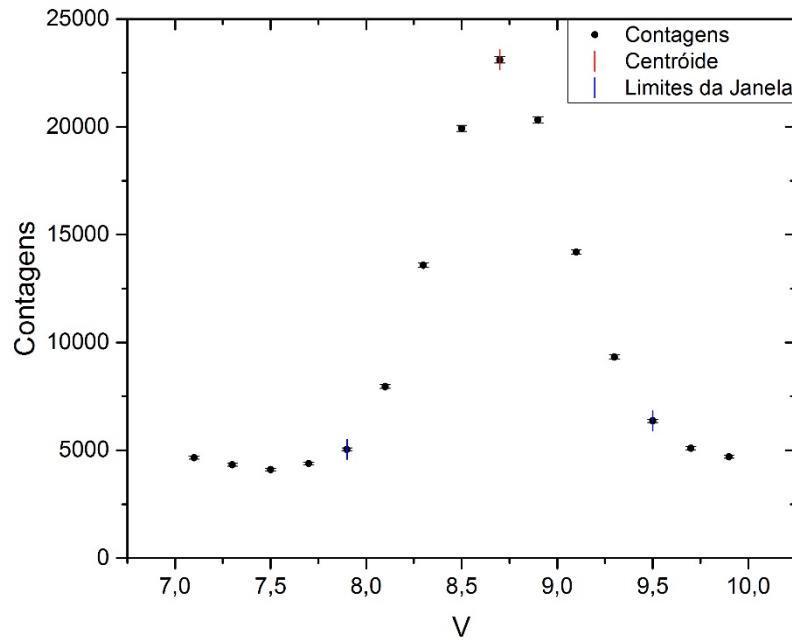


Figura 14 – Definição janela de contagem, NaITl 2x2". O Autor.

Após a definição da janela de operação, seguimos com a metodologia de simulação de desgaste. Com a realização de todas as repetições deste experimento foi possível comparar Contagens X Atividade para cada configuração de folhas ativadas. O resultado esperado, como descrito na seção referente a TLA, é uma reta com os pontos bem ajustados a mesma. O coeficiente angular desta reta depende da eficiência absoluta da nossa geometria, probabilidade de emissão do fotópico de 846,7 keV e do tempo de contagem. O resultado pode ser visto na Figura 15.

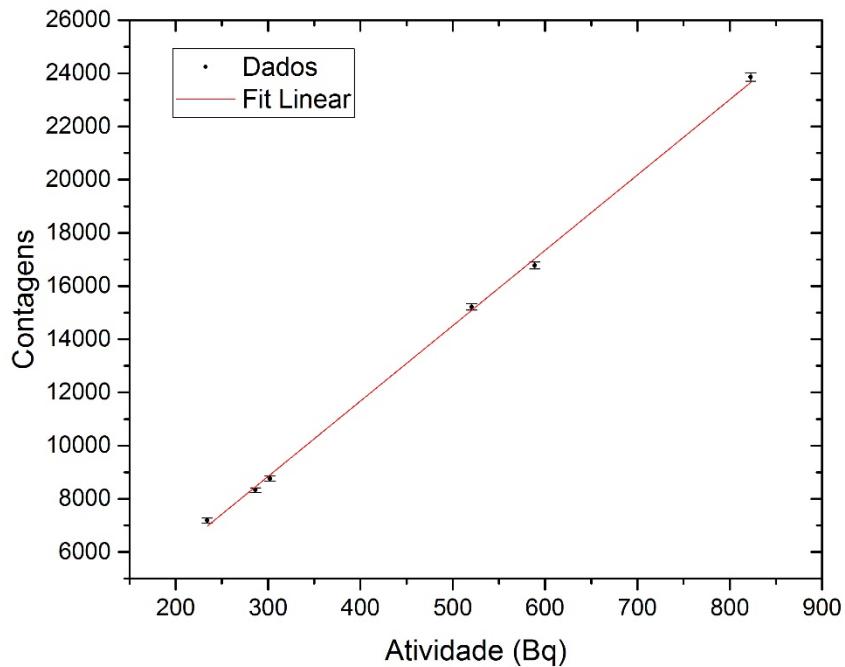


Figura 15 – Atividade (Bq) X Contagens para folhas ativadas. O Autor.

Visualmente todos os pontos estão bem ajustados à reta, estatisticamente temos  $r^2 = 0,99935$  para comprovar a estabilidade deste sistema de contagem. Esta geometria utilizada pode ser vista como o pior cenário possível, pois a atividade está bem abaixo da que teremos após a ativação da fonte, mesmo para apenas  $1\mu m$  desbastado e acumulado no filtro, além disso, a variação da geometria, aqui da ordem de milímetros, também é consideravelmente maior que a mencionada sobre o desbastamento real. Assim, sendo este sistema sensível e estável neste cenário, podemos atestar sua adequação ao experimento final posterior.

### 3.4 Ativação da Fonte

Todos os resultados acerca da ativação da fonte principal devem ser indiretos, através da *TLA2*, pois não possuímos equações de eficiência para a geometria da mesma, tampouco como meios de discernir o perfil de ativação interno desta. Logo, todos os resultados são acerca das folhas de aço inox, e através destes confirmamos a confiabilidade do resultado esperado da *TLA2*.

O primeiro resultado é referente a energia esperada de acordo com a análise do poder de frenagem do Tântalo e do ar. A energia esperada foi de  $(19,1 \pm 0,4) MeV$  com

um nível de confiança de 95%. Inserindo essa energia de ativação na *TLA2* obtivemos o gráfico da figura 16 representando a atividade específica esperada das folhas de aço inox através de toda a profundidade. Nele também constam os nuclídeos produzidos além do  $^{56}Co$ , que são  $^{51}Cr$ ,  $^{52}gMn$  e  $^{57}Ni$ , principalmente.

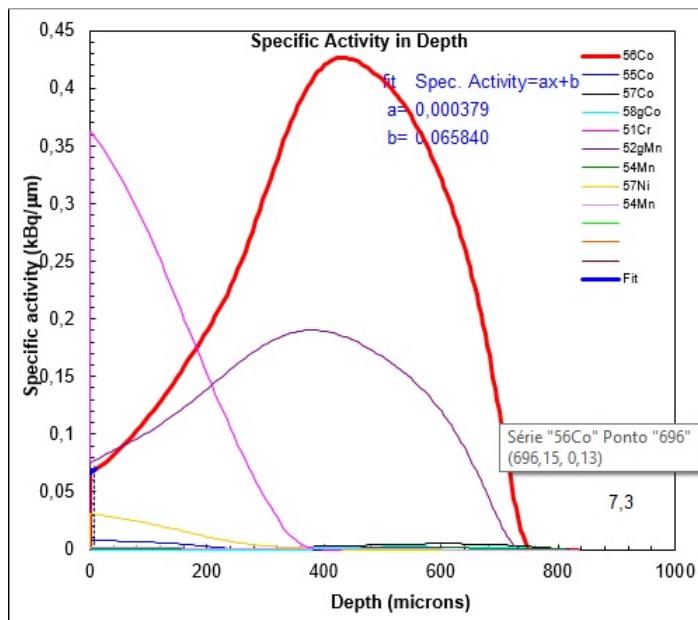


Figura 16 – Atividade específica ( $kBq/\mu m$ ) X Profundidade ( $\mu m$ ) para folhas de aço inox. (AIEA, 2017a).

O segundo passo foi a obtenção das atividades das 4 folhas de aço inox. Alinhadas de 1 a 4, da primeira a receber o feixe até a última, temos as atividades e seus erros com nível de confiança em 95% listadas na tabela 3.

Tabela 3 – Atividade das folhas de aço inox.

Folha	Atividade ( $kBq$ )	Incerteza ( $kBq$ )
1	4130	113
2	6430	141
3	9754	173
4	11829	189

Para a confirmação experimental desta energia esperada através das folhas de aço inox foram utilizados as curvas ajustadas e áreas integradas das mesmas. A figura 17 mostra um exemplo dessa análise.

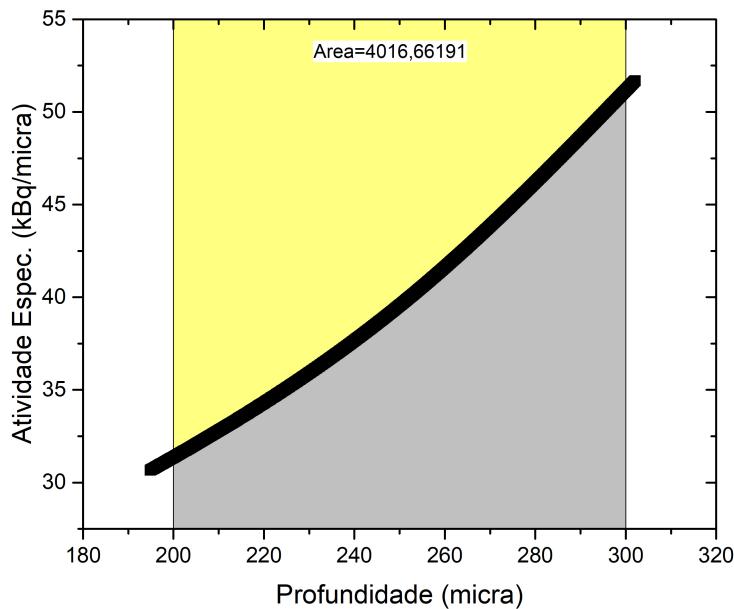


Figura 17 – Curva de ajuste com área integrada, folha 3 em 19,1MeV. O Autor.

Porém, através da análise da razão entre as atividades das folhas e as áreas integradas foi observada uma diferença de 18,7% entre elas, o que mostra que a energia esperada e a efetiva estão em desacordo.

O processo de inserir uma energia esperada na ferramenta *TLA2*, refazer as curvas de ajuste e áreas integradas e por fim analisar as razões foi refeito. Observando a passagem do pico de seção de choque pela profundidade da quarta folha, foi possível reduzir a faixa de energia que atenderia as condições encontradas e, por fim, foi obtida a energia efetiva de ativação, 18,4 MeV, com o maior erro entre as razões no valor de 5%. Um valor de erro menor que este não foi possível devido a forma como a *TLA2* apresenta a primeira seção da ativação, referente à folha 1. A figura 18 trás uma visualização do perfil de ativação efetivo nas folhas de aço inox.

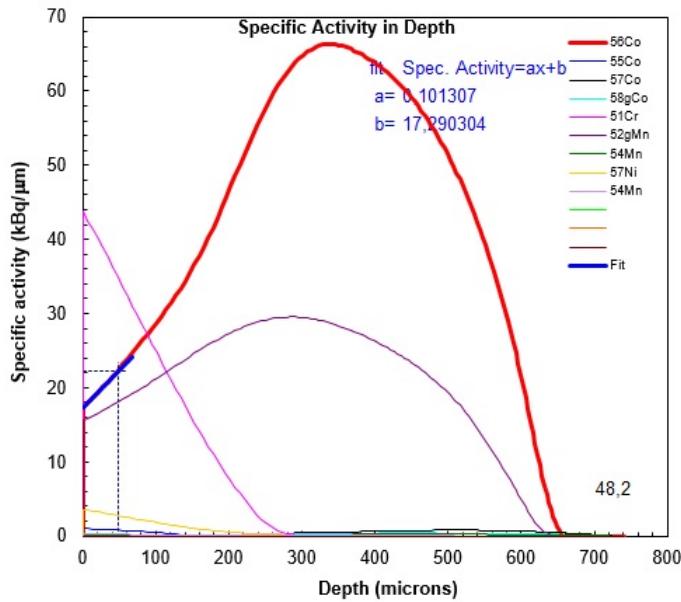


Figura 18 – Curva de ativação efetiva com feixe de 18,4 MeV para folhas de aço inox. (AIEA, 2017a).

Com a energia confirmada junto a ferramenta *TLA2* foi possível utilizar a mesma para obter o perfil de ativação para a fonte principal. A figura 19 fornece a visualização deste perfil. A área de interesse desta ativação são os primeiros 48  $\mu m$  que possuem uma atividade específica média de aproximadamente 4  $kBq/\mu m$ , atividade total de 5,5 MBq e o coeficiente angular de ativação igual a 0,020035. Também é importante ressaltar a baixa atividade para outros isótopos além do de interesse.

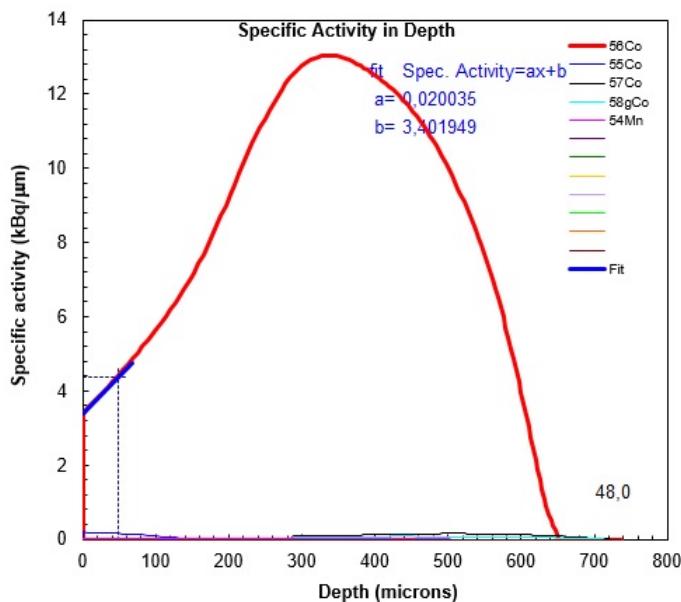


Figura 19 – Curva de ativação efetiva com feixe de 18,4 MeV para a fonte principal. (AIEA, 2017a).

A espessura da placa de alumínio necessária para reduzir a energia do feixe, dos 18,4 MeV para os 13,3 MeV desejados foi definida em 0,98 mm. Porém, este valor é para esta geometria de ativação, outras geometrias, com diferentes suportes e alvos necessitarão de uma nova análise sobre este fator.

Um resultado importante, porém indesejado, foi uma extensa oxidação da fonte principal, a mesma pode ser vista na figura 20. Isto ocorreu por conta da alta corrente ( $2 \mu A$ ) e consequentemente altas temperaturas sobre a fonte.



Figura 20 – Oxidação na fonte principal. O Autor.

### 3.5 Experimento de Análise de Desgaste

O primeiro experimento de contagem de *background* e influência da fonte principal sobre o Detector 3 resultou em  $9654 \pm 196$  contagens, já a geometria sem a blindagem,  $95372 \pm 618$  contagens (para um nível de confiança de 95%). A razão entre os dois valores ficou em  $1/9,9$ , bem próximo do valor esperado de  $1/10$ , ainda a considerar que o *background* possui um valor fixo e não proporcional.

A contagem do filtro a partir do detector HPGe retornou o espectro presente na Figura 21. Nele, é possível ver os fotópicos de maior intensidade do  $^{56}Co$ , em especial o fotópico de estudo,  $846,7 \text{ keV}$ , e outros dois, de  $1238,3 \text{ keV}$  e  $1771,3 \text{ keV}$ . Isto confirma que o sistema foi capaz de desbastar a fonte principal e transportar a limalha até o filtro, porém, não houve tempo suficiente de desbaste para que a variação da atividade fosse perceptível. Vale ressaltar que de início foi utilizada uma frequência de rotação de 4 a 6 vezes menor que a máxima possível para o sistema.

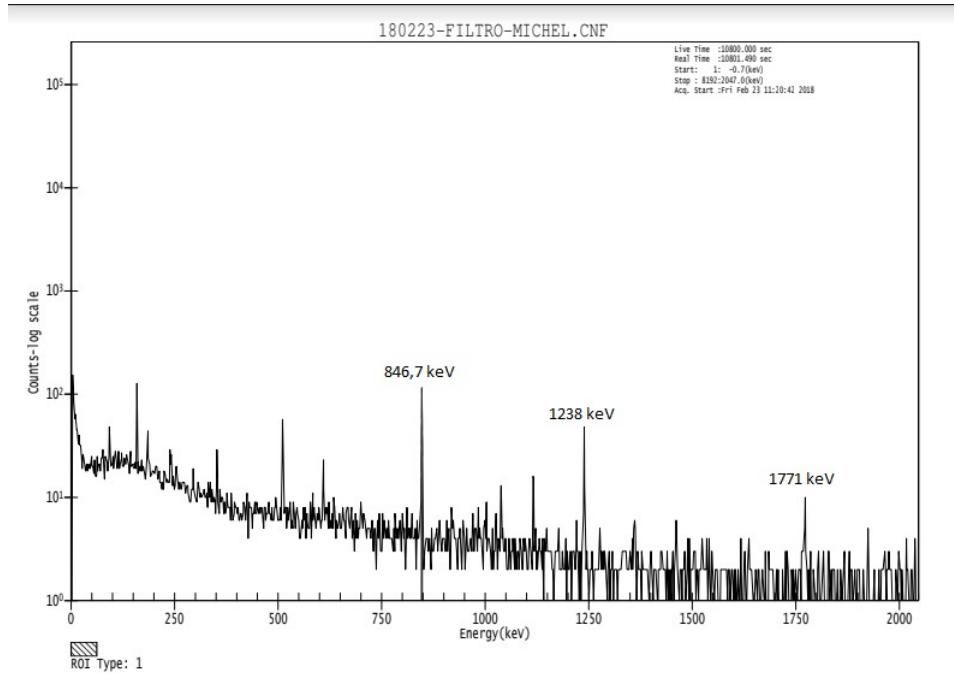


Figura 21 – Espectro encontrado no filtro. O Autor.

## 4 Conclusão

Ao longo deste trabalho foram utilizadas diversas ferramentas e métodos para atingir nosso objetivo: projetar, construir e testar o sistema de análise de taxa de desgaste em ligas de aço utilizando da TLA, a partir de ambos os métodos de contagem, TLM e CMM. Para isto, 5 procedimentos foram seguidos.

Primeiro, o projeto e construção do Desbastador, responsável por gerar o desgaste e transportar a limalha até o filtro. Estes seguiram as especificações necessárias às medições posteriores, como a ausência de trepidações potencialmente prejudiciais aos sistemas de detecção, as dimensões de todas as componentes, a possibilidade de variações da taxa de rotação, lubrificante utilizado e corpo de prova (fonte principal).

Em seguida, um trabalho utilizando do código MCNP-X foi realizado para obter a melhor geometria de contagem montada sobre o dispositivo anterior. Esta foi adequada aos dois pontos de medição referentes a TLM e CMM, e dimensionada a proporcionar uma estatística de contagem adequada mesmo para poucos mícrons de desbaste. Outro resultado nesta etapa é que o outro ponto (Detector 2) foi descartado por se mostrar pouco proveitoso no âmbito deste trabalho. Também nesta etapa, foi analisada a necessidade de blindagens e o dimensionamento da mesma. O resultado final foi uma geometria totalmente adequada ao propósito deste sistema. Um destaque, ainda nesta etapa, foi a conclusão dos estudos acerca da dose efetiva para um possível operador do equipamento. Este resultado é importante pois mostra a possibilidade de aplicar este tipo de técnica no âmbito industrial, justamente onde ele será mais requisitado, com baixas restrições referentes a dose a qual o público será submetido.

Na terceira etapa, tivemos o teste preliminar do sistema de contagem. Isto foi feito através do uso de lâminas de aço inox ativadas em um procedimento anterior, estas lâminas possuem o mesmo isótopo de estudo da fonte principal. Com essas, foi possível simular o que ocorreria no filtro com o acúmulo de limalha. Os resultados foram bons e mostram que o sistema é sensível e estável mesmo para atividades menores que as esperadas durante a análise de desgaste real, abrindo espaço para possíveis attenuações da atividade.

Posteriormente, foi realizada uma análise do perfil de ativação esperado da fonte principal, assim como a ativação propriamente dita. Através desta análise, utilizando da ferramenta *TLA2*, foi possível constatar a energia efetiva de ativação. Porém, esta

não é a necessária para se obter uma região de ativação semi-constante na superfície da fonte principal. Assim, foi feita uma análise para determinar qual espessura de alumínio seria adequada para reduzir a energia do feixe de prótons para o valor recomendado pela AIEA em sua seção destinada à TLA. Essa placa de alumínio de aproximadamente 0,98 mm quando posicionada antes do alvo irá proporcionar a ativação desejada para nossa geometria de ativação atual. Um resultado indesejado durante a ativação foi a oxidação do alvo, que posteriormente pode ter comprometido a etapa seguinte. Esta oxidação se deve ao aquecimento da fonte. Para solucionar este problema, o uso de uma corrente mais baixa que a utilizada é recomendado (compensada com uma duração de feixe maior), pudemos ver pelas folhas ativadas em seguida, com uma corrente de 0,5  $\mu A$  que o mesmo não ocorreu, apesar delas serem feitas de aço inox, ao contrário da fonte principal. Assim, é necessário efetuar testes acerca da corrente máxima que pode ser utilizada para determinados alvos, e possivelmente a inclusão de um sistema de refrigeração.

Por fim, todo o sistema foi montado, com os equipamentos, geometrias e parâmetros definidos nas etapas anteriores. Os resultados da análise acerca da influência da fonte principal sobre o Detector 3 foram consistentes com as simulações e atestaram que o controle foi efetivo. Além disso, a dose efetiva, exterior ao sistema, também se mostrou abaixo dos limites estabelecidos pela CNEN e dentro dos valores esperados através da simulação, mesmo para nossa ativação total, que foi feita com um valor acima do necessário para este cenário.

Como principais contribuições deste trabalho, há, em suma: o desenvolvimento e teste bem sucedidos do sistema de contagem, nossa contribuição principal; outro resultado de extrema relevância foi a comprovação de que este tipo de técnica, como apresentado aqui é passível de aplicação em ambiente industrial, oferecendo uma dose efetiva dentro do limite estipulado mesmo para o público e, por fim; também foi desenvolvido um sistema de análise da ativação efetiva, utilizando de um método de baixo custo e sem a necessidade de detectores específicos para feixes de prótons.

Para prospecções futuras, temos inicialmente a adequação da parte mecânica, possivelmente com uma configuração mais profissional, possibilitando a prestação dos serviços relacionados anteriormente, como análise da influência das características de óleos lubrificantes diferentes e/ou a resistência de certas ligas metálicas ao desgaste por atrito. Outro ponto que deve ser otimizado é a ativação da fonte, além da solução do problema de oxidação e seria de grande utilidade o desenvolvimento de uma estrutura que permita o melhor posicionamento das fontes durante a ativação.

# Referências

- AIEA. *Main page for TLA section in AIEA*. [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://www-nds.iaea.org/tla/abouttla.html>>. Acesso em: 30 ago. 2017. Citado 5 vezes nas páginas 9, 23, 24, 51 e 53.
- AIEA. *Proton X Iron reaction's cross section for energy range*. [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://www-nds.iaea.org/tla/fep56co7.html>>. Acesso em: 30 ago. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 22.
- AIEA. *Reactions for Thin Layer Activation applications*. [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://www-nds.iaea.org/tla/index.html>>. Acesso em: 30 ago. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 21.
- ANTUNES, J. F. d. O. et al. Desenvolvimento de uma técnica para análise de desgaste em peças metálicas com o uso do ciclotron cv-28 do ien. Instituto de Engenharia Nuclear, 2016. Citado 5 vezes nas páginas 9, 16, 22, 23 e 37.
- ARNOLD, K. Standard handbook of petroleum & natural gas engineering. Gulf Pub. Co, 1996. Citado na página 33.
- AZOM. *Aluminium's properties*. [S.l.], 2012. Disponível em: <<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6622>>. Acesso em: 30 ago. 2017. Citado na página 33.
- AZOM. *Stainless Steel, AISI 304 properties*. [S.l.], 2012. Disponível em: <<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=965>>. Acesso em: 24 feb. 2018. Citado na página 40.
- BENSON, R. S.; WHITEHOUSE, N. D. *Internal combustion engines: a detailed introduction to the thermodynamics of spark and compression ignition engines, their design and development*. [S.l.]: Elsevier, 2013. v. 1. Citado na página 30.
- CNEN. *Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica*. [s.n.], 2014. Disponível em: <<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm301.pdf>>. Acesso em: 27 mar. 2018. Citado na página 36.
- DITRÓI, F. et al. The thin layer activation method and its applications in industry. *IAEA TECDOC*, v. 924, 1997. Citado na página 20.
- FEHSENFELD, P.; KLEINRAHM, A.; SCHWEICKERT, H. Radionuclide technique in mechanical engineering in germany. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, Akadémiai Kiadó, co-published with Springer Science+ Business Media BV, Formerly Kluwer Academic Publishers BV, v. 160, n. 1, p. 141–151, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 25.
- FURLANETTO, J. et al. Operation and maintenance of cv-28 cyclotron. Citado na página 28.
- HINE, G. J.; BROWNELL, G. L. *Radiation dosimetry*. [S.l.]: Elsevier, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 48.

- INGOLE, S. P. et al. *Tribology for Scientists and Engineers: From Basics to Advanced Concepts*. [S.l.]: Springer, 2013. Citado na página 15.
- LANL. *Main page for MCNP-X*. [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://mcnpx.lanl.gov/>>. Acesso em: 30 ago. 2017. Citado na página 26.
- LEMOS, M. L. B. et al. Projeto e desenvolvimento de um sistema de irradiação multipropósito com diagnóstico de feixes para o acelerador de partículas ciclotron cv 28. Instituto de Engenharia Nuclear, 2016. Citado na página 29.
- LISHUI. *Main page for Lushui bearings*. [S.l.], 2017. Disponível em: <<http://pt.spainbearing.com/MRC/>>. Acesso em: 30 ago. 2017. Citado na página 43.
- MCCCONN, R. J. et al. *Compendium of material composition data for radiation transport modeling*. [S.l.], 2011. Citado na página 33.
- MORAES, M. A. F. d. et al. Desenvolvimento de metodologias de avaliação e monitoramento do desgaste no par tribológico riser/enrijecedor. Universidade Federal de Uberlândia, 2013. Citado na página 18.
- NIST. *PSTAR and ASTAR Databases for Protons and Helium Ions*. [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/programs.html>>. Acesso em: 30 ago. 2017. Citado na página 41.
- NIST. *Página principal para PSTAR*. [S.l.], 2018. Disponível em: <<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/PSTAR.html>>. Acesso em: 14 feb. 2018. Citado na página 40.
- PETOSSI-HENSS, N. et al. Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures. *Annals of the ICRP*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 40, n. 2-5, p. 1–257, 2010. Citado na página 28.
- PRASAD, K.; COLE, W.; HAASE, G. Radiation protection in humans: extending the concept of as low as reasonably achievable (alara) from dose to biological damage. *The British Journal of Radiology*, British Institute of Radiology, v. 77, n. 914, p. 97–99, 2004. Citado na página 32.
- RADI, P. A. et al. Tribologia, conceitos e aplicações. *Anais do XIII ENCITA, ITA*, 2007. Citado na página 17.
- SINATORA, A. Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte. *Prova de Erudição, São Paulo*, 2005. Citado na página 15.
- SRIM. *Stopping Power for Protons on Tantalum*. [S.l.], 2017. Disponível em: <<http://www.srim.org/l>>. Acesso em: 24 jan. 2018. Citado na página 40.
- SUMIYA, L. C. D. A. et al. *Medidas de desgaste em aço inoxidável AISI 316 por meio de ativação superficial em ciclotron*. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2000. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 20.
- WOOD, R. J. *Tribology: saving costs and improving safety across industries*. [S.l.], 2012. Disponível em: <[https://www.southampton.ac.uk/engineering/research/impact/preventing\\_wear\\_and\\_tear.page#overview](https://www.southampton.ac.uk/engineering/research/impact/preventing_wear_and_tear.page#overview)>. Acesso em: 30 ago. 2017. Citado na página 15.