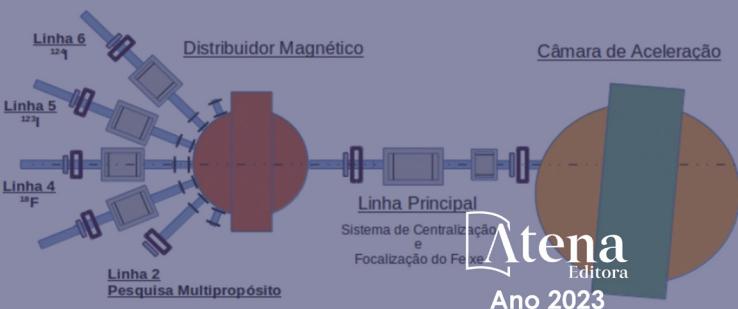




DESENVOLVIMENTO DE UMA TÉCNICA PARA ANÁLISE DE DESGASTE EM PEÇAS METÁLICAS COM O USO DO CÍCLTRON CV-28 DO IEN

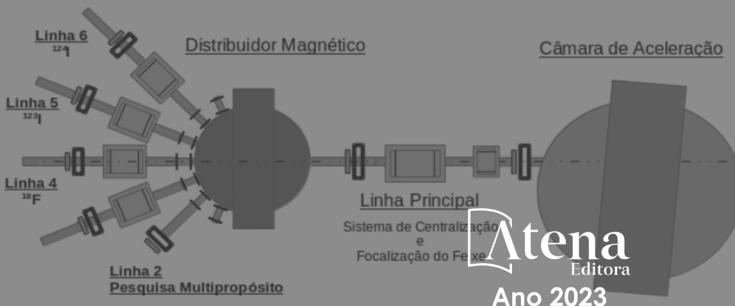
JOÃO FRANCISCO DE OLIVEIRA ANTUNES





DESENVOLVIMENTO DE UMA TÉCNICA PARA ANÁLISE DE DESGASTE EM PEÇAS METÁLICAS COM O USO DO CÍCLTRON CV-28 DO IEN

JOÃO FRANCISCO DE OLIVEIRA ANTUNES



Editora chefe

Prof^a Dr^a Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2023 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2023 Os autores

Copyright da edição © 2023 Atena

Editora

Direitos para esta edição cedidos à
Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena
Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo do texto e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva do autor, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos ao autor, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Prof^a Dr^a Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Prof^a Dr^a Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Prof^a Dr^a Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Prof^a Dr^a Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profº Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabricio Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profº Drª Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá
Profº Drª Iara Margolis Ribeiro – Universidade Federal de Pernambuco
Profº Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profº Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profº Drª Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Prof. Dr. Milson dos Santos Barbosa – Universidade Tiradentes
Profº Drª Natíeli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profº Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Profº Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Profº Dr Ramiro Picoli Nippes – Universidade Estadual de Maringá
Profº Drª Regina Célia da Silva Barros Allil – Universidade Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Desenvolvimento de uma técnica para análise de desgaste em peças metálicas com o uso do Cíclotron CV-28 do IEN

Diagramação: Natália Sandrini de Azevedo
Correção: Maiara Ferreira
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: O autor
Autor: João Francisco de Oliveira Antunes

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)	
A636	Antunes, João Francisco de Oliveira Desenvolvimento de uma técnica para análise de desgaste em peças metálicas com o uso do Cíclotron CV-28 do IEN / João Francisco de Oliveira Antunes. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2023. Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-258-1075-1 DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.751232802
<p>1. Metalurgia. I. Antunes, João Francisco de Oliveira. II. Título.</p> <p>CDD 669</p> <p>Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166</p>	

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil

Telefone: +55 (42) 3323-5493

www.atenaeditora.com.br

contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DO AUTOR

O autor desta obra: 1. Atesta não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao conteúdo publicado; 2. Declara que participou ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certifica que o texto publicado está completamente isento de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirma a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhece ter informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autoriza a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, desta forma não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de e-commerce, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa Luíza e minhas filhas Gabriela, Lívia e Cecília, pois são a razão de tudo o que faço.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores prof. Dr. Júlio César Suita e prof. Dr. Celso Marcelo Franklin Lapa pelo incentivo, pela generosidade e por terem acreditado em mim e neste trabalho quando eu mesmo não o fazia.

À DIRA através de seus líderes pelo incentivo e apoio.

Ao meu chefe e colega de mestrado Mauro Lúcio Borges Lemos, pelo apoio e parceria.

Aos colegas da DIRA/SECIC pelo apoio e compreensão.

Aos colegas do DIRA/SERAD pelo incentivo.

Aos professores do PPG-IEN pela orientação e conhecimento Aos órgãos de fomento CNPq, FAPERJ e CAPES, ao IEN e CNEN que de forma direta ou indireta proporcionaram esse trabalho.

Ao prof. Dr. Gonçalo Rodrigues dos Santos pela paciência, as longas discussões e as muito úteis explicações.

E por fim ao colega e amigo Reinam Batista Dutra Sereno, pela ajuda, destreza e principalmente pela genialidade sem a qual este projeto não teria sido possível.

EPÍGRAFE

Sonhar
Mais um sonho impossível
Lutar
Quando é fácil ceder
Vencer
O inimigo invencível
Negar
Quando a regra é vender
Sofrer
A tortura implacável
Romper
A incabível prisão
Voar
Num limite improvável
Tocar
O inacessível chão...
J. Darión - M. Leigh - Versão Chico Buarque e Ruy Guerra/1972
Para o musical para O Homem de La Mancha de Ruy Guerra

"Para mim só existe percorrer os caminhos que tenham coração,
qualquer caminho que tenha coração.

Ali viajo, e o único desafio que vale é atravessá-lo em toda sua
extensão. E por ali viajo, olhando, olhando, arquejante."

Nagual Don Juan Matus

Do livro "A Erva do Diabo" de Carlos Castaneda

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	1
RESUMO	2
ABSTRACT	3
INTRODUÇÃO	4
Tribologia.....	4
Taxionomia do Desgaste	5
Métodos de Detecção de Desgaste.....	7
Métodos não nucleares (convencionais)	7
Métodos Nucleares	7
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
Materiais e métodos	19
Cíclotron CV-28	19
Roda Degradadora	21
Determinação da espessura das lâminas	25
Montagem da Roda	30
Ajuste do Feixe.....	32
Porta Alvo.....	35
Alvo – Lâminas de aço	37
Metodologia da prática efetuada	37
Irradiação das Amostras	38
Recuperação das amostras irradiadas e medição.....	39
Resultados das medições	39
RESULTADOS	44
Aparência das amostras	44
Tratamento dos Dados	44
CONCLUSÃO	55

SUMÁRIO

TRABALHOS FUTUROS	56
REFERÊNCIAS	57
SOBRE O AUTOR	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT -	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFM -	Atomic Force Microscopy
AIEA -	Agência Internacional de Energia Atômica
AISI -	American Iron and Steel Institute
ASTM-	American Society for Testing and Materials
CNEN -	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CRP -	Co-ordinated Research Program – AIEA
DIRA -	Divisão de Radiofármacos - IEN
FDG –	Fluordesoxiglicose
IEN -	Instituto de Engenharia Nuclear - CNEN
HPGe -	Detector de Germânio hiperpuro
LVDT -	Linear Variable Differential Transformer
MIBG -	Metaiodobenzilguanidina
Nal(Tl) -	Detector de Iodeto de Sódio
NSIT -	National Institute of Standard and Technology
PSTAR -	Base de dados para Poder de frenagem e Range para prótons
PVC -	Policloreto de Vinila
TLA –	Thin Layer Activation - Ativação de Camada Fina
UTLA -	Ultra Thin Layer Activation – Ativação de Camada Ultrafina

RESUMO

As técnicas nucleares, com ênfase a técnica conhecida como TLA – Thin Layer Activation, tem sido utilizada com sucesso e contribuído significativamente para o estudo de sistemas tribológicos, na análise e medição de desgaste para profundidades na ordem de grandeza de $10^2 \mu\text{m}$. Esta limitação é intrínseca da técnica utilizada na ativação da camada superficial da peça ou elemento a ser investigado, que consiste na aplicação direta de um feixe de partículas carregadas a uma determinada energia, equivalente a máxima seção de choque do material a fim de obter uma taxa ativação constante ao longo de uma determinada espessura ou utilizando uma energia menor que este valor para se obter uma taxa ativação linear também para uma determinada profundidade de ativação. O objetivo deste trabalho é apresentar uma nova técnica que consiste na utilização de um feixe de energia superior a energia correspondente à máxima seção de choque e aplicar um elemento degradador (Roda Degradadora) como objetivo de homogeneizar a ativação superficial ao longo da espessura da amostra, possibilitando uma melhoria na precisão da análise e possibilitando ainda uma maior alcance dessa camada ativada e aumentando a gama de aplicações possíveis dessa técnica, onde por exemplo, maiores taxas de desgaste possam ser analisadas. Após o experimento e análise dos dados constatou-se que a técnica proposta melhora a linearidade da curva que representa a taxa de ativação e aumentando significativamente a profundidade analisável podendo chegar a ordem $6.10^3 \mu\text{m}$. Em adição este trabalho reinaugura a pesquisa em aplicações nucleares no IEN – Instituto de Engenharia Nuclear com utilização de aceleradores de partículas tipo cíclotron.

PALAVRAS-CHAVE: Ativação de camada fina, Radionuclídeos, Tribologia, Cíclotron

ABSTRACT

Nuclear techniques, emphasis on technology known as TLA - Thin Layer Activation has been used successfully and contributed significantly to the study of tribological systems, analysis and wear measuring depths in the $10^2 \mu\text{m}$ order of magnitude. This limitation is inherent in the technique used in the activation of the surface layer of the part or element to be investigated, which consists of the direct application of a beam of loaded particles at a given energy, equivalent to the maximum cross section of the material in order to obtain a rate activation constant over a certain thickness or using a lower energy than this value to obtain a linear activation rate as well for a given depth of activation. The aim of this paper is to present a new technique that involves the use of a higher power beam energy corresponding to the maximum cross section and apply a degrading element (degrading Wheel) aim to homogenize the surface activation through the thickness of the sample, enabling an improvement in accuracy of analysis and also allowing a greater range of this active layer and increasing the range of possible applications of this technique, where, for example, increased wear rates can be analyzed. After the experiment and analysis it was found that the proposed technique improves the linearity of the curve representing the activation fee and significantly increasing depth analyzable may reach $6.10^3 \mu\text{m}$ order. In addition this work reopened research into nuclear applications in IEN - Nuclear Engineering Institute with the use of particle accelerators like the cyclotron.

KEYWORDS: Thin layer activation , Radionuclide, Tribology, Cyclotron

INTRODUÇÃO

O atrito, o desgaste e suas aplicações, assim como os mecanismos para mitigar seus efeitos têm sido objeto de estudo desde os primórdios da humanidade. Há registros datados de seu uso desde as eras Paleolíticas e Mesolíticas (RADJ et al, 2007). O atrito e o desgaste são o binômio com o qual sempre iremos nos deparar em todas as fases de desenvolvimento de um projeto. Considerando que as perdas operacionais e financeiras causadas pelo desgaste são uma das maiores preocupações das indústrias em todo o mundo, Sinatra (2005), em seu estado da arte sobre Tribologia mostra que as perdas podem chegar de 1% a 6% do PIB e que são estimadas emissões de cerca de 187.500 toneladas de CO₂ na cidade de São Paulo devidos às perdas resultantes do atrito e desgaste. A adoção de técnicas que permitam a determinação do desgaste ainda na fase projeto são de vital importância para o desenvolvimento da “Tribologia” – entendida como a ciência que estuda os mecanismos do atrito, do desgaste e da lubrificação e da interação entre as superfícies de contato.

Este trabalho apresenta no capítulo 1, um levantamento teórico conceitual sobre a Tribologia e o desgaste, além de apresentar as técnicas nucleares e não nucleares mais utilizadas para análise de desgaste. Apresenta também a técnica conhecida como TLA – “Thin Layer Activation” - Ativação Superficial em Camada Fina.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica que discorre sobre os principais trabalhos nessa área e o estado da arte da tecnologia. Em seguida no capítulo 3 foi encontrado um embasamento teórico sobre a técnica TLA e da interação de partículas carregadas com a matéria.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia utilizada neste trabalho, indicando conceitualmente como seu objetivo será alcançado, apresentando o desenvolvimento do projeto e a descrição de como o experimento foi elaborado. No capítulo 5 é feita a análise dos dados e a discussão dos resultados. Nos capítulos 6 e 7 são apresentadas as conclusões e as recomendações de trabalhos futuros, respectivamente. E, finalmente, o capítulo 8 traz as referências bibliográficas ordenadas alfabeticamente.

TRIBOLOGIA

Este termo foi utilizado pela primeira vez em 1966 para definir “The science and technology of interacting surfaces in relative motion and the practices related thereto” (DOWSON, 1979). Sendo assim o foco do seu campo de estudo são o atrito, o desgaste e a lubrificação. Como estudos nessas áreas vêm sendo desenvolvidos desde antes da invenção da roda, este termo apenas consolida estes estudos e a ciência neles envolvida

através de suas áreas de aplicação (WINER, 1990).

Segundo Dawson (1979), em seu livro intitulado History of tribology, os pioneiros da Tribologia foram Guillaume Amontons (1663-1705), John Theophilus Desaguliers (1683-1744), Leonard Euler (1707-1783), Charles-Augustin Coulomb (1736-1806) e Charles Hatchett (1760-1820), Osborne Reynolds (1842-1919), Heinrich Rudolph Hertz (1869-1851), George Vogelpohl (1900-1975), e Frank Philip Bowden (1903-1968)

TAXIONOMIA DO DESGASTE

Em geral, todas as definições de desgaste se referem a perda progressiva de material devido a interação entre duas superfícies em contato. Na definição da American Society for Testing and Materials (ASTM), o desgaste é definido como a degradação da superfície de um sólido, já para Castro (2010), normalmente o termo desgaste refere-se a dano ao equipamento, geralmente envolvendo perda de material.

Rigney (1990) define desgaste como o deslocamento ou a remoção de material resultante de processos tribológicos. E, segundo a Norma Brasileira NBR-12042, “desgaste é a desagregação superficial e remoção de partículas de um determinado material submetida à força de atrito” (ABNT, 2012). (SINATORA, 2005),

Em geral são aceitos quatro modos de desgaste que estão representados na figura 1 abaixo modificada de (KATO, 2001).

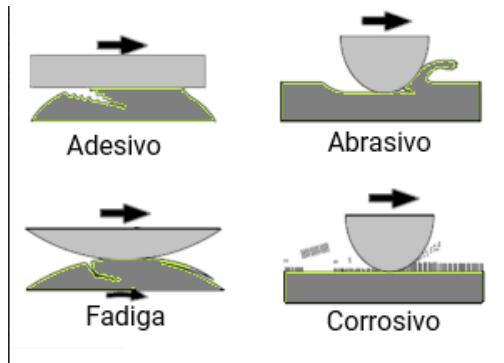


Figura 1: Tipos de Desgaste

O desgaste adesivo ocorre a partir da ligação adesiva entre as superfícies sendo suficientemente forte para se opor ao deslizamento. Como resultado, uma deformação plástica é causada na região de contato gerando uma trinca que pode se propagar levando à geração de um terceiro corpo e a uma transferência completa de material.(RADI et al, 2007)

No desgaste abrasivo ocorre remoção de material da superfície. Esse desgaste ocorre em função do formato e da dureza dos dois materiais em contato.(RADI et al, 2007)

Quando o desgaste é ocasionado pelo alto número de repetições do movimento ele é chamado de desgaste por fadiga.(RADI et al, 2007)

Finalmente, o desgaste corrosivo ocorre em meios corrosivos, líquidos ou gasosos. Neste tipo de desgaste são formados produtos de reação devido às interações químicas e eletroquímicas. Essas reações são conhecidas como reações tribo químicas e produzem uma camada na superfície que depois é removida. (RADI et al, 2007)

Os mecanismos de desgaste são descritos pela consideração de mudanças complexas na superfície durante o movimento. Em geral, o desgaste ocorre através de mais de um modo, portanto a compreensão de cada mecanismo de desgaste em cada modo se torna importante. Sumiya (2000) apresenta a tabela 1, reproduzida abaixo com as ações tribológicas e os desgastes associados.

Estrutura do Sistema	Fenômeno Tribológico	Tipo de Desgaste	Mecanismos Efetivos			
			Adesão	Abrasão	Fadiga Superficial	Reações Tribo químicas
Sólido e Sólido	Deslizamento	Desgaste por deslizamento	X	X	X	X
	Rolamento	Desgaste por rolagem	X	X	X	X
	Impacto	Desgaste por impacto	X	X	X	X
	Oscilação	Desgaste por corrosão	X	X	X	X
Sólido e Partículas sólidas	Deslizamento	Deslizamento abrasivo		X		
	Rolamento	Rolagem abrasiva		X		
Sólido e Fluido com particulado	Fluxo	Erosão		X	X	X
Sólido e Gás com particulado	Fluxo	Erosão		X	X	X
	Impacto	Desgaste por Impacto		X	X	X
Sólido e Fluido	Fluxo turbulento	Erosão			X	X
	Impacto	Erosão			X	X

Tabela 1: Ações tribológicas e desgaste associados

Métodos de Detecção de Desgaste

A literatura apresenta vários métodos utilizados na detecção de desgaste, para efeito deste trabalho dividiremos os métodos em métodos nucleares e não nucleares (convencionais).

Métodos não nucleares (convencionais)

Moraes (2013) identifica vários métodos utilizados classificados como não nucleares, estes incluem métodos sem contato: microscópio de interferência à luz branca; perfilômetro de varredura, com o levantamento da topografia 3D da superfície, método de mudança de fase utilizando padrões de franja método de medição confocal codificado cromaticamente; microscopia de força atômica (AFM). E métodos com contato: LVDT (Linear Variable Differential Transformer), MM3C (Máquina de Medir a três Coordenadas) e balança, além de medições diretas utilizando instrumentos de medição convencional.

Esses métodos, entretanto, têm como característica a necessidade de desmontagem do conjunto avaliado diversas vezes a fim de obter a medição.

Métodos indiretos químicos espectrais como a análise produtos do desgaste em amostras de óleo lubrificante também podem ser utilizados, mas não fornecem informação sobre a área desgastada. (SUMIYA, 2000)

Métodos Nucleares

O uso de métodos nucleares na indústria tem sido utilizado em diversas aplicações desde a análise da estrutura dos materiais, como na radiografia de raio-X, a radiografia com nêutrons e a gamagrafia até o uso de radioisótopos como traçadores. Aplicados no estudo do fenômeno de desgaste em sistemas tribológicos, os métodos nucleares conhecidos até o momento se referem a ativação dos componentes ou partes dos componentes destes sistemas, diferindo apenas na forma da introdução do radionuclídeo (radiotraçador ou radioisótopo). Os métodos nucleares apresentam a vantagem de permitir a análise do desgaste sem a necessidade da desmontagem dos sistemas tribológicos. Um fator importante na definição do método consiste na meia vida do radioisótopo, pois esta deve ser tal que permita operação do sistema investigado. Meia-vida de um radionuclídeo é o tempo transcorrido para que a atividade de um radionuclídeo se reduza à metade da atividade inicial. Segundo Sumiya(2000) os métodos mais utilizados são:

- Método de inserção de marcador radioativo

Inserção mecânica de um elemento ativado (p.e. cavilha), com área conhecida.

- Método de marcador radioativo fundido

Inserção do radioisótopo na liga fundida do material da peça aplicada.

- Método de deposição eletrolítica

Deposição eletrolítica do radioisótopo na peça a ser investigada.

- Método de marcação de gás radioativo

Difusão na liga base da peça investigada do radioisótopo na forma de gás.

- Método de revestimento de Zinco radioativo

Sublimação do Zn radioativo sobre a superfície da peça a ser investigada.

- Método baseado em reações nucleares

Utiliza-se de reações nucleares para induzir a formação de material radioativo diretamente peça a ser investigada

Dos métodos baseados em reações nucleares podemos citar a ativação com nêutron e ativação superficial com partículas carregadas – TLA (Thin Layer Activation) - Objeto de estudo deste trabalho.

Análise por ativação com Nêutrons

Consiste na utilização de uma fonte de nêutrons (reatores). No processo de irradiação, os nêutrons interagem com os núcleos do elemento alvo, produzindo as reações nucleares, que dão origem aos radionuclídeos. A interação do fluxo de nêutrons com a amostra produzem reações nucleares do tipo (n,γ) , (n,p) , (n,α) e $(n,2n)$, sendo as reações do tipo (n,p) as mais utilizadas para análise de desgaste devido às seções de choque e taxas de ativação obtidas. Para efeito de ilustração podemos ressaltar as reações:

- | | |
|------------------------|---|
| • Reação (n, γ) | - $^{58}\text{Fe} (n, \gamma) \rightarrow ^{59}\text{Fe}$ |
| • Reação (n, p) | - $^{35}\text{Cl} (n, p) \rightarrow ^{35}\text{S}$ |
| • Reação (n, α) | - $^{66}\text{Zn} (n, \alpha) \rightarrow ^{63}\text{Ni}$ |
| • Reação $(n, 2n)$ | - $^{63}\text{Cu} (n, 2n) \rightarrow ^{62}\text{Cu}$ |

É importante ressaltar que quando se utiliza este método todo o volume da amostra (peça a ser ativada) é exposto ao fluxo de nêutrons, logo não se tem o controle da área e da espessura a ser ativada, desta forma áreas que não correspondem às áreas de estudo são ativadas atingindo-se taxas de ativação total desnecessariamente altas, de forma que a análise necessite ser efetuada em condições controladas de proteção radiológica normalmente restritas a laboratórios. (SUMIYA, 2000). Outro fator importante é que como toda a amostra está ativada, se torna difícil a análise ou medição direta do desgaste, sendo normalmente utilizados métodos indiretos de medição, como por exemplo a medida da atividade de partículas em suspensão no óleo no reservatório ou retidas em filtros.

Ativação superficial com partículas carregadas – TLA

As restrições relacionadas à análise por ativação de nêutrons levaram ao desenvolvimento da técnica de ativação superficial de partículas. Esta técnica permite que apenas a área de interesse seja ativada possibilitando entre outras coisas a medição direta do desgaste e a melhoria nas condições de operação devido às baixas taxas de ativação.

A análise de desgaste por ativação superficial consiste na medição direta (TLM – Thin Layer Difference Method), que mede a diferença de atividade da região ativada antes de depois de desgastada, ou indireta (CMM – Concentration Measuring Method) que mede a atividade da concentração de material removido da região de interesse, existente no óleo lubrificante, capturado por um filtro. Como exemplo podemos apresentar esquematicamente a análise de desgaste entre o anel de segmento de um pistão e a camisa do cilindro de um motor a combustão pela ativação superficial em ciclotron de uma região em torno do ponto morto superior do pistão conforme mostrado na Figura 2. A energia gama emitida pela região ativada da camisa do pistão penetra em sua parede e no bloco do motor sem grande atenuação, sendo medida por um detector na parte externa do bloco do motor (TLM). O desgaste pode ser determinado pela diferença de atividade causada pela perda de material da camisa. Ou no caso do método CMM pela medição da atividade da concentração de material capturado nos filtros do óleo lubrificante e do líquido de refrigeração do motor.

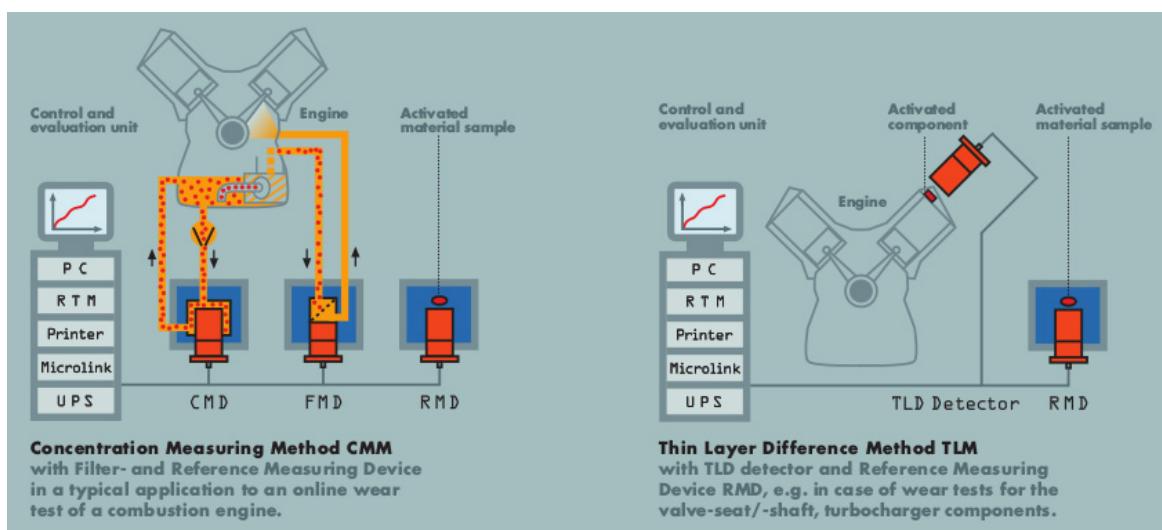


Figura 2: Técnicas de medição de desgaste com TLA (ZAG Zyklotron AG, Germany, 2012)

As medições realizadas devem ser comparadas a uma curva de calibração obtida previamente em laboratório, pela irradiação e análise de amostras do mesmo material. A

figura 3 (FEHSENFELD ET al, 2001) apresenta exemplos de curvas de calibração utilizadas em ambos os métodos. A curva de calibração para o método TLM demonstra a relação linear entre a atividade medida e a profundidade do desgaste. No método de medição da concentração CMM, as partículas de desgaste são suspensas no lubrificante, que é bombeado através da câmara de fluxo com o detector, a taxa de contagem do detector é proporcional ao desgaste total.

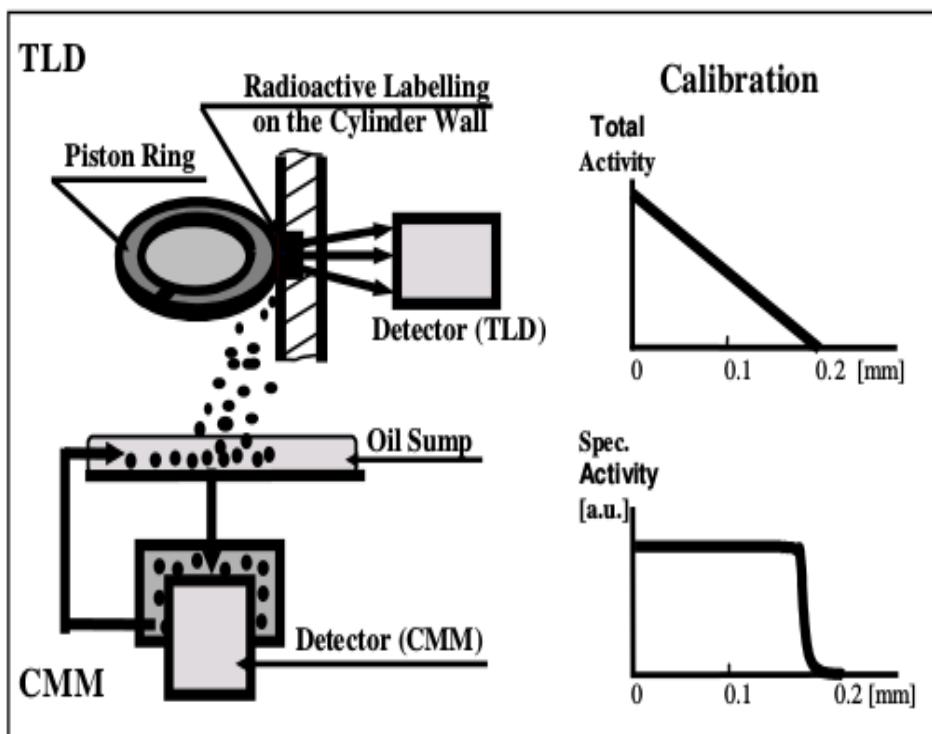


Figura 3: Curvas de calibração (FEHSENFELD ET al, 2001)

Como vantagens dessa técnica podemos citar:

- Monitoração remota não destrutiva da degradação da superfície, incluindo o desgaste, corrosão e erosão
- Medição in loco da degradação de partes críticas de máquina
- Medição simultânea em operação da degradação de superfície de vários componentes na mesma máquina
- Alta sensibilidade no acompanhamento da degradação de processos com pequenas taxas de desgaste

- Nenhuma influência sobre as condições de funcionamento da máquina ou do sistema
- nível muito baixo de radioatividade (< 370 kBq (= 10 μ Ci))
- Mais barata e mais rápida em comparação com os métodos convencionais .

Vários tipos de radioisótopos podem ser utilizados em função do material a ser investigado e da espessura desejada, sendo os mais comuns produzidos pelas seguintes reações, apresentadas na tabela 2.

Partículas	Material	Reação
Próton (H)	Cobre (Cu)	$^{65}\text{Cu}(\text{p},\text{n}) \rightarrow ^{65}\text{Zn}$
	Ferro (Fe)	$^{56}\text{Fe}(\text{p},\text{n}) \rightarrow ^{56}\text{Co}$
Alfa	Cromo (Cr)	$^{50}\text{Cr}(\text{a},\text{pn}) \rightarrow ^{52}\text{Mn}$
	Vanádio (V)	$^{51}\text{V}(\text{a},\text{n}) \rightarrow ^{54}\text{Mn}$
	Zircônio (Zr)	$^{94}\text{Zr}(\text{a},\text{pn}) \rightarrow ^{96}\text{Nb}$
Dêuterons (H_2)	Cobre (Cu)	$^{65}\text{Cu}(\text{d},2\text{n}) \rightarrow ^{65}\text{Zn}$
	Ferro (Fe)	$^{56}\text{Fe}(\text{d},\text{n}) \rightarrow ^{57}\text{Co}$
	Prata (Ag)	$^{109}\text{Ag}(\text{d},2\text{n}) \rightarrow ^{109}\text{Cd}$
Hélio-3 (H_3)	Alumínio (Al)	$^{27}\text{Al}(\text{He},2^{\alpha}) \rightarrow ^{22}\text{Na}$

Tabela 2: Radioisótopos mais utilizados em TLA

Para efeito deste estudo vamos nos concentrar na produção de ^{56}Co a partir da reação $^{56}\text{Fe}(\text{p}, \text{n}) \rightarrow ^{56}\text{Co}$ em liga de aço, para isso será utilizado aço AISI304. A tabela 3 a seguir apresenta a composição química dos aços inoxidáveis mais utilizados na indústria nacional.

Tipo de Aço	Composição Química (%)							
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Outros
AISI 304	0,08	2,00	1,00	0,045	0,03	18,00	8,00	
AISI 304 L	0,03	2,00	1,00	0,045	0,03	18,00	8,00	
AISI 316	0,08	2,00	1,00	0,045	0,03	16,00	10,00	Mo
AISI 316 L	0,03	2,00	1,00	0,045	0,03	16,00	10,00	Mo

Tabela 3: Composição química dos aços mais utilizados na indústria nacional

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A técnica TLA teve seu desenvolvimento no início de 1970 em vários países industrializados. KONSTANTINOV (1971) e COLLON (1974) apresentam as bases teóricas desta técnica. Collon também apresenta curvas de taxas de ativação em função da profundidade ativada, para vários tipos de materiais ferrosos e não ferrosos. Dando continuidade a estes estudos no Centro de Pesquisa Thornton da Shell Research Ltd., R. EVANS (1980) realizou irradiações de balancins utilizando um feixe de déuterons com energia de aproximadamente 9 MeV. Comparando esta técnica com a ativação por nêutrons e comprovando sua precisão, em seguida no Centro de Tecnologia de Materiais da Daimler-Benz AG, SAILER (1981), apresentou estudo de desgaste em carcaças de mancais de um motor, utilizando feixe de déuterons, e processo de medição indireta (CMM).

Em 1989, no Centro de Pesquisa de Ciência e Tecnologia Nuclear da Universidade de Tóquio no Japão, Toshiro Kosako e Kazuo Nishimura, testou a técnica irradiando prótons de 7 MeV, em um cubo de aço, produzindo curvas de calibração para ^{56}Co e ^{57}Co utilizando detectores de NaI(Tl) e HPGe, para profundidades de 90 μm .

Em 1990, a AIEA convocou uma reunião de consultores para discutir o estado da arte da TLA técnica e avaliar as possibilidades e potenciais limitações de introduzi-la nos países em desenvolvimento. Seguindo as recomendações da reunião de consultores, a AIEA deu início a um Programa de pesquisa (Co-ordinated Research Program - CRP) voltado para métodos nucleares de monitoramento de desgaste e corrosão na Indústria, em 1992. Pesquisas realizadas na Hungria, Índia, Itália, Romênia e na Federação Russa contribuíram significativamente para o desenvolvimento de diferentes aspectos da metodologia e tecnologia TLA. (IAEA , 1997).

A partir deste estudo várias outras pesquisas foram realizadas, no Brasil no IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da CNEN– Brasil Sumiya, Luiz Carlos do Amaral, em 2000 utilizando Cíclotron CV-28 investigou a viabilidade da técnica aplicada ao desgaste do aço AISI 316 para espessuras até 100 μm utilizando prótons de 11 MeV.

No Instituto FZK/Karlsruhe – P. Fehsenfeld, A. Kleinrahm e H. Schweickert realizaram ensaios de desgaste, em diversas peças de máquinas. Posteriormente P. FEHSENFELD em 2001, apresenta a técnica com o nome de RTM - “Radionuclide Technique in Mechanical Engineering” no 2nd World TRIBOLOGY Congress, Vienna, 3.-7.9.2001. No Laboratório de Cíclotron do I.P.N.E. (Institute of Physics and Nuclear Engineering) – Bucareste/Romênia, utilizando o cíclotron U-120 efetuaram testes e ensaios utilizando prótons, déuterons, e ^3He . B. Constantinescu, E.A. Ivanov, G. Pascovicci, L. Popa, Simil e P. M. Raccolta realizaram testes, onde foram irradiadas diversas peças de motores a diesel, com a finalidade

detectar níveis de desgaste, utilizando medição direta, e obtiveram sucesso comprovando a aplicabilidade da metodologia. G. Wallace, L. H. Boulton e D. Hodder utilizaram TLA para examinar o processo de erosão – corrosão, que ocorre num digestor de celulose de uma fábrica de papel, comparando essa técnica com o método de medida de espessura por ultrassom, prótons de 11 MeV. F. Ditroi, I. Mahunka no Institute of Nuclear Research, Debrecen, Hungary aplicaram esta técnica na investigação de desgaste em ferramentas de corte.

Esta técnica também foi aplicada, na análise de desgaste de próteses ortopédicas – Biotribologia. T. Sauvage, et al em 1998, utilizou um método de ativação indireta é proposto para medir a resistência ao desgaste de polímeros com íons de ^{7}BE radioativos gerados por feixes de partículas ^{3}He , que são implantados na superfície próxima (alguns μm) sem degradação das propriedades químicas ou mecânicas do material. Foram ativados três tipos de polímeros (mylar, polietileno e polipropileno) e, pela primeira vez, determinada profundidade distribuição de íons radioativos nestes. A sensibilidade medida é de algumas centenas de nanômetros. Mais recentemente em 2007 G. Dearnaley utilizou a técnica para avaliar tratamentos de superfícies com feixe de partículas carregadas em materiais de implantes ortopédicos. Finalmente F. Ditrói, F. Tarkanyi, S. Takács em 2012 estudaram a aplicação da técnica para análise de desgaste utilizando Molibdênio com feixes de Prótons, Alfa e Dêuterons.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Quando um feixe de íons com uma determinada energia colide com a superfície de um material da amostra, produz isótopos radioativos ao longo de seu caminho por reações nucleares induzidas por partículas carregadas. Como resultado, uma fina camada de atividade é produzida a partir da superfície até uma certa profundidade. A profundidade da ativação pode ser controlada pela energia do feixe de íons. Quando um determinado componente ativado sofre desgaste, este será proporcional a perda de atividade do local ativado. Esta perda pode ser medida por um espectrômetro de raios γ como um detector de Germânio hiperpuro – HPGe ou um detector de Iodeto de Sódio-NaI(Tl). A perda de material da superfície pode ser obtida comparando a perda de atividade com uma curva de calibração previamente determinada.(IAEA, 1997 CHOWDHURY et al, 2011)

Após diversas pesquisas realizadas com essa técnica a AIEA, 1997 publica o IAEA-TECDOC-924 – The thin layer activation method and its applications in industry. Este documento técnico apresenta as bases teóricas desta técnica e recomendações de utilização e tabelas de dados. A partir dele pode-se estruturar os conceitos a seguir.

A concentração de átomos radioativos produzidos é função da secção de choque do material irradiado, que pode ser descrita como a probabilidade de interação por unidade de fluência de partículas daquela radiação por área de interação do material, sendo a Fluência o número de partículas que passa por unidade de área (TAUHATA et al, 2014).

A medida que um feixe de íons acelerados penetra em um material, suas partículas rapidamente perdem energia e atingem uma profundidade bem definida, essa taxa da perda de energia é denominada Poder de Frenagem (“Stopping power”) e é dada por $S = dE/dx$. O cálculo desse poder de frenagem é dado pela fórmula de Bethe,

$$\frac{-dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} \cdot N B \quad (1)$$

sendo,

$$B \equiv Z \cdot \left[\ln \left(\frac{(2m_0 v^2)}{I} \right) - \ln \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right] \quad (2)$$

onde,

- c = velocidade da luz;
- e = carga do elétron;
- v = velocidade da partícula
- N = átomos/cm³ do material absorvedor = $N_A \cdot \rho/A$;
- z = carga da partícula incidente;

- Z = número atômico do material absorvedor;
- I = potencial de excitação e ionização médio; e
- m_0 = massa de repouso da partícula

A variação da secção de choque do material em função da energia do feixe é chamada Função Excitação apresentada na figura 3 para prótons em ^{56}Fe . As Seções de choque (Cross sections) experimentais das reações nucleares e dados referentes ao Poder de frenagem (“Stopping power”) estão disponíveis em muitos periódicos e tabelas de dados nucleares, como, por exemplo, no site [PSTAR – Stopping Power and Ranges for Prótons Data Base do NSIT](#).

A energia do feixe de íons deve ser escolhida de tal forma que a seção de choque máxima da função de excitação seja utilizada, a fim de gerar a atividade em camada fina com melhor rendimento.

Uma vez que a energia seja escolhida, o alcance das partículas ou Range (R) corresponde ao valor penetrado em um material, por uma partícula, com uma determinada energia, e é dado pela fórmula de Bragg (3) (IAEA ,1997).

$$\frac{1}{R_{\Sigma}} = \sum_i \frac{\eta_i}{R_i} \quad (3)$$

Onde, R_{Σ} é o range no aço, R_i e η_i correspondem ao Range e a concentração de cada elemento “i” da liga. Sendo que a profundidade de ativação depende da energia do feixe e do ângulo de incidência Θ (IAEA , 1997). e é dada pela fórmula (4):

$$d = [R_0(E_0) - R(E_{th}^{\min})] \cdot \sin(\Theta) = R_0 \sin(\Theta) \quad (4)$$

onde,

d – profundidade de ativação

E_0 – energia das partículas

E_{th} – energia limite para reação

A produção de cada radionuclídeo produzido nas respectivas reações é dada por (IAEA , 1997)

$$Y = \frac{A}{I} \cdot \left(\frac{\lambda}{(1 - e^{\lambda t})} \right) \quad (5)$$

onde,

- **A** – atividade do radionuclídeos
- **I** – corrente no alvo
- **λ** – constante de decaimento de cada elemento
- **t** – tempo de irradiação

E a produção total será dada pela fórmula (6)(IAEA, 1997):

$$Y_{\Sigma} = Y_i \eta_i \cdot \left(\frac{R_{\Sigma}}{R_i} \right) \quad (6)$$

onde,

- **Y_i** – produção de radionuclídeos para cada elemento *i*.
- **η_i** – concentração para cada elemento *i*.

A figura 4 mostra a variação de energia abaixo de 24 MeV(parte superior) e da taxa de produção de ⁵⁶Co em função do alcance (parte inferior) a partir da irradiação do ⁵⁶Fe com um feixe de 30MeV. Podemos observar que a faixa hachurada representa o Range onde a atividade é praticamente constante. Essa faixa corresponde a faixa da maior seção de choque na função excitação.

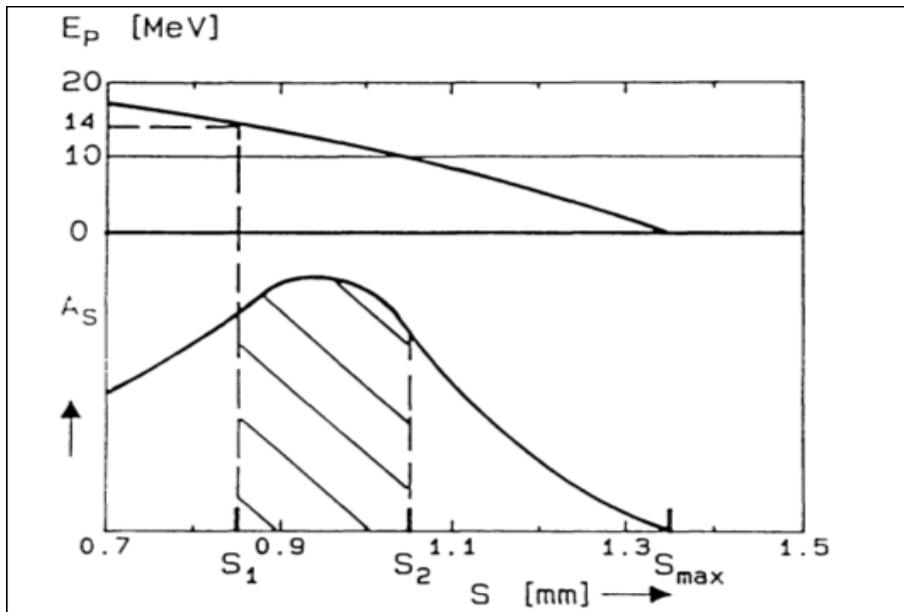


Figura 4: Variação de energia abaixo de 24 MeV(parte superior) e da profundidade de irradiação (parte inferior) para o ^{56}Co a partir da irradiação de prótons em ^{56}Fe (AIEA 1997)

A partir deste estudo a AIEA em seu documento “The thin layer activation method and its applications in industry” recomenda parâmetros para aplicação desta técnica, reproduzidos aqui na tabela 4, para produção de ^{56}Co a partir da irradiação com prótons do ^{56}Fe , objeto deste estudo.

Elemento Químico	Partícula Acelerada	Radioisótopo Medido ($T_{1/2}$)	Energia [MeV]	Produção Y[kBk/ $\mu\text{A}/\text{h}$]	Impurezas Radioativas	Tempo após Irradiação	Espectro Medido [MeV]	Tempo de Controle
^{56}Fe	Próton	^{56}Co (78,5)	11	444	^{57}Co	7d	0,65 a 1,4	7a8, meses

Tabela 4: Parâmetros de irradiação para TLA recomendados pela AIEA

Sendo assim esta técnica tem sido aplicada para faixas de investigação de 70 a 200 μm , sendo a faixa até 70 μm denominada UTLA – Ultra Thin Layer Activation. Esta característica tem limitado a aplicação dessa técnica, ou pelo menos, concentrado sua aplicação para solução de problemas cuja análise de desgaste desejada se encontre dentro dessa faixa.

MATERIAIS E MÉTODOS

Cíclotron CV-28

O Cíclotron CV-28 do IEN é um acelerador de partículas circular, multi partículas e multi energia, fabricado pela empresa americana “The Cíclotron Corporation”. Sua utilização inicial se deu na pesquisa básica, aquisição de dados nucleares, aplicações de técnicas nucleares, pesquisas de danos por radiação e produção de radioisótopos para uso médico. Na década de 90 a pesquisa nuclear foi substituída pela produção de ^{18}F utilizado como marcador no radiofármacos FDG – Fludesoxiglicose e ^{123}I utilizado como marcador em Iodeto de Sódio e Metaiodobenzilguanidina – MIBG, utilizados no diagnóstico de câncer. O Cíclotron CV-28 do IEN está instalado na Divisão de Radiofármacos – DDIRA, em um prédio especialmente construído para ele e dotado de todas as facilidades necessárias e sistemas de proteção radiológica adequados. A figura 6 mostra a planta baixa do Prédio do Cíclotron CV-28 com as respectivas áreas classificadas.

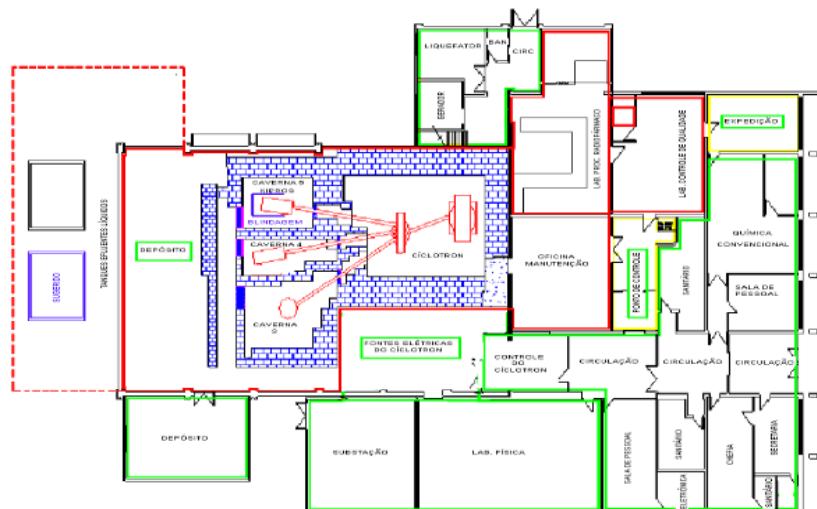
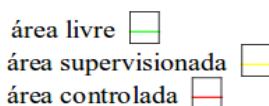


Figura 6: Planta Baixa Prédio do ciclotron CV-28

Em sua configuração original é capaz de acelerar quatro tipos de partículas obtidas a partir de gases, a tabela 5 apresenta as partículas aceleradas, os gases dos quais se

originam e as energias máximas obtidas.

Partícula Acelerada	Tipo de gás	Energia máxima
Próton (p)	Hidrogênio (H)	24 MeV
Dêuterion (d)	Deutério (^2H)	14 MeV
$^3\text{He}^{++}$	Hélio 3 (He-3)	36 MeV
Alfa (α)	Hélio 4 (He-4)	28 MeV

Tabela 5: Partículas Aceleradas e os gases dos quais se originam

Atualmente o Cíclotron CV-28 do IEN está otimizado para irradiação apenas com prótons (p), utilizado na fabricação dos radiofármacos mencionados.

O Cíclotron CV-28, pode ser dividido em quatro partes: a Câmara de aceleração, onde encontramos os sistemas de produção de íons, aceleração do feixe e extração; a linha principal com o sistema de centralização e focalização do feixe; o Distribuidor magnético com a função de direcionar o feixe para a linha uma das 7 saídas disponíveis; e o conjunto de linhas. Hoje no IEN estão em uso 5 das 7 linhas disponíveis utilizadas da seguinte maneira. As linhas 4 e 5, utilizadas para produção de radiofármacos, a linha 6 utilizada na pesquisa de produção de ^{124}I , a linha 3 dotada de uma câmara de espalhamento utilizada principalmente na aquisição de dados nucleares e análise por ativação de partículas carregadas, e a linha 2 agora efetivada para a pesquisa multipropósito. A figura 7 apresenta uma vista superior esquemática do Cíclotron CV-28.

Linhas de Feixe

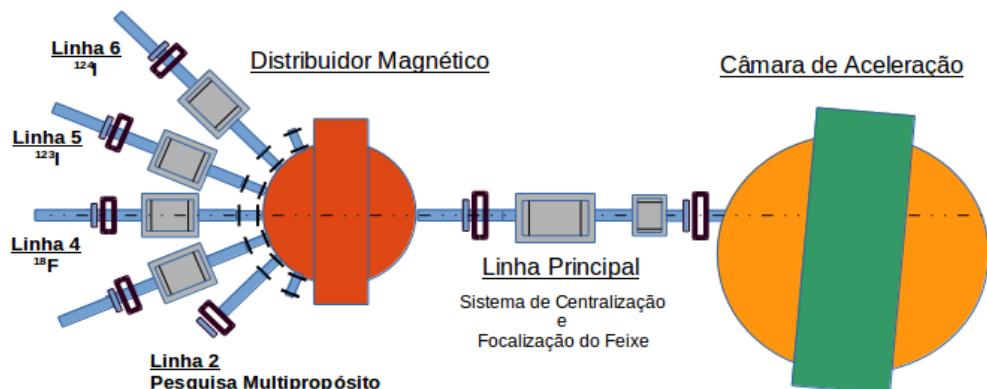


Figura 7: Vista Superior Esquemática - Cíclotron CV-28

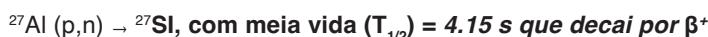
Aspectos relacionados à produção, aceleração, extração e direcionamento do feixe podem ser encontrados no trabalho “PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE IRRADIAÇÃO MULTIPROPÓSITO COM DIAGNÓSTICO DE FEIXES PARA O CÍCLOTRON CV 28 DO IEN” (LEMOS, 2016).

RODA DEGRADADORA

A Roda Degradadora tem por objetivo proporcionar uma degradação sucessiva no feixe de forma a homogeneizar a atividade resultante na amostra e teve como base as seguintes premissas e restrições:

- Possibilitar uma degradação de forma a se obter uma variação de energia aplicada sobre a amostra.
- Permitir flexibilidade do estabelecimento desta variação.
- Possibilitar o manuseio de forma a expor as pessoas a menor exposição possível a partículas ionizantes
- Possibilitar sua construção com os recursos disponíveis no instituto. Principalmente os disponíveis na DDIRA – Divisão de Radiofármacos do IEN, isso limita entre outras coisas o diâmetro máximo da roda limitando assim o número de elementos degradadores possíveis.

A partir dessas premissas e restrições algumas decisões foram tomadas, entre elas utilizar Alumínio que além da leveza e disponibilidade apresenta baixas taxas de ativação e tempo de meia vida ($T_{1/2}$) baixos. Considerando a faixa de energia até 24 MeV, dentro das reações possíveis para o ^{27}Al as mais prováveis são as reações (p,n) e $(p,2n)$. Sendo:



A figura 8 apresenta os radioisótopos produzidos a partir destas reações com suas respectivas meias vidas ($T_{1/2}$).

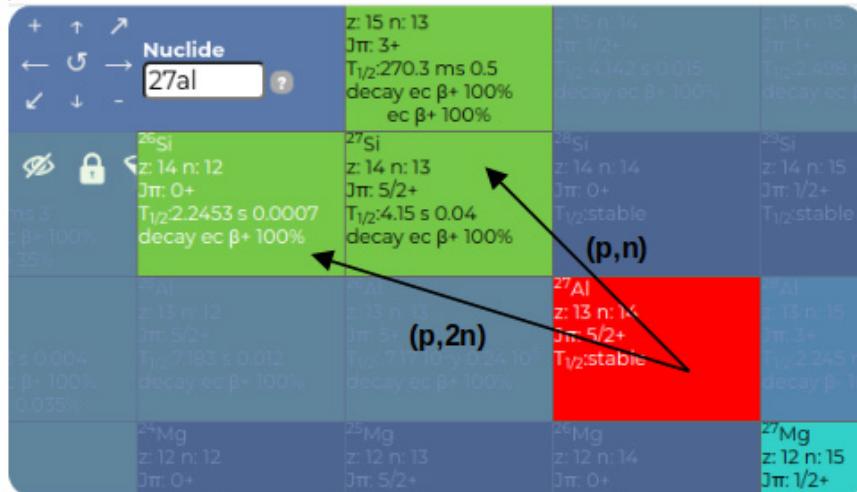


Figura 8: Radioisótopos produzidos a partir do ^{27}Al (IAEA - Live Chart of Nuclides)

O diâmetro máximo da roda não poderia exceder a 365 mm em função do diâmetro máximo usinável em nossa oficina e, a degradação deveria ser obtida através de palhetas cambiáveis na roda.

Dessa forma a roda foi concebida com um espaçador central em PVC, dois flanges, de entrada e saída, para acoplamento na linha de feixe, um rotor onde são fixadas por parafusos as palhetas de degradação do feixe, porém possibilitando a trocas das mesmas, permitindo várias configurações e, um mecanismo de acionamento, conforme desenho esquemático da figura 9.

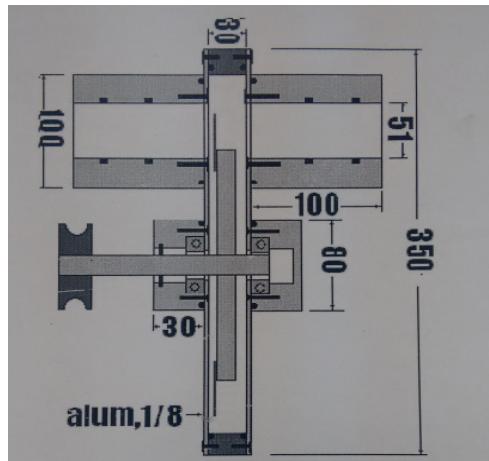


Figura 9: Desenho esquemático Roda de degradação

A roda pode ser montada à pressão atmosférica ou em vácuo uma vez que todos os seus elementos possuem anéis de vedação. As figuras 10 a 16 mostram o conjunto da roda e seus elementos construtivos.



Figura 10: Conjunto da Roda
Degradadora



Figura 11: Corpo da Roda -PVC



Figura 12: Flange de Entrada

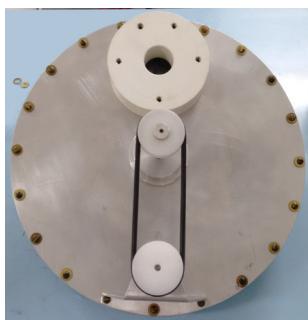


Figura 13: Flange de Saída



Figura 14: Rotor

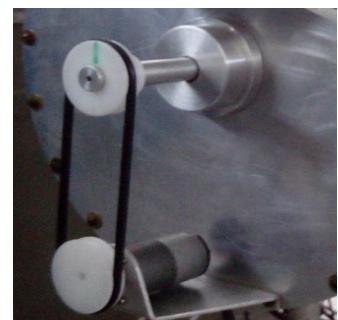


Figura 15: Acionador



Figura 16: Detalhe da chave de liberação do conjunto acionador

O mecanismo de acionamento é composto de um motor de corrente contínua de 12v e 3 rpm, conectado ao rotor por meio de duas polias acionadas por um anel “O”, adaptado como correia transmissora. Apresentado em detalhe na figura 15. Após a montagem efetuou-se 3 medições a fim de determinar a velocidade rotação real do conjunto estas medidas indicaram que o conjunto rotor efetua uma volta a cada 22 s, representando uma velocidade de 2,73 rpm.

O elemento rotativo permite a montagem de até 16 palhetas de espessura variada de 0,05 mm até 5 mm de espessura. A figura 17 e 18 mostram respectivamente o desenho das palhetas e o rotor com as palhetas montadas.

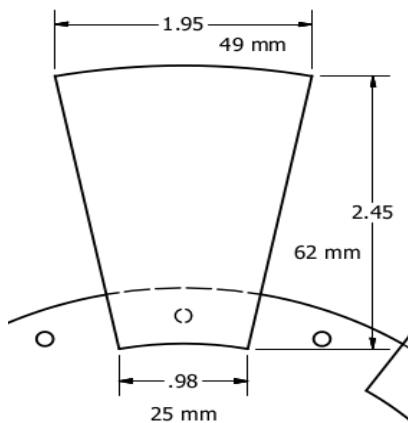


Figura 17: Palheta da Roda Degradaora



Figura 18: Rotor com palhetas montadas

DETERMINAÇÃO DA ESPESSURA DAS LÂMINAS

A determinação das espessuras das lâminas da roda degradadora, foi baseada no fato que tanto a Taxa de produção quanto o Poder de frenagem (“Stopping power”), são função da densidade do material. A partir dessa observação obteve-se os dados de Poder de frenagem (“Stopping power”), e Seção de Choque (“Cross section”), da qual a taxa de produção também depende, em função da energia do feixe para prótons em ^{56}Fe , para energias variando de 1 a 25 MeV, compatíveis com a energia máxima produzida pelo Cíclotron CV-28 do IEN para prótons, isto é, 24 MeV. Extraída do PSTAR, apresentados na tabela 6 e, representados nos gráficos das figuras 19 e 20, respectivamente.

PSTAR: Stopping Powers and Range Tables for Protons IRON				
Energia MeV	Poder de Frenagem Total. MeV.cm ² /g	Range g/cm ²	Seção de choque (mbarn)	Alcance (mm)
1,00	43040	0,00531	0	0,07
1,50	51290	0,00788	0	0,10
2,00	58200	0,01049	0	0,13
2,50	64290	0,01312	0	0,17
3,00	69790	0,01575	0	0,20
4,00	79570	0,02102	0	0,27
5,00	88210	0,02627	18	0,33
6,00	96040	0,03147	50	0,40
7,00	103300	0,03663	125	0,47
8,00	110000	0,04172	200	0,53
9,00	116300	0,04675	270	0,60
10,00	122300	0,05171	330	0,66
12,50	134500	0,06389	390	0,81
15,00	145300	0,07579	280	0,97
17,50	155000	0,08741	118	1,11
20,00	164000	0,09876	58	1,26
22,50	172200	0,10990	36	1,40
25,00	179900	0,12070	21	1,54

Tabela 6: Poder de frenagem e “Range” para prótons em ^{56}Fe

Seção de choque (Cross Sectino) Proton em 56Fe

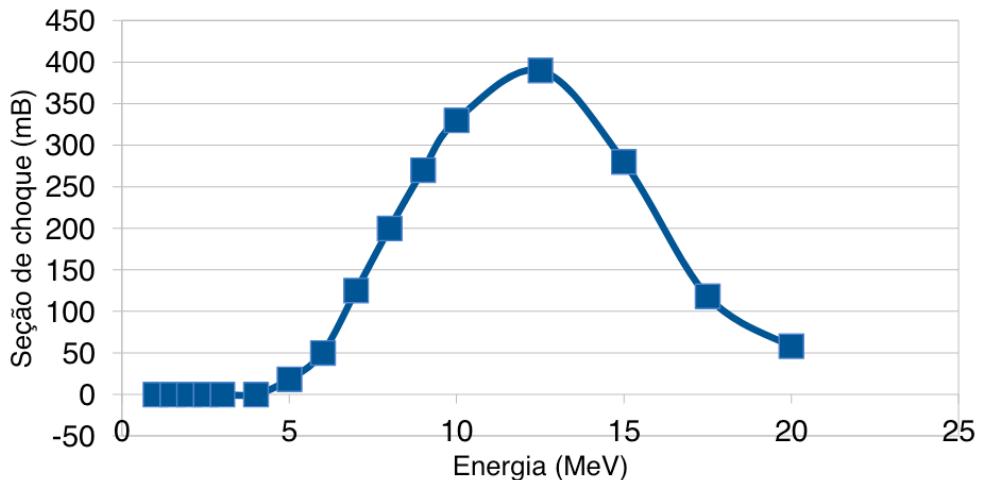


Figura 19: Seção de Choque - próton em 56Fe

Poder de frenagem (Stopping power) Proton em 56Fe

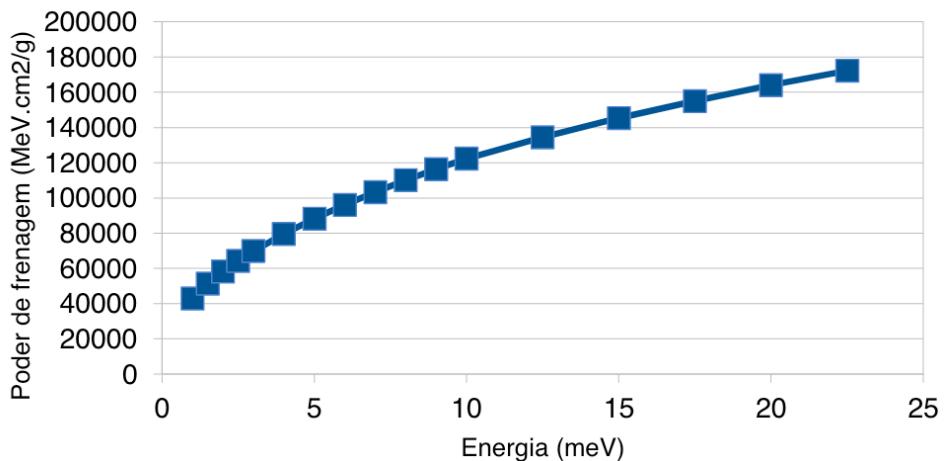


Figura 20: Poder de Frenagem - Próton em 56Fe

Em seguida calculou-se o alcance do feixe para cada uma das energias selecionadas, associando-os com a seção de choque (“Cross section”), também apresentado na tabela 6. Obteve-se então o gráfico seção de choque (“Cross section”) em função o alcance

apresentado no gráfico da figura 21, que por sua vez é proporcional a atividade produzida na amostra.

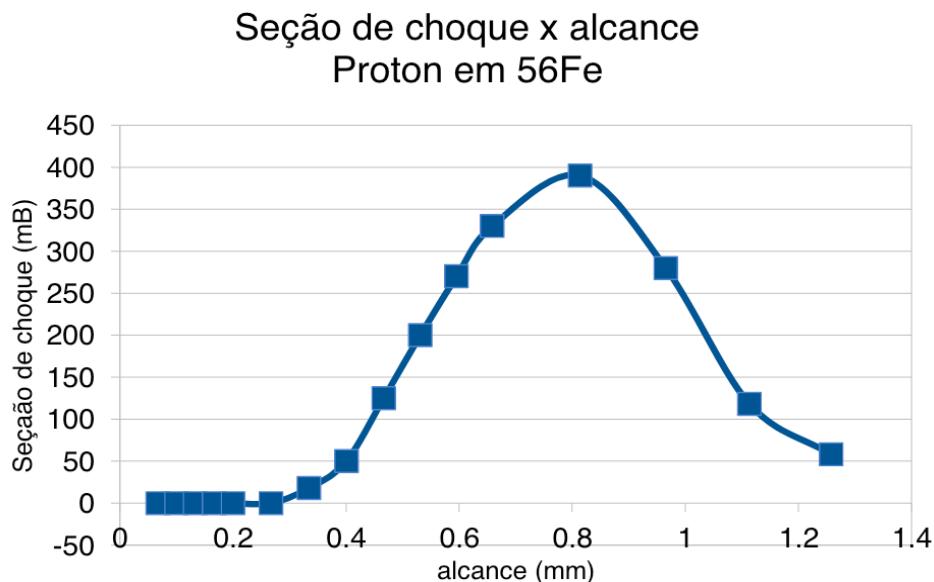


Figura 21: Seção de Choque x Alcance - Prótons em ^{56}Fe

A partir dessa relação distribuiu-se as Seções de choque (“Cross section”) por espessura para cada energia incidente na amostra, obtendo-se a tabela 7, mostrada em sequência. Em seguida obteve-se o somatório das Seções de choque (“Cross section”), de cada distribuição obtendo-se uma Atividade Relativa total teórica ao longo da espessura da amostra, proporcional a atividade total, apresentados no gráfico da figura 22

Distribuição teórica das lâminas														
Alcance (mm)	Lâminas	0,00	0,20	0,40	0,63	0,85	1,09	1,33	1,43	1,54	1,65	1,76	1,88	Σ Atividade Relativa
	Energia	25,00	22,50	20,00	17,50	15,00	12,50	10,00	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	
0,00		21	36	58	118	280	390	330	270	200	125	50	18	1896
0,07		36	58	118	280	390	330	270	200	125	50	18		1875
0,10		58	118	280	390	330	270	200	125	50	18			1839
0,13		118	280	390	330	270	200	125	50	18				1781
0,17		280	390	330	270	200	125	50	18					1663
0,20		390	330	270	200	125	50	18						1383
0,27		330	270	200	125	50	18							993
0,33		270	200	125	50	18								663
0,40		200	125	50	18									393
0,47		125	50	18										193
0,53		50	18											68
0,60		18												18
0,66														0
0,81														
0,97														
1,11														
1,26														
1,40														
1,54														

Tabela 7: Distribuição das Lâminas e Atividade relativa total - teóricas

Atividade Relativa Total - teórica Distribuição teórica das lâminas

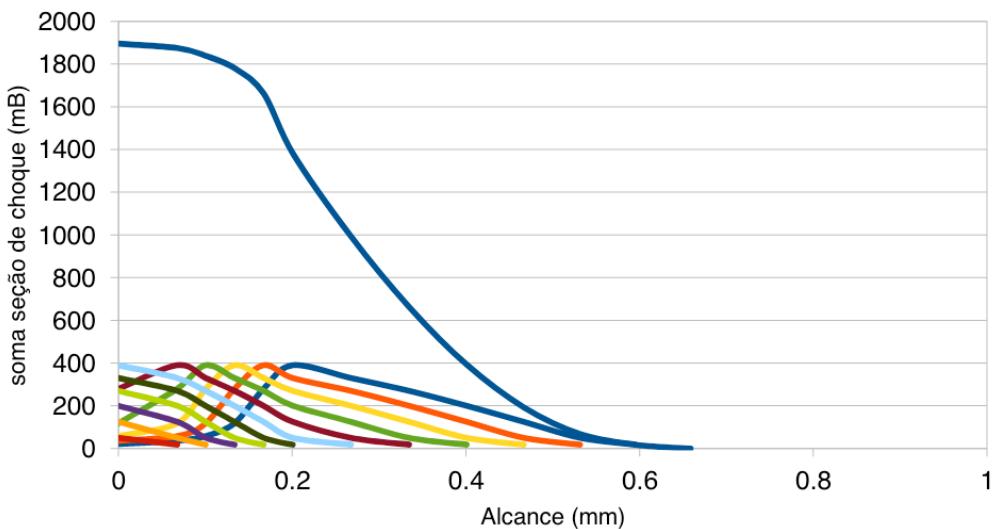


Figura 22: Atividade Relativa Total - Teórica

Como para a composição das rodas havia disponível uma fita calibrada de alumínio de 0,25 mm de espessura, decidiu-se aplicar esta variação por lâmina, de forma que a roda seria montada com lâminas de 0,25, 0,5, etc. até 2,75 mm.

Observe-se que as estimativas foram efetuadas, tomando como base 12 lâminas, com exposições idênticas, isto é, sem fator de correção para o tempo de exposição. Como a roda possui 16 posições, as 4 posições não utilizadas foram preenchidas com lâminas alumínio de 3 mm de espessura de forma a bloquearem o feixe, evitando assim a interferência nos resultados.

Uma vez tomada essa decisão fez-se uma nova distribuição, utilizando-se interpolação linear, a partir das novas lâminas novos valores de energia, seção de choque e alcance. Estes novos valores produziram novas distribuições, apresentadas na tabela 8 e representados no gráfico da figura 23.

Distribuição real das lâminas														
Alcance interpolado	Lâminas	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50	2,75	Σ Atividade Relativa
	Energia	25,00	18,40	16,56	14,71	12,81	10,87	8,87	7,37	6,15	5,12	4,22	3,41	
0,00		21	29	48	99	239	293	221	154	91	35	12		1242
0,08		29	48	99	239	293	221	154	91	35	12			1221
0,12		48	99	239	293	221	154	91	35	12				1192
0,17		99	239	293	221	154	91	35	12					1144
0,21		239	293	221	154	91	35	12						1045
0,27		293	221	154	91	35	12							806
0,35		221	154	91	35	12								513
0,45		154	91	35	12									292
0,54		91	35	12										138
0,65	Atividade Relativa	35	12											47
0,76		12												12
0,90														0
1,06														0
1,25														0
1,43														0
1,60														0
1,75														0
1,90														0
2,53														0

Tabela 8: Distribuição das Lâminas e Atividade relativa total - reais

Atividade Relativa Total - Teórica Interpolada Distribuição real das lâminas

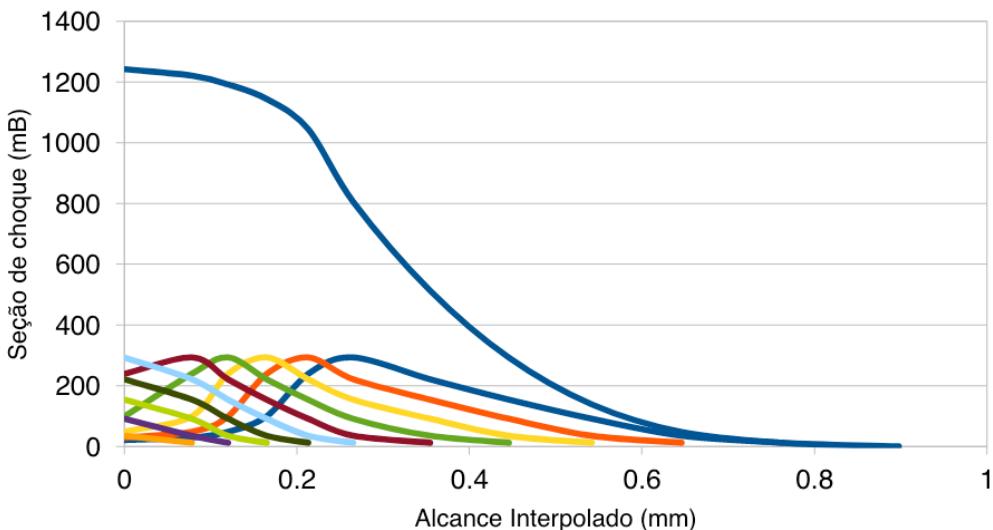


Figura 23: Atividade Relativa Total - Teórica Interpolada

MONTAGEM DA RODA

A aplicação da roda degradadora foi efetuada na linha 2, do Cíclotron CV-28 do IEN, esta linha preparada com o objetivo de ser uma linha multipropósito, possibilitando a retomada das pesquisas em técnicas nucleares no IEN, seu desenvolvimento é foco do trabalho “PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE IRRADIAÇÃO MULTIPROPÓSITO COM DIAGNÓSTICO DE FEIXES PARA O CÍCLOTRON CV 28 DO IEN” (LEMOS, 2016). Sendo este trabalho sua primeira aplicação prática.

A roda foi instalada diretamente no carretel do porta alvo, exatamente onde inicialmente era montado o porta alvo. Optamos por fazer a instalação sem vácuo, por considerarmos a situação mais crítica em relação a degradação de energia, pois incluímos, neste caso, a perda pelas colisões com o ar em toda extensão da roda até o alvo. Como este também diretamente a roda, as amostras também ficaram expostas às condições ambientes. A figura 24 apresenta a linha 2 antes da montagem da roda e a figura 25 a roda instalada nessa linha.

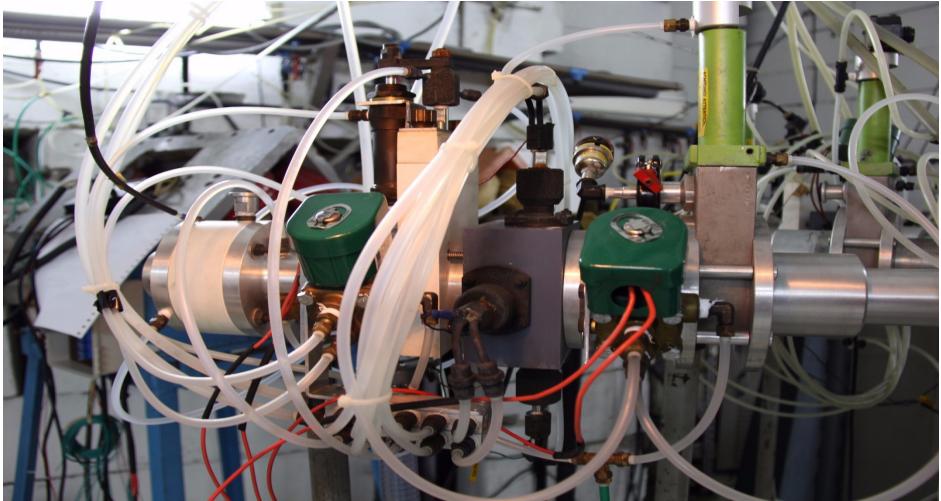


Figura 24: Linha 2 do CV28 - Sem a roda degradadora.



Figura 25: Roda instalada la linha 2

AJUSTE DO FEIXE

Os parâmetros e ajustes do feixe foram determinados no trabalho - intitulado “PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE IRRADIAÇÃO MULTIPROPÓSITO COM DIAGNÓSTICO DE FEIXES PARA O CÍCLOTRON CV 28 DO IEN” (LEMOS, 2016), ficando apenas a corrente no alvo e o tempo de irradiação a ser determinado. Mesmo estes foram definidos em função da atividade final obtida naquele estudo. As tabelas 9 e 10 apresentam os parâmetros utilizados nos feixes das amostras 1 e 2 respectivamente.

Dados de produção do Feixe – Amostra 1										
Nº do feixe:	6507	Operador:	João Fco O. Antunes			Data:	12/05/2016			
Radio Frequência (RF)										
Frequência [Mhz]	V (D's) [KV]	V (Anodo) [KV]	V (Catodo) [KV]	Vdc [KV]	Idc [A]					
25, 4	27,0	16,5	1,4	7,5	4,0					
Polarização do D's						V [KV]	A [mA]			
						2,5	1,2			
Dial Anodo	Cap. Anodo	Cap. Catodo	Limiar Aceleração							
622	878	1003	25,4							
Sistema de Magnetização						Bobinas Harmonias				
Bobina	Polarização	V [mV]	A [mA]	Internas		Externas				
Principal (main)	(+)	1585	323	X	160	X	213			
Perfil 1	(-)	---	---	Y	-121	Y	-617			
Perfil 2	(+)	50	17							
Perfil 3	(-)	461	232							
Perfil 4	(+)	---	---							
Fonte de Íons			Sistema de Extração (Defletor)							
V (arco) [V]	A (arco) [mA]	P(câmera) [mm Hg]	V [KV]	A [mA]	Abertura [%]	Entrada [%]	Saída [%]			
39			0,6	46	6	46				
320	380	1,1 10 ⁻⁵	Canal magnético (%)					2,5		
Dados do Sistema de Transporte										
Distribuidor				Quadripolo 1						
A 12"	Dial Grosso	Dial Fino	Pol. [N/R]	Fonte 1			Fonte 2			
				A [A]	Dial	Polaridade [N/R]	A [A]	Dial	Pol. [N/R]	
67,53										
67,53	377	808	N	12	500	N	11	345	N	
Imã Direcionador										
A [A]		Direção [E/D]			A [A]		Direção [C/B]			
-1,8		E			- 2,4		C			
Dados do Feixe										
A 12" [A]	Extração		Lp1	Lp 2	Ls 22	Alvo	Hora Início	Hora Fim	Carga Integrada	
	A R _{ext} [A].	R _{ext}								
1,25	1,2	16,19	1,0		0,7	0,5	12:54	13:52	1816	

Tabela 9: Parâmetros do feixe - Amostra 1

Dados de produção do Feixe - Amostra 2												
Nº do feixe:	6517	Operador:	João Fco O. Antunes		Data:	19/05/2016						
Radio Frequência (RF)												
Frequência [Mhz]	V (D's) [KV]	V (Anodo) [KV]		V (Catodo) [KV]		Vdc [KV]	Idc [A]					
25,45	26,0	16,0		1,5		8	4,2					
Polarização do D's						V [KV]	A [mA]					
						2,5	1.2					
Dial Anodo	Cap. Anodo	Cap. Catodo	Limiar Aceleração									
512	879	1002	25,4									
Sistema de Magnetização						Bobinas Harmonias						
Bobina	Polarização	V [mV]	A [mA]	Internas		Externas						
Principal (main)	(+)	1590	324	X	190	X	212					
Perfil 1	(-)	---	---	Y	- 119	Y	-604					
Perfil 2	(+)	53	18									
Perfil 3	(-)	472	236									
Perfil 4	(+)	---	---									
Fonte de Íons			Sistema de Extração (Defletor)									
V (arco) [V]	A (arco) [mA]	P(câmara) [mm Hg]	V [KV]	A [mA]	Abertura [%]	Entrada [%]	Saída [%]					
			39	0,6	46	6	50					
300	400	$1,3 \cdot 10^{-5}$	Canal magnético (%)				2,5					
Dados do Sistema de Transporte												
Distribuidor			Quadripolo 1									
A [A]	Dial Grosso	Dial Fino	Pol. [N/R]	Fonte 1			Fonte 2					
				A [A]	Dial	Polaridade [N/R]	A [A]	Dial	Pol. [N/R]			
66,93	373	922	N	11,0	500	N	10,5	345				
Imã Direcionador												
A [A]		Direção [E/D]		A [A]		Direção [C/B]						
-1,1		E		-2,4		C						
Dados do Feixe												
A 12" [A]	Extração		Lp1	Lp 2	Ls 22	Alvo	Hora Início	Hora Fim				
	A R _{ext} [A]	R _{ext}										
3,2	2,2	16,18	1,0	1,0	1,0	0,5	14:23	15:50				
								1835				

Tabela 10: Parâmetros do feixe - Amostra 2

POR TA ALVO

O porta alvo foi o mesmo utilizado em Lemos (2016), acoplado diretamente à roda, para isso foi elaborado um adaptador em PVC, a fim de possibilitar a montagem e proporcionar isolamento elétrico para permitir a medição da corrente no alvo. A figura 27 e 26, mostram a montagem do porta alvo na roda. O porta alvo possui um colimador removível de 10 mm de diâmetro que garante a incidência do feixe no centro da amostra, apresentado na figura 28.

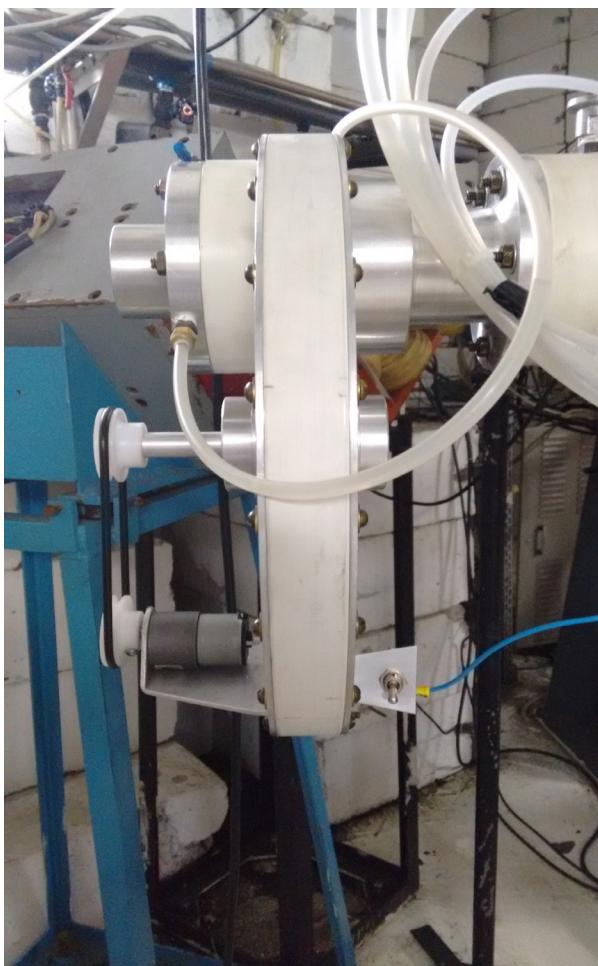


Figura 26: Montagem do Porta Alvo - Vista Lateral

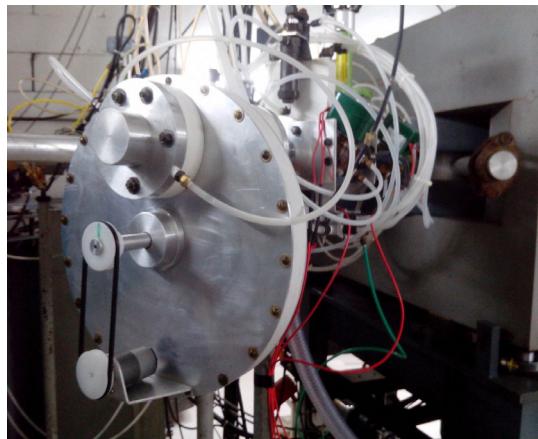


Figura 27: Montagem do Porta Alvo - Vista Traseira



Figura 28: Porta alvo com colimador

Para manter as lâminas do alvo compactas, simulando uma peça rígida, foi confeccionado um espaçador em teflon de 1,5 mm de espessura montado entre o colimador e as lâminas da amostra, conforme mostrado na figura 29.

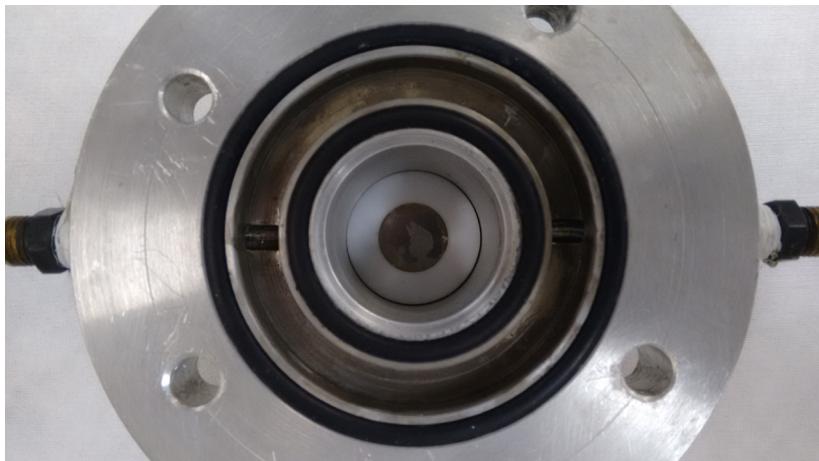


Figura 29: Espaçador das amostras

ALVO – LÂMINAS DE AÇO

De forma a garantir a precisão na medição da atividade ao longo da espessura da amostra, utilizamos lâminas calibradas de aço inoxidável AISI 304 de 0,1 mm (100 μm) de espessura, cuja composição foi apresentada na tabela 11, montadas na forma de um pacote compacto simulando um material maciço.

Composição Química (%)								
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Outros
AISI 304	0,08	2,00	1,00	0,045	0,030	18,00	8,00	

Tabela 11: Composição Química – AISI304

METODOLOGIA DA PRÁTICA EFETUADA

Para avaliar o efeito da roda degradadora sobre a ativação da camada da amostra, foram preparados dois conjuntos de 14 lâminas numeradas em Hexadecimal de 1 a E, denominados Amostra 1 e Amostra 2. Cada conjunto de lâminas foi inserido no porta alvo sendo que a primeira lâmina inserida foi a numerada com o número E_(Hex) e a última a de número 1_(Hex) de forma que esta última, de número 1_(Hex), fosse a lâmina mais exposta ao feixe de íons.

A primeira amostra foi submetida a ação direta do feixe de íons, e a segunda

irradiada com a interposição da roda degradadora entre o feixe e a amostra. Para cada uma das amostras foram efetuadas medidas para cada uma das lâminas utilizando-se um detector HPGe. Foram levantados a área e o erro do foto pico de interesse (energia de 847 KeV), cuidando-se para que o tempo morto da contagem, e consequentemente seu erro estatístico fosse da ordem de 3 % para as lâminas mais ativadas.

IRRADIAÇÃO DAS AMOSTRAS

O primeiro jogo de lâminas – Amostra 1, foi submetido ao feixe direto, sem roda degradadora, para isso a roda foi posicionada de forma a alinhar a posição sem palhetas (vazia) com o tubo da linha. A chave de liberação do sistema de giro da roda foi posicionada em “desligada”, impossibilitando que acidentalmente a fonte de alimentação do motor da roda fosse acionado. Abaixo seguem os parâmetros de ativação da amostra:

- Data da irradiação: 12/05/2016
- Corrente máxima: $0,5 \mu\text{A}$
- Tempo de irradiação: 60 min
- Carga integrada: 1800 contagens
- Ângulo de incidência do feixe (Θ): 90°

Para o segundo jogo de lâminas – Amostra 2, a roda também foi posicionada inicialmente de forma a alinhar o tubo da linha a posição vazia da roda, a chave de liberação do sistema de giro da roda foi posicionada “ligada” para esta começasse a girar assim que a fonte de alimentação do motor fosse ligada. Inicialmente o alvo foi submetido ao feixe direto até que a corrente máxima estipulada ($0,5 \mu\text{A}$) fosse estabelecida, a partir da fonte de alimentação do motor da roda foi ligada acionando o motor. O funcionamento da roda foi atestado pela variação da corrente no alvo desde o seu valor máximo até 0 e novamente ao máximo à medida que as diversas palhetas se interpunham ao feixe. O tempo de duração do feixe foi determinado pela carga integrada de modo a que a carga integrada das duas amostras fossem equivalentes.

- Data da irradiação: 19/05/2016
- Corrente máxima: $0,5 \mu\text{A}$
- Tempo de irradiação: N/A
- Carga integrada: 1800 contagens
- Ângulo de incidência do feixe (Θ): 90°

RECUPERAÇÃO DAS AMOSTRAS IRRADIADAS E MEDAÇÃO

Após cada uma das irradiações as amostras foram recuperadas e levadas para medição em um detector de Germânio hiperpuro HpGe, calibrado com uma fonte de ^{152}Eu com atividade de 53,141 kB em 27/05/2002, acoplado a um coletor multicanal e um software aquisição de análise para emissão gama, descritos a seguir:

- Detector: Canberra GC 2518
- Multicanal: Canberra Multiport II
- Software: Genie 2000 versão 3.2.1 – 26/8/2009
- Hardware: HP Compaq 8100 – Windows 7 pro – 32 bits

A figura 30 apresenta imagem do sistema de aquisição e análise de emissões gama.

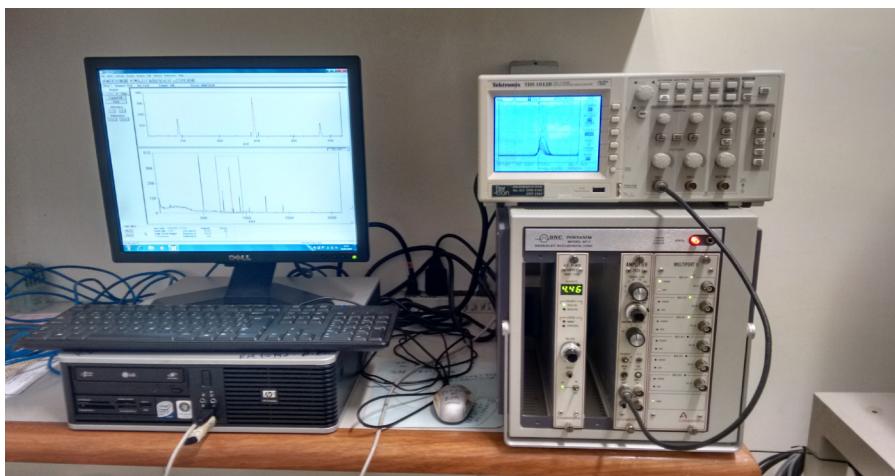


Figura 30: Sistema de aquisição e análise de emissões gama

RESULTADOS DAS MEDIÇÕES

A fim de se obter a atividade obtida ao longo da espessura da amostra foi efetuada a medição em cada uma das lâminas isoladamente, da mais exposta ao feixe ($01_{(\text{Hex})}$) até a menos exposta ($E_{(\text{Hex})}$). As figuras 31 e 32 apresentam as amostras recuperadas antes de cada leitura.

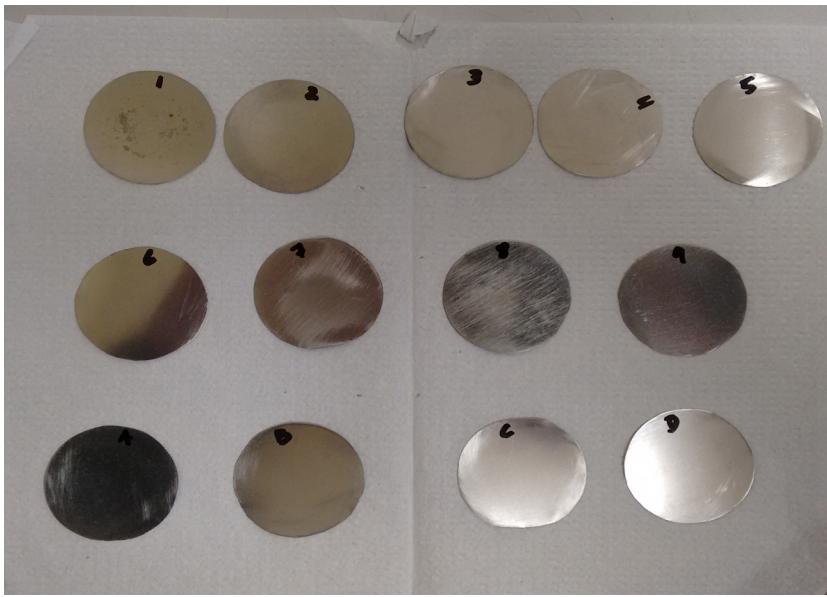


Figura 31: Lâminas da Amostra 1



Figura 32: Lâminas da Amostra 2

Para possibilitar a medição das lâminas foi utilizado um dispositivo em acrílico adaptado ao corpo da blindagem apoiando cada lâmina e garantindo a mesma geometria de medição. A figura 33 mostra a uma das lâminas colocadas no dispositivo.

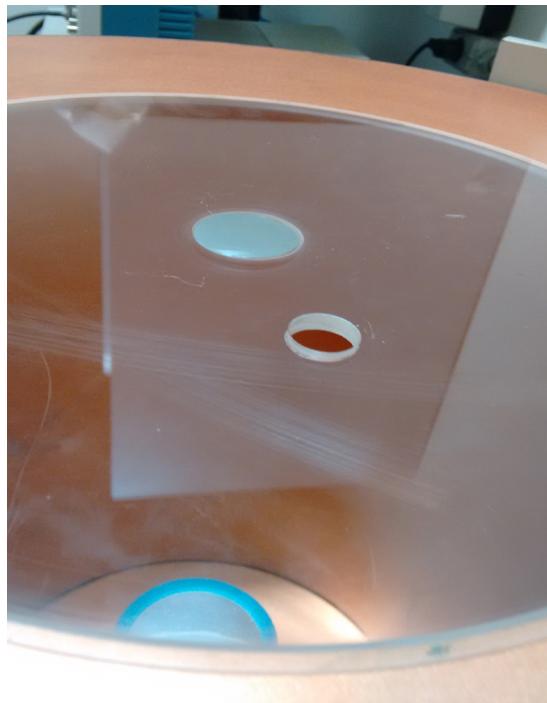


Figura 33: Dispositivo de acrílico para garantir a geometria da medição com uma lâmina montada.

Na medição da lâmina 08_(Hex) verificou um valor de atividade muito baixo, na lâmina 09_(Hex) constatou-se situação semelhante, sendo assim decidiu-se efetuar a medição das lâminas de A_(Hex) a E_(Hex) em um único bloco. Este procedimento foi repetido para o jogo de lâminas da Amostra 2, pois tivemos comportamento similar durante a medição. As tabelas 12 e 13, mostram os resultados da medição efetuada em cada uma das amostras.

Medição efetuada na Amostra 1 - raio gama de 847 keV			
Data da medição		19/05/2016	
Distância fonte detector = 40 cm		Tempo de contagem = 600 s	
Lâmina	Profundidade	Atividade (área)	Erro (%)
1	0,1	1000	03,31
2	0,2	1456	02,82
3	0,3	2333	02,17
4	0,4	3121	01,87
5	0,5	3291	01,81
6	0,6	2548	02,06
7	0,7	1015	3,27
8	0,8	9	40,84
9	0,9	3	96,45
A → E	1,4	4	50,00

Tabela 12: Dados da medição - Amostra 1

Medição efetuada na Amostra 2 - raio gama de 847 keV			
Data da medição		27/05/2016	
Distância fonte detector = 40 cm		Tempo de contagem = 600 s	
Lâmina	Profundidade	Atividade (área)	Erro (%)
1	0,1	1763	02,49
2	0,2	1742	02,47
3	0,3	1709	02,50
4	0,4	1541	02,62
5	0,5	1120	03,11
6	0,6	655	04,03
7	0,7	230	06,76
8	0,8	4	50,00
9	0,9	2	41,00
A → E	1,4	4	50,00

Tabela 13: Dados da medição - Amostra 2

Na sequência são apresentados exemplos dos espectros de radiação gama obtidos nas lâminas nº 1, de cada uma das amostras. Figuras 34 e 35 respectivamente.

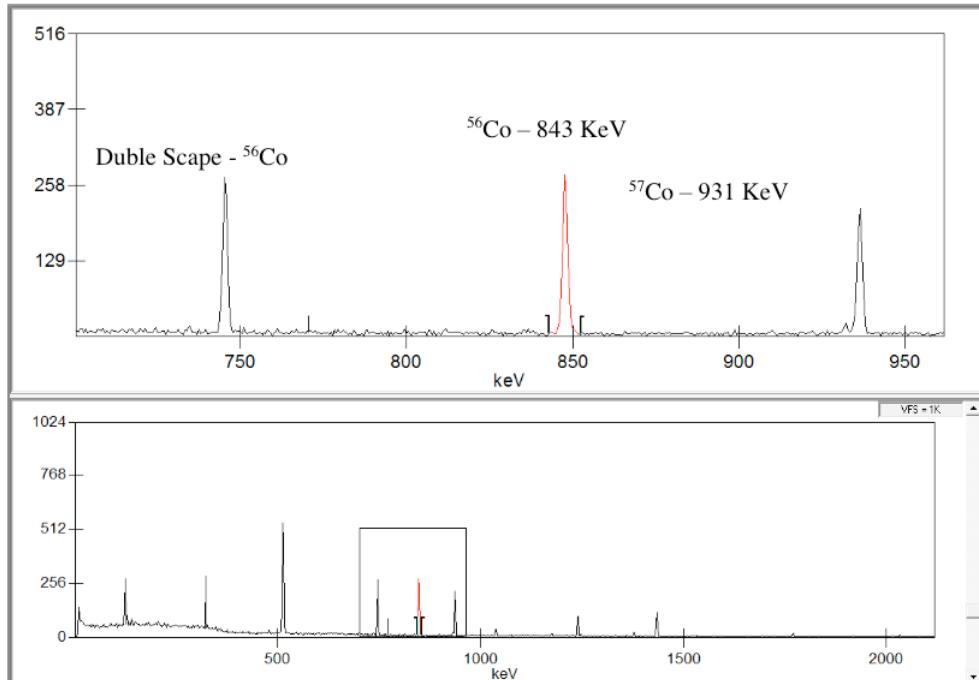


Figura 34: Espectro de radiação - Lâmina 1, Amostra 1

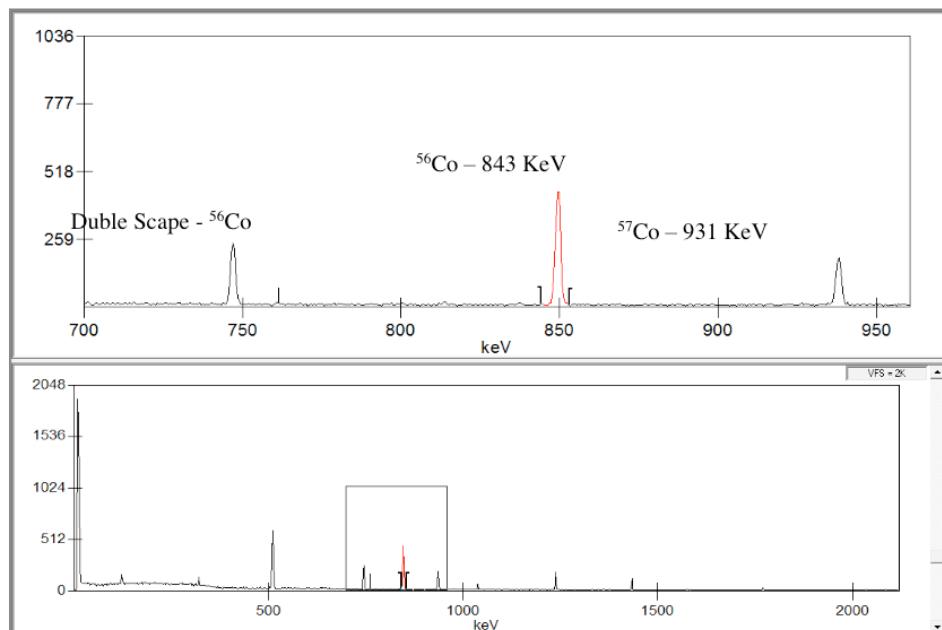


Figura 35: Espectro de radiação - Lâmina 1, Amostra 2

RESULTADOS

APARÊNCIA DAS AMOSTRAS

A inspeção visual das amostras, demonstra pela marca deixada pela interação do feixe com as lâminas número 1 de ambas as amostras, ver figuras 31 e 32, podemos verificar que o feixe incidiu de forma bem centralizada validando os ajustes do feixe e a função do colimador do porta alvo.

A marca mais evidente da lâmina 1 da Amostra 2, se deve provavelmente ao maior tempo de irradiação desta amostra a fim de se obter uma carga integrada equivalente em ambas as amostras e, resíduos provenientes da deterioração do anel de vedação do colimador.

TRATAMENTO DOS DADOS

Conforme apresentado anteriormente a determinação do desgaste utilizando a técnica de TLA, compara a medida da atividade restante na peça (medição direta) ou a atividade correspondente a porção desgastada (medição indireta) com uma curva de calibração previamente estabelecida, calculada a partir da integração dos valores de atividade obtidos numa amostra. Em ambos os casos a curva resultante apresentará os mesmos valores para os mesmos pontos alterando apenas o sinal do coeficiente de inclinação das retas tangentes.

Os gráficos das figuras 36 e 37 apresentam distribuição da atividade ao longo da espessura da amostra para as amostras 1 e 2 respectivamente. Podemos observar de imediato que a amostra 2 apresenta uma região de atividade mais homogênea até uma profundidade de 0,3 mm, representada pela região plana do gráfico. Já demonstrando a capacidade de distribuir de forma homogênea a atividade na amostra pela aplicação da roda na degradação do feixe.

Atividade por Espessura Amostra 1

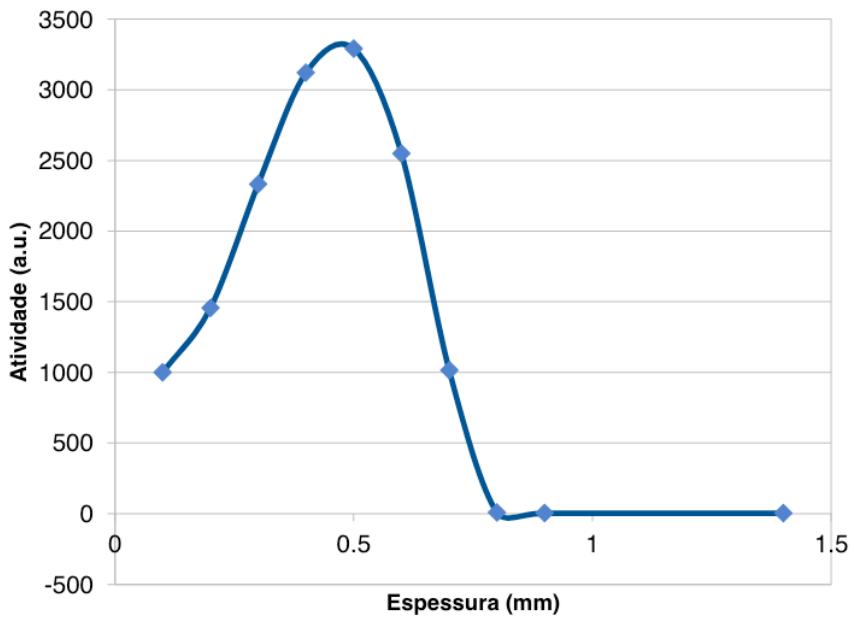


Figura 36: Atividade por espessura – Amostra 1

Atividade por Espessura Amostra 2

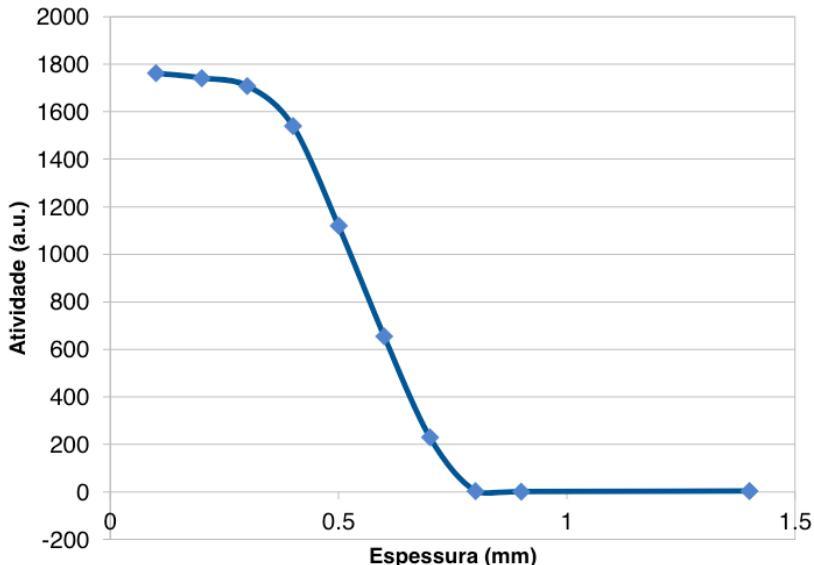


Figura 37: Atividade por espessura - Amostra 2

Em seguida determinou-se a integração das medidas ao longo da espessura. Os gráficos das figuras 38 e 39 apresentam a curva resultante desta integração.

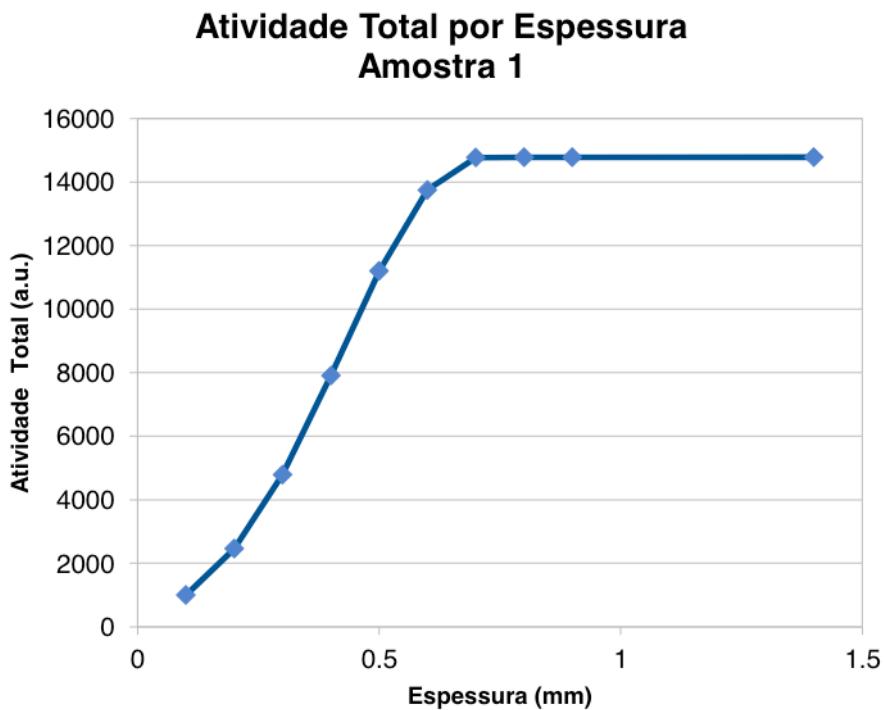


Figura 38: Atividade Total por Espessura - Amostra 1

Atividade Total por Espessura Amostra 2

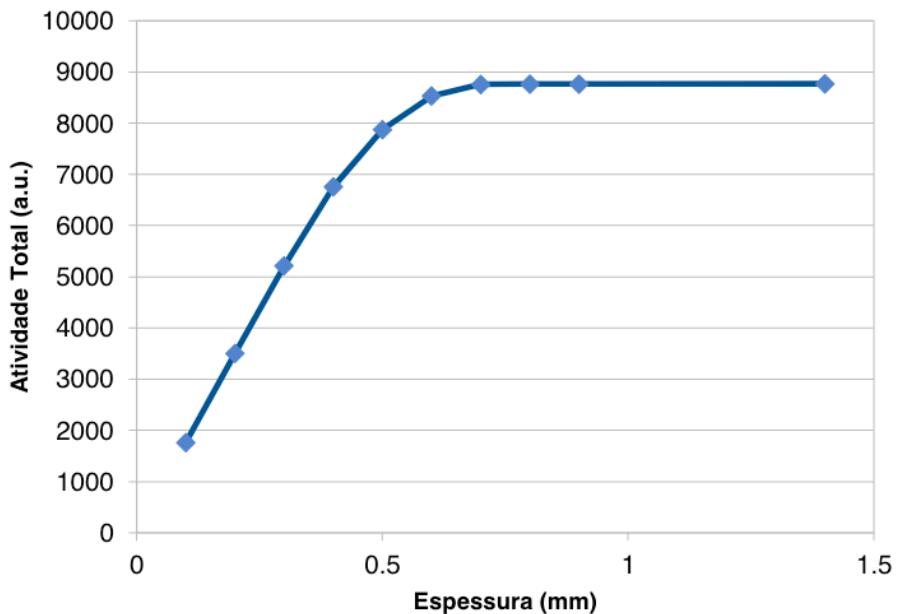


Figura 39: Atividade Total por Espessura - Amostra 2

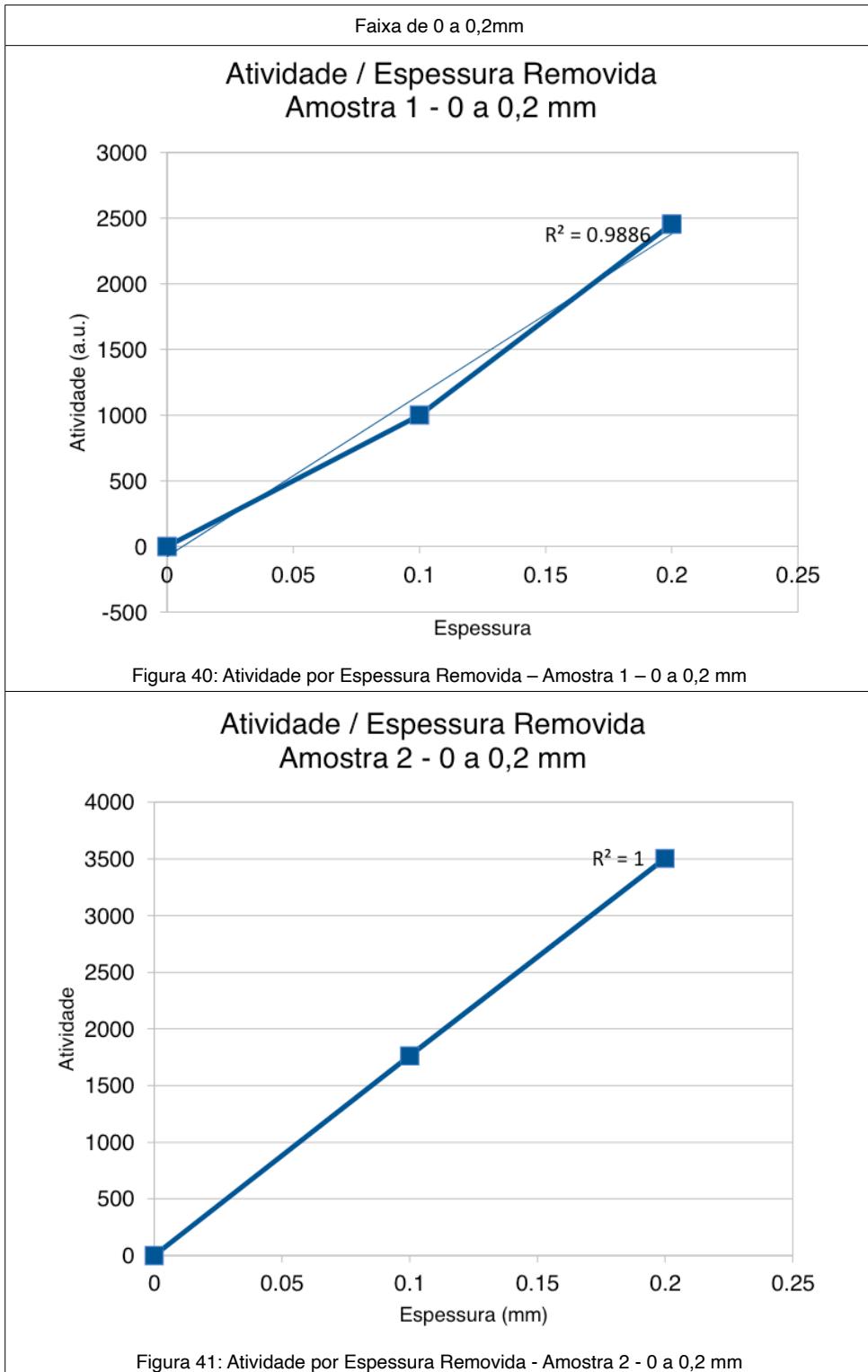
Primeiramente foi possível estabelecer a faixa de análise de 0 a 0,7 mm de espessura para ambas as amostras. Numa primeira comparação entre os gráficos das figuras 38 e 39 podemos observar uma maior tendência à reta da curva da Amostra 2, irradiada com a utilização da roda. A partir dessa observação comparou-se as curvas em faixas de 0,2 a 0,7 mm com incrementos de 0,1 mm, isto é, a cada lâmina acrescentada, a fim de verificarmos o quanto cada curva se aproxima de uma reta. Assim, comparou-se a cada faixa o coeficiente de determinação R^2 de cada gráfico. A seguir apresentamos os gráficos para cada faixa estabelecida. A tabela 14 apresenta a comparação entre os coeficientes referentes às duas amostras.

Intervalo da espessura amostrado	Coeficiente de determinação R ²	
	Amostra 1	Amostra 2
0 a 0,2 mm	0,98864	0,99999
0 a 0,3 mm	0,96507	0,99995
0 a 0,4 mm	0,95323	0,99935
0 a 0,5 mm	0,95753	0,99498
0 a 0,6 mm	0,97077	0,98240
0 a 0,7 mm	0,97818	0,95716

Tabela 14: Coeficientes de determinação das retas - Amostras 1 e 2

Os gráficos a seguir mostram as curvas de cada uma das amostras para cada faixa, contendo o coeficiente de determinação R² de ambas as amostras. Podemos observar que os coeficientes das curvas relativas a Amostra 2, no intervalo de 0 a 0,5 mm apresentam-se próximos a 1, caracterizando uma curvatura próxima a de uma reta. Na faixa de 0 a 0,6 mm a curva da Amostra 2 ainda apresenta um coeficiente mais próximo a 1 em relação a curva da Amostra 1.

Apenas na faixa de 0 a 0,7 mm a curva da Amostra 1 apresenta coeficiente de determinação R² mais próximo a 1 em relação a Amostra 2, porém claramente nessa faixa, não se caracteriza uma reta, esse fato se dá apenas pela compensação dos índices nas metades da curva da Amostra 1.



Faixa de 0 a 0,3 mm

Atividade / Espessura Removida Amostra 1 - 0 a 0,3 mm

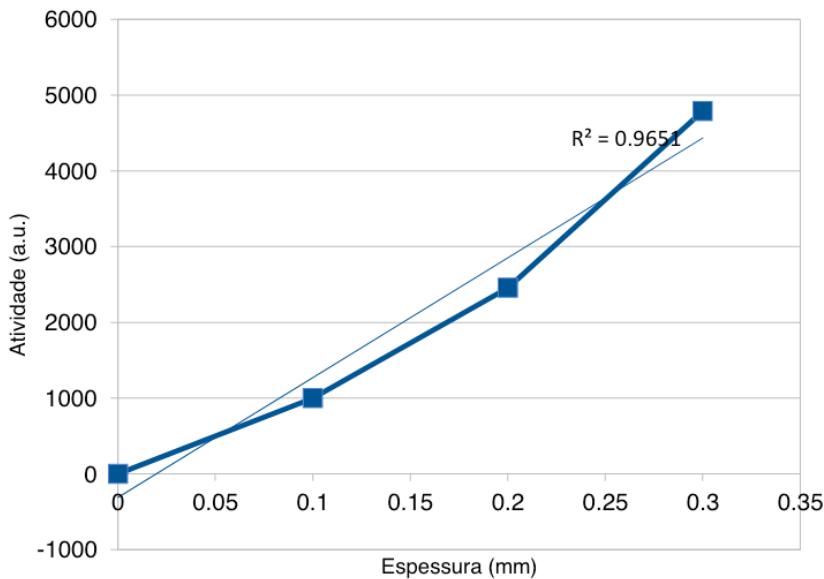


Figura 42: Atividade por Espessura Removida - Amostra 1 - 0 a 0,3 mm

Atividade / Espessura Removida Amostra 2 - 0 a 0,3 mm

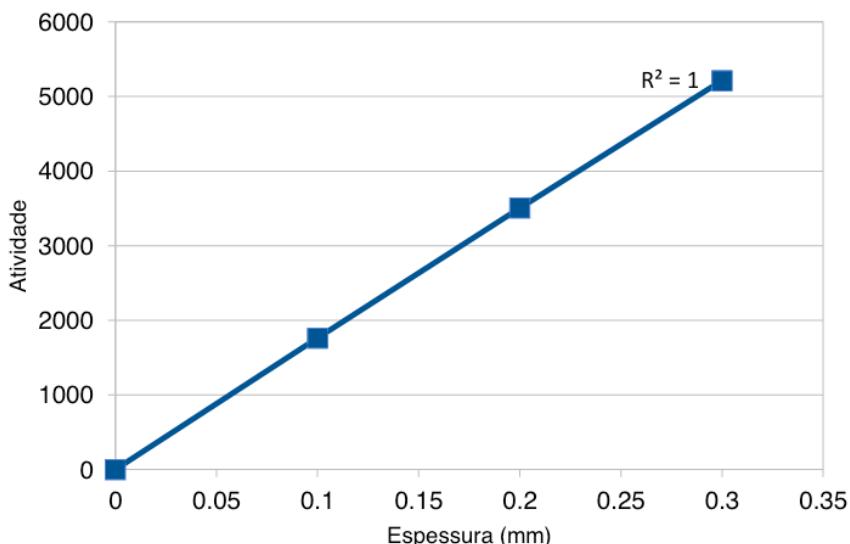


Figura 43: Atividade por Espessura Removida - Amostra 2 - 0 a 0,3 mm

Faixa de 0 a 0,4mm

Atividade / Espessura Removida Amostra 1 - 0 a 0,4 mm

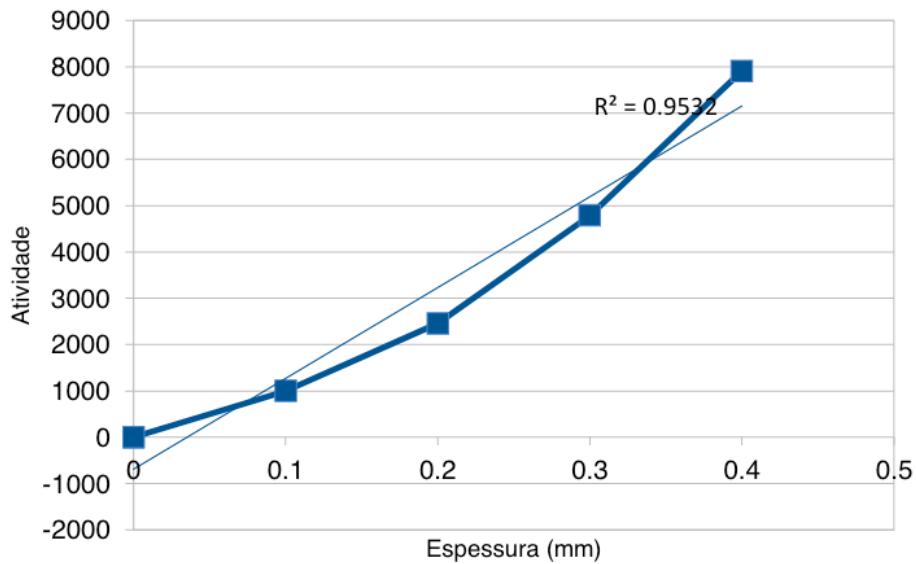


Figura 44: Atividade por Espessura Removida - Amostra 1 - 0 a 0,4 mm

Atividade / Espessura Removida Amostra 2 - 0 a 0,4 mm

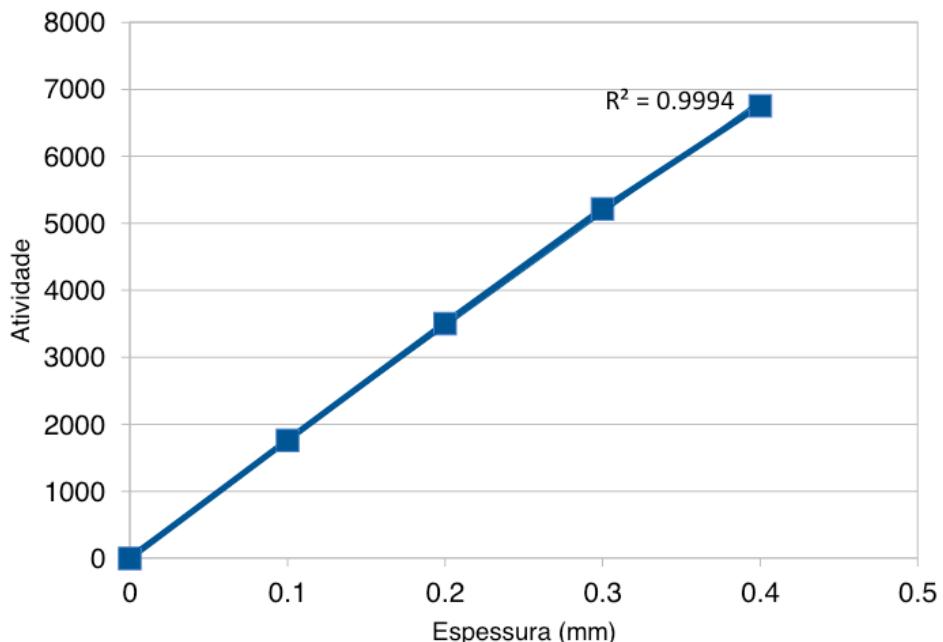
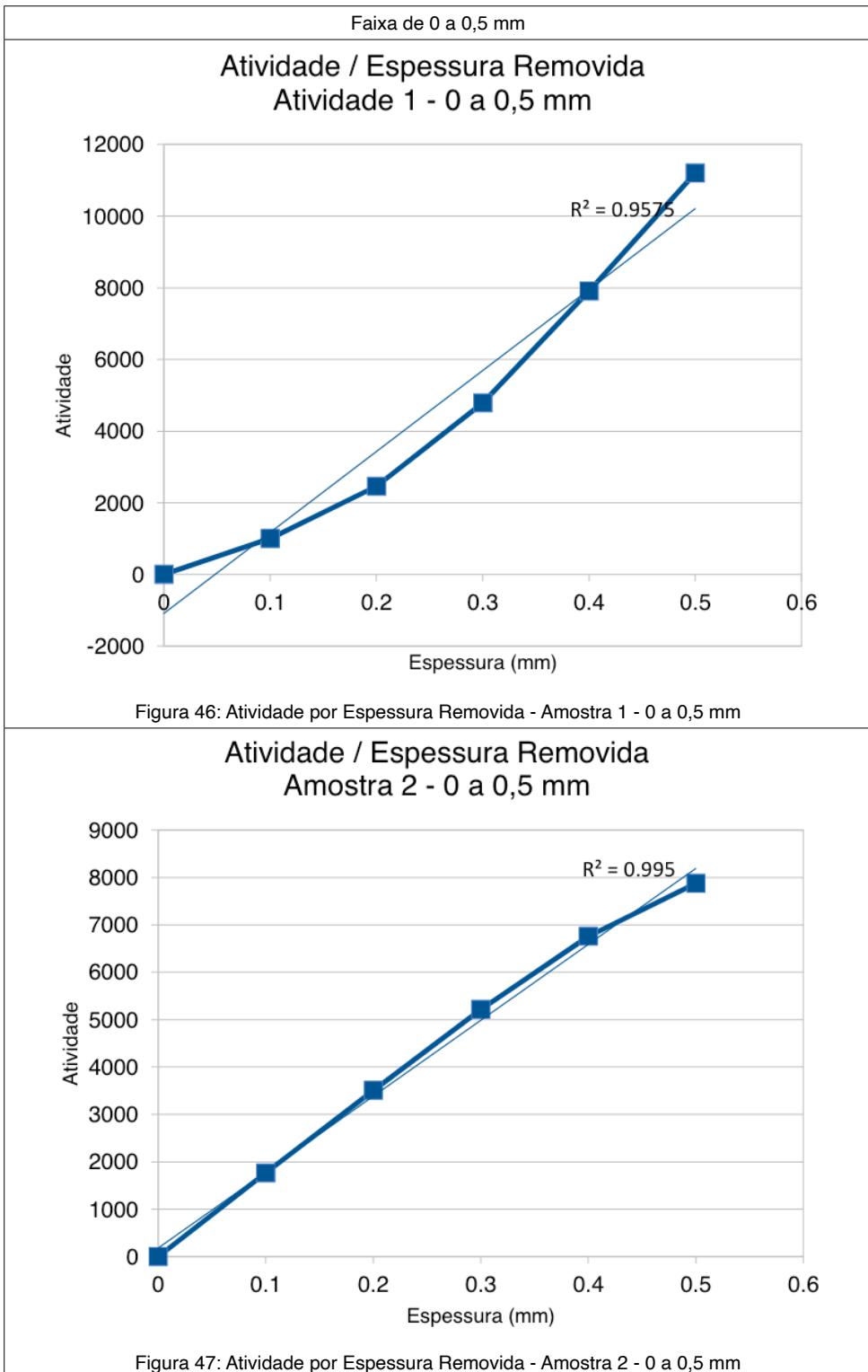


Figura 45: Atividade por Espessura Removida - Amostra 2 - 0 a 0,4 mm



Faixa de 0 a 0,6 mm

Atividade / Espessura Removida Amostra 1 - 0 a 0,6 mm

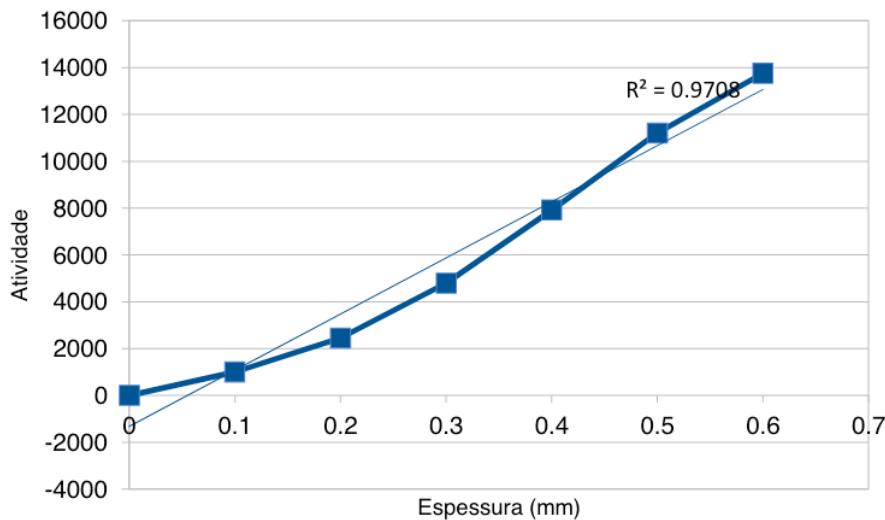


Figura 48: Atividade por Espessura Removida - Amostra 1 - 0 a 0,6 mm

Atividade / Espessura Removida Amostra 2 - 0 a 0,6 mm

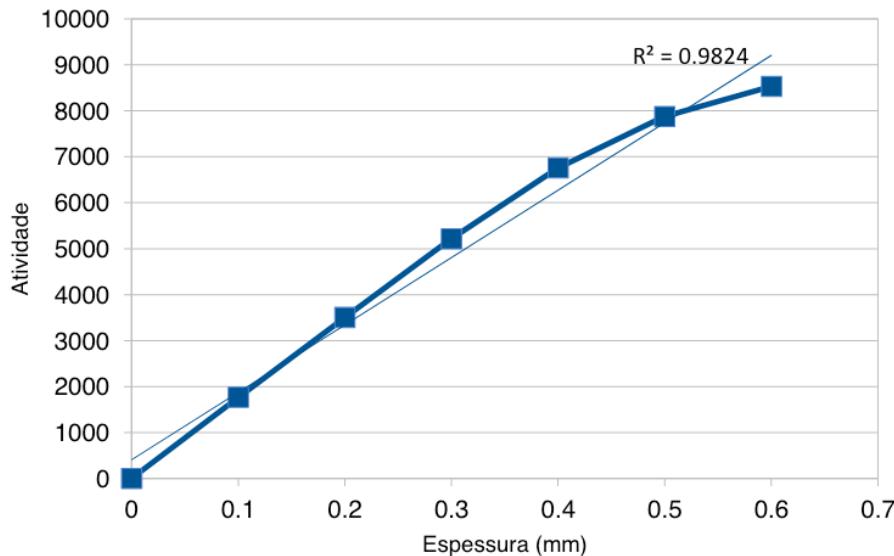
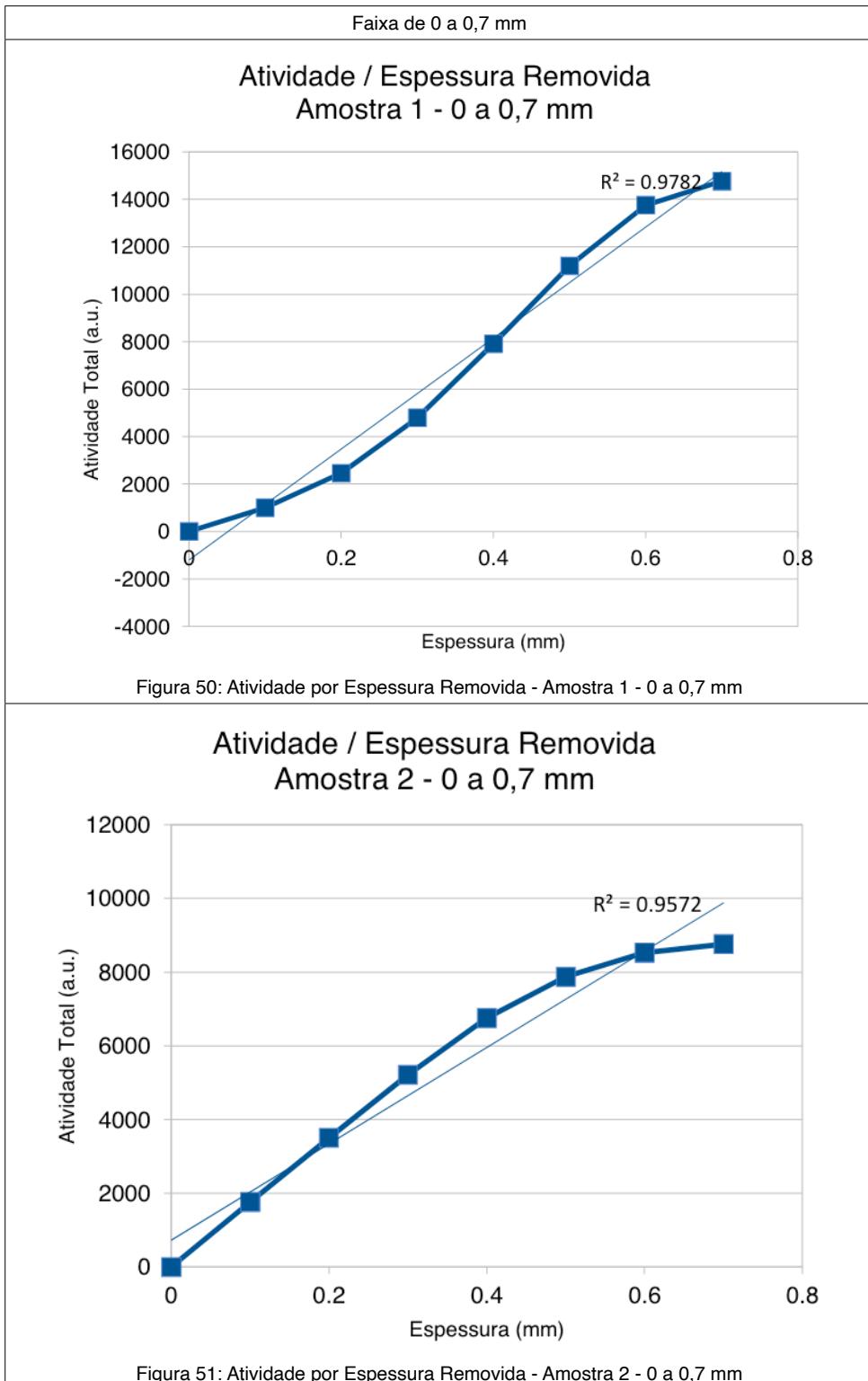


Figura 49: Atividade por Espessura Removida - Amostra 2 - 0 a 0,6 mm



CONCLUSÃO

Primeiramente, podemos observar, após análise dos dados, que a curva de atividade obtida na Amostra 2, se aproxima da curva de atividade relativa teórica extrapolada calculada para o conjunto de lâminas utilizadas. Semelhanças como o formato da curva, distância máxima alcançada, profundidade do platô de atividade, corroboram o método de determinação das lâminas escolhido.

Pode-se concluir também, pela comparação dos gráficos de atividade por espessura removida de ambas as amostras que, a aplicação da roda degradadora possibilitou a homogeneização da atividade implantada na amostra, proporcionando uma curva de calibração mais próxima a uma reta, com coeficiente de determinação R^2 praticamente 1, melhorando a precisão e um aumento da espessura analisável, melhorando assim a aplicabilidade da técnica, como, por exemplo, na análise de desgaste em paredes de tubulação, análise de desgaste em mancais de pastilhas flutuantes, desgaste de colmeias em turbomáquinas, etc

Além disso comprovou a utilidade da linha 2 do cíclotron CV-28 do IEN como linha de pesquisa multipropósito na área de técnicas nucleares. Reinaugurando em conjunto com Lemos (2016) a pesquisa em técnicas nucleares com o uso Cíclotron CV-28.

TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho reinaugura a pesquisa em técnicas nucleares com utilização do ciclotron no IEN, nessa linha de pesquisa podemos sugerir como trabalhos futuro efetuar irradiações com o uso de outras partículas, outras energias e outros materiais, com o objetivo de avaliar os alcances obtidos e suas respectivas curvas de calibração. Além disso seria muito interessante efetuar irradiações com variação de ângulo de incidência do feixe a fim de determinar sua influência no alcance, para casos em que a geometria da peça irradiada não permita a incidência ortogonal do feixe, além de determinar a distância máxima entre a roda e o alvo. Também é necessário a influência do ar na taxa de produção e no alcance da atividade da amostra, para tal pode-se efetuar irradiações com a roda e o alvo no vácuo.

Podemos identificar também a necessidade de se elaborar um programa de computador para determinar as lâminas a partir do material da amostra e do material das lâminas. Em relação ao controle do feixe, vimos a necessidade de se projetar um sistema de controle de velocidade e posição da roda de forma a variar de forma automática a incidência e o tempo das energias sobre a amostra.

Por fim seria de grande importância buscar ligas que produzam isótopos com maior vida útil que com a maior espessura possam ser utilizadas não só na análise, mas também na detecção de desgaste e corrosão.

REFERÊNCIAS

- CONLON, T.W., "Thin layer activation by accelerated ions – Application to measurement of industrial wear" (1974)
- CONSTANTINESCU, B., IVANOV, E. A., PASCOVICCI, G., POPA-SIMIL, L. and RACCOLTA, P.M. Thin Layer Activation Techniques at U-120 Cyclotron of Bucharest.Nuclear Instruments and Methods in Physics Research,B 89, p. 83-87, 1994.
- DOWSON, D. History of tribology. London: Long-man, 1979.
- EVANS, R. Radioisotope methods for measuring engine wear: a thin layer activation method wear and its comparison with a neutron activation method. Wear, n°64, p. 311 -325, 1980.
- F. DITROI, I. MAHUNKA, Thin layer activation of non-metallic materials by using nuclear implantation, Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. B113, 1996
- F. DITROI, I. MAHUNKA, Wear measurement using radioactive tracer technique based on proton, deuteron and a -particle induced nuclear reactions on molybdenum, 2012
- FEHSENFELD, P., KLEINRAHM, A. and SCHWEICKERT, H. Radionuclide Technique in Mechanical Engineering in Germany.Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry,Articles, v. 160,n°01,p. 141 - 151, 1992.
- G. Dearnaley, J. Asher, A.T. Peacock, S.J. Allen, R.E.J. Watkins. The use of thin layer activation to evaluate ion beam surface treatments of orthopedic implant materials. 2012
- HMSO, London, 1966, p.4. Citado em: SINATORA, A., 2005, "Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte", Prova de Erudição, São Paulo.
- IAEA TECDOC-924, The Thin Layer Activation method and its application in industry (1997)
- IAEA, Thin Layer Activation Technique (TLA) for Wear Measurement. Disponível em: <https://www-nds.iaea.org/tla/abouttla.html>. Acessado em 05/2016
- JOST, H.P, 1960, "Lubrication (tribology) education and research, Jost Rep., Department of Education and Science,
- JOST, H. P., 1990, "Tribology-origin and future", Wear, v.136, pp.1-17.
- KATO, K. Adachi, K., 2001, "Wear Mechanisms", MODERN TRIBOLOGY HANDBOOK, Ed. CRC Press LLC Vol.2 Cap 22.

KONSTANTINOV I.O., KRASNOV N.N., "Determination of the wear of machine parts by charged particle surface activation", J. Radioanal. Chem. 8 (1971)

KOSAKO T., NISHIMURA K. The thin layer activation technique applied to the on-line iron wear measurement of an engine can nose. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B 56/57, p. 900 - 903, 1991.

IAEA, Live Chart of Nuclides - nuclear structure and decay data, disponível em: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VchartHTML.html>, acessado em: 05/2016.

LEMOS, Mauro Projeto e desenvolvimento de um sistema de irradiação multipropósito com diagnóstico de feixes para o ciclotron CV-28 do IEN, 2016

MIRA Tribology using Thin Layer Activation Disponível em <http://www.horiba-mira.com/our-services/tribology> Acessado em 06/2016

MORAES, Monique Alves Franco de. Desenvolvimento de metodologias de avaliação e monitoramento do desgaste no par tribológico RISER/ENRIJECEDOR. 2013. 126 f. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

RIGNEY, D. View point set on materials aspects of wear: introduction. Scripta Metallurgica et Materialia, v. 24, 1990.

RADI, P. A.; SANTOS, L. V.; BONETTI, L. F.; TRAVA; AIROLDI, V. J. Tribologia, conceitos e aplicações. In: 13º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA (Instituto Tecnológico de Aeronáutica) - XIII ENCITA , 2007, São José dos Campos, SP.

IAEA, VIENNA, 1997, IAEA-TECDOC-924 The Thin Layer Activsation methode and this application in industry

SAILER, S. Radionuclide technology applications in development and production in the automobile industry. Industrial Applications of Radioisotopes and Radiation Technology, Conference in Grenoble, 28 September - 02 October, p. 433-448, 1981

SINATORA, Amilton. Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte. São Paulo: Departamento de Eng. Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2 jun. 2005. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/66537526/tribologiaITA>. Acesso em 05/2016

SUMIYA, L. C. A São Paulo 2000, Medidas de desgaste em aço AISI 316 por meio de ciclotron

WALLACE G.; BOULTON L. H. and HODDER D. Corrosion monitoring on a large steel pressure vessel by thin layer activation. Corrosion, v. 45, n° 12, p. 1016- 1019, 1989

WINER, W. O. Future trends in tribology. Wear, v.136, p. 19-27, 1990

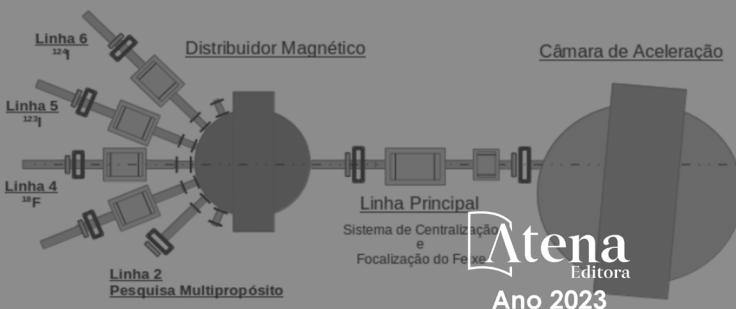
SOBRE O AUTOR

JOÃO FRANCISCO DE OLIVEIRA ANTUNES - Nascido no Rio de Janeiro no ano de 1960, possui mais de 30 anos de experiência nas áreas de Engenharia e TI. Já atou na aviação e na área de turbo máquinas projetando implantando e suportando grupos turbo geradores e turbo compressores. Desde os anos 2000 vem dividindo sua atuação também na área de TI mais especificamente em redes de Computadores, Cyber segurança e Educação. Desde 2010 integra a Divisão de Radiofármacos (DIRAD) do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) do governo brasileiro, onde atua na operação e manutenção do acelerador de partículas ciclotron CV-28 e pesquisas em técnicas nucleares.



DESENVOLVIMENTO DE UMA TÉCNICA PARA ANÁLISE DE DESGASTE EM PEÇAS METÁLICAS COM O USO DO CÍCLTRON CV-28 DO IEN

www.atenaeditora.com.br 
contato@atenaeditora.com.br 
[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 
www.facebook.com/atenaeditora.com.br 





DESENVOLVIMENTO DE UMA TÉCNICA PARA ANÁLISE DE DESGASTE EM PEÇAS METÁLICAS COM O USO DO CÍCLTRON CV-28 DO IEN

www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
www.facebook.com/atenaeditora.com.br

