

Imageamento com nêutrons
30 anos de atividades no IPEN-CNEN/SP



Sagitarius Editora

© 2017, Marco Antonio Stanojev Pereira, ed.

Impresso no Brasil/Printed in Brazil

Título: Imageamento com nêutrons: 30 anos de atividades no IPEN-CNEN/SP.

E-mail: mstanojev@hotmail.com

Depósito Legal: 793392/18

Capa: Núcleo do Reator de Pesquisas IEA-R1 e o efeito Cherenkov.

1ª Edição – São Paulo - Dezembro, 2017

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

P436i Pereira, Marco Antonio Stanojev.
Imageamento com nêutrons: 30 anos de atividades no IPEN-
CNEN/SP / Marco Antonio Stanojev Pereira. São Paulo :
Sagitarius Editora, 2017
208 f. : il. ; 21 cm.

ISBN: 978-85-923404-1-4

1. tecnologia nuclear. 2. imageamento com nêutrons. 3. ciência.
I. Título.

CDD: 539.7
CDU: 539.1

Marco A. Stanojev Pereira

Imageamento com nêutrons

30 anos de atividades no IPEN-CNEN/SP

São Paulo

Sagittarius Editora

2017

“Se um jovem cientista que trabalha comigo vier a mim depois de dois anos de trabalho e me perguntar o que fazer em seguida, aconselho-o a sair da ciência. Depois de dois anos de trabalho, se um homem não sabe o que fazer em seguida, ele nunca se tornará um verdadeiro cientista”.

— Sir Ernest Rutherford

Ao Prof. Dr. Reynaldo Pugliesi, orientador, amigo e eterno Professor.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN/SP, por proporcionar-me a oportunidade do aprendizado em Tecnologia Nuclear nos cursos de Mestrado, Doutorado e Pós Doutorado, causa do efeito desta publicação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro nas Bolsas de Estudos de Mestrado e Pós Doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro na Bolsa de Estudos de Doutorado.

Aos meus amigos e companheiros Dr. Mário Olímpio de Menezes, Dr. Marcos Leandro G. Andrade, Dr. Fábio Pugliesi e M.Sc. Roberto M. Schoueri.

Índice

Capítulo 1

Princípios	13
1.0. Introdução.....	15
1.1. Fundamentos	19
1.1.1. Nêutrons	20
1.1.2. Interação do nêutron com a matéria	26
1.1.3. Transmissão de nêutrons pela matéria.....	32

Capítulo 2

Imageamento com nêutrons.....	35
2.1. Histórico	37
2.2. Conceitos Básicos.....	40
2.2.1. Fontes de Nêutrons	45
2.2.2. Reator Nuclear IEA-R1	51
2.2.3. Sistema de Colimação	56
2.2.4. Filtros contra radiação gama.....	59
2.2.5. Conversor e meio sensível.....	60

Capítulo 3

Imageamento com nêutrons no IPEN-CNEN-SP...	63
3.1. Primórdios Radiográficos	65
3.2. Trabalhos Acadêmicos	79
3.3. As técnicas de imageamento com nêutrons do IPEN-CNEN-SP.	103

Capítulo 4

Tomografia com Nêutrons.....	123
4.1 Conceitos gerais sobre imagens analógicas e imagens digitais.	125

4.2. Aspectos básicos sobre a obtenção de uma Tomografia com Nêutrons.....	135
--	-----

Capítulo 5

Aplicações da técnica de Tomografia com Nêutrons.....	145
5.1. Patrimônio Histórico e Cultural.....	146
5.2. Preservação de objetos cerâmicos	153
5.3. Estudo de Fósseis	161
5.4. Materiais de composição mista.....	164
5.5. Projétil	166
5.6. Artefato com ferrugem	170
5.7. Arqueometalurgia	174
5.8. Concreto de Engenharia.....	178

Capítulo 6	183
------------------	-----

Epílogo	183
---------------	-----

6.1. Perspectivas	185
-------------------------	-----

ANEXO I.....	199
--------------	-----

ANEXO II.....	203
---------------	-----

Capítulo 1



Princípios

1.0. Introdução

Esta obra que começamos a delinear no ano de 2013, e finalizamos durante e em conjunto com os trabalhos de Pós Doutorado desenvolvido entre os anos de 2016 e 2017 apresenta, de uma forma bastante sucinta, os trinta anos de atividades de pesquisas e ensino do Grupo de Radiografia com Nêutrons do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), autarquia vinculada à Universidade de São Paulo desde 1956.

No conceito da interdisciplinaridade, a área nuclear permite, naturalmente, a convergência de várias áreas do conhecimento humano, assim, é possível o desenvolvimento de trabalhos de pesquisa e formação de recursos humanos em todos os segmentos das ciências exatas e da terra, como física teórica e experimental, química, engenharia, geografia e meio ambiente, geologia, tecnologia da informação, matemática; as ciências humanas, como história, arqueologia, direito, pedagogia; as ciências biológicas como medicina, biologia, farmácia, biomedicina, nutrição, odontologia, etc.

Apresentamos esta obra na emblemática data em que o IPEN, antigo Instituto de Energia Atômica (IEA) comemora, em grande forma, 60 anos de operação de seu Reator Nuclear IEA-R1 ininterruptamente, gerando nêutrons em seu núcleo de Urânio produzido com tecnologia nacional, e produzindo conhecimentos e recursos humanos em seu núcleo humano, consolidando a idéia primordial,

quando da época de sua construção, no conceito de “Átomos para a Paz”. A Figura 1 mostra a placa de inauguração do Reator Nuclear construído pela empresa americana *The Babcock & Wilcox Company*, assistida de perto pelos gigantes e visionários da ciência nuclear brasileira, entre eles o Prof. Dr. Marcelo Damy de Souza Santos, o grande responsável pela construção do Reator Nuclear IEA-R1, um homem cuja visão, idealismo e energia faz falta nos dias de hoje.



Figura 1. Placa de inauguração do Reator Nuclear IEA, localizada na parede da blindagem biológica próximo da saída da coluna térmica.

Imageamento com nêutrons
30 anos de atividades no IPEN-CNEN/SP

Procurando por radiografias históricas nos arquivos do grupo de imageamento com nêutrons, deparei-me com um tesouro: “Publicação IEA – nº2: Radioisótopos Artificiais Preparados com o Reator IEA R-1.”.

Na página 3 desta publicação, encontramos duas citações históricas, que transcrevo:

“A inauguração do reator atômico é um desses exemplos memoráveis do que pode fazer o paulista. Ingressou hoje o Brasil e mesmo a América Latina na era atômica, projetando-se, assim, internacionalmente”.

(palavras proferidas pelo presidente Juscelino Kubitschek, durante a inauguração do reator de pesquisas do Instituto de Energia Atômica a 25-1-58).

“A inauguração desse reator atômico, na presença do Presidente Kubitschek, assinala uma das datas mais memoráveis na civilização paulista: dá a São Paulo e a Nação o primado sulamericano quanto à pesquisa atômica”.

(palavras proferidas pelo governador Jânio Quadros, durante a inauguração do reator de pesquisas do Instituto de Energia Atômica, a 25-1-58).

Participo desta grande epopéia de 30 anos de atividades de radiografia com nêutrons à exatamente

vinde e dois anos, aprendendo sempre e muito com todos os participantes do grupo, a saber: o Prof. Dr. Reynaldo Pugliesi nosso paciente e competente orientador, chefe do grupo de Imageamento com Nêutrons que coordena todas as atividades desenvolvidas com o puro e inspirador sentimento científico, a Dra. Marlete Pereira Meira Assunção, o Dr. Mario Olímpio de Menezes, o Dr. Marcos Leandro Garcia Andrade, o Dr. Fábio Pugliesi e o MSc. Roberto Mauro Schoueri, respectivamente na ordem cronológica de defesas de Teses e Dissertações.

Trabalhar neste grupo de pesquisa de imageamento com nêutrons encerra em si o conceito da Utopia, com a diferença de que este lugar existe realmente, e é graças a este núcleo que sou hoje o que sou, o que penso e produzo.

Espero que apreciem as informações contidas nesta obra, que possa servir de inspiração para os estudantes a trilharem a carreira científica, e compartilhem comigo o orgulho de ser brasileiro, um dos poucos países no mundo que detêm o domínio pleno da tecnologia nuclear, disponibilizando-a para o bem da humanidade em seus vários campos de atuação.

1.1. Fundamentos

O imageamento com nêutrons é um conjunto de técnicas de ensaios não destrutivos e não invasivos, que desde a década de 60 vem sendo amplamente utilizada mundialmente na análise de materiais. Enquanto que os Raios-X interagem com a matéria mediante forças eletromagnéticas, os nêutrons interagem basicamente via forças nucleares, e estes processos atribuem a esta técnica características únicas. As aplicações da radiografia com nêutrons abrangem uma gama bastante diversificada de componentes, peças e processos, sendo amplamente utilizada pelas indústrias aeronáutica e aeroespacial na inspeção de materiais ricamente hidrogenados mesmo quando encapsulados em alguns metais como aço, alumínio e chumbo; pela nuclear na inspeção de materiais altamente radioativos, na área da saúde com a aplicação da técnica para estudo e desenvolvimento de biomateriais; na arqueologia como técnica de arqueometria empregada no estudo de processos de restauro e conservação de objetos do patrimônio histórico e cultural, etc.

Desta forma, as técnicas de imageamento com nêutrons são complementares às que utilizam Raios-X e Raios γ na inspeção da estrutura interna de materiais.

1.1.1. Nêutrons

Em 1930, Bothe e Becker estavam estudando o caráter das radiações resultantes do bombardeamento de partículas alfa de uma fonte de Polônio, em alvos de elementos leves, e deduziram ser eletromagnéticas. Entretanto, ao se aplicar a mesma metodologia para a caracterização da radiação oriunda do alvo de Berílio, estes pesquisadores juntamente com Webster, Curie e Joliot em 1932, perceberam que o resultado não fazia sentido, pois a radiação eletromagnética deveria ter energia muito elevada, ~50 MeV. Em 1932 o físico inglês James Chadwick provou experimentalmente que esta radiação emitida não era uma manifestação eletromagnética de alta energia, mas uma partícula neutra e de massa muito próxima à do próton, a qual havia sido proposta 20 anos antes por Ernest Rutherford¹.

À época da publicação destes trabalhos, Chadwick determinou a sua massa por meio de reações de bombardeamento de nêutrons em núcleos de massa conhecida e medindo a velocidade com que eram ejetados, e o valor obtido foi de 1.008982 u.m.a. Desde então o nêutron tem sido utilizado em diversas aplicações que envolvem desde medidas de parâmetros nucleares até a obtenção de imagens. Atualmente o nêutron é considerado como uma

¹ CHADWICK, J. The Existence of a Neutron. **Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.**, v. 136, n. 830, p. 692–708, jun. 1932.