

Marco A. Stanojev Pereira

Imageamento com Nêutrons

30 anos de atividades no IPEN-CNEN/SP



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



© 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

ISBN: 978-85-923404-1-4

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

CDU: 539.1

CDD: 539.7

1ª Edição – São Paulo - Dezembro, 2017

Marco A. Stanojev Pereira

Imageamento com nêutrons

30 anos de atividades no IPEN-CNEN/SP

São Paulo

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

vinte 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.

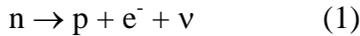
1.1.1. Nêutrons

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.

partícula não elementar, isto é, possui estrutura interna, com spin = 1/2, momento de dipolo magnético $\mu = -1,913 \mu_N$ ($\mu_N \equiv$ magneton nuclear), massa de 1.00866491600(43) u.m.a, com uma carga líquida que se existir é menor do que $1,5 \times 10^{-20} e$ ($e \equiv$ carga do elétron). Além disto, o nêutron em estado livre decai com uma meia-vida de 12,8 minutos em um próton, um elétron e em um anti-neutrino, esquematicamente representado na equação (1).



O nêutron possui um comprimento de onda de DeBroglie associado à sua massa dado por^{2,3}

$$\lambda = h/mv = 0,286/(E^{1/2}) \quad (2)$$

sendo:

λ - comprimento de onda [Å]

h - constante de Planck

v - velocidade do nêutron

m - massa do nêutron

E - energia cinética do nêutron [eV]

² CURTISS, L.F. **Introduction to Neutron Physics**. Massachusetts: Boston Technical Publishers, Inc, 1965.

³ GUREVICH, L.V.; TARASOV, I.I. **Low-Energy Neutron Physics**. Amsterdam: North dHollan, 1968.

De uma forma geral, até por volta de 1990, as imagens fornecidas por nêutrons possuíam qualidade pouco inferior às fornecidas por Raios-X. Entretanto, a partir desta data o desenvolvimento de sistemas de imageamento digitais, mais especificamente câmeras com sensor de imagem CCD (**C**harged **C**ouple **D**evice) e softwares para o processamento de imagens, bem como detectores com maior eficiência de conversão sinal/nêutron, fontes de nêutrons com maior intensidade, e eletrônica associada mais rápida para a leitura de dados, permitiu um salto significativo tanto na qualidade das imagens obtidas quanto no desenvolvimento das técnicas de imageamento, que o conduziram a um ponto crucial de sua história, tornando-o reconhecidamente valioso na pesquisa e no estudo dos materiais.

Dentre alguns exemplos de aplicações podem-se destacar estudos em arqueologia, obras de arte, penetração de líquidos em estruturas porosas, posicionamento de anéis de borracha para vedação, incrustações de minérios em rochas, amostras biológicas, líquidos em motores, água em células de combustível (PEM – Proton Exchange Membrane), micro e nano estruturas, entre outras^{4,5,6}.

⁴ PEREIRA, M. A. S.; SCHOUERI, R.; DOMIENIKAN, C.; de TOLEDO, F.; ANDRADE, M. L. G.; PUGLIESI, R. The neutron tomography facility of IPEN-CNEN/SP and its potential to investigate ceramic objects from the Brazilian cultural heritage. **Appl. Radiat. Isot.**, v. 75, p. 6–10, 2013.

Hoje em dia, a obtenção de uma imagem com a qualidade necessária para estas finalidades, requer o uso de feixes de nêutrons com uma intensidade somente conseguida em reatores nucleares ou em aceleradores de partículas. À primeira vista, e levando em conta a infraestrutura necessária para que uma máquina deste porte opere, pode parecer que a obtenção de uma imagem deste tipo teria um preço proibitivo, quando comparado com o de uma imagem fornecida pelas técnicas convencionais que empregam Raios-X. Entretanto, em geral, estas máquinas não operam exclusivamente para esta finalidade, tornando estas atividades viáveis em termos econômicos.

O setor de reatores de pesquisas da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) publicou um relatório sobre fontes de nêutrons, de acordo com o qual dos 66 reatores nucleares mencionados, pertencentes a 39 países membros da IAEA, todos possuíam características para a instalação de

⁵ PEREIRA, M. A. S.; MARQUES, J.; SANTOS, J.; BURBIDGE, C.; DIAS, M.; PRUDÊNCIO, M. Neutron Imaging Techniques Applied to Studies in the Archaeological and Cultural Heritage Fields. **Mediterr. Archaeol. Archaeom.**, 2013.

⁶ HUSSEY, D. S.; SPERNJAK, D.; WEBER, A. Z.; MUKUNDAN, R.; FAIRWEATHER, J.; BROSHA, E. L.; DAVEY, J.; SPENDELOW, J. S.; JACOBSON, D. L.; BORUP, E R. L. Accurate measurement of the through-plane water content of proton-exchange membranes using neutron radiography. **J. Appl. Phys.**, v. 112, p.104906, 2012.

equipamentos para imageamento com nêutrons^{7,8}. Para a comunidade desta área de investigação, uma definição de um equipamento, no “estado da arte” deve incluir:

- 1- canal para irradiação dedicado, com fluxo de nêutrons $> 10^6 \text{ n.s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$;
- 2- divergência angular do feixe $\leq 3^0$;
- 3- espectro de energia dos nêutrons conhecido;
- 4- fundo de radiação gama de pouca intensidade;
- 5- campo de irradiação com diâmetro $\geq 20\text{cm}$;
- 6- equipamento instalado em local adequado em termos de proteção radiológica e infraestrutura;
- 7- sistemas para imageamento digital;
- 8- manipuladores de amostras a controle remoto no caso de níveis elevados de radiação;
- 9- parcerias com centros de pesquisa e indústria.

Dentre os centros de pesquisas que possuem equipamentos operacionais para imageamento com nêutrons com estas características, destacam-se os apresentados na Tabela 1⁸.

⁷ IAEA, **Neutron Imaging: A Non-Destructive Tool for Materials Testing**. Disponível em: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1604_web.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2015.

⁸ LEHMANN, E. H.; VONTOBEL, P.; FREI, G.; KUEHNE, G.; KAESTNER, A. How to organize a neutron imaging user lab? 13 years of experience at PSI, CH. **Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.**, v. 651, n. 1, p. 1–5, 2011.

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

Tabela 1. Equipamentos para imageamento com nêutrons em operação.

| País | Local | Instituição | Fonte de Nêutrons | Dimensão Máx. do Feixe |
|---------------|------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Áustria | Viena | Atominstitut | TRIGA Mark-II, 250kW | 90 mm diam. |
| Brasil | São Paulo | IPEN | IEA-R1M 5MW | 25 cm diam. |
| Alemanha | Garching | TU Munich | FRM-II 25MW | 32cm diam. |
| Alemanha | Garching | TU Munich | FRM-II 25MW | 20 cm diam. |
| Alemanha | Berlim | HZB | BER-II 10MW | 10 cm x 10 cm |
| Hungria | Budapeste | KFKI | WRS-M 10MW | 25 cm diam. |
| Japão | Osaka | Universidade de Kyoto | MTR 5MW | 16 cm diam. |
| Japão | Tokai | JAEA | JRRM-3M 20MW MTR | 25 cm x 30 cm |
| Coréia do Sul | Daejon | KAERI | HANARO 30MW | 25 cm x 30 cm |
| Suíça | Villigen | PSI | SINQ spallation source | 40 cm diam. |
| Suíça | Villigen | PSI | SINQ spallation source | 15 cm diam. |
| EUA | Pensilvania | Pen State University | TRIGA 2MW | 23 cm diam. |
| EUA | Gaithersburg | NIST | NBSR 20MW | 25 cm diam. |
| EUA | Sacramento | McCleallan RC | TRIGA 2MW | 23 cm diam. |
| África do Sul | Pelindaba | NECSA | SAFARI-1 20MW | 36 cm diam. |

1.1.2. Interação do nêutron com a matéria

Basicamente a interação do nêutron com o núcleo pode ocorrer por dois processos: nuclear e magnético; e devido a sua importância para a técnica da radiografia com nêutrons, será dada ênfase ao primeiro. No estudo das reações nucleares é de fundamental importância o conceito de Secção de Choque Microscópica. Qualitativamente pode ser compreendida como uma área efetiva que o núcleo alvo apresenta ao nêutron de modo que se atingida, ocorrerá uma reação nuclear. Quantitativamente representa a sua probabilidade de ocorrência. A secção de choque microscópica (σ) é comumente expressa na unidade "barn", sendo $1\text{barn}=10^{-24}\text{ cm}^2$. No processo nuclear o nêutron poderá ser absorvido e/ou espalhado pelo núcleo alvo, e a probabilidade de ocorrência será dada por:

$$\sigma_T = \sigma_{\text{esp}} + \sigma_{\text{abs}} \quad (3)$$

onde σ_T , σ_{esp} e σ_{abs} . são as secções de choque total, de espalhamento e de absorção, respectivamente.

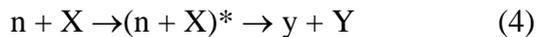
Em 1936 Niels Bohr⁹ propôs a teoria do núcleo composto para a explicação das reações

⁹ BLATT, J.N.; WEISSKOPF, V.F. **Theoretical Nuclear Physics**. Dover Publication, Inc. New Graw Hill, Book Company, Inc. New York , 1957.

nucleares, as quais ocorrem fundamentalmente em duas etapas:

a) formação do “núcleo composto”. Nesta fase o nêutron incidente perde a sua identidade e fica incorporado à este núcleo. A energia de excitação introduzida pelo nêutron (cinética + ligação) é dividida entre os nucleons.

b) desintegração do núcleo composto nos produtos da reação. Nesta fase o núcleo composto permanece excitado até que um ou mais nucleons adquiram energia suficiente para serem emitidos. Caso esta energia seja insuficiente, ele decairá emitindo radiação γ . A desintegração do núcleo composto independe da maneira pela qual foi formado, sendo função exclusiva de suas características tais como: energia de excitação, momento angular, etc. Em alguns casos o núcleo produto formado também é instável e decairá até atingir a estabilidade. Assim uma reação nuclear pode ser esquematizada da seguinte forma:



sendo:

n - nêutron incidente

y - partícula ou radiação emergente

X, Y - núcleos alvo e produto

(n + X)* - núcleo composto excitado

No processo de absorção, o núcleo composto excitado emite uma ou mais radiações gama ou qualquer uma das partículas listadas na tabela 2¹⁰. A emissão de partículas carregadas ocorre preferencialmente para nêutrons de alta energia (~Mev) e para elementos de baixo número atômico, e a emissão de radiação gama para nêutrons de baixa energia (~meV). Esta última reação é comumente denominada de captura radioativa.

No processo de espalhamento, o núcleo composto excitado emite um nêutron, e este processo é chamado de espalhamento ressonante.

Caso o espalhamento seja resultante de um ricocheteamento do nêutron incidente na superfície do núcleo alvo, teremos o chamado espalhamento potencial, e neste caso não há a formação do núcleo composto.

¹⁰ BONILLA, C.F. **Nuclear Engineering**. Mc Graw Hill, Book Company, Inc. New York, 1957

Tabela 2. Algumas das possíveis reações nêutron-núcleo

| absorção | espalhamento |
|-----------------|---------------------|
| (n,y) | elástico (n,n) |
| (n, α) | Inelástico (n,n') |
| (n,p) | |
| (n,d) | |
| (n,2n) | |
| (n,fissão) | |

Se a energia cinética total do sistema nêutron-núcleo se conservar, o espalhamento é denominado elástico, representado por (n,n). Caso contrário é denominado inelástico, representado por (n,n') e parte desta energia é convertida em energia de excitação nuclear.

Baseados nestas considerações, Breit e Wigner deduziram uma expressão teórica para o cálculo da secção de choque na vizinhança de um nível de ressonância do núcleo composto. Esta expressão, na região térmica de energia, prevê um comportamento proporcional a $1/v$ para secção de choque de absorção e um comportamento constante para a de

espalhamento. Neste caso, a expressão (3) para a secção de choque total pode ser escrita como¹⁰.

$$\sigma_T = \sigma_{\text{esp}} + \sigma_{\text{abs}} = a + b/v \quad (5)$$

onde a e b são constantes para cada núcleo.

Devido a especificidade das interações, os nêutrons são classificados de acordo com sua energia cinética. A Tabela 3¹¹ apresenta uma classificação usualmente utilizada.

Tabela 3 - Classificação dos nêutrons em função de sua energia cinética

| Classe | Faixa de Energia |
|-------------------------|--------------------------------------|
| Nêutrons Frios | $E < 0,01 \text{ eV}$ |
| Nêutrons Térmicos | $0,01 < E < 0,5 \text{ eV}$ |
| Nêutrons Epitérmicos | $0,3 < E < 10^4 \text{ eV}$ |
| Nêutrons Rápidos | $10^4 \text{ eV} < E < 20\text{MeV}$ |
| Nêutrons Relativísticos | $> 20 \text{ MeV}$ |

¹¹ ASSUNÇÃO, M.P.M. **Desenvolvimento da Técnica da Radiografia com nêutrons pelo Método do Registro de Traços Nucleares**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Física da Universidade de São Paulo, 1992.

Um fato importante a se abordar é o efeito das ligações químicas nos valores das secções de choque de espalhamento. Estes tornam-se significativos para nêutrons que possuem energias cinéticas da ordem de grandeza daquelas das ligações químicas ($\sim eV$), e para núcleos-alvo leves como o Hidrogênio e o Deutério. Isto porque a secção de choque de espalhamento é proporcional ao quadrado da massa reduzida (μ) do sistema nêutron-alvo ou seja, $\sigma_{esp} \propto \mu^2$. Considerando a massa do nêutron igual a 1, para um núcleo de massa "A" no estado livre, $\mu = A/(1+A)$, e se estiver ligado em uma molécula pesada, $\mu \sim 1$. Sendo assim, a razão entre os valores das suas secções de choque, nos estados ligado (σ_{lig}) e livre (σ_{livre}), será:

$$\sigma_{lig} = \sigma_{livre} [(A+1)/A]^2 \quad (6)$$

Para o caso do núcleo de Hidrogênio ($A = 1$), $\sigma_{lig} = 4 \sigma_{livre}$. A sua secção de choque na região térmica passa de 20barn para 80barn, o que o torna um dos maiores espalhadores de nêutrons de baixa energia.

1.1.3. Transmissão de nêutrons pela matéria

Teoricamente a transmissão de nêutrons pela matéria é governada por uma lei exponencial do tipo²:

$$\phi(x) = \phi_0 e^{-N\sigma_T(v).x} \quad (7)$$

sendo:

ϕ_0 = fluxo de nêutrons incidente no material

$\phi(x)$ = fluxo de nêutrons que não sofreu interação após atravessar o material de espessura “x”

N= densidade atômica do material (cm⁻³)

O produto $N.\sigma_T$ é denominado secção de choque total macroscópica e representa a probabilidade do nêutron, com velocidade “v”, sofrer qualquer tipo de interação por unidade de caminho percorrido neste material, ou seja:

$$\Sigma_T(v) = N.\sigma_T(v) \quad (8)$$

Caso o feixe incidente possua uma distribuição de velocidades $n(v)$, a secção de choque total a ser considerada é a efetiva para o espectro ou seja¹²:

$$\Sigma_T(v) = \frac{N \int n(v) \cdot v \sigma_T(v) \cdot dv}{\int n(v) \cdot v \cdot dv} \quad (9)$$

Experimentalmente a expressão (7) é verificada se a medida de transmissão for realizada na condição de boa geometria, mediante colimação dos feixes de nêutrons incidente e transmitido pelo material, de modo a se minimizar a detecção dos nêutrons que sofreram espalhamento ao atravessa-lo.

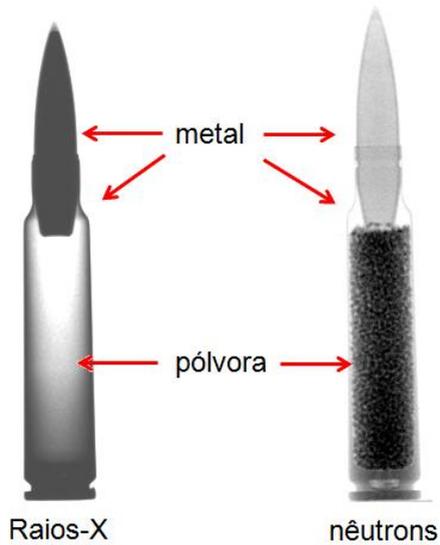
Caso a medida de transmissão seja realizada na condição de má geometria, esta expressão deverá conter o termo adicional “s”, que leva em conta a fração dos nêutrons espalhados pelo material¹³.

¹² MURRAY, R.L. **Nuclear Reactor Physics**. Prentice Hall, Inc. N.J., 1957

¹³ KOBAYASHY, H.; WAKAO, H.; IKEDA, Y.; OHOKUBO, K.; TSURUNO, A. Macroscopic Cross Section Measurements and Defect Detection in Materials Using Neutron Radiography Technique. **Journal of Nuclear Science and Technology**, 29 (11), p 1045-1053, 1992.

Marco A. Stanojev Pereira

Capítulo 2



Imageamento com nêutrons

2.1. Histórico

De modo análogo à descoberta dos Raios-X, em 1895 por Roentgen, e a sua conseqüente aplicação em uma técnica radiográfica, o emprego da radiografia com nêutrons surgiu cinco anos após a sua descoberta em 1932 por Chadwick. Neste primeiro trabalho, publicado em 1937, Kallmann e Khun utilizaram como fonte de nêutrons um pequeno acelerador de partículas, onde relataram os princípios e idéias básicas fundamentais desta técnica. Paralelamente, em 1946, O. Peter produziu algumas radiografias de melhor qualidade, pois dispunha de um feixe de nêutrons mais intenso, obtido em um acelerador mais potente que o utilizado por Kallmann.

Depois de quase uma década de estagnação, Thewlis e Derbyshire fixaram um marco decisivo referente a técnica da radiografia com nêutrons em 1956. Utilizando agora um reator nuclear, demonstraram as possíveis aplicações desta nova técnica de ensaio não destrutivo, as quais viriam a ampliar e complementar os campos de aplicação das convencionais, que utilizam Raios-x e Raios- γ , como radiação penetrante.

O imageamento com nêutrons pode ser definido como um conjunto de técnicas que fazem uso do nêutron como radiação penetrante para investigar a estrutura interna de um objeto. Dentre estas técnicas estão as de radiografia em filmes

convencionais para Raios-X, polímeros, tempo-real e a da tomografia.

A Figura 2 mostra uma linha do tempo do desenvolvimento das técnicas de imageamento com nêutrons^{14,15,16}.

A técnica permaneceu sem grandes desenvolvimentos por anos, até que durante as décadas de 1980/90 os dispositivos para digitalização e para o processamento de imagens digitais propiciaram um novo e decisivo impulso, de tal modo que em 1990 já existiam alguns equipamentos operacionais para Tomografia com Nêutrons, e em 2010 já haviam cerca de 60 instalações desta técnica ao redor do mundo^{17,18,19}.

¹⁴ BERGER, H. **Neutron Radiography: Methods, Capabilities, and Applications**. New York, N.Y.: Elsevier, 1965

¹⁵ BRYANT, P.; MCENTIRE, L. E. **Radiography and radiation testing**. Am. Soc. Nondestruct. Test. (Nondestructive Test. Handbook), n° 2nd edition, 1985.

¹⁶ FISHER, C. O. The history of the first radiographs in Berlin. In: **Fourth World Conf. on Neutron Radiography**, p. 3–10.

¹⁷ BERGER, H. Advances in neutron radiographic techniques and applications: A method for nondestructive testing. **Appl. Radiat. Isot.**, v. 61, n. 4, p. 437–442, 2004.

¹⁸ SCHILLINGER, B.; BLUMLHUBER, W.; FENT, A.; WEGNER, E. M. 3D neutron tomography: recent developments and first steps towards reverse engineering, **Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.**, v. 424, n. 1, p. 58–65, 1999.

¹⁹ KARDJILOV, N.; HILGER, A.; MANKE, I.; STROBL, M.; TREIMER, W.; BANHART, E. J. Industrial applications at the new cold neutron radiography and tomography facility of the HMI, **Nucl. Instruments Methods Phys. Res. A**, v. 542, n. 1–3, p. 16–21, 2005.

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

Para um futuro próximo, são esperados novos desenvolvimentos e avanços, uma vez que está prevista a operação de uma nova fonte de nêutrons na Alemanha, baseada em um acelerador de partículas do tipo Spallation Source (ESS), capaz de prover intensidades de nêutrons 10 vezes superiores as disponíveis hoje em dia, e no Brasil a construção do Reator Multipropósito Brasileiro (RMB) manterá São Paulo e o Brasil no contexto da frase proferida por Juscelino Kubitschek e Jânio Quadros naquele dia de 25 de Janeiro de 1958.

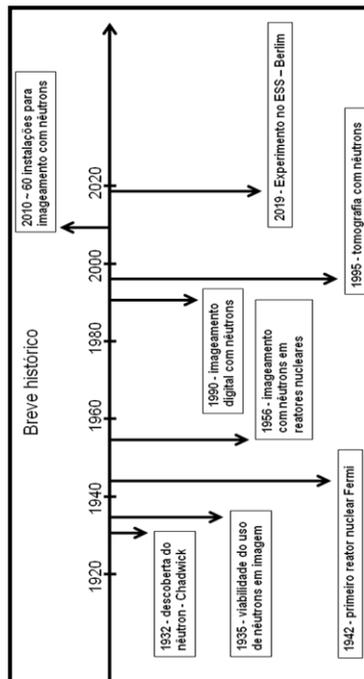


Figura 2 - Histórico do desenvolvimento do imageamento com nêutrons.

2.2. Conceitos Básicos

Pelo fato da interação nêutron-matéria ocorrer mediante forças nucleares, a dependência dos coeficientes de atenuação com o número atômico (Z) do elemento alvo, não pode ser representada por uma função monotônica, como no caso dos Raios-X. A Tabela 4 mostra os valores destes coeficientes, referentes a nêutrons térmicos (25 meV) e Raios-X de 125 keV²⁰, no qual se pode verificar que para alguns elementos de número atômico pequeno, os coeficientes exibem valores elevados em relação aos Raios-X, enquanto que para a maioria dos elementos pesados ocorre o inverso. Estas diferenças significativas de atenuação, também são observadas para alguns elementos com números atômicos vizinhos, bem como para alguns isótopos, atribuindo a esta técnica características únicas, tornando possível, por exemplo, a visualização de materiais hidrogenados como óleo, graxas, plásticos, explosivos, água, sangue, adesivos, mesmo quando envoltos por espessas camadas de alguns metais, ou em outras palavras: **“nêutrons podem ver o que Raios-X não podem ver”** e vice-versa.

²⁰ HARDT, H.; VON DER ROETTGER, P. **Neutron Radiography Handbook**. *Nuclear Science and Technology*. Springer, 1981.

Tabela 4 – Coeficientes de atenuação para nêutrons térmicos e Raios-X para alguns elementos e substâncias.

| Nº atômico | Elemento | Coeficiente de atenuação (cm ⁻² .g ⁻¹) | |
|------------|--------------|---|--------------------|
| | | Nêutron térmico | Raio-X |
| 1 | Hidrogênio | 23.2 | 0,048 |
| 6 | Carbono | 0,24 | 0,024 |
| 20 | Cálcio | 0,053 | 0,049 |
| 26 | Ferro | 0,15 | 0,079 |
| 28 | Níquel | 0,23 | 0,10 |
| 29 | Cobre | 0,104 | 0,10 |
| 30 | Zinco | 0,043 | 0,11 |
| 47 | Prata | 0,382 | 0,36 |
| 50 | Estanho | 0,023 | 0,41 |
| 79 | Ouro | 0,330 | 0,26 |
| 82 | Chumbo | 0,032 | 1,05 |
| - | Água | 3,482 | 0,15 |
| - | Concreto | 0,064 | 0,14 |
| - | Óleo vegetal | 3,52 | 0,12 |
| - | Parafina | 3,5 | 0,15 |
| - | Aço | 0,14 | 0,25 ²¹ |

Dentre estas aplicações destacam-se a visualização de materiais ricos em Hidrogênio mesmo quando envoltos por espessas camadas de metais como o chumbo, aço, alumínio e, a possibilidade de inspecionar materiais altamente radioativos. A Figura 3 apresenta uma imagem

²¹ Valor para raio-X de 130 keV.

comparativa entre as técnicas de neutrongrafia e Raio-X, obtidas para um mesmo objeto.

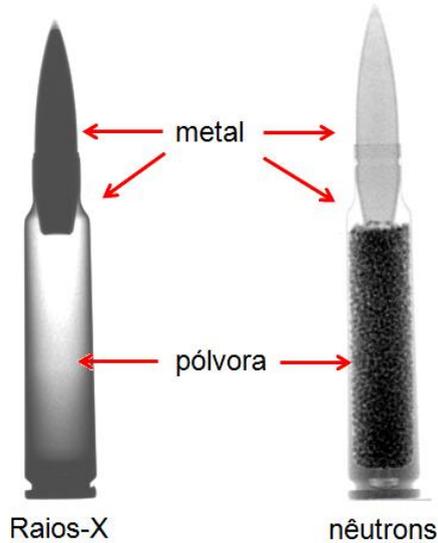


Figura 3 – Imagens comparativas de um mesmo cartucho obtidas por Raios-X e nêutrons, destacando o potencial da utilização dos nêutrons na visualização de materiais hidrogenados, mesmo envoltos por metal.

O procedimento básico para a obtenção de uma imagem por transmissão de nêutrons é semelhante ao das técnicas convencionais, e está esquematizado na Figura 4. Uma fonte fornece um feixe intenso de nêutrons o qual após ser colimado atinge o objeto a ser inspecionado. Pelo fato de o

nêutron não ser uma radiação ionizante, não possui carga, torna-se necessário o emprego de uma tela conversora intermediária, cuja finalidade é transformar a intensidade de nêutrons que é transmitida pelo objeto, em um feixe de radiação ionizante capaz de sensibilizar um meio (filme para Raios – X, por exemplo) formando a imagem^{14,22}.

²² HAWKESWORTH, M. R. Neutron radiography: Equipaments and Methods. **Atom. Energy Rev.**, v. 152, p. 169-220, 1977.

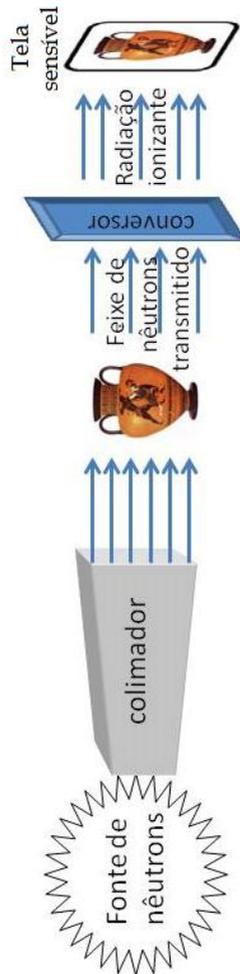


Figura 4. Diagrama esquemático do procedimento de obtenção de uma imagem por transmissão de nêutrons.

2.2.1. Fontes de Nêutrons [15, 21]

Um feixe de nêutrons, para propósitos radiográficos, pode ser oriundo de um acelerador, de uma fonte radioisotópica ou de um reator nuclear. Como em todos estes casos os nêutrons produzidos possuem energias elevadas, \sim MeV, a fonte deverá ser munida de um meio moderador de modo a reduzi-la a níveis de \sim eV. Isto porque é nesta região de energia que as telas conversoras apresentam os valores mais elevados para as secções de choque de absorção e, portanto, a maior eficiência de conversão.

No caso de aceleradores, um feixe de partículas carregadas é acelerado às energias de até 30MeV podendo produzir nêutrons, mediante diversas reações nucleares, tais como: T (d,n) ^4He , D (d,n) ^3He , ^7Li (p,n) ^3Be , ^9Be (d,n) ^{10}B . Além destas, reações do tipo (X,n) em alvos de Berílio, obtidas em aceleradores lineares de elétrons são também viáveis para esta finalidade. Dentre as reações apresentadas, aquelas dos tipos T(d,n) ^4He e (X,n) são as mais empregadas; a primeira por fornecer um rendimento elevado para a produção de nêutrons, mesmo para energias relativamente pequenas (\sim 150 KeV) e a segunda devido à baixa energia de ligação do nêutron no núcleo de Berílio (1,66MeV).

Dentre as fontes radioisotópicas, destacam-se aquelas dos tipos (α ,n), (γ ,n) e o Cf-252 sendo esta

última a que apresenta o melhor desempenho. Esta fonte gera nêutrons por fissão espontânea, e o fluxo produzido é limitado mais por problemas de custo do que técnicos. A Tabela 5 apresenta algumas fontes empregadas em neutronografia e suas principais características²⁰.

Tabela 5 – Algumas fontes radioisotópicas nêutron-emissoras e suas características.

| Fonte | Meia vida | Reação | Produção de nêutrons n/s.g | Energia média (MeV) |
|----------------------|-----------|----------------|----------------------------|---------------------|
| ¹²⁴ Sb-Be | 60d | (γ ,n) | $2,7 \times 10^9$ | 0,024 |
| ²¹⁰ Po-Be | 138d | (α ,n) | $1,28 \times 10^{10}$ | 4,3 |
| ²⁴¹ Am-Be | 433a | (α ,n) | 1×10^7 | ~ 4 |
| ²²⁶ Ra-Be | 1620a | (α ,n) | $1,3 \times 10^7$ | ~ 4 |
| ²²⁷ Ac-Be | 21,8a | (α ,n) | $1,1 \times 10^9$ | ~ 4 |
| ²²⁸ Th-Be | 1,91a | (α ,n) | $1,10 \times 10^{10}$ | ~ 4 |
| ²⁵² Cf | 2,65a | fissão | $2,34 \times 10^{12}$ | 2,3 |

Até o início dos anos 70 a principal desvantagem destes dois tipos de fontes era o fluxo de nêutrons, relativamente pequeno, incidente na amostra. Isto limitava a sua utilização aos conversores cintiladores do tipo composto por Fluoreto de Lítio (LiF), os quais apesar de serem ~10 vezes mais rápidos em relação aos metálicos fornecem uma resolução ~10 vezes inferior na imagem. Entretanto o desenvolvimento e a operacionalização de sistemas eletrônicos para o processamento de imagens digitais associadas à

otimização de novos cintiladores, à base de Gadolínio, tem propiciado a obtenção de radiografias de boa qualidade, mesmo para fontes de nêutrons de baixo fluxo.

Hoje em dia, o aprimoramento de blindagens para nêutrons e a disponibilidade de aceleradores compactos, dos tipos van de Graaf e Cíclotrons, permitiram o desenvolvimento de sistemas transportáveis para radiografia com nêutrons.

No caso de reatores nucleares, os nêutrons são produtos de uma reação de fissão nuclear, a qual ocorre quando o núcleo de um elemento físsil, como o Urânio-235, captura um nêutron. Neste processo, este núcleo se rompe em 2 fragmentos com a liberação de energia, principalmente na forma de energia cinética destes fragmentos. Existe também a liberação de radiação γ , e a emissão de 2 a 3 nêutrons com energia média em torno de 2 MeV. O material físsil na forma de placas ou pastilhas compõe os chamados elementos combustíveis que são dispostos em uma região denominada núcleo do reator. Este conjunto é inserido em um meio moderador como a água, por exemplo, e uma parte dos nêutrons emitidos é termalizada através de colisões elásticas com os núcleos de Hidrogênio. Neste caso são necessárias aproximadamente 18 colisões para que os nêutrons adquiram energia média de $\sim 25\text{meV}$, com uma distribuição de velocidades do tipo Maxwelliana, para uma temperatura de 25°C do meio moderador.

A reação de fissão é auto-mantida por meio destes nêutrons moderados, os quais são absorvidos por outros núcleos de Urânio, e de uma maneira mais eficiente, pois $\sigma_{\text{abs}} \propto 1/v$, ou seja, quanto menor a energia do nêutron, maior a probabilidade da reação com o núcleo alvo. Para o caso do Urânio-235, a secção de choque para fissão aumenta de um fator 10 se a energia do nêutron passar de 2MeV para 25meV²³.

A reação em cadeia é controlada por "barras de controle", confeccionadas de materiais absorvedores de nêutrons, que são inseridas no núcleo do reator, e que limitam a sua população. O fluxo de nêutrons disponível para a radiografia é constituído por aqueles que escaparam do processo de fissão, e que são conduzidos ao local de irradiação das amostras por meio de canais, dispostos radialmente ou tangencialmente em relação ao núcleo, e construídos no interior da blindagem principal do reator²⁴.

Dentre as fontes de nêutrons, viáveis para fins radiográficos, o reator nuclear é a que fornece o feixe mais intenso e, portanto, viabiliza a obtenção de radiografias de melhor qualidade. Um reator nuclear pode prover um fluxo de nêutrons entre 100 e 10.000 vezes mais intenso do que os extraídos de aceleradores e de fontes radioisotópicas, e neste caso

²³ HUGHES, D. J.; HARVEY, J.A. **Neutron Cross Sections**, New York, Mc Graw Hill, 1955, BNL325.

²⁴ MURRAY, R. L. **Nuclear Reactor Physics**. Prentice Hall, Inc. N.J., 1957.

as radiografias podem apresentar uma melhor resolução, além de que o tempo de exposição para a formação da imagem ser menor. A principal desvantagem na utilização de reatores nucleares é a sua falta de mobilidade, o que restringe a obtenção de radiografias ao seu local de instalação. Devido ao baixo consumo de nêutrons por equipamento radiográfico (~20% dos nêutrons disponíveis), o reator pode ser empregado para outras finalidades, tornando-o muito competitivo economicamente com as outras fontes citadas. Os reatores nucleares mais utilizados para fins radiográficos são os do tipo Material Testing Reactor, operando em potências entre 0,25 e 50MW com fluxo de nêutrons térmicos e rápidos entre 10^{12} e 10^{15} n/cm².s, junto ao seu núcleo.

Na Tabela 6¹⁵ estão representadas algumas das características das fontes de nêutrons empregadas para imageamento com nêutrons.

Tabela 6 - Características das fontes de nêutrons utilizadas para fins radiográficos.

| Fontes de nêutrons | Fluxo na amostra n/s.cm ² | Resolução | Tempo de exposição |
|---------------------|--------------------------------------|-----------|--------------------|
| Radioisótopo Cf-252 | Até 10 ⁴ | média | longo |
| Acelerador | 10 ³ a 10 ⁶ | média | médio |
| Reator nuclear | 10 ⁵ a 10 ⁸ | excelente | curto |

2.2.2. Reator Nuclear IEA-R1

O Reator Nuclear de Pesquisas IEA-R1 do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP) é um reator do tipo piscina que opera à potência de 5MW, construído na Cidade Universitária de São Paulo.

Sua concepção pode ser datada quando em 1955, Brasil e Estados Unidos firmaram o “Acordo Atômico Brasil – Estados Unidos: Uso de Isótopos Radioativos na Agricultura e na Indústria”, tratado que vigorou durante cinco anos e previa, em seu artigo VIII, que o Brasil deveria entregar todos os elementos combustíveis utilizados à Comissão de Energia Atômica dos Estados Unidos assim que se expirasse este prazo²⁵.

Esse acordo, e outro assinado entre os dois países que visava a descoberta e pesquisa de Urânio no Brasil, constituíam o programa “Átomos para a Paz”, que redundou na assinatura e publicação do Decreto nº 39.872 de 31 de Agosto de 1956, pg. 16588 do Diário Oficial (Seção 1)²⁶, criando em São Paulo, numa área cedida pela USP,

²⁵Acordo de cooperação para usos civís de energia atômica entre o Governo dos Estados Unidos do Brasil e o Governo dos Estados Unidos da América. <http://dai-mre.serpro.gov.br/atos-internacionais/bilaterais/1955/b_19/at_download/arquivo> acessado em setembro de 2016.

²⁶ <<https://www.jusbrasil.com.br/diarios/2876633/pg-4-sec-1-diario-oficial-da-uniao-dou-de-31-08-1956/pdfView>> acessado em setembro de 2016.

o Instituto de Energia Atômica (IEA), com a conclusão da construção do Reator de Pesquisas IEA-R1 em Agosto de 1957, e inauguração oficial aos 25 de Janeiro de 1958, pelo presidente da república, Dr. Juscelino Kubitschek de Oliveira. A Figura 5 mostra o *fac-simile* desta publicação.

A missão do novo Instituto era de desenvolver pesquisas baseadas em energia atômica com propósitos pacíficos; desenvolver tecnologia de produção de radioisótopos; e formar recursos humanos especializados nas respectivas tecnologias da Física Nuclear, provenientes de diversas áreas do conhecimento, bem como desenvolver *know-how* na engenharia de novos reatores, segundo as necessidades do Brasil.

Como dito anteriormente, a construção do prédio do Reator ficou a cargo da empresa norte-americana *The Babcock & Wilcox Company*, sob orientação e acompanhamento do Prof. Marcello Damy de Souza Santos, e os trabalhos de sua construção desenvolveram-se de tal forma em tempo recorde, que foi o primeiro reator deste programa a entrar em operação, antes mesmo de seu congêneres de Michigan, nos EUA, que iniciou os trabalhos de construção na mesma época que o brasileiro e somente foi concluída em 1961²⁷.

²⁷ SÉRIE DEPOIMENTOS, publicada pelo IPEN em São Paulo, v. 1, o Prof. Marcello Damy, 1994.

A capacidade dos profissionais brasileiros envolvidos nesta odisséia foi verificada quando propuseram o uso de concreto de barita na construção das paredes de contenção do núcleo ao invés da pedra de brita, normalmente usada, depositado sobre uma estrutura de aço em forma de piscina. Esta maravilha da engenharia isolou perfeitamente o meio-ambiente da radiação do núcleo do reator, que era uma preocupação constante de todos os envolvidos no projeto, concebendo assim um Reator Nuclear seguro e operacional até hoje, passados mais de meio século de operação.

Um documentário editado pela TV Usp com o título: “**Universo IPEN 7 - CRPq - Centro do Reator de Pesquisas**”, sobre o Reator Nuclear IEA-R1 e suas atividades de pesquisa pode ser livremente acessado na internet, permitindo assim uma visita virtual em suas dependências²⁸.

Na Figura 6 é mostrada uma visão superior da piscina do Reator, onde no centro está localizado seu núcleo evidenciando o efeito luminoso ocasionado pela radiação de Cherenkov.

²⁸ Universo IPEN 7 - CRPq - Centro do Reator de Pesquisas. <<https://www.youtube.com/watch?v=cfZZLHaVwkQ>>. Acesso em dezembro de 2016.

DECRETO N.º 39.872 -- DE
31 DE AGOSTO DE 1956

Cria o Instituto de Energia Atômica e dá outras providências.

O Presidente da República, usando da atribuição que lhe confere o artigo 87, Item I, da Constituição Federal e tendo em vista a proposta do Conselho Nacional de Pesquisas, baseada no art. 13, da Lei n.º 1.310, de 15 de janeiro de 1951, decreta:

Art. 1.º Fica criado o Instituto de Energia Atômica, nos moldes do convênio firmado entre o Conselho Nacional de Pesquisas e a Universidade de São Paulo, em 11-1-1956.

Art. 2.º O instituto será localizado em São Paulo, em área para esse fim destinada pela Universidade de São Paulo.

Art. 3.º O Instituto de Energia Atômica, de âmbito nacional, tem por objetivo desenvolver: pesquisas sobre a energia atômica para fins pacíficos; produzir radioisótopos para estudos e experiências em qualquer ponto do país; contribuir para a formação em ciência e tecnologia nucleares, de cientistas e técnicos provenientes das várias unidades da Federação; estabelecer bases, dados construtivos e protótipos de reatores destinados ao aproveitamento da energia atômica, para fins industriais, de acordo com as necessidades do país.

Parágrafo único. A fim de atender ao disposto neste artigo, o Conselho Nacional de pesquisas fará instalar no Instituto de Energia Atômica, um Reator Nuclear experimental.

Art. 4.º A organização e o funcionamento do Instituto de Energia Atômica serão estabelecidos em Regulamento aprovado pelo Conselho Nacional de Pesquisas, com prévia audiência da Universidade de São Paulo.

Art. 5.º Este Decreto entrará em vigor na data da sua publicação.

Art. 6.º Revogam-se as disposições em contrário.

Rio de Janeiro, 31 de agosto de 1956; 135.º da Independência e 68.º da República.

JUSCELINO KUBITSCHEK

Nereu Ramos

Cloris Salgado

Figura 5. Fac-simile do Decreto presidencial criando o Instituto de Energia Atômica.

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

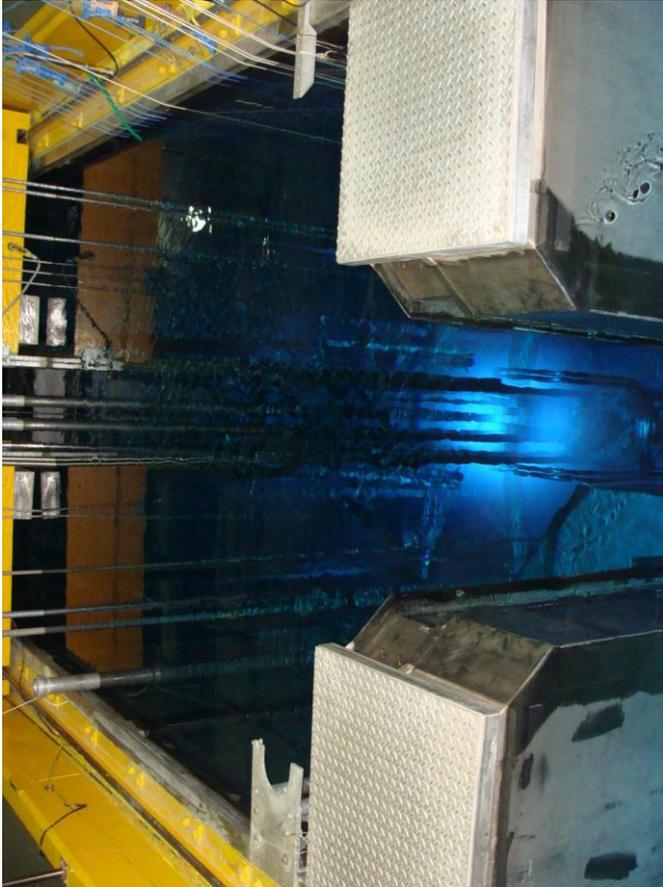


Figura 6. Visão da superfície da piscina do Reator IEA-R1, onde em seu interior, mergulhado em 19 metros de água deionizada, se encontra seu núcleo.

2.2.3. Sistema de Colimação²⁰

O colimador tem a função de dar forma ao feixe de nêutrons que incidirá na amostra. Um colimador é caracterizado pelo seu comprimento (L) e pela sua abertura de entrada do feixe (D). A razão de colimação, L/D ²⁹, está relacionada à chamada resolução geométrica (U_g), a qual quantifica as distorções na imagem, denominadas penumbra, e vem dada pela equação:

$$U_g = x/(L/D) \quad (10)$$

sendo “ x “ a distância do objeto a ser radiografado ao filme.

Basicamente os colimadores são constituídos por dois tubos coaxiais entre os quais é depositado um material opaco à nêutrons. Além disto, este material deve ser tal que a radiação secundária resultante da absorção dos nêutrons, não venha a contribuir significativamente na formação da imagem. Como exemplo pode-se citar o Boro. A qualidade de uma imagem radiográfica será tanto

²⁹ PUGLIESI, R.; STANOJEV PEREIRA, M.A.; SCHOUERI, R.M. Method to evaluate the L/D Ratio of Neutron Imaging Beams. **Brazilian Journal of Radiation Science** v. 5, (1), p. 1-7, 2017.

melhor quanto menor for o valor de U_g . Isto significa elevar a razão L/D . Entretanto, o fluxo de nêutrons (ϕ) extraído do colimador que incidirá na amostra vem dado pela equação:

$$\phi = \phi_0(D/4L)^2 \quad (11)$$

sendo ϕ_0 o fluxo de nêutrons na entrada no colimador.

Assim o compromisso entre (ϕ) e (U_g) dependerá basicamente da intensidade da fonte de nêutrons utilizada. Na Figura 7 é mostrado um colimador do tipo cônico divergente empregado em radiografia, bem como o efeito de penumbra.

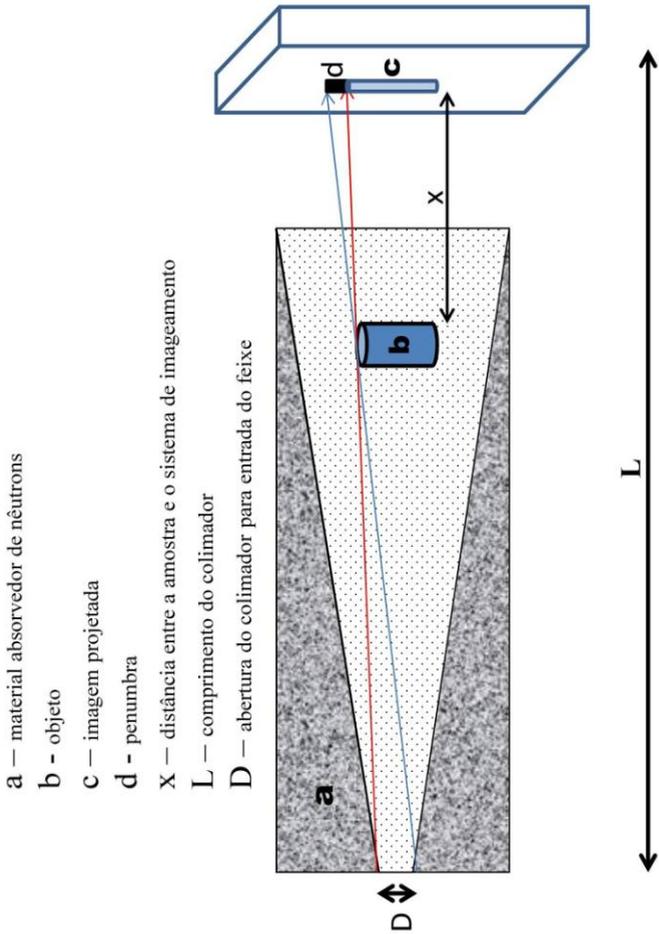


Figura 7. Efeito da divergência angular do feixe de nêutrons em um colimador cônico divergente com a formação da penumbra.

2.2.4. Filtros contra radiação gama [14, 21, 24]

Fundamentalmente os filtros tem a função de reduzir a intensidade da radiação gama presente no feixe de nêutrons, de modo a viabilizar a obtenção de radiografias com nêutrons em filmes convencionais para Raios - X. De acordo com a literatura, a razão entre o fluxo de nêutrons e a dose de radiação gama no local de irradiação das amostras deverá ser $n/\gamma > 10^5$ n/cm².mrem. Abaixo destes valores uma gamagrafia será sobreposta à radiografia com nêutrons, o que prejudica a resolução da imagem. Os materiais para esta finalidade devem possuir número atômico elevado e baixos valores para as seções de choque de absorção e de espalhamento de nêutrons, de modo a não atenuar demasiadamente o feixe de nêutrons. Dentre os materiais comumente utilizados destacam-se o Chumbo e o Bismuto que possuem Z=82 e Z=83, seções de choque para absorção de 170mbarn e 34mbarn e de espalhamento ~9barn, ambas referentes à região térmica. De uma forma geral um equipamento para radiografia com nêutrons deve possuir as seguintes características:

- fluxo de nêutrons térmicos na amostra entre 10^4 e 10^8 n/cm²s
- energia cinética do nêutron na faixa térmica (meV)
- sistema de colimação com, $10 \leq L/D \leq 500$
- razão (nêutron/gama), $n/\gamma > 10^5$ n/cm².mrem

2.2.5. Conversor e meio sensível.

Como já mencionado anteriormente, para que um feixe de nêutrons possa ser empregado para produzir uma imagem, há a necessidade de utilização da tela conversora, para transformá-lo em algum tipo de radiação ionizante capaz de sensibilizar o meio no qual a imagem será formada. Os materiais que compõe estas telas devem possuir elevada secção de choque para a absorção de nêutrons, e dentre eles destacam-se o Gadolínio, Disprósio, Boro e o Lítio. A Tabela 7 mostra as características de alguns conversores empregados em radiografia com nêutrons.

Além destes listados, ainda há o conjunto formado pelo conversor cintilador de Fluoreto de Lítio e Sulfeto de Zinco - LiF(ZnS) - em conjunto com uma câmera de vídeo com sensor de imagem CCD, conjunto que é utilizado para obtenção de imagens em tempo real e na técnica da Tomografia com Nêutrons.

Neste caso de conversor, uma mistura entre os dois compostos, LiF e ZnS, em proporções que variam dependendo da finalidade do cintilador, e com uma espessura típica de 450 μm , é depositada em uma base de Alumínio com 2 ou 3 mm de espessura, e a reação nuclear responsável pela geração das partículas ionizantes é ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}^{20,30,31}$.

A partícula alfa gerada interage com o sulfeto de zinco dando origem a uma cintilação. Esta cintilação é capturada pelo sensor CCD da câmera de vídeo onde é gerada uma corrente elétrica, que é proporcional à intensidade da cintilação, e quanto maior a corrente maior o brilho na imagem resultante, e quanto menor, mais escuro³².

³⁰ BANHART, J.; KARDJILOV, N.; MANKE, I.; HILGER, A.; DAWSON, M.; KANDEMIR, E. T. Neutron Tomography In: Second Australian Tomography Workshop, 2008.

³¹ KOERNER, S.; LEHMANN, E.; VONTOBEL, E P. Design and optimization of a CCD-neutron radiography detector. **Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A**, v. 454, n. 1, p. 158–164, 2000.

³² KODAK, Kodak image sensors, Users Manual, n° Ccd, 2008.

Tabela 7. Características de alguns conversores comumente empregados para a obtenção de imagens neutronográficas.

| Conversor | Abund.isot. (%) | Reação | σ_{abs} (barn) | Meia-vida | Partícula ionizante |
|-----------|--------------------|-------------------------------|--------------------------|-----------|------------------------|
| Boro | 19,5 | $B^{10}(n,\alpha)Li^7$ | 3770 | - | α |
| Cádmio | 12,3 | $Cd^{113}(n,\gamma)Cd^{114}$ | 20.000 | - | γ |
| Índio | 95,7 | $In^{115}(n,\gamma)In^{116}$ | 45 | 13 s | β |
| | | $In^{115}(n,\gamma)In^{116m}$ | 155 | 54,1 m | |
| Gadolínio | 14,7 | $Gd^{155}(n,\gamma)Gd^{156}$ | 61.000 | - | e^- |
| | | $Gd^{157}(n,\gamma)Gd^{158}$ | 240.000 | - | |
| Disprósio | 28,1 | $Dy^{164}(n,\gamma)Dy^{165}$ | 2.000 | 2,3h | β |
| | | $Dy^{164}(n,\gamma)Dy^{165m}$ | 500 | 1,25m | |
| Ouro | 100 | $Au^{197}(n,\gamma)Au^{198}$ | 96 | 2,7d | β |

Capítulo 3



**Imageamento com
nêutrons no IPEN-
CNEN/SP**

3.1. Primórdios Radiográficos

As atividades referentes à técnica da radiografia com nêutrons, abaixo da linha do equador, iniciou-se na Divisão de Física Nuclear, antiga TFF, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP) em meados de 1987, depois de realizados alguns estudos preliminares da viabilidade de se obter radiografias em polímeros, quando irradiado com nêutrons, oriundos do reator nuclear de pesquisa IEA-R1^{33,34,35}.

Técnica inédita no Brasil e na América Latina, utilizou-se inicialmente o canal de irradiação 03, onde operava o espectrômetro tipo filtro de berílio-tempo de vôo. O feixe do canal 03 foi empregado sem qualquer alteração, obtendo-se os dados de caracterização da técnica da radiografia com nêutrons em detectores de traços nucleares de estado sólido (SSNTD), e filmes convencionais de emulsão. A Figura 8 mostra as primeiras imagens

³³ de MORAES, M.A.P.V. Detecção de Radônio em solos por meio da técnica dos Detectores de Traços Nucleares de Estado Sólido. MSc. Thesis. CNEN/SP, 1982.

³⁴ de MORAES, M.A.P.V.; PUGLIESI, R; KHOURI, M.T.F.C. Determinação de boro em soluções aquosas, empregando um feixe de nêutrons filtrado, pela técnica do registro de traços. Publicação Ipen, ipen/cnen/ s.p.ep, v. 86, 1985.

³⁵ PUGLIESI, R; de MORAES, M.A.P.V. Aspectos qualitativos da neutrongrafia pela técnica do registro de traços. CIÊNCIA E CULTURA, São paulo, v. 39, n. 8, p. 772-774, 1987.

radiográficas obtidas no canal de irradiação n° 3 do reator IEA-R1, publicadas na década de 1987³⁶.

Posteriormente, foram feitas medidas de viabilidade no canal 10, no qual operava o espectrometro três eixos. Neste canal foram necessárias adaptações internas inserindo filtros de Chumbo para atenuar a radiação gama. A tabela 5 mostra as principais características destes feixes extraídos, cuja caracterização foi realizada empregando os polímeros Makrofol-E, CN-85, CR-39 e LR-115, bem como diversos filmes convencionais de Raios-X, em conjunto com telas conversoras confeccionadas de Boro natural, Disprósio e Gadolínio.

³⁶ PUGLIESI, R; DE MORAES, M.A.P.V. Aspectos qualitativos da neutrongrafia pela técnica do registro de traços. Ciência e Cultura, São paulo, v. 39, n. 8, p. 772-774, 1987.

Tabela 8 - Características dos feixes de nêutrons extraídos dos canais de irradiação 03 e 10.

| Canal | Fluxo N/s.cm ² | Filtros | Razão L/D | Razão Cd(Au) | Razão-n/γ N/cm ² .mrem | Energia meV | Diâmetro feixe-cm |
|-------|------------------------------|---------|--------------|-----------------|--------------------------------------|----------------|----------------------|
| 03 | 1.10 ⁵ | Pb/Be | 20 | 2000 | 4.10 ⁵ | 5,2 | 20 |
| 10 | 1.10 ⁶ | Pb | 40 | 200 | 4.10 ⁵ | 5 | 10 |

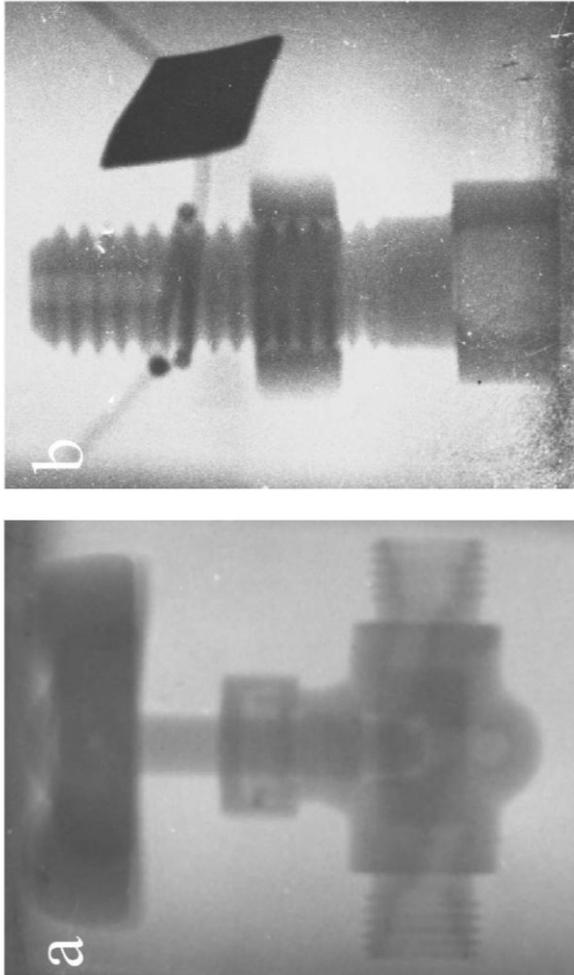


Figura 8 - Primeiras neutrongrafias obtidas no canal de irradiação nº3 do reator IEA-R1. (a) Válvula de pressão tipo agulha. (b) Parafuso tipo Allen.

Otimizado e caracterizado, o equipamento de radiografia com nêutrons instalado no canal de irradiação nº10 do Reator IEA-R1 propiciou a aplicação da técnica na inspeção de materiais hidrogenados, e a participação do grupo no 3º Workshop de Combustão e Propulsão, realizado na Faculdade de Engenharia Química (Lorena-SP), em 1989³⁷. Empregando a técnica de conversão direta (conversor de Gadolínio) e indireta (conversor de Disprósio), foi demonstrada a viabilidade de inspecionar o interior de materiais metálicos que continham substâncias hidrogenadas em seu interior^{38,39}.

A apresentação deste trabalho abriu novas linhas de pesquisa acadêmica na área do nascente projeto aeroespacial brasileiro. No segmento aeronáutico, foram realizados ensaios de viabilidade para inspecionar entupimentos em micro-orifícios existentes na estrutura de pás de turbina.

³⁷ PUGLIESI, R; YAMAZAKI, I.M; ASSUNÇÃO, M.P.M. Radiografia com nêutrons: aplicação na inspeção de materiais hidrogenados. In: 3º. Workshop de Combustão e Propulsão, 28-30 de novembro, Lorena, SP, 1989.

³⁸ de MENEZES, M.O; PUGLIESI, R. Radiografia com nêutrons pelos métodos de conversão direta e indireta. In: 44a. Reunião Anual da SBPC, 12-17 de julho, São Paulo, SP, 1992.

³⁹ de MENEZES, M.O. Desenvolvimento e aplicação da Técnica da Radiografia com nêutrons por conversão direta e indireta. Dissertação de Mestrado. Comissão Nacional de Energia Nuclear, IPEN-CNEN/SP, 1994.

Além das aplicações em tecnologia aeroespacial e aeronáutica, foram feitos testes de viabilidade para aplicação no segmento automobilístico, que mostrou interesse na inspeção da distribuição dos componentes geradores de gás para air-bags, contidos em suas estruturas metálicas e, na indústria de construção civil, a técnica pode ser empregada na análise de micro rachaduras em concreto⁴⁰.

Baseado nos resultados, apresentados na Tabela 8, verificou-se que o feixe de nêutrons, desejável para um arranjo experimental com propósitos radiográficos, deveria possuir fundamentalmente características similares daquelas do canal 10, porém com fluxo um pouco superior. Isto para se minimizar o tempo de obtenção da radiografia. Entre 1984 e 1991, vários trabalhos foram realizados no canal 10 do reator IEA-R1 do IPEN-CNEN/SP, construindo um amplo e sólido *Know-how* acerca da obtenção e processamento de radiografias e de desenvolvimento de equipamentos otimizados para as diversas aplicações, aptos a serem realizadas *in situ*^{37,41,42,43,44}.

⁴⁰ PUGLIESI, R., ANDRADE, M.L.G. Study of cracking in concrete by neutron radiography. **Applied Radiation and Isotopes**, v.48 (3), p. 339-344, 1997.

⁴¹ PUGLIESI, R.; de MORAES, M.A.P.V.; YAMAZAKI, I.M.; ACOSTA, C.F. Neutronography experiments at the IEA-R1 nuclear research reactor. In: International conference on Nuclear data for science and technology, Mito, Japan, May 30-June 03, p.1095-97,1988.

Nesta mesma época de 1984, iniciou-se a disciplina de Pós Graduação “TNA5729 - Nêutrons Lentos. Aplicação na Tecnologia Nuclear e na Análise de Materiais’ -, organizada e ministrada pelo Prof. Dr. Reynaldo Pugliesi, com o objetivo de oferecer aos alunos de Mestrado e Doutorado do IPEN e da Universidade de São Paulo os conceitos básicos, teóricos e experimentais, acerca das propriedades dos nêutrons, sua utilização nas pesquisas básicas e aplicadas em diversas áreas da ciência e tecnologia e, sua interação com a matéria, cuja peculiaridade o torna único e objeto de estudo particular na Física. Atualmente, além do Prof. Dr. Pugliesi, o curso é ministrado pelos pesquisadores do IPEN Dr. Mário Olímpio de Menezes e Dr. Renato Semmler.

Em 1992, o grupo de radiografia do IPEN-CNEN/SP instalou no canal 08 do reator um equipamento totalmente projetado e desenvolvido

⁴² PUGLIESI, R.; de MORAES, M.A.P.V.; YAMAZAKI, I.M.; ACOSTA, C.F. Radiografia com nêutrons no reator nuclear IEA-R1. In: 2º Congresso Geral de Energia Nuclear. Rio de Janeiro, 24-29 de abril, 1988.

⁴³ PUGLIESI, R.; de MORAES, M.A.P.V.; YAMAZAKI, I.M. Characteristics of some track detectors applied for neutron radiography. **Int. J. Radiat. Appl. Instrum., Part A. Appl. Radiat. Isot.**, v. 41, n. 6, p. 601-605, 1990.

⁴⁴ PUGLIESI, R.; de MORAES, M.A.P.V.; YAMAZAKI, I.M. Characteristics of some track detectors for neutron radiography. In: 3º. Congresso Geral de Energia Nuclear, 22-27 de julho, 1990, Rio de Janeiro, RJ. p. 18-25.

por seus componentes, e que ficou em operação até 1997, quando foi substituída em 1998 por outro, cujo espaço interno maior possibilitava a manipulação e posicionamento de amostras com variadas dimensões para serem inspecionadas.

No interior deste canal foram inseridos dois tubos de Alumínio, soldados entre si, com comprimento total de 1,9 metros e diâmetro externo de cerca de 20cm, cuja finalidade era de conter os colimadores, filtros e outros componentes essenciais à extração do feixe de nêutrons.

O feixe, proveniente do núcleo do reator, penetra pela face frontal deste tubo, e em seu caminho atinge:

- um filtro contra radiação gama confeccionado em Bismuto. As suas dimensões foram calculadas de modo a manter a razão $n/\gamma > 10^5$ n/cm².mRem, e neste caso sua espessura deve ser de 25cm com diâmetro de 14cm. Com esta espessura o filtro conduz à uma redução de um fator $\sim 6 \times 10^{-6}$ para a intensidade da radiação gama e $\sim 2 \times 10^{-3}$ para a intensidade dos nêutrons com energia superior a 1,8meV, e de $\sim 0,69$ para energias menores. É importante salientar que a eficácia do Bismuto para atenuação da radiação gama é similar à do Chumbo, pois seus números atômicos são muito próximos. Entretanto a sua seleção deu-se principalmente porque este material apresenta uma maior transparência aos nêutrons, pois possui uma seção de choque para absorção de 34mbarn, a qual é 5 vezes

menor que a do Chumbo, enquanto que as de espalhamento permanecem ambas próximas à 9barn;

• um colimador cônico divergente composto por uma estrutura de Alumínio de alta pureza preenchida com uma mistura de ácido bórico e parafina derretida (parafina borada). Este colimador possuía as seguintes características:

- comprimento: 150cm.

- diâmetro da abertura frontal: 7cm.

- diâmetro da abertura de saída: 16cm.

- razão de colimação (L/D) ~ 70, dada pela razão entre a distância de entrada do feixe ao local de irradiação da amostra.

Com estas características, este colimador conduzia a uma atenuação de $1,2 \times 10^{-5}$ ao feixe de nêutrons que incide em sua abertura frontal. Nestas condições a redução total ao fluxo de nêutrons causada pelos filtros e pela colimação era de $2,5 \times 10^{-8}$, resultando um fluxo de $\sim 1,75 \times 10^6$ n/s.cm² no local de irradiação com uma dose gama e de nêutrons de ~ 2 Rem/h e ~ 7 Rem/h respectivamente.

• Anel de Chumbo revestido com Cádmio com diâmetro externo de ~ 20 cm e interno de ~ 14 cm e comprimento 25cm no interior do qual o filtro de bismuto e inserido para minimizar o “efeito coroa” das radiações gama e nêutrons;

• Obturadores de feixe - Com o intuito de aumentar a segurança do equipamento e do pessoal, em termos de proteção radiológica, foram instalados dois obturadores, um contra radiação neutrônica, e outro contra radiação gama. O primeiro encontrava-se no interior da blindagem biológica do reator e estava posicionado junto ao colimador de nêutrons. Confeccionado em Alumínio, um dispositivo remoto acionava um sistema de ar comprimido que preenchia todo o seu interior com água deionizada quando o feixe não estava sendo utilizado, e esvaziado quando se desejava dar início a irradiação. O segundo era uma estrutura composta de Chumbo, Gadolínio e Cádmio com dimensões de 40cmx40cm e 20cm de espessura na direção do feixe, posicionado junto a blindagem biológica do reator. Este obturador se movimentava na direção vertical por meio de uma talha elétrica e interceptava perpendicularmente o feixe de nêutrons quando este não estava sendo utilizado.

Estes dois obturadores permitiam que a dose de radiação neutrônica e gama estivessem à níveis seguros tanto no espaço interno quanto externa da blindagem.

Fazia parte deste equipamento uma blindagem externa, composta basicamente por parafina, ácido bórico, Cádmio, Chumbo e concreto de barita, posicionada junto à blindagem biológica do reator. Possuía duas paredes de Chumbo de dimensões 2,0mx1,0m e espessura 0,1m, e duas outras independentes, uma de concreto de barita e outra de

parafina borada que davam continuidade às de Chumbo, com dimensões 2m x 3,5m e espessura de 0,3m cada uma.

Por fim possuía também um *beam-catcher* com aproximadamente 4.000Kg que se movia horizontalmente, sobre rodízios e trilhos, até 2 metros ao longo do feixe de nêutrons permitindo várias posições de irradiação, um fácil manuseio de amostras e, uma contribuição desprezível dos nêutrons e da radiação gama espalhadas pela própria blindagem, na formação da imagem radiográfica.

As Figuras 9 e 10 mostram os componentes do grupo de radiografia com nêutrons nestas épocas, e a Tabela 9 apresenta suas principais características.

Desde então, o Grupo de Imageamento com Nêutrons vem se dedicando ao aprimoramento de sua estrutura física e humana, a fim de disponibilizar para a comunidade acadêmica e tecnológica nacional um equipamento de excelência para pesquisa e na formação de pessoal técnico/científico especializado nas áreas afins^{45,46,47,48}.

⁴⁵ PUGLIESI, R.; DE MENEZES, M.O.; ASSUNÇÃO, M.P.M. Detection of aluminium corrosion products by neutron radiography. **Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part A Applied Radiation Isotopes**, v. 43, n. 5, p. 663-665, 1992.

⁴⁶ ASSUNÇÃO, M.P.M.; PUGLIESI, R. Radiografia com nêutrons utilizando detectores de traços nucleares de estado solido. In: 44a. Reunião Anual da SBPC, 12-17 de julho, São Paulo, SP, 1992.

Tabela 9 – Características do feixe de nêutrons extraído do BH-8.

| | |
|---|--|
| Fluxo no local de irradiação | $1,75 \times 10^6 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ |
| Diâmetro útil | 20cm |
| Energia média | 7meV |
| Filtros | Pb, Bi |
| Razão L/D | 70 |
| Razão Cd (Au) | 150 |
| Razão-n/ γ ($\text{n/cm}^2 \cdot \text{mrem}$) | 8×10^5 |

⁴⁷ de MENEZES, M.O; PUGLIESI, R. Radiografia com nêutrons pelos métodos de conversão direta e indireta. In: 44a. Reunião Anual da SBPC, 12-17 de julho Sao Paulo, SP, 1992,

⁴⁸ ASSUNÇÃO, M.P.M; PUGLIESI, R; de MENEZES, M.O. Characteristics of the solid state nuclear track detector CN-85 for neutron radiography. In: 4th World Conference on Neutron Radiography, May 10-16, 1992, San Francisco, California.

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



Figura 9. Primeiro equipamento de radiografia com nêutrons do IPEN. A Caixa azul, em segundo plano, era a blindagem de nêutrons com o *beam catcher* acoplado atrás. Em Primeiro plano, da direita para a esquerda da figura vemos o doutorando Mário Olímpio de Menezes, no meio o Dr. Reynaldo Pugliesi e na esquerda o mestrando Marco A. Stanojev Pereira. 1997.



Figura 10. Segundo equipamento de radiografia com nêutrons do IPEN. A Blindagem foi otimizada em dimensão interna e melhorada em termos de proteção radiológica. Em primeiro plano, da direita para a esquerda da figura vemos o doutorando Mário O. de Menezes, ao seu lado o mestrando Marcos L. G. Andrade, seguido pelo Dr. Reynaldo Pugliesi e na esquerda o mestrando Marco A. S. Pereira. 1998.

3.2. Trabalhos Acadêmicos

Com a verificação da viabilidade e a operação da técnica solidificada no reator nuclear IEA-R1 do IPEN-CNEN/SP, a formação de profissionais qualificados iniciou-se oficialmente quando a primeira dissertação de Mestrado foi defendida⁴⁹.

Este trabalho vinha estabelecer as bases quantitativas para a obtenção de radiografias com nêutrons utilizando polímeros especiais como filmes radiográficos. Esta técnica utiliza uma tela conversora confeccionada de Boro natural em contato próximo com o polímero. Este sistema é então colocado frente ao feixe de nêutrons, no qual o conjunto do produto da reação nuclear $B^{10}(n,\alpha)Li^7$ formará uma imagem latente que, após um ataque químico adequado, dará origem à uma imagem bidimensional e visível a olho nú.

Em 1994, outra Dissertação de Mestrado vinha lançar as bases para a obtenção de radiografias com nêutrons utilizando filmes de emulsão, utilizados normalmente em radiografias com Raios-X. Neste trabalho foi desenvolvida a técnica da radiografia com nêutrons por conversão direta (utilizando uma tela conversora de Gadolínio metálico) e, indireta (utilizando uma tela de Disprósio metálico), em

⁴⁹ ASSUNÇÃO, M. P. M. **Desenvolvimento da Técnica de Radiografia com Nêutrons pelo método do Registro de Traços Nucleares**. São Paulo: USP, 1992. 86p.

conjunto com o filme de emulsão que, após a irradiação no feixe de nêutrons, este passa pelo processo de revelação, utilizando os reagentes padrões da Kodak⁵⁰.

Além da tela metálica de Gadolínio, telas de Cádmio, Prata, Samário, telas cintiladoras à base de uma mistura de Fluoreto de Lítio-6 e Sulfeto de Zinco, são também comumente empregadas no Método Direto.

Nos casos em que a amostra a ser inspecionada apresenta altas doses de radiação gama o Método Direto, que emprega filmes de emulsão, não é viável, pois são sensíveis a este tipo de radiação sem precisar empregar qualquer tipo de conversor, o que resultará de uma imagem radiográfica sobreposta à neutrongrafia, prejudicando sua análise. Nestes casos emprega-se o Método Indireto, que é baseado na radioatividade induzida pela absorção dos nêutrons pela tela conversora. Neste método a amostra é irradiada em conjunto apenas com a tela conversora, que registra o padrão de nêutrons transmitido pela amostra e, em seguida, esta tela é colocada em firme contato com o filme de emulsão para a transferência da imagem registrada através da radiação de decaimento do material, sendo que este processo deve ser realizado no interior de uma

⁵⁰ de MENEZES, M.O. **Desenvolvimento e aplicação da Técnica da Radiografia com nêutrons por conversão direta e indireta.** Dissertação de Mestrado. Comissão Nacional de Energia Nuclear, IPEN-CNEN/SP, 1994.

câmara escura, protegida contra a luz ambiente que pode velar o filme de emulsão. Sua desvantagem é o maior tempo dispendido para se obter uma radiografia e, a resolução da imagem ser pior, quando comparada com o Método Direto. A vantagem é que é o único método disponível para se analisar, por exemplo, elementos combustíveis de um reator nuclear.

As telas conversoras utilizadas neste método devem possuir decaimento radioativo cuja meia-vida possibilite tempos de exposição e de transferência da imagem preferivelmente curtos, questão de horas. Neste caso o material mais empregado para este fim é uma tela confeccionada com o elemento Disprósio, que apresenta uma alta secção de choque de absorção para nêutrons térmicos (ver Tabela 7).

Em 1997, contemplado pelo projeto “Radiografia com nêutrons em tempo real” financiado pela FAPESP, o Grupo de Radiografia com nêutrons do IPEN-CNEN/SP deu um importante passo na aplicação da técnica para a inspeção, em tempo real, de processos dinâmicos de movimento de líquidos, óleos, etc, mesmo se envolvidos por espessas camadas de metais. O fruto deste projeto foi a defesa da Tese de Doutorado “Radiografia com Nêutrons em Tempo Real”, em 2000 e, um trabalho desenvolvido em conjunto com o Instituto do Coração (InCor) de São Paulo, na análise da estrutura interna de um coração artificial

confeccionado de Titânio, como mostrado na Figura 11^{51,52,53}.

Em 1998, com a aprovação do projeto “Real Time Neutron Radiography” pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), o grupo de imageamento com nêutrons projetou e construiu um novo equipamento de excelência em termos de proteção radiológica e qualidade na imagem, mais amplo e otimizado, para a realização das diversas atividades neutronográficas desenvolvidas pelo grupo de radiografia. As Figuras 12, 13, 14, 15 e 16 mostram parte da reestruturação do equipamento de imageamento com nêutrons, realizado desde a construção de um novo tubo colimador até a blindagem externa.

⁵¹ de MENEZES, M.O. **Radiografia com Nêutrons em Tempo Real**. Tese de Doutorado. Comissão Nacional de Energia Nuclear, IPEN-CNEN/SP, 2000.

⁵² de MENEZES, M.O.; PUGLIESI, R.; STANOJEV PEREIRA, M. A.; ANDRADE, M. L. G. Real-Time Neutron Radiography at the IEA-R1m Nuclear Research Reactor. **Braz. J. Phys.** v.33 n.2, June 2003.

⁵³ PUGLIESI, R.; GERALDO, L. P.; de MENEZES M. O.; ANDRADE, M. L. G.; STANOJEV PEREIRA, M. A.; MAIZATO, M. S. **Inspection of an Artificial Heart by the Neutron Radiography Technique**. In: 3rd International Topical Meeting on NR. Lucerne, Switzerland, March 16-19, 1998.

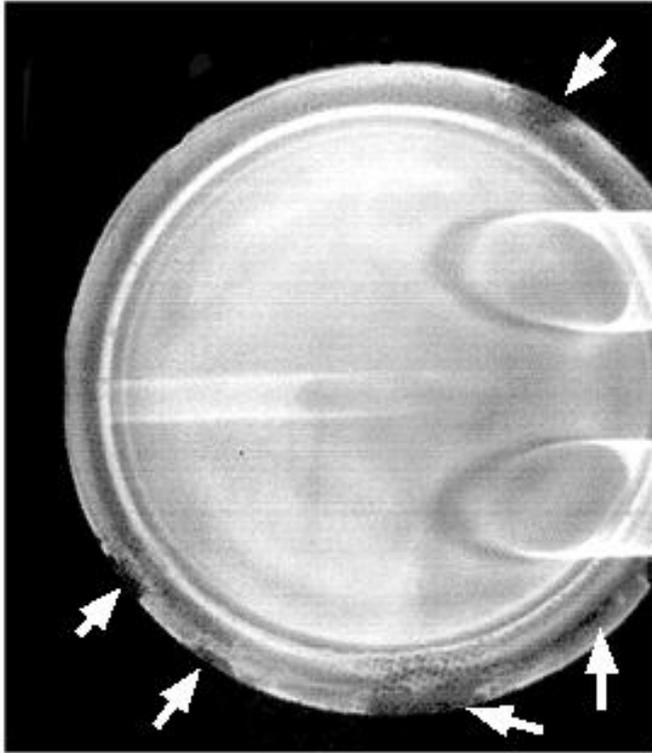


Figura 11 – Neutronografia de um protótipo de coração artificial confeccionado de titânio. As setas indicam as falhas na soldagem, por onde vazava o fluido, detalhe visto somente pela presente técnica.

Com a técnica de radiografia com nêutrons utilizando polímeros como películas de registro de imagens estabelecida desde o ano de 1992 e, utilizando toda a infraestrutura existente, em 2000 é apresentada a Dissertação de Mestrado com o tema: “Emprego dos Policarbonatos Makrofol-DE e CR-39 em Radiografia com Nêutrons”, com o intuito de caracterizar estes dois polímeros, comumente utilizados na indústria automobilística, como filmes radiográficos. A Figura 17 mostra algumas de suas aplicações⁵⁴.

⁵⁴ STANOJEV PEREIRA, M. A. **Emprego dos Policarbonatos Makrofol-DE e CR-39 em Radiografia com Nêutrons**. Dissertação de Mestrado. Comissão Nacional de Energia Nuclear, IPEN-CNEN/SP, 2000.

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



Figura 12 – Restruturação do canal BH-8 do equipamento de radiografia com nêutrons. No meio o Dr. Pugliesi e a sua volta a competente equipe da Ofina Mecânica do IPEN, liderados pelo sr. Mantovani (à direita da foto).



Figura 13 – Restruturação do canal BH-8 do equipamento de radiografia com nêutrons. No meio o Dr. Pugliesi e a sua direita o Dr. de Menezes.

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



Figura 14 – Restruturação do canal BH-8 do equipamento de radiografia com nêutrons. No meio o Dr. Pugliesi e a sua direita seu filho, o Dr. Fábio Pugliesi.



Figura 15 – Reestruturação do canal BH-8 do equipamento de radiografia com nêutrons. Detalhe da saída do feixe de nêutrons e as blindagens laterais de chumbo e de parafina borada e concreto.

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



Figura 16 – Reestruturação do canal BH-8 do equipamento de radiografia com nêutrons. O Dr. Pugliesi manejando a empilhadeira para posicionamento da blindagem de parafina borada.

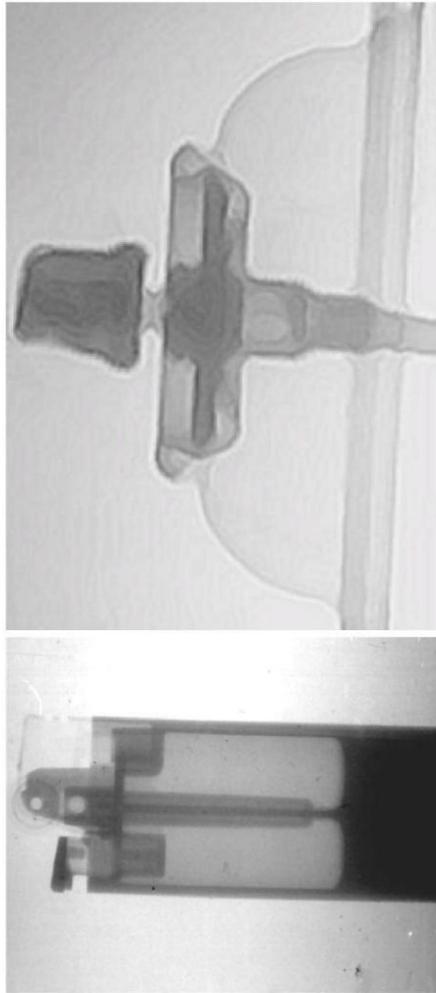


Figura 17 – Neutronografia da estrutura interna de um Isqueiro e de um recipiente pressurizado, obtidos nos polímeros SSNTDs Makrofol DE e CR-39, respectivamente.

Em 2002, foi apresentada a Dissertação de Mestrado intitulada “Caracterização de sistemas filme–conversor para radiografia com nêutrons”. Esta tinha por objetivo estudar quatro métodos, ou sistema filme-conversor, para obtenção de radiografias com nêutrons em películas de emulsão utilizadas normalmente para Raios-X, determinando as melhores condições para a obtenção de imagens radiográficas em termos da sensibilidade para discernir espessuras de materiais e sua resolução espacial⁵⁵.

Em meados de 2003 o grupo de radiografia com nêutrons do IPEN é contemplado com recursos de um projeto aprovado e financiado pela IAEA com o tema: “New images from old neutron converter screens”, cujo objetivo era o desenvolvimento e aplicação de novas técnicas radiográficas para a inspeção de materiais finos, da ordem de unidades de micra.

O desenvolvimento desta nova técnica, utilizando alfa, prótons e elétrons como partículas de prova oriundas de telas conversoras compostas pelos elementos Boro, Gadolínio e ${}^6\text{LiF}$, através de reações nucleares induzidas por nêutrons oriundos do reator IEA-R1, foi tema de duas teses de doutoramento, onde toda a metodologia foi

⁵⁵ ANDRADE, M.L.G. **Caracterização de sistemas filme – conversor para radiografia com nêutrons**. Dissertação de Mestrado. Comissão Nacional de Energia Nuclear, IPEN-CNEN/SP, 2002.

desenvolvida originalmente pelo grupo de imageamento com nêutrons do IPEN, ampliando ainda mais os campos de emprego da radiografia com nêutrons como técnica de ensaio não destrutivo e não invasivo, como pode ser visto nas aplicações apresentadas nas Figuras 18, 19, 20, 21^{56,57,58,59,60,61,62,63}.

⁵⁶ IAEA Neutron imaging: **A Non-destructive Tool for Materials Testing**. IAEA-TECDOC, 2008–1064, 2008.

⁵⁷ STANOJEV PEREIRA, M.A. **Radiografia com partículas alfa induzidas por nêutrons**. Tese de Doutorado. Comissão Nacional de Energia Nuclear, IPEN-CNEN/SP, 2008.

⁵⁸ ANDRADE, M.L.G. **Radiografia com elétrons induzidos por nêutrons**. Tese de Doutorado. Comissão Nacional de Energia Nuclear, IPEN-CNEN/SP, 2008.

⁵⁹ PUGLIESI, F. **Caracterização do Durolon como detector de traços nucleares de estado sólido**. Tese de Doutorado. Comissão Nacional de Energia Nuclear, IPEN-CNEN/SP, 2008.

⁶⁰ PUGLIESI, F.; SCIANI, V.; STANOJEV PEREIRA, M.A.; PUGLIESI, R. Digital System to Characterize Solid State Nuclear Track Detectors. **Braz. J. Phys.** v.37, n.2a, São Paulo, 2007.

⁶¹ PUGLIESI, R.; ANDRADE, M.L.G.; STANOJEV PEREIRA, M.A.; PUGLIESI, F. Neutron-induced electron radiography. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, v. 542, p. 81–86, 2005.

⁶² STANOJEV PEREIRA, M.A.; PUGLIESI, R.; PUGLIESI, F. Neutron induced radiography a new technique to inspect the internal structure of thin samples. **Braz. J. Phys.** v.38 n.3a. p.346-349, 2008.

⁶³ STANOJEV PEREIRA, M.A.; PUGLIESI, R.; PUGLIESI, F. Neutron-induced alfa-radiography. **Rad. Measurements**, v.43, p 1226-1230, 2008.

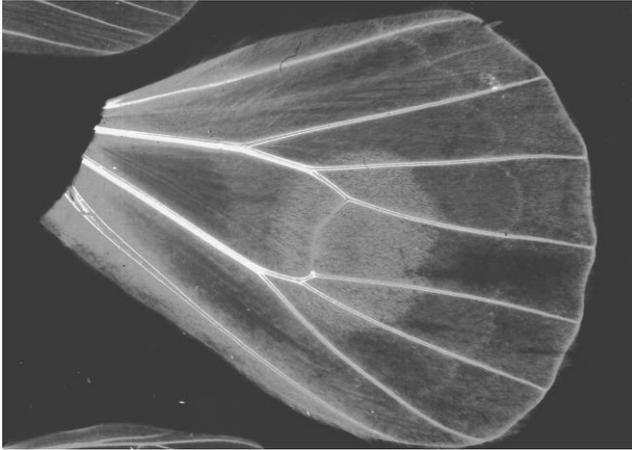


Figura 18 – Radiografia com partículas alfa induzidas por nêutrons de uma asa de mariposa.

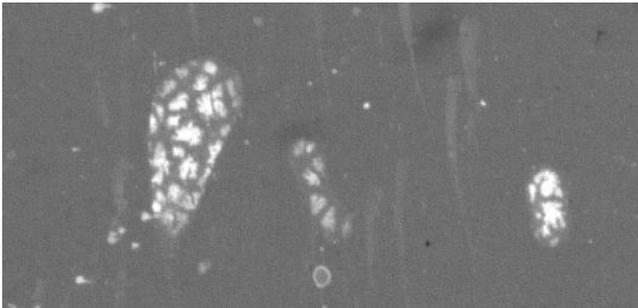
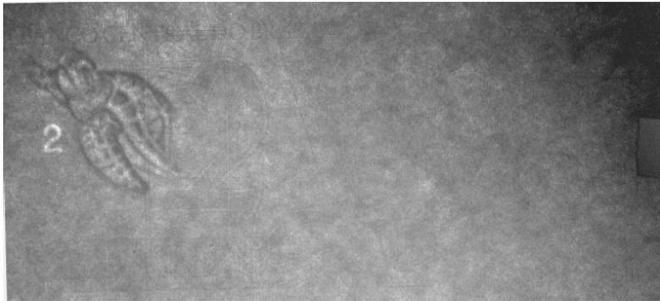


Figura 19 – Radiografia com partículas alfa induzidas por nêutrons de uma colônia de bactérias.



Figura 20 – Radiografia com partículas alfa induzidas por nêutrons de uma fatia histológica com 9 micras de espessura de cérebro de camundongo.

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



(a)



(b)

Figura 21 – Radiografia com elétrons induzida por nêutrons. Cédula de R\$2,00. a) inteira; b) detalhe com a marca d'água.

Durante o desenvolvimento do projeto, o grupo se viu motivado pelas possibilidades desta nova técnica radiográfica e, surpreso pela indisponibilidade inesperada do microfotômetro ótico, que vinha sendo utilizado para analisar intensidade de luz transmitida, fator fundamental para a caracterização de um filme com propósitos radiográficos, iniciou estudos para o desenvolvimento e emprego de um sistema digital para medir, contar traços e analisar esta intensidade de luz transmitida por um polímero, utilizando um computador e um software, substituindo satisfatoriamente o sistema analógico, até então utilizado com êxito. Esta viabilidade e praticidade foram verificadas em 2004 com a publicação de um trabalho inédito, e serviu de base para o desenvolvimento de outro tema de doutoramento, defendido no ano de 2008^{64,65}.

Com isso, novas perspectivas de pesquisa se abriram, permitindo o acesso aos parâmetros

⁶⁴ PUGLIESI, F. **Caracterização do Durolon como detector de traços nucleares de estado sólido**. Tese de Doutorado. Comissão Nacional de Energia Nuclear, IPEN-CNEN/SP, 2008.

⁶⁵ PUGLIESI, F.; SCIANI, V.; STANOJEV PEREIRA, M.A.; PUGLIESI, R. Digital System to Characterize Solid State Nuclear Track Detectors. **Braz. J. Phys.** v.37, n.2a, São Paulo, 2007.

fundamentais que norteiam a teoria da formação da imagem em polímeros, proposta em 1990^{66,67,68,69}.

Em 2009, com o apoio financeiro da FAPESP que aprovou o Projeto de Pesquisas (nº 09 50261-0), foi dado início ao projeto, construção e instalação do novo equipamento para Tomografia com Nêutrons do IPEN-CNEN/SP no canal de irradiação nº 14 do Reator Nuclear IEA-R1, o qual está operacional desde 2011.

Este equipamento substituiu aquele instalado no canal de irradiação nº 08 com grande sucesso, colocando o IPEN como um dos poucos Institutos de Pesquisas Nucleares do mundo com o domínio e condições de aplicar a técnica da inspeção em 3D com nêutrons em materiais de diversos seguimentos e de vários tipos e, em 2016 foi apresentada a Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

⁶⁶ILIC', R.; NAJZER, M. Image Formation in Track-Etch Detector-I. The Large Area Signal Transfer Function. **Nucl. Track Radiat. Meas.** v.17, p.453-460, 1990a.

⁶⁷ILIC', R.; NAJZER, M. Image Formation in Track-Etch Detector-II. The Space-Dependent Transfer Function in Thin Detectors. **Nucl. Track Radiat. Meas.** v.17, p.461-468, 1990b.

⁶⁸ILIC', R.; NAJZER, M. Image Formation In Track-Etch Detector-III. The Space-Dependent Transfer Function in Thick Detectors. **Nucl. Track Radiat. Meas.** v.17, p. 469-473, 1990c.

⁶⁹ILIC', R.; NAJZER, M. Image Formation in Track-Etch Detector-IV. Image Quality. **Nucl. Track Radiat. Meas.** v.17, p.475-481,1990d.

Tecnologia Nuclear com o tema: “Projeto e instalação de um equipamento para Tomografia com Nêutrons no IPEN-CNEN/SP”⁷⁰.

Este equipamento possui excelente qualidade em termos de proteção radiológica, contraste e resolução na imagem, bem como sensibilidade ótima para discernir espessuras de materiais, suficientes para a realização de análises qualitativas e quantitativas em diversos métodos de imageamento como Tempo-Real, Detetores de Traços Nucleares (SSNTD), e a Tomografia com Nêutrons. A Figura 23 é uma versão artística de autoria do M.Sc. Roberto M. Schoueri do atual equipamento para Tomografia com Nêutrons, na qual são destacados alguns dos seus componentes individuais⁷⁰.

⁷⁰SCHOUERI, R. M. **Projeto e instalação de um equipamento para tomografia com nêutrons no IPEN-CNEN/SP**. Dissertação (Mestrado), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN-CNEN/SP, São Paulo, 2016.

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



Figura 22. Montagem do *beam-catcher* nas oficinas do IPEN (cima), e a instalação da blindagem no BH nº14 do Reator Nuclear IEA-R1 (baixo).

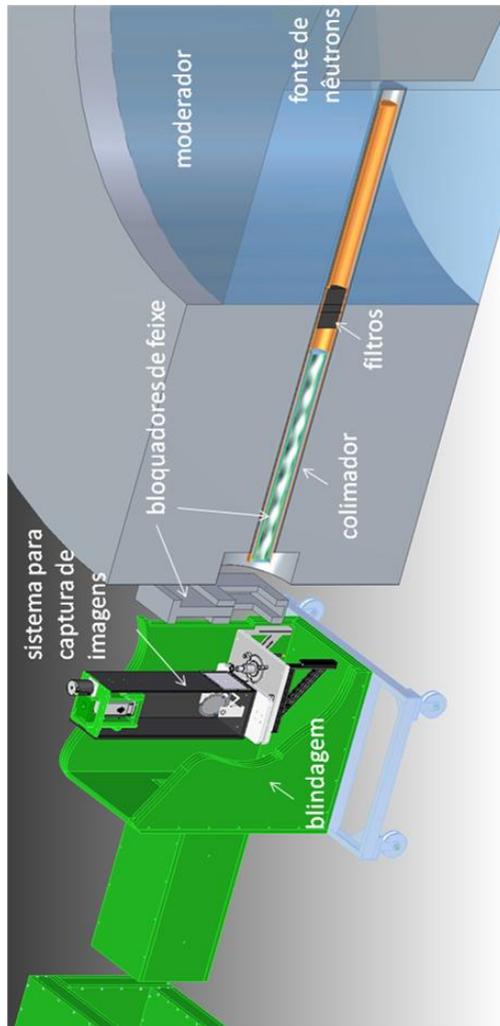


Figura 23. Diagrama esquemático do equipamento de imageamento com nêutrons do IPEN-CNEN/SP. Arte de M.Sc. Roberto M. Schoueri.

O canal de irradiação nº 14 do Reator Nuclear IEA-R1 é radial com relação ao seu núcleo, e a Figura 24 mostra a disposição dos canais de irradiação no interior da piscina do Reator, e uma visão panorâmica do alto do equipamento de Tomografia com Nêutrons instalado. As principais características do feixe extraído, no local de irradiação das amostras, estão listadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Características do equipamento para Tomografia com Nêutrons instalados no BH14 do reator IEA-R1 do IPEN-CNEN/SP.

| Canal de irradiação | BH 14 |
|--|-----------------|
| Fluxo de nêutrons na posição de irradiação ($n.s^{-1}cm^{-2}$) (folhas Au) | 8×10^6 |
| Tempo de irradiação por imagem (s) | 1 |
| Diâmetro do feixe-máx (cm) | 16 |
| Resolução espacial (μm) | 205 ± 24 |
| Tempo/tomografia (s) | 400 |
| Dose de nêutron/tomografia (μSv) | 20 |

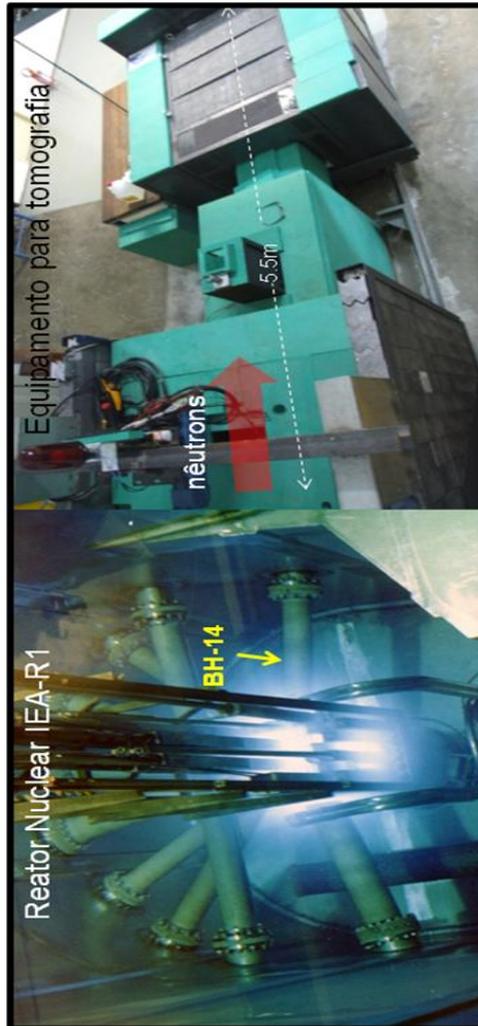


Figura 24. Canais para irradiação no reator nuclear de pesquisas IEA-R1.

3.3. As técnicas de imageamento com nêutrons do IPEN-CNEN-SP.

Como foi mostrado, o grupo de imageamento com nêutrons do Centro do Reator de Pesquisas (CRPq) do IPEN domina várias técnicas de obtenção de imagens digitais e analógicas em 2D, 3D e Tempo-real, utilizando o nêutron como partícula de prova.

É importante salientar que o domínio destas técnicas é importante quando o objetivo é a pesquisa da estrutura interna de objetos dos mais diferentes tipos de composição, pois como dissemos, alguns materiais são possíveis de serem investigados apenas com o emprego da neutronografia. Uma técnica neutronográfica não anula a outra, muito pelo contrário, pois nem sempre a tomografia substitui as técnicas de imageamento bidimensional, e vice-versa. As informações trazidas por cada uma delas podem ser diferentes, e em alguns casos complementares. Por exemplo, um conjunto de imagens bidimensionais com elevada qualidade, em termos de contraste, não é aval para a obtenção de uma tomografia com excelente qualidade. É necessária muita experiência para selecionar a técnica ou conjunto de técnicas adequadas a serem utilizadas na inspeção de um objeto, de modo a obter a maior quantidade de informações que o nêutron pode trazer consigo. Basicamente esta seleção depende da composição, dimensões e forma do objeto. Desta maneira, este Capítulo é dedicado a

uma breve descrição das técnicas de imageamento que envolvem a transmissão de nêutrons, disponíveis no equipamento instalado no IPEN.

Em todas as técnicas, as irradiações são realizadas sempre com o objeto em estudo próximo a posição em que as imagens são obtidas, sendo necessário somente substituir o sistema de captura de imagens pelo conjunto “conversor/meio sensível” adequado.

A Tabela 11 sintetiza algumas das técnicas radiográficas disponíveis no IPEN, bem como suas características operacionais, e com base nas informações nela contidas, será feita uma pequena explanação de seus componentes^{33,34,50,53,71,72,73}.

⁷¹ PUGLIESI, R.; STANOJEV PEREIRA, M. A. Study of the neutron radiography characteristics for the solid state nuclear track detector Makrofol-DE. **Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A**, v. 484, n° 1–3, p. 613–618, 2002.

⁷² PUGLIESI, R.; STANOJEV PEREIRA, M. A.; DE MORAES, M.A.P.V.; DE MENEZES, M. O. Characteristics of the solid state nuclear detector CR-39 for neutron radiography purposes, **Appl. Radiat. Isot.**, v.50, n° 2, p. 375–380, 1999.

⁷³ ASSUNÇÃO, M.P.M.; PUGLIESI, R.; DE MENEZES, M. O. Study of the neutron radiography characteristics for the solid state nuclear track detector Makrofol-E, **Appl. Radiat. Isot.**, v. 45, n° 8, p. 851–855, 1994.

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

Tabela 11. Técnicas de imageamento bidimensional que estão operacionais no IPEN-CNEN/SP.

| Técnica de imageamento | conversor / meio - sensível | Irradiação (s) | Resolução espacial (μm) | Revelação química (h) | Amostra | Imagem |
|------------------------|----------------------------------|----------------|--------------------------------------|-----------------------|------------|-------------------|
| 2D | Gd + filme R-X | 20 | 70 | 0.5 | | analógica |
| 2D | Dy + filme R-X | 600 + 7200 | 400 | 0.5 | radioativa | analógica |
| 2D | B + Polímero | 720 | 30 – 50 | 1 | radioativa | analógica |
| 2D | LiF(ZnS) + câmara de vídeo | 1 | 205 | | | digital |
| 2D Tempo - real | LiF(ZnS) + câmara de vídeo | 1 | 205 | | | digital |
| 2D Tempo - real | LIXI + câmara de vídeo | 0,03 | 440 | | | analógica/digital |

A primeira técnica radiográfica, denominada Método Direto, é composta por uma placa de Gadolínio metálico como conversor de radiação em conjunto com um filme de emulsão, normalmente utilizado para radiografia com Raio-X.

O conversor e o filme são inseridos no interior de um estojo confeccionado em alumínio, blindado contra a luz ambiente que pode velar o filme de emulsão. O objeto em estudo é posicionado fora do estojo e o mais próximo possível deste, de forma que a penumbra ocasionada pela divergência angular do feixe de nêutrons seja minimizada (ver Figura 7). Este conjunto é então posicionado frente ao feixe de nêutrons para irradiação. A intensidade de nêutrons transmitida pelo objeto atinge o conversor de Gadolínio causando uma reação nuclear que gera uma radiação ionizante responsável pela sensibilização do filme de emulsão formando uma imagem latente (ver Tabela 4). Em seguida, o filme passa pelo processo de revelação fotográfica através de um processamento químico composto pelo agente revelador, pelo banho de parada e, finalmente, pelo fixador, o que resulta na formação de uma imagem bidimensional de sua estrutura interna. Os principais aspectos positivos desta técnica são o tempo de irradiação de 20 s, e a resolução espacial na imagem de 70 μm . Seus principais aspectos negativos são a necessidade do processamento químico do filme, o qual demanda um tempo de aproximadamente 0,5 h, e a imagem resultante ser analógica^{14, 20,50}.

Este sistema, bem como todos aqueles que utilizam filmes de emulsão para registro da imagem, são muitíssimos raros de serem empregados nos dias atuais, isso devido à dificuldade de se encontrar no mercado varejista o filme de emulsão utilizado para propósitos radiográficos seja o empregado na indústria ou para diagnósticos médicos, bem como o kit de reagentes para o processamento químico.

A segunda técnica radiográfica é denominada Método Indireto, pelo fato que a formação da imagem requer duas irradiações distintas. É composta por uma placa de Disprósio metálico como conversor de radiação, também em conjunto com um filme de emulsão^{14,20,50}.

Neste método, o objeto em estudo é posicionado o mais próximo possível do conversor de Disprósio e ambos são irradiados no feixe de nêutrons. A intensidade de nêutrons transmitida pelo objeto atinge o conversor de Disprósio causando uma reação nuclear com meia-vida de decaimento de 2,3h, que gera uma radiação ionizante. Em seguida, o Disprósio ativado e o filme de emulsão são inseridos no interior de um estojo confeccionado em Alumínio blindado contra a luz. A radiação ionizante gerada sensibiliza o filme formando uma imagem latente (ver Tabela 4). O filme é então revelado da mesma forma que citado anteriormente, obtendo-se uma imagem bidimensional de sua estrutura interna. Seus principais aspectos negativos

são o tempo excessivo para a formação da imagem latente em torno de 7800 s, a necessidade do processamento químico do filme que demanda um tempo de aproximadamente 0,5 h, a resolução espacial na imagem de 400 μm , e a imagem resultante ser analógica. Embora possua diversos aspectos negativos, esta técnica possui um aspecto positivo que a torna quase que única, e que justifica a sua utilização. Como o objeto não é irradiado com o filme, é possível a inspeção de objetos altamente radioativos.

A terceira técnica radiográfica é denominada de Método Radiográfico pelo Registro do Traço Nuclear, e os filmes comumente utilizados nesta técnica são os detectores de traços nucleares de estado sólido (SSNTD). A sensibilização destes detectores pelas radiações ionizantes ocorre basicamente da seguinte maneira: Partículas carregadas ao interagirem com este meio causam ionizações e excitações. Os elétrons emitidos como consequência das ionizações (Raios-delta) podem gerar mais ionizações secundárias e excitações. Os átomos e as moléculas excitadas podem adquirir considerável energia vibracional e passar por um processo de ruptura para formar, por exemplo, uma cadeia complexa de moléculas estáveis e radicais livres, levando à uma redução na massa molecular da substância. Como consequência destes processos ocorrerá uma trilha de danos, ao longo de seu percurso, e caso a resistividade elétrica do meio seja

superior à $2000\Omega\cdot\text{cm}$, parte destes danos serão permanentes e neste caso este meio é denominado SSNTD. Como exemplo pode-se citar os polímeros, vidro, e os cristais inorgânicos^{74,75}.

Estes detectores foram descobertos em 1958 por D.A.Young que observou que os fragmentos da fissão nuclear do Urânio causavam danos permanentes em cristais de fluoreto de lítio. Estes danos, visíveis apenas em microscópios eletrônicos, possuíam um formato cilíndrico de diâmetro entre 50 e 100Å e comprimento igual ao alcance dos fragmentos neste material. Em 1959 Silk e Barnes observam os mesmos tipos de danos registrados em cristais de mica. Em 1960 Fleischer, Price e Walker notaram que quando estes cristais eram submetidos à ação de soluções químicas adequadas, os locais danificados eram quimicamente mais reativos do que os locais não irradiados, e que suas dimensões poderiam ser ampliadas de modo a torná-los visíveis em microscópios óticos comuns. Nesta condição os danos são chamados de traços. Fleischer constatou ainda que a velocidade do ataque químico sobre os

⁷⁴ FLEISCHER, R. L.; PRICE, P.B.; WALKER, R.M. **Nuclear Tracks in Solids - Principle and Applications**. University of California, Berkeley, California-U.S.A, 1975.

⁷⁵ KNOLL, G.F; GENN, F. **Radiation Detection and Measurements**. John Willey & Sons, New York, 1989.

detectores orgânicos aumenta na proporção em que a sua massa molecular média diminui⁷⁶.

A solução química a ser utilizada difere para cada tipo de detector. Para os orgânicos utiliza-se soluções aquosas de hidróxidos alcalinos enquanto que para os inorgânicos soluções ácidas.

A ação da solução química na trilha de interação, somente será efetiva caso haja uma densidade mínima de danos em seu interior, existindo portanto um limiar energético para cada tipo de radiação ionizante, fato que explica a sensibilidade elevada dos SSNTD para radiações dos tipos α , prótons e fragmentos de fissão e sua quase total insensibilidade para radiações dos tipos β e γ ⁵⁴.

A fim de se obter uma radiografia por meio desta técnica, um Detector de Traço Nuclear do Estado Sólido, no caso um polímero, e a tela conversora, e nesta ordem com relação ao feixe de nêutrons, são mantidos em firme contato no interior de um cassete de alumínio durante a irradiação, e o objeto em estudo é posicionado fora do estojo e o mais próximo possível dele, e este conjunto é irradiado no feixe de nêutrons. A intensidade de nêutrons transmitida pelo objeto atinge o conversor

⁷⁶ DURRANI, S.A.; BULL, R.K. **Solid State Nuclear Track Detection. Principles, Methods and Applications.** International Series in Natural Philosophy vol-111. Pergamon Press, 1987.

de Boro causando uma reação nuclear que gera uma radiação ionizante, que sensibiliza o polímero formando uma imagem latente. A Figura 25 mostra um esquema que ilustra o modo de obtenção de uma radiografia com este sistema. O polímero é então revelado em uma solução de Hidróxido de Potássio à 70°C, que resulta na formação de uma imagem visível a olho nú.

Seus principais aspectos positivos são a insensibilidade do polímero à luz visível, o que dispensa o uso de câmeras escuras para o seu processamento, e a resolução espacial na imagem entre 30 e 50 μm . Além disto, como o polímero é praticamente sensível somente às radiações altamente ionizantes (como alfas e prótons) ele também pode ser utilizado para inspecionar materiais altamente radioativos. Seus principais aspectos negativos resume-se na necessidade do processamento químico do polímero, que demanda aproximadamente 1 h, e a imagem resultante ser analógica e de baixo contraste intrínseco quando comparada com a imagem formada em filmes de Raio-X^{14, 66,67,68}.

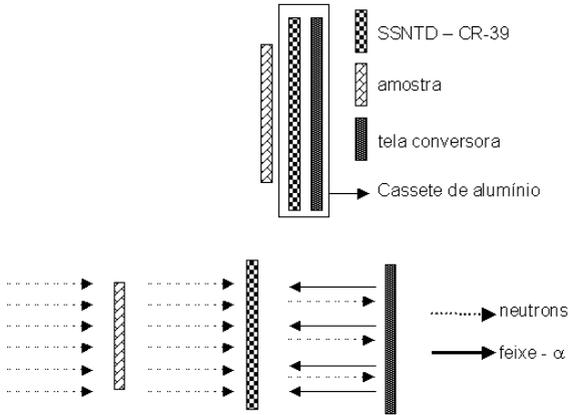


Figura 25. Representação esquemática para obtenção de uma radiografia com SSNTD.

A quarta técnica radiográfica é denominada de Método Radiográfico por Radiação Induzida por Nêutrons e, como dito em 3.2, esta técnica foi desenvolvida pelo grupo de imageamento com nêutrons do IPEN, e é especialmente aplicada no estudo de objetos muito finos, da ordem de unidades de micra⁷⁷.

⁷⁷R. Pugliesi, M.L.G. Andrade, M.A.S. Pereira, F. Pugliesi, M. Olimpio de Menezes. **New radiographic images from old neutron converter screens.** In. Neutron Imaging: A Non-Destructive Tool for Materials Testing. IAEA-TECDOC-1604, 2006

No final de 2002, de uma conversa entre os membros do grupo de radiografia com nêutrons, cujo foco era a discussão de novos projetos para ampliar as atividades do grupo de trabalho para novas áreas de pesquisa, surgiu a idéia de desenvolver uma nova técnica radiográfica para a inspeção de amostras finas. Do conhecimento adquirido da literatura referente às técnicas de auto - radiografia, sabíamos que o feixe de radiação penetrante deveria ser de partículas carregadas, de modo a ter um pequeno alcance na matéria e, o filme para o registro da imagem deveria possuir características específicas.

Baseado em nossa experiência prévia, sabíamos como obter este feixe de partículas penetrantes e também quais filmes e sistemas utilizar para tentar substituir o filme de emulsão, uma vez que, como dito anteriormente, estes filmes especiais são extremamente difíceis de se conseguir em pequenas quantidades atualmente. Estas respostas viriam dos conhecimentos adquiridos da técnica da radiografia com nêutrons em detectores de traços nucleares de estado sólido (SSNTD), a qual foi desenvolvida e vem sendo utilizada pelo grupo de trabalho desde 1987³⁵. Nesta técnica, a radiografia é feita posicionando a amostra em um feixe de nêutrons e, a intensidade transmitida é registrada utilizando uma tela conversora e um detector. Estas telas, normalmente confeccionadas a base de Boro natural, tem a função de transformar, mediante reações nucleares, a radiação neutrônica transmitida em um feixe de partículas alfa, capaz de sensibilizar

o detector originando danos, os quais sob a ação de uma solução química são ampliados milhares de vezes formando traços, e conseqüentemente a imagem radiográfica^{74,76}. Assim, possuíamos um feixe de nêutrons adequado para a geração do feixe de radiação penetrante e, utilizaríamos como filme radiográfico os detectores de traços nucleares os quais, dentre os meios de registro, são um dos que oferecem a melhor resolução intrínseca na imagem, além de serem insensíveis às radiações eletromagnéticas e beta.

Este foi o ponto de partida para o desenvolvimento de duas novas técnicas radiográficas, denominada radiografia com partículas alfa induzida por nêutrons (NIAR), e radiografia com partículas beta induzida por nêutrons (NIER). Em ambos os casos a radiografia é obtida posicionando o filme a amostra e a tela conversora, e nesta ordem em relação ao feixe de nêutrons, em firme contato no interior de um cassete de alumínio durante a irradiação. O nêutron passa pelo filme, passa pela amostra e induzirá reações nucleares do tipo (n,α) se a tela conversora for a base de Boro natural; (n,p) para a tela conversora de ${}^6\text{LiF}$; e (n,β) para a tela conversora de Gadolínio metálico. O feixe de partículas gerado atinge a amostra e a fração transmitida sensibiliza o SSNTD ou o filme de emulsão, os quais após serem

revelados, forma a imagem radiográfica bidimensional^{78,79,80}.

A Figura 26 mostra um esquema que ilustra o modo de obtenção de uma radiografia com este método.

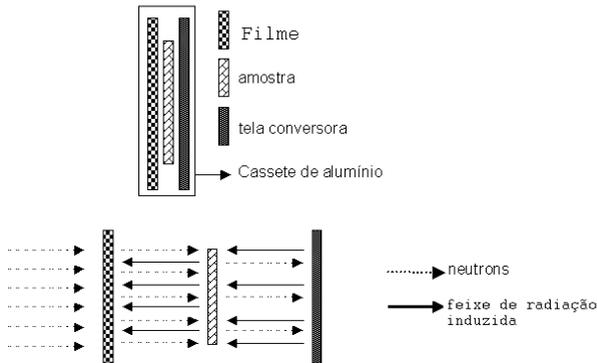


Figura 26. Representação esquemática para obtenção de uma radiografia com radiação induzida por nêutrons.

⁷⁸ PUGLIESI, R.; ANDRADE, M.L.G.; STANOJEV PEREIRA, M.A.; PUGLIESI, F. Neutron-induced electron radiography. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, v. 542, 2005.

⁷⁹ STANOJEV PEREIRA, M.A.; PUGLIESI, R.; PUGLIESI, F. Neutron induced radiography a new technique to inspect the internal structure of thin samples. **Braz. J. Phys.** v. 38, 3A, 2008.

⁸⁰ STANOJEV PEREIRA, M.A.; PUGLIESI, R.; PUGLIESI, F. Neutron-induced alfa-radiography. **Rad. Meas.** v.43, 2008.

A quinta técnica radiográfica é denominada de Sistema Digital, e neste caso o conversor e o meio sensível (onde a imagem bidimensional é formada) são os mesmos, e recebem o nome de tela cintiladora.

Nesta técnica, o padrão de nêutrons transmitido pela amostra reage com o componente Lítio-6 do composto Fluoreto de Lítio-6 (${}^6\text{LiF}$), o qual emite as partículas alfa e Trítio, que ao atingirem o Sulfeto de Zinco produzem uma cintilação, cuja luz é capturada por uma câmera de vídeo digital.

Seus principais aspectos positivos são o tempo de irradiação de 1 s para a obtenção da imagem, que é relativamente pequeno, e a imagem resultante ser digital, não mais analógica, isso devido aos avanços no desenvolvimento de câmeras com CCD refrigerado. Quanto a resolução espacial na imagem, devido aos componentes que compõem um equipamento para tomografia serem complexos, cada um colabora construtiva ou destrutivamente à grandeza da resolução, por exemplo, a intensidade do feixe de nêutrons que incide na amostra, sua energia, a composição e formato do colimador, os filtros contra radiação gama, a espessura da amostra e sua distância ao cintilador, a espessura do cintilador, o tipo de material que é feito o espelho que desvia a imagem formada no cintilador para a câmera de vídeo bem como a distância deste espelho à câmera de vídeo, o tamanho do pixel do CCD da câmera, etc.

A sexta técnica radiográfica é denominada de Radiografia em Tempo Real, e emprega-se a mesma tela cintiladora descrita acima. Esta técnica radiográfica é utilizada para investigação de processos dinâmicos, como movimento de fluídos no interior de cavidades, movimento de pistões em motores de combustão, etc. Como cada imagem é capturada em 1 s de irradiação esta é a resolução temporal da técnica, ou seja, a sua capacidade para discernir processos dinâmicos.

A Figura 27 é uma amostra de madeira comumente utilizada na construção de telhados residenciais. Em alguns casos, e devido às condições propícias de clima, umidade e temperatura, cupins podem atacar e literalmente “comer” o material causando danos severos às estruturas onde a madeira está instalada. Dependendo da extensão dos danos é possível mantê-la em uso mediante a aplicação de algum produto químico para proteção. A amostra de madeira foi posicionada no equipamento sobre uma mesa rotatória e, para cada ângulo de $0,9^\circ$, uma imagem em 2D em tempo - real, com resolução temporal de 1 s era armazenada. A Figura 28 mostra uma sequência de quatro imagens obtidas em quatro ângulos diferentes. Nestas imagens é possível verificar a extensão dos danos causados pelos cupins, mediante a visualização de canais esculpidos na madeira em 28(a), (b), (c) e (d). Na reprodução em tempo-real foi possível verificar o movimento dos cupins em seu interior.



Figura 27. Amostra de madeira que foi inspecionada pela técnica da radiografia com nêutrons em tempo-real.

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

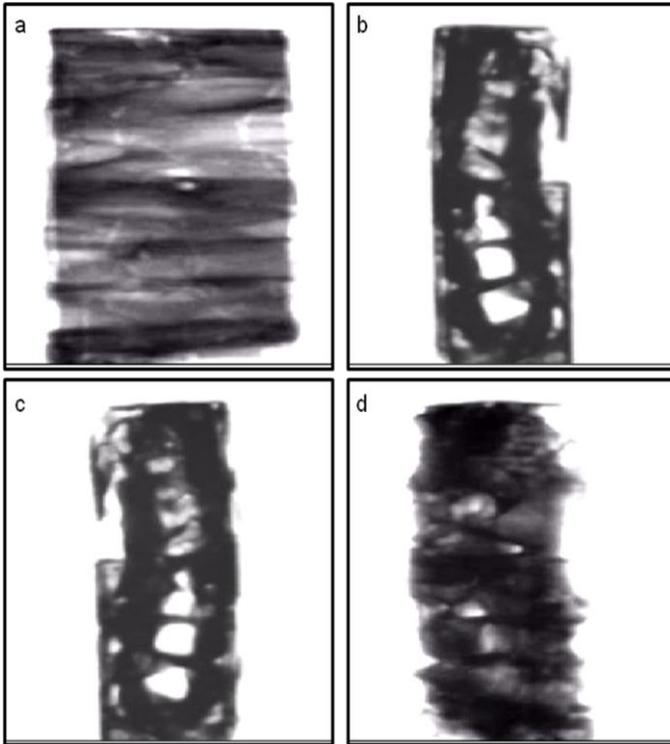


Figura 28. Sequência de imagens 2D mostrando detalhes da infestação de cupins no interior da madeira.

A sétima técnica radiográfica é denominada de Radiografia em Tempo Real com Intensificador de Luz e Câmera de Vídeo.

O módulo “Intensificador de Luz” do conjunto desta técnica radiográfica é denominado comercialmente de LIXI (Light Intensifier X-ray Image), e atua também como conversor de radiação, ao mesmo tempo que intensifica o sinal luminoso.

Nesta técnica radiográfica o objeto e o LIXI são posicionados juntos à saída do feixe de nêutrons, como mostrado na Figura 29, e a intensidade de nêutrons transmitida pelo objeto sensibiliza o cintilador do LIXI formando uma imagem bidimensional (2D) de sua estrutura interna. Assim como as outras técnicas radiográficas que utilizam uma câmera digital para capturar a imagem, aqui também, para evitar exposição direta da câmera de vídeo à radiação, a câmera está instalada a 90^0 com relação ao feixe de radiação.

O aspecto positivo do emprego do dispositivo LIXI para radiografia com nêutrons é, como dissemos, a intensificação da luz gerada no cintilador, o que propicia resolução temporal de aproximadamente 30 ms, contudo o aspecto negativo é o pequeno diâmetro de saída da imagem, o que limita sua aplicação^{51, 52}.

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

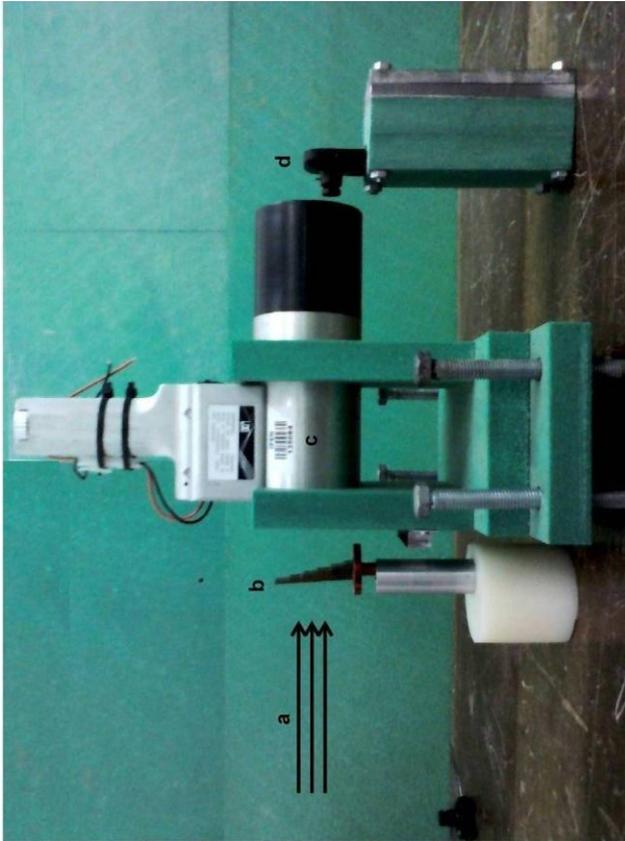
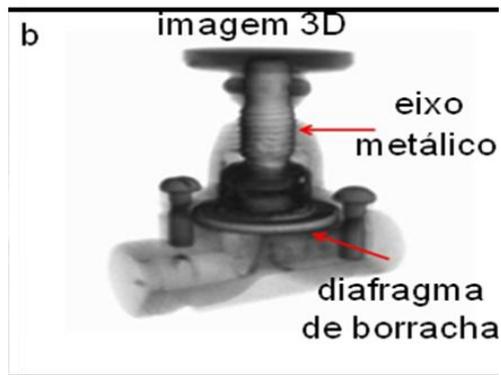


Figura 29 – Esquema do Lixi. O feixe de nêutrons (a) atravessa a amostra (b) e, o padrão de radiação transmitida atinge o corpo do dispositivo (c), onde há um intensificador de fótons que amplifica a luz gerada no cintilador gerando a imagem estática ou dinâmica capturada por uma câmera (d).

Marco A. Stanojev Pereira

Capítulo 4



Tomografia com Nêutrons

4.1 Conceitos gerais sobre imagens analógicas e imagens digitais⁷⁰.

Tornou-se bastante comum descrever a antiga fotografia, obtida com as velhas máquinas fotográficas que utilizam cartuchos de filmes de emulsão, como analógica, para diferenciá-la da fotografia digital moderna. A Figura 30 mostra um destes cartuchos e um dispositivo fotográfico de meados da década de 1970.



Figura 30 – Cartucho de filme de emulsão e máquina fotográfica analógica.

No sentido aqui abordado, analógico refere-se a um sinal onde a saída deste é proporcional à entrada. Um medidor de tom de luz é um bom exemplo de um instrumento analógico. A luz que entra em uma fotocélula gera uma corrente elétrica que move uma agulha através de uma escala (medida analógica). Quanto mais brilhante a luz, maior o movimento.

Neste sentido, o sensor que captura a luz em uma câmera digital, o CCD da câmera, também é analógico, contudo o elemento básico que forma uma imagem digital recebe o nome de PIXEL abreviatura de “**p**icture **e**lement. Uma imagem digital é formada por milhões de Pixels e, cada um destes que compõem o sensor CCD é uma fotocélula sensível à luz que gera uma pequena corrente elétrica em resposta à intensidade de luz que o atinge, assim, quanto mais brilhante for a luz, mais forte será a corrente.

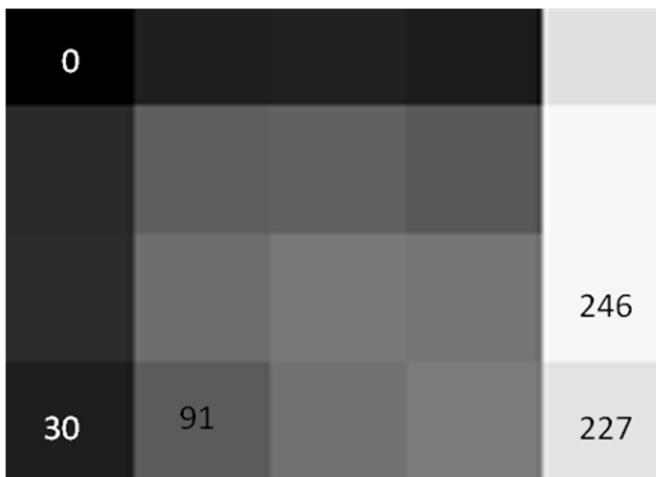


Figura 31. Imagem digital ampliada ao limite dos pixels, mostrando a variação de alguns tons de cinza em uma escala de 8 bits.

O termo Imagem Digital só acontece, portanto, quando os níveis de brilho do Pixel são codificados

no sistema binário do computador, criando-se assim um arquivo de imagem digital.

O processamento de imagens digitais, ou seja, a manipulação de imagens em computadores, é uma técnica relativamente recente. Muitas destas técnicas foram desenvolvidas nos anos de 1960 no laboratório da propulsão a jato (JPL), no Massachusetts Institute of Technology (MIT), nos laboratórios da Bell, e na universidade de Maryland⁸¹. Nesta época o custo do processamento era razoavelmente elevado. Nos anos 70 o processamento de imagens digitais proliferou quando computadores mais baratos e softwares específicos se tornaram disponíveis. As imagens puderam inclusive ser processadas em tempo - real. Hoje em dia a fácil acessibilidade a computadores rápidos tornou o processamento de imagens digitais a forma mais comum e barata de análise de imagens.

Matematicamente falando, uma imagem digital é uma representação matricial da uma imagem real. Em um modelo elementar, o termo “imagem” refere-se a uma função bidimensional de intensidade de luz, denotada por $f(x,y)$, cujo valor ou amplitude na coordenada espacial (x,y) fornece a intensidade (brilho) da imagem naquele ponto.

⁸¹ GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital Image Processing**. Addison-Wesley Pub. Co. Reading, MA. EUA. 1992. 716p

Em decorrência da natureza da luz (energia eletromagnética):

$$0 < f(x,y) < \infty \quad (12)$$

A digitalização das coordenadas espaciais (x,y) é chamada amostragem e a digitalização da amplitude, quantização em níveis de cinza. No processo de digitalização, a imagem contínua $f(x,y)$ é aproximada por amostragens equidistantes, como mostra a equação (13), onde cada elemento da matriz é uma quantidade discreta:

$$f(x,y) \approx \begin{pmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0,M-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1,M-1) \\ \vdots & & & \\ f(N-1,0) & f(N-1,1) & \dots & f(N-1,M-1) \end{pmatrix} \quad (13)$$

O lado direito da equação (13) representa o que é comumente chamado uma imagem digital e cada elemento da matriz é referido como pixel. O termo imagem digital pode também ser aplicado a dados associados a pontos dispersos sobre uma região tridimensional e, nesse caso, cada elemento é chamado de voxel (volume element).

A conversão, analógica \Rightarrow digital pode ser executada por uma variedade de dispositivos tais

como câmeras digitais, scanners, etc. Alternativamente a conversão pode ser feita por uma placa digitalizadora acoplada a um dispositivo analógico. Uma imagem digital com “n” bits pode ser representada em uma escala com 2^n níveis de cinza. Assim para $n = 8$ a escala terá 256 níveis de cinza que variam de 0 para nível mais escuro até 255 para o mais claro.

Após digitalizada a imagem poderá ser processada mediante o uso de algoritmos. O processamento de imagens digitais é uma ciência que manipula matematicamente imagens e cobre um amplo espectro de técnicas que são direcionadas a um grande número de aplicações. As funções de processamento podem ser expressas como:

$$g(x,y) = T[f(x,y)] \quad (14)$$

onde $f(x,y)$ é a imagem de entrada, $g(x,y)$ é a imagem processada e T é um operador sobre f.

Técnicas de processamento são utilizadas quando se deseja:

- realçar ou modificar uma imagem para melhorar a aparência ou destacar algum aspecto da informação nela contida;
- categorizar, classificar, coincidir ou medir elementos dentro da imagem;
- combinar ou reorganizar porções da imagem;

Dentre as operações mais empregadas destacam-se:

- Média aritmética e geométrica entre imagens para a redução de ruído;

- Subtração de imagens para determinar diferenças e mudanças entre duas imagens estáticas e corrigir não uniformidades do feixe de radiação penetrante;

- Subtração de imagem “Máscara” para determinar mudanças com relação a esta imagem máscara padrão, de modo a estudar processos dinâmicos ou, determinar a direção de algum movimento na imagem. Uma aplicação desta operação é a comparação de duas imagens de uma mesma amostra, uma obtida normalmente e outra com algum agente contrastante. A imagem diferença revelará regiões penetradas pelo agente contrastante, por exemplo, em trincas, micro - rachaduras, etc;

- Integração ou soma que permite melhorar a qualidade de imagens originalmente com pouca luminosidade intrínseca;

- Negativos de imagens;

- Aumento de contraste;

- Compressão ou redução da faixa dinâmica para ajustar as partes mais brilhantes ou mais escuras da imagem à capacidade do monitor ou do dispositivo de visualização;

- Corte de níveis de cinza para destacar uma faixa específica de níveis de cinza;

- Realce de contraste em regiões localizadas;

- Filtragem: Filtros são máscaras aplicadas ao conjunto dos pixels de uma imagem. Estas máscaras são matrizes cujos elementos determinarão a sua função. Os filtros normalmente subdividem-se em suavizadores e de realce de bordas;
- Passa – baixa é utilizado para suavizar bordas e reduzir ruídos de uma imagem para, por exemplo, remover pequenos detalhes ou manchas e o segundo para realçar as bordas da imagem;
- Mediana para a redução de ruído com a preservação da agudez e dos cantos da imagem. É particularmente eficaz quando o padrão de ruído consiste de componentes pontuais intensos;
- Passa – alta é utilizado para destacar detalhes tênues ou realçar detalhes que tenham sido suavizados por erros ou por efeitos naturais na aquisição da imagem;
- Derivativos. Um dos métodos mais comuns de diferenciação no processamento de imagens é o gradiente. As máscaras deste operador são projetadas convenientemente de modo que, por exemplo, em regiões sem variação de intensidade, produza-se um pixel nulo, ou seja, uma região escura.



Figura 32. Exemplificação do processo de digitalização de uma fotografia analógica bidimensional por uma câmera digital. Cada quadrado na figura no eixo (x,y) ilustra um pixel.

No caso da Tomografia com Nêutrons, as imagens resultantes são tridimensionais e, neste caso, da mesma forma que um PIXEL é a unidade básica de uma imagem digital bidimensional, um

VOXEL⁸², abreviatura de “**v**olume **e**lement”, é a unidade básica de uma imagem digital tridimensional, como esquematizado na Figura 33. Neste caso, a imagem digital tridimensional é representada por um conjunto de matrizes, e cada um de seus elementos é um VOXEL, onde cada um representa uma pequena fração do volume original, e possuem uma posição fixa, dada pelas coordenadas cartesianas (**x,y,z**), e um número inteiro associado, que é representativo do brilho da parte da imagem original que ele representa. Da mesma forma que os Pixels, os Voxels podem também ser processados matematicamente.

⁸² DIERICK, M. **Tomographic Imaging Techniques using Cold and Thermal Neutron Beams**. PhD Thesis, Ghent University, 2005.

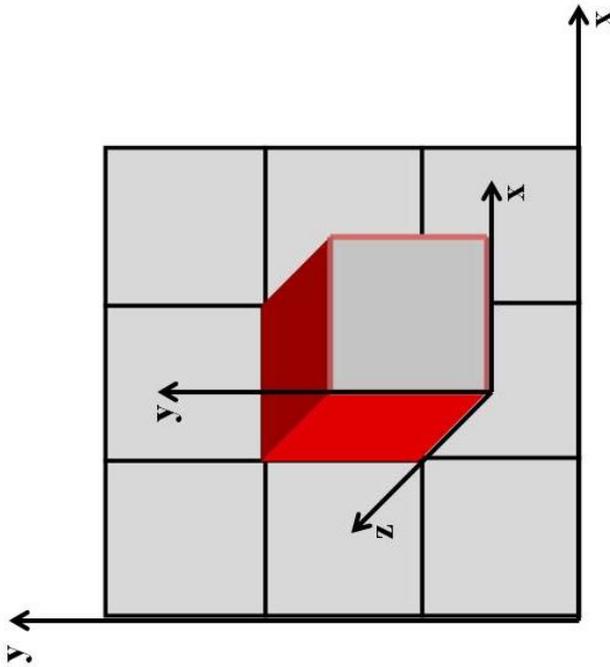


Figura 33. Representação comparativa entre um Pixel (x,y) e um Voxel (x,y,z) .

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

Uma tomografia é obtida da seguinte forma: a amostra a ser irradiada (a) é posicionada numa mesa giratória motorizada (b) e a intensidade de nêutrons transmitida pelo vaso (c) incide em uma tela cintiladora de Fluoreto de Lítio (${}^6\text{LiF}(\text{ZnS})$) (d) formando uma imagem bidimensional de sua estrutura interna; um espelho plano reflete esta imagem para uma câmera de vídeo digital, onde é capturada e, em seguida, armazenada num computador. Devido à baixa intensidade da luz gerada pela tela, o cintilador, o espelho e a câmera são instalados no interior de uma caixa vedada contra luz externa (e). Uma interface eletromecânica conecta a mesa e a câmera, de tal forma que, após a imagem ser capturada, a mesa gira $0,9^\circ$, e outra imagem é capturada até completar 360° . O arquivo das imagens armazenadas é o dado de entrada para o *software* Octopus V8.0 gerar o arquivo de imagens reconstruídas (tomografias), que é o dado de entrada para outro *software* VG Studio Max V2.2 gerar imagens 3D da estrutura interna do vaso. Ambos os *softwares* estão instalados em um computador do tipo estação de trabalho.

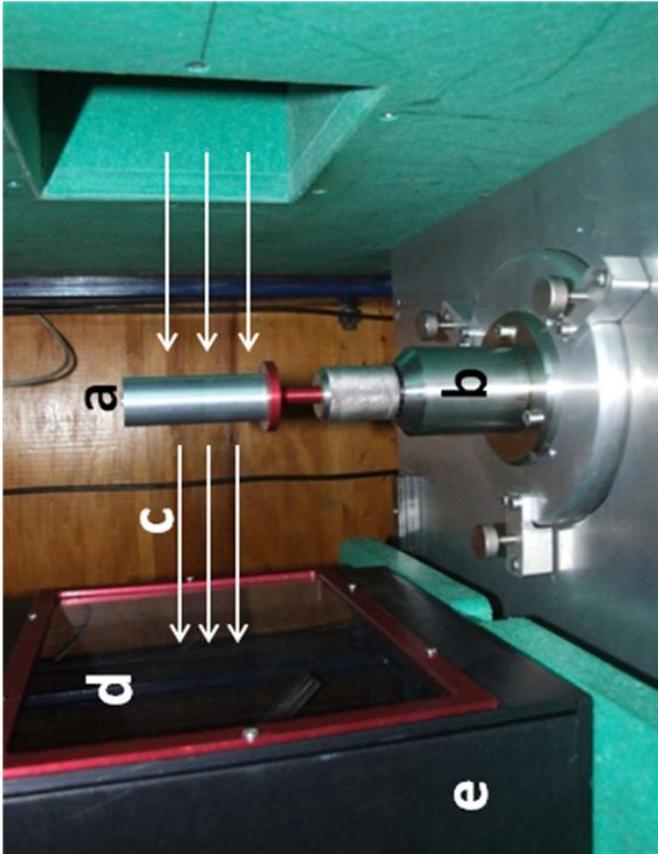


Figura 34. Procedimento de obtenção de Tomografia com Nêutrons.

Normalmente, um equipamento para Tomografia com Nêutrons é caracterizado mediante a definição de protocolos de irradiação, que inclui a determinação dos procedimentos de irradiação e de captura de imagens a serem seguidos, de forma a se ter a imagem de entrada de melhor qualidade possível, para se obter a melhor tomografia. Dentre estes procedimentos destacam-se a determinação do tempo de exposição do CCD da câmera de vídeo, da obtenção da sensibilidade do equipamento para discernir variações de espessura e de sua resolução espacial^{51, 52, 53, 56, 57, 59, 60, 66,72}.

A determinação do tempo de exposição (ou tempo de irradiação) é o primeiro passo na caracterização de um equipamento de imageamento com nêutrons, pois, é o parâmetro que indica o tempo para obtenção da melhor imagem com a maior faixa dinâmica ou contraste. Para sua determinação são obtidas diversas imagens do feixe de nêutrons (feixe direto na tela cintiladora sem objeto), e realizadas leituras do nível de cinza (ou de brilho) destas imagens em função do tempo de exposição do CCD. Os níveis de cinza são determinados em uma escala de 16 bits, ou seja, uma variação de tons de cinza entre 0 (sem brilho) e 65535 (brilho máximo). Os pares de dados determinados experimentalmente em “nível de cinza” vs “tempo de exposição” serão inseridos num gráfico, e o tempo ideal de exposição é aquele que limita a região linear entre estes parâmetros. Este tempo depende do tipo de cintilador, da câmera de vídeo e da lente que são empregados, e certamente

do fluxo de nêutrons incidente no objeto em estudo, e se algum destes componentes forem mudados, uma nova curva característica deverá ser obtida. A Figura 35 mostra uma distribuição típica deste estudo.

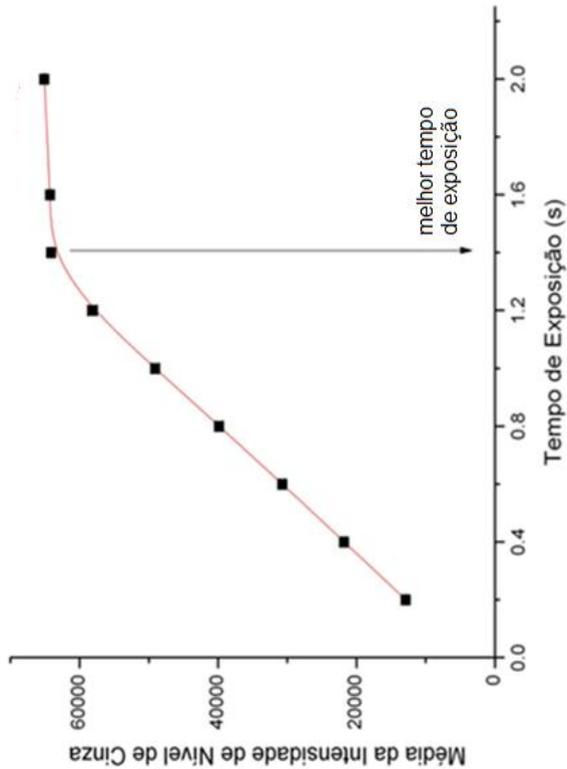


Figura 35. Comportamento do nível de cinza em função do tempo de irradiação.

O parâmetro estabelecido como sensibilidade do equipamento para discernir variações de espessura é definido como a variação de espessura (Δx) do objeto, que é discernível por uma variação do nível de cinza (ΔGL) na imagem, e é determinada por meio da curva que relaciona o Nível de Cinza (NC) como função da espessura (x) do objeto estudado. Para este estudo se utiliza objetos padrões no formato de cunhas com degraus confeccionadas em diversos materiais, como polímero, metal puro ou ligas, com espessuras de degraus variados. Os objetos são irradiados o mais próximo possível da base do cintilador e no tempo determinado no parâmetro acima, cujo contraste óptico é máximo. A Figura 36 mostra a radiografia com nêutrons destes objetos. O nível de cinza GL para cada degrau é determinado através de um software de processamento de imagens que fornece a leitura do nível de cinza e o erro da medida.

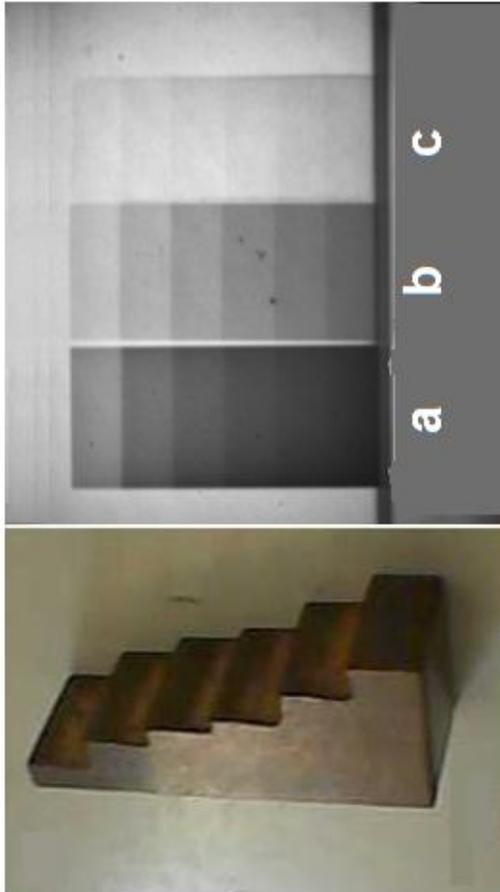


Figura 36. Fotografia do objeto e radiografia das cunhas com degraus dos padrões utilizados: (a) polímero, (b) ferro e (c) chumbo.

O terceiro procedimento de caracterização de um equipamento para imageamento com nêutrons é denominado de Resolução Espacial, e é definida como a menor distância entre dois pontos de uma imagem de forma que eles possam ser distinguidos um do outro. Esta determinação que envolve um procedimento também já estabelecido no IPEN, normalmente é avaliada em termos da resolução total (U_t), que é composta pela resolução geométrica (U_g) e pela resolução intrínseca (U_i) do sistema de captura da imagem (cintilador, focalização da câmera, campo de visão, etc.). Este parâmetro é obtido irradiando-se uma placa de material altamente absorvedor de nêutrons, por exemplo o Gadolínio metálico, em firme contato com o cintilador, frente ao feixe direto, obtendo-se assim a interface de duas imagens, uma opaca, no qual o feixe de nêutrons foi eliminado e outra, do feixe direto. Após a captura da imagem pela câmera CCD, é feita uma varredura ponto a ponto para a determinação da distribuição dos níveis de cinza na interface compreendida entre o feixe direto (região clara) e atrás da lâmina de Gadolínio (região escura), mediante o uso de um software de processamento de imagens. Aos pontos experimentais, é ajustada a função matemática chamada Edge Spread Function (ESF)^{83,84}.

⁸³ HARMS, A.A.; ZELLINGER, A. A. New Formulation of Total Unsharpness in Radiography. **Phys. Med. Biol.**, v.22, n.1, p.70-80. 1977.

$$ESF = \arctg(C.x) \quad (15)$$

na forma:

$$ESF = p_1 + p_2.a \tan(p_3.(X - p_4)) \quad (16)$$

e, a resolução total é dada por:

$$Ut = 2/(p_3) \quad (17)$$

Neste ajuste “X” é a coordenada de distribuição espacial, e p_1 , p_2 , p_3 e p_4 são parâmetros livres.

A Figura 37 ilustra a radiografia do objeto para a determinação da resolução, e uma típica distribuição obtida com o ajuste da ESF aos pontos experimentais.

⁸⁴ WROBEL, M; GREIM, L. Resolution functions and unsharpness in neutron radiography. Geesthacht, German, GKSS, (GKSS 88/e/12), 1988.

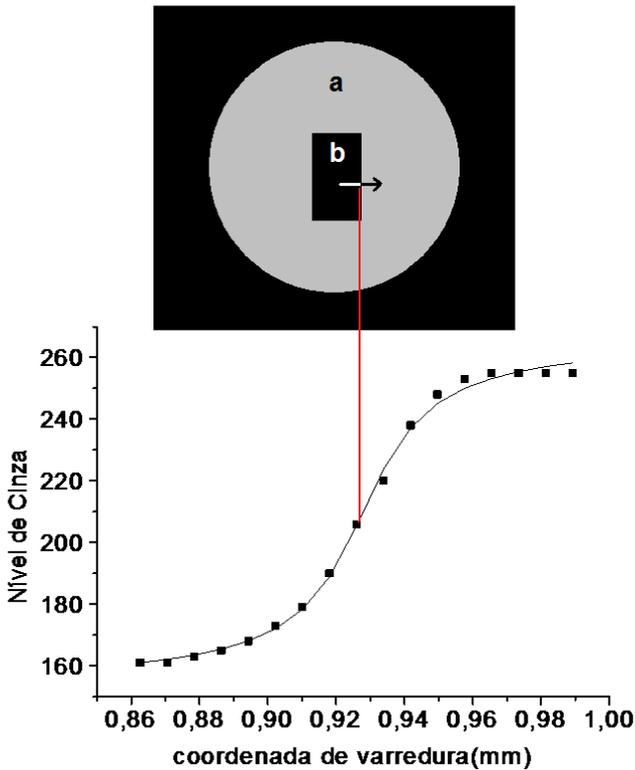
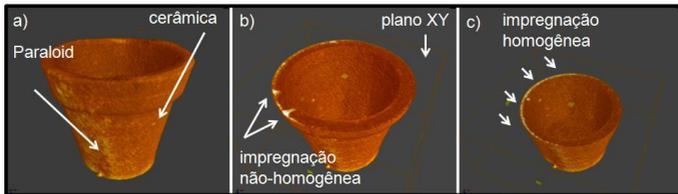


Figura 37. Determinação da resolução espacial do sistema de imageamento com nêutrons. No topo a figura ilustra uma radiografia onde se evidencia o contraste entre o feixe direto (a) e o objeto opaco à nêutrons (b). A medida feita ponto a ponto da intensidade dos Níveis de Cinza na interface entre “a” e “b”, fornece a distribuição dos pontos experimentais aos quais se ajusta a função ESF.

Capítulo 5



Aplicações da técnica de Tomografia com Nêutrons

Marcos L. G. Andrade
Roberto M. Schoueri

5.1. Patrimônio Histórico e Cultural

A herança cultural brasileira é constituída principalmente pelas etnias indígena, europeia e africana, e muitos objetos e ferramentas utilizados em terras brasileiras desde seus primeiros tempos até o seu ingresso na cultura ocidental, tais como estatuetas, símbolos religiosos, armas, adornos, etc, foram fabricados utilizando argila, rocha, madeira, fibras orgânicas, ossos e alguns metais.

Normalmente, ao se iniciar o estudo de um destes tipos de objetos, os peritos arqueológicos primeiramente investigam se sua forma estrutural esta ameaçada, ou seja, se seu corpo está estável ou em processo de decomposição ou fragmentação, em seguida, investigam se o objeto já sofreu algum tipo de restauro, como por exemplo, colagem de suas partes, se é autêntico, ou seja, foi confeccionado segundo práticas utilizadas na época estimada, etc^{85,86}.

No processo de restauro de artefatos cerâmicos, quando o objeto apresenta fragmentação de sua estrutura causada principalmente pela ação da

⁸⁵ Nuclear Techniques for Cultural Heritage Research- IAEA Radiation Technology Series n° 2.

⁸⁶ LEHMANN, E.H.; HARTMANN, S.; SPEIDEL, M.O.. Investigation of the content of ancient Tibetan metallic Buddha statues by means of neutron imaging methods. **Archaeometry**, v. 52, p.416-428, 2010.

água, são utilizados adesivos acrílicos específicos conhecidos como consolidantes, aplicadas na superfície do objeto com o propósito de estabilizar seu corpo e protegê-lo da umidade e da fragmentação ocasionada pelas intempéries. Como a aplicação destas substâncias sobre o corpo cerâmico é manual, muitas vezes utilizando pincéis, é muito importante conhecer a profundidade da absorção e a distribuição destes produtos pela estrutura do objeto^{87,88,89}.

Desta forma, o desenvolvimento de técnicas de ensaios que sejam não destrutivos e não invasivos, sensíveis à presença de materiais hidrogenados, são muito úteis nestes casos, pois torna possível o estudo da estrutura interna destes objetos únicos sem comprometer sua integridade.

⁸⁷ PRUDÊNCIO, M. I.; STANOJEV PEREIRA, M.A.; MARQUES, J.G.; DIAS, M.I.; ESTEVES, L.; BURBIDGE, C. I.; TRINDADE, M.J.; ALBUQUERQUE, M.B. Neutron tomography for the assessment of consolidant impregnation efficiency in Portuguese glazed tiles (16th and 18th centuries), **J. Arch. Science**, v. 39, p. 964-969, 2012.

⁸⁸ STANOJEV PEREIRA, M. A.; PRUDÊNCIO, I.; MARQUES, J. Tomografia de neutrões aplicada a azulejos dos séculos XVI e XVII visualização para caracterização, diagnóstico e otimização de técnicas de conservação. **Estudos Arqueológicos de Oeiras**. - ISSN 0872-6086. - V. 19, p. 261-266, 2012.

⁸⁹ FLEISCHER, G., NIMMRICTER, J., ROHATSCH, A. The relevance of scientific investigation for the preservation of monuments and historic buildings made of stone e a state of the art report. **Geophysical Research Abstracts**, v.7 (SRef-ID: 1607e7962/gra/EGU05-A-04479), 2005.

Como vimos anteriormente, o imageamento com nêutrons é ideal para inspecionar a estrutura interna de objetos de vários tipos de composição devido suas características únicas de interação dos nêutrons com a matéria, assim, esta técnica é muito utilizada para inspecionar substâncias ricas em Hidrogênio como óleo, água, madeira, adesivos, borracha, etc, mesmo se envoltos por espessas camadas de alguns metais. Por este motivo, a técnica de imageamento por nêutrons é muito importante no estudo de objetos desta natureza, pois como mencionado acima muitos dos objetos do nosso patrimônio cultural, bem como os materiais utilizados para a sua restauração e preservação, são fabricados de vários tipos de substâncias hidrogenadas^{4,90}.

Os processos empregados na conservação e restauro de cerâmicas é amplamente estudado, pois trata-se de um dos materiais mais comuns encontrados em sítios arqueológicos brasileiros e de outras civilizações modernas e da antiguidade. Basicamente, possuem em sua composição elementos transparentes aos nêutrons, como Carbono, Oxigênio, Magnésio, Alumínio, Silício, Potássio, Cálcio e outros e, nos processos de

⁹⁰ SCHOUERI, R.; DOMIENIKAN, C.; TOLEDO, F.; ANDRADE, M.L.G.; STANOJEV PEREIRA, M.A.; PUGLIESI, R. The new facility for neutron tomography of IPEN-CNEN/SP and its potential to investigate hydrogenous substances. **Applied Radiation and Isotopes**, v.84, p. 22-26, 2014.

restauração e preservação, é empregado normalmente adesivos acrílicos, substância rica em Hidrogênio, o que torna o processo de imageamento com nêutrons ideal para estudar sua estrutura interna, haja visto seu alto coeficiente de atenuação para nêutrons térmicos, em comparação para Raios-X (vide Tabela 4).

A Figura 38 mostra um procedimento de estudo da estrutura interna de um vaso adquirido no mercado comum, que simula um artefato de interesse arqueológico. Primeiramente o objeto foi radiografado em sua forma original, sem nenhum tipo de intervenção e, em seguida e com o intuito de se verificar a potencialidade da técnica referente ao processo de restauro, o objeto foi quebrado e posteriormente restaurado, empregando um adesivo do tipo epóxi.

Em seguida, e com o intuito de se verificar a sensibilidade da técnica a materiais que são normalmente encontrados em escavações arqueológicas, no interior do vaso cerâmico restaurado foi introduzido um objeto metálico e, na sequência, posicionado no equipamento de tomografia para inspeção. As imagens obtidas estão apresentadas na Figura 39.

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

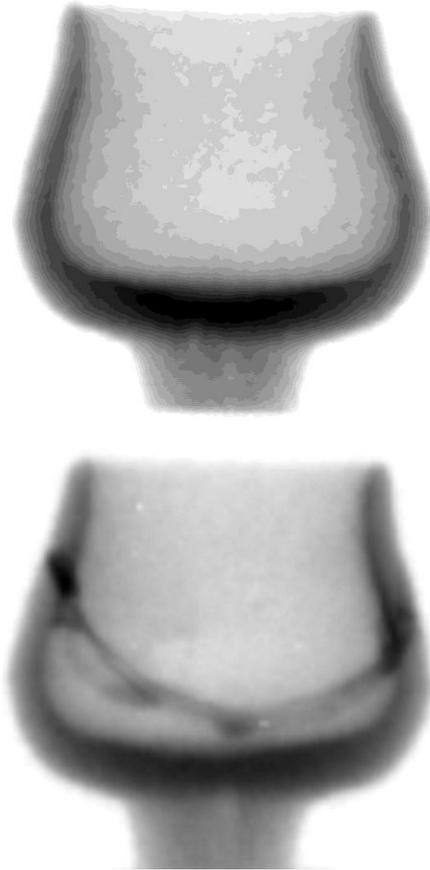


Figura 38. Radiografia com nêutrons (2D) do objeto íntegro (cima) e restaurado (baixo).

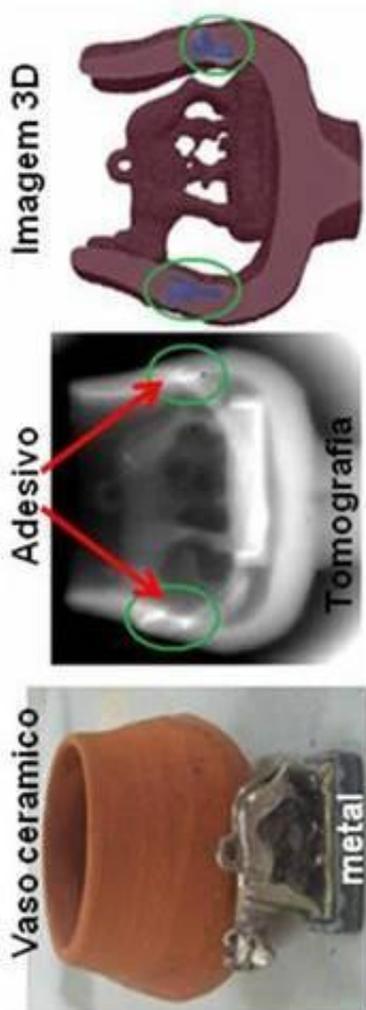


Figura 39. Imagens obtidas por Tomografia com Nêutrons de vaso cerâmico restaurado com um objeto de metal: detalhe ao contraste do adesivo epóxi em relação ao corpo cerâmico.

5.2. Preservação de objetos cerâmicos.

Utensílios fabricados a partir de argila são presentes em diversas culturas ao longo de várias épocas da civilização, da antiguidade até a modernidade. No Brasil a produção de objetos de cerâmica datam de pelo menos 2000 a.C., destacando-se as produzidas na Ilha de Marajó. Os vestígios arqueológicos desta ainda pouco conhecida civilização mostram que seus artífices dominavam a arte da escultura em cerâmica de uma forma muito requintada, “(...) *comparadas muito favoravelmente com as dos antigos gregos e etruscos em simetria e elegância da forma, bem como no bom gosto e alto grau de suas decorações (...)*”⁹¹.

No período conhecido como colonial brasileiro, as olarias, que podem ser consideradas como o primeiro tipo de indústria a ser instalada no território, e os processos de fabricação de objetos em cerâmica vermelha como tijolos, telhas, potes, meringas e diversos outros utensílios foram introduzidos no país para atender as necessidades emergentes na construção dos engenhos de cana de

⁹¹ DERBY, O. A. The Artificial Mounds of the Island of Marajo, Brazil. **The American Naturalist**, V. 13, n. 4, p. 224-229, 1879.

açúcar, onde produziam o açúcar para exportação, e para a edificação das primeiras cidades.

Na antiguidade, as olarias e as cantarias também estavam presentes no cotidiano das civilizações, por exemplo, no Egito dos antigos faraós o barro era utilizado para a produção de tijolos empregados na construção das magníficas obras de arquitetura que resistem ao tempo, bem como na fabricação de objetos de uso cotidiano como pratos, potes, copos e estatuetas para os mais diversos fins e, na China, temos o magnífico exército de soldados de terracota do século III a.C, que apesar de todo o cuidado dispensado em sua preservação sofre com a ação das intempéries da modernidade como a poluição e humidade, podendo comprometer sua integridade.

No sentido da preservação destes tesouros da humanidade é que o desenvolvimento de técnicas de análise da estrutura interna de objetos confeccionados em cerâmica para o estudo de formas de preservação e restauro de objetos pertencentes ao acervo de nosso patrimônio histórico e cultural torna-se importante ferramenta para os peritos que lidam com esta tarefa, pois torna-se disponível aos seus trabalhos uma técnica de ensaio não destrutivo e não invasivo que lhe dá a possibilidade de ver por dentro possíveis ameaças à sua estrutura, como processos de decomposição ou fragmentação.

Como dito anteriormente, em casos onde o objeto apresenta fragmentação ou deterioração parcial de sua estrutura, são utilizadas substâncias orgânicas específicas conhecidas como consolidantes, aplicadas na superfície do objeto. Estas substâncias são polímeros acrílicos, conhecidos comercialmente por Paraloid[®] B-72, Elvacite, Acrilem, Paraloid B-66, Paraloid B-67, e dentre estes o Paraloid[®] B-72 é um dos mais empregados^{5, 86}.

Estes consolidantes além de formarem um filme protetor na superfície penetram pelos poros da cerâmica sem, no entanto, selar completamente a sua superfície, deixando-a permeável à humidade.

Assim, o conhecimento e a visualização da profundidade de sua penetração, bem como de sua distribuição dentro da estrutura do objeto de interesse é um fator chave no tratamento com o consolidante, o que auxilia os restauradores a estimar a efetividade do procedimento utilizado^{86,87,92,93,94}.

⁹² CLIFTON, J.R. **Stone Consolidating Materials - A Status Report**. Center for Building Technology, National Engineering Laboratory, National Bureau of Standards, NBS Technical Note 1118. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards, Washington (DC).

⁹³ CONSTÂNCIO, C.; FRANCO, L.; RUSSO, A.; ANJINHO, C.; PIRES, J.; VAZ, M.F.; CARVALHO, A.P. Studies on polymeric conservation treatments of ceramic tiles with Paraloid B-72 and two alkoxyxilanes. **Journal of Applied Polymer**, v. 116, p.2833-2839, 2010.

As amostras utilizadas para o estudo da eficiência de penetração do consolidante na parede da cerâmica, tratam-se de vasos cerâmicos contemporâneos adquiridos no mercado comum. Confeccionada em cerâmica vermelha é chamada pelos povos indígenas das nações Tupís de “Curi (ku'ri)”, e é composta basicamente por argila comum.

A quantificação da penetração do Paraloid® B-72 na cerâmica vermelha foi realizada a partir das fatias correspondentes ao plano de visualização XY (Figura 40), cada uma representando uma espessura de 0,28 mm do vaso. A Figura 41 mostra a imagem de uma fatia do vaso estudado, que foi processada utilizando o software VGStudio, para realçar a visualização do Paraloid® B-72 na parede cerâmica, destacada como um anel mais brilhante semicircular, à esquerda, enquanto o corpo cerâmico é mais escuro. A quantificação da penetração foi avaliada por varredura do Nível de Brilho "NB" em função da coordenada de varredura "x", ao longo das paredes cerâmicas, e "NB" varia de 0 a 255, de tal forma que quanto maior o valor "NB", maior é a concentração de Paraloid® B-72^{4,89}. Para o estudo desta grandeza, foram empregados os recursos de análise e quantificação de imagens do próprio software de processamento 3D *VG Studio Max 2.2*, o que

⁹⁴ GROSSI, D. Análise do estado de conservação do Monumento a Ramos de Azevedo com a utilização de métodos não destrutivos. Dissertação de Mestrado – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

mostrou ser uma ferramenta muito potente e versátil. Uma distribuição típica obtida para o vaso, é mostrada na Figura 42, onde, **A** indica o início da parede externa do vaso, **B** a máxima intensidade da distribuição, **C** o limite de penetração do Paraloid na parede e **D** o limite da parede interna do vaso. Para cada distribuição individual foram avaliados os seguintes parâmetros: profundidade da penetração (distância AC no eixo “X”), profundidade que o Paraloid[®] B-72 atinge a maior concentração (distância AB no eixo “X”), espessura da parede do vaso (distância AD no eixo “X”), e valor máximo de GL (distância 0B no eixo “Y”).

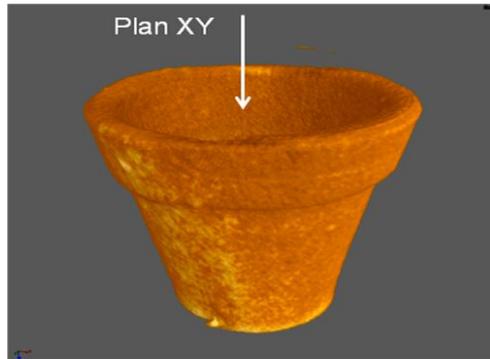


Figura 40. Imagem em 3D do vaso confeccionado em cerâmica vermelha, mostrando a direção do plano XY.

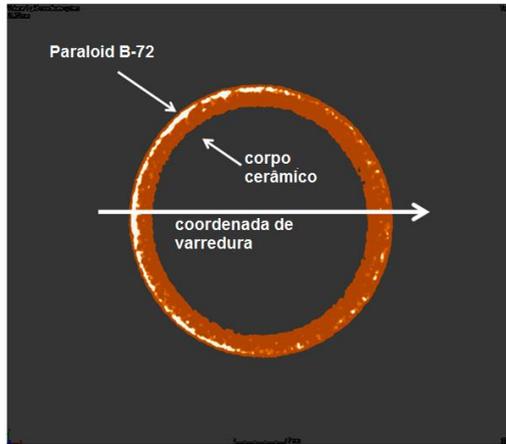


Figura 41. Imagem processada da fatia do vaso e a distribuição visível do consolidante em sua estrutura interna.

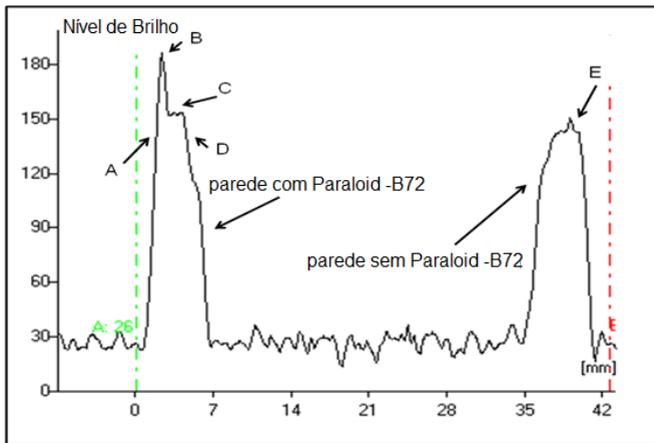


Figura 42. Distribuição típica do Nível de Brilho ao longo da parede da cerâmica, obtida a partir do Software VG Studio Max 2.2.

De modo a complementar o estudo e demonstrar a potencialidade da técnica, a Figura 43 mostra algumas imagens tridimensionais obtidas por meio do software VGStudio, no qual as seguintes conclusões podem ser observadas:

- Figura. 43a.: Visualização de regiões com (mais claro) e sem Paraloid® B-72;

- Figura. 43b.: Corte ao longo do plano XY mostrando alguma inhomogeneidade na concentração de Paraloid® B-72;

- Figura. 43c.: Corte ao longo do plano XY mostrando dois pontos esporádicos não homogêneos de maior impregnação, provavelmente causados por grandes vazios na parede cerâmica;

- Figura. 43d.: Corte ao longo do plano XY mostrando a homogeneidade da concentração de Paraloid® B-72;

- Figura. 43e.: Corte ao longo do plano XZ mostrando a profundidade alcançada pelo Paraloid® B-72 na parede cerâmica;

- Figura. 43f.: Dois cortes, mostrando ao mesmo tempo as profundidades atingidas pelo Paraloid® B-72 na parede cerâmica ao longo dos planos XY e XZ.

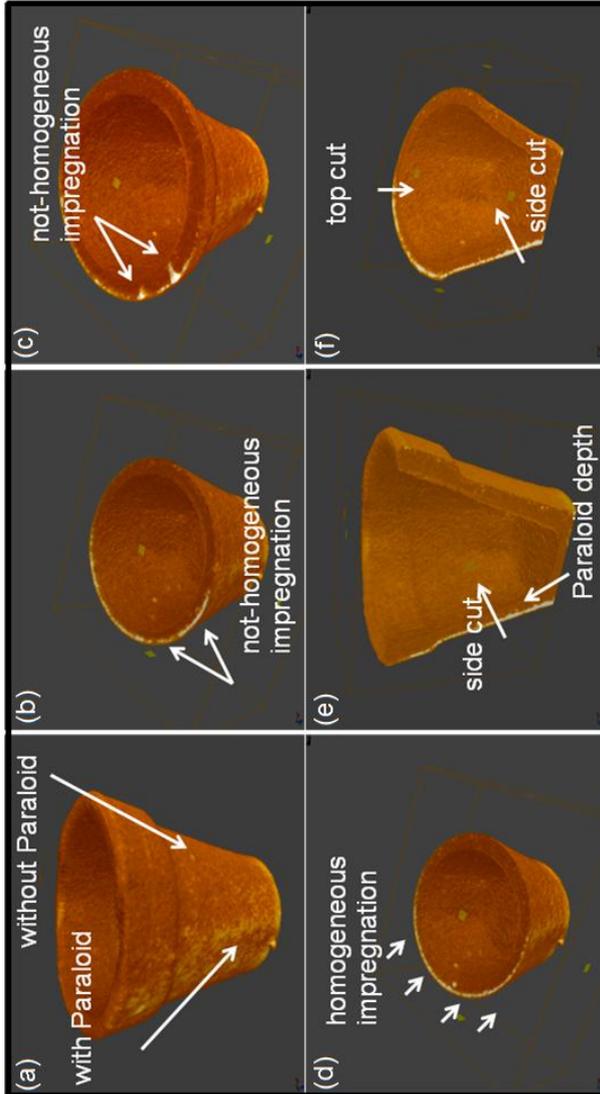


Figura 43. Imagens 3D mostrando a distribuição de Paraloid® B-72.

5.3. Estudo de Fósseis

A Tomografia com Nêutrons é uma técnica de arqueometria amplamente utilizada para inspeção de fósseis em paleozoologia (fósseis de animais) e paleobotânica (fósseis de plantas). O desenvolvimento de técnicas de ensaio não destrutivas e não invasivas, para a investigação da estrutura interna dos fósseis de plantas e animais, sempre foi uma grande preocupação para os arqueólogos que, no princípio, contavam apenas com procedimentos que acabavam por levar à destruição dos exemplares estudados, e muitos destes de valor inestimável.

Técnicas de imageamento bi e tridimensional, entre elas a tomografia com nêutrons, permite ao pesquisador a visualização da estrutura externa e interna do objeto sem a necessidade de destruir a amostra e, através de software, dessecar e quantificar o espécimen estudado.

No campo da paleobotânica, os resultados obtidos com o emprego da tomografia com nêutrons na inspeção de fósseis da espécie *Breytenia*⁹⁵ mostraram ser muito promissores, pois suas cavidades morfológicas preservadas no fóssil contrastam fortemente com seus tecidos vegetais

⁹⁵ MELVILLE, R. Two new genera of Glossopteridae. **Bot. J. Linn. Soc.** v.86 (3), p. 275-277. doi: 10.1111/j.1095-8339.1983.tb00974.x, 1983;

mineralizados, sendo perfeitamente reconstruídas por meio da técnica neutrongráfica⁹⁶.

Em paleozoologia, a eficiência da aplicação da técnica foi verificada no equipamento de Tomografia com Nêutrons do IPEN/CNEN-SP na inspeção de uma amostra proveniente de escavações de um sítio arqueológico localizado na cidade de Jales, São Paulo.

O exemplar estudado consiste de um fragmento de osso parcialmente incrustado em rocha de origem fluvial, composta basicamente por grãos de quartzo e finas camadas de barro. A rocha foi submetida à análise por tomografia com nêutrons, e pode-se observar em um dos tomos o fragmento do dedo de um animal denominado de *crocodylomorpha*, datado do período cretáceo, com aproximadamente 70 Milhões de anos. No plano tomográfico destacado na Figura 44, o osso possui um comprimento de 38,8 mm e espessura máxima de 11,1 mm.

⁹⁶ de BEER, F.C.; PREVEC, R.; CISNEROS, J.; ABDALA, F. Hidden structure of fossils revealed by neutron and X-ray tomography. In: Proceedings of the 8th World Conference on Neutron Radiography (WCNR-8) held at NIST, Gaithersburg, USA, Sept 2006.

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

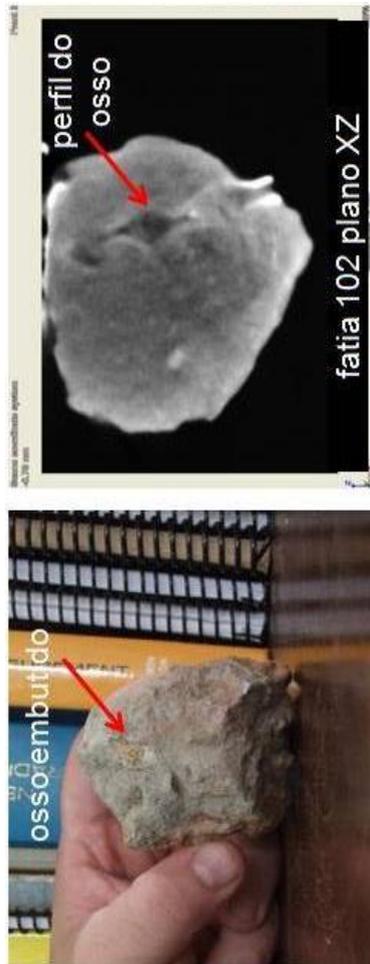


Figura 44 – Imagem obtida por Tomografia com Nêutrons de Fóssil: Fragmento de osso parcialmente incrustado em rocha de origem fluvial, encontrada em Jales, São Paulo.

5.4. Materiais de composição mista

Devido às características únicas da interação do nêutron com a matéria, o emprego de técnicas de imageamento com nêutrons de materiais de composição mista, como os compósitos de matriz cerâmica (que são constituídos de elementos metálicos e elementos não metálicos, ligados por ligações iônico-covalente); de matriz polimérica (constituído por um ou mais polímeros em conjunto com elementos metálicos e/ ou elementos não metálicos); de matriz metálica (onde se utiliza reforços de natureza cerâmicos e polímeros)⁹⁷, etc, vem sendo utilizada como técnica de ensaio para controle de qualidade e desenvolvimento de novos materiais dentro da Ciência dos Materiais para Engenharia.

A válvula mostrada na Figura 45(a) é semelhante àquela utilizada em 1987, quando do início do Grupo de Radiografia com Nêutrons do IPEN, descrita no Capítulo 3, e consiste de um corpo em alumínio, no interior do qual um diafragma de borracha (material rico em Hidrogênio) pode ser deslocado verticalmente conforme seu eixo metálico é girado no sentido anti-horário e horário, para controle de fluxo de água. A Figura 45(b) é uma imagem 3D obtida por Tomografia com Nêutrons, na qual parte do corpo em alumínio foi removido por

⁹⁷ CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. John Wiley & Sons, Inc., 2002

processamento no software VGStudio, de modo a realçar o diafragma, podendo assim estudá-lo e verificar sua integridade.

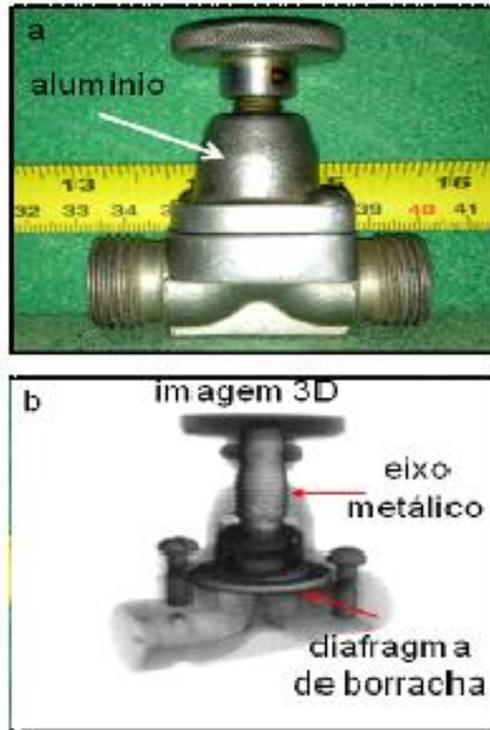


Figura 45. (a) Válvula inspecionada por Tomografia com Nêutrons; (b) Imagem 3D realçando o diafragma de borracha.

5.5. Projétil

O cartucho mostrado na Figura 46 consta basicamente de um invólucro metálico confeccionado em Latão, no interior do qual a pólvora é inserida. A pólvora é uma substância composta, em média, de Enxofre (12%), carvão vegetal (14%) e Nitrato de Potássio (74%), composição que torna viável a sua inspeção pela técnica da Tomografia com Nêutrons.



Figura 46. Cartucho de festim.

As Figuras 47, abaixo, são uma sequência de seis quadros de um filme 3D, feito a partir do

arquivo das tomografias obtidas: na Figura 47 (a) o cartucho é mostrado inteiro, e seu invólucro metálico foi colorido artificialmente para se parecer com a cor original do latão; na 47 (b) parte do invólucro metálico é removido o que expõe parte da pólvora; na Figura 47 (c) a pólvora é totalmente destacada do invólucro e na 47 (d) o conjunto é girado $\sim 90^{\circ}$, de modo a exibir o local do invólucro onde a pólvora fica alojada; na Figura 47 (e) a pólvora é novamente inserida em seu local original e, na 47 (f) o invólucro é então fechado.

Na Figura 48 foi utilizada a mesma ferramenta de quantificação do software VGStudio, por meio da qual foi possível determinar tanto o comprimento de 20,35 mm quanto o diâmetro de 11,81 mm da pólvora em seu interior, bem como constatar o seu caráter granular.

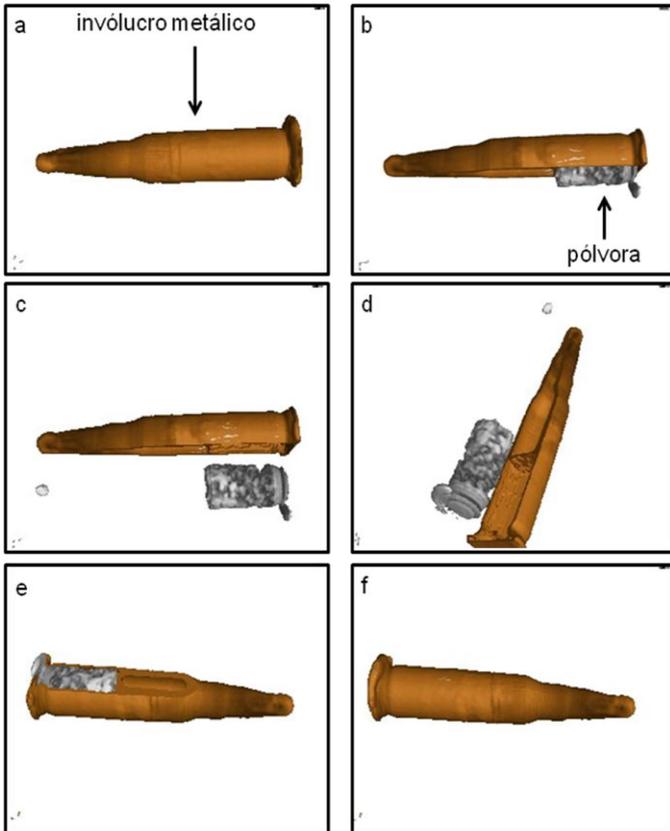


Figura 47. Sequência de imagens 3D mostrando detalhes da pólvora no interior da carcaça metálica.

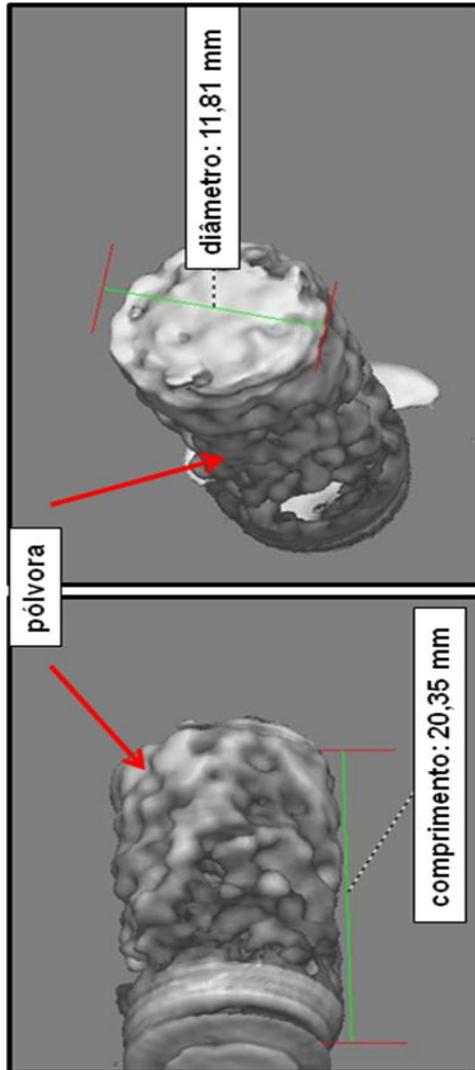


Figura 48. Imagens 3D da pólvora mostrando suas dimensões nas posições indicadas.

5.6. Artefato com ferrugem

O artefato ilustrado na Figura 49, trata-se de um parafuso confeccionado em aço carbono, e oriundo de uma das flanges da tubulação do circuito de refrigeração do reator IEA-R1. Como pode ser observado, ele está completamente enferrujado, inclusive a sua própria rosca está totalmente corroída. A ferrugem é o resultado da oxidação do ferro, e que contém em sua composição moléculas de água, o que o torna desejável para ser investigado pela técnica da Tomografia com Nêutrons. Assim, a intenção deste estudo é verificar a viabilidade do emprego desta técnica no estudo da ferrugem neste metal.



Figura 49. Parafuso com ferrugem tomografado.

As Figuras 50 abaixo são uma sequência de seis imagens de um “filme 3D”, feito a partir do arquivo das tomografias obtidas. Na Figura 50 (a) o parafuso é mostrado inteiro, e sem detalhes da estrutura da ferrugem; nas Figuras 50 (b) e (c) parte do aço começa a ser removido progressivamente, por processamento no software VGStudio, até que reste somente a ferrugem, em 50 (d); de modo a realçá-la, na Figura 50 (e) a ferrugem é colorida artificialmente, e na 50 (f) é girada de modo a ficar perpendicular à sua posição inicial.

Na Figura 51 é mostrada uma das imagens 3D na qual a ferrugem está isolada do parafuso e colorida artificialmente. De acordo com os dados extraídos do mesmo software, foi possível constatar que a espessura da ferrugem no local em que foi medido é aproximadamente 1,69 mm.

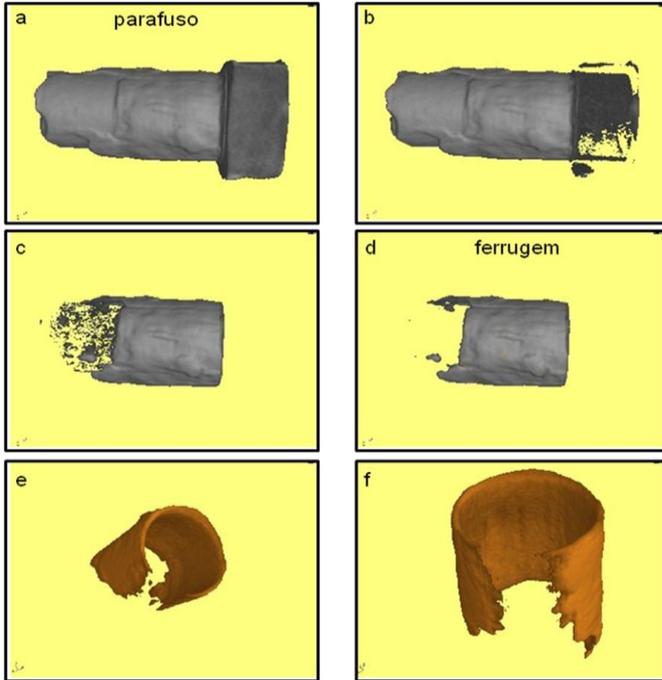


Figura 50. Sequência de imagens 3D mostrando detalhes da disposição da ferrugem.

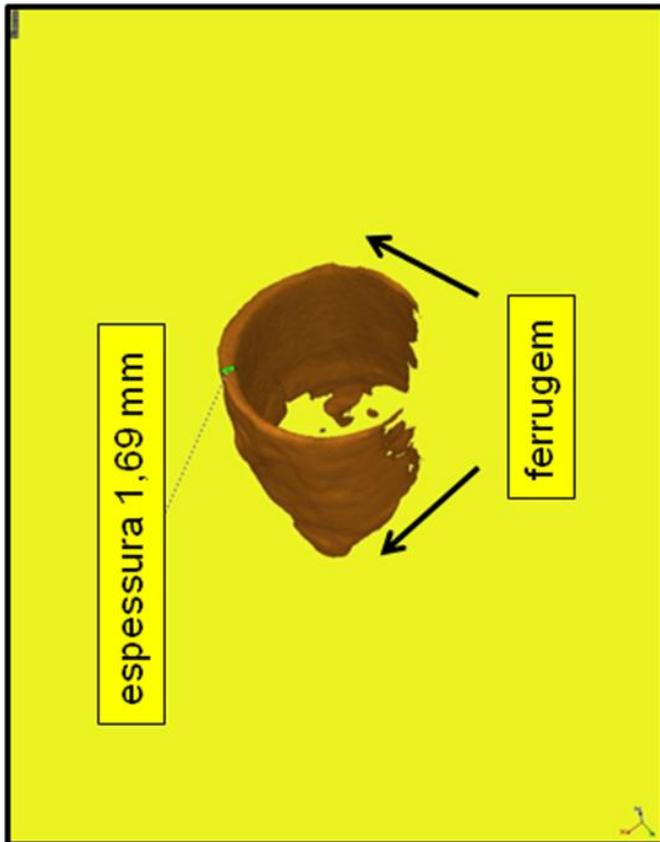


Figura 51. Imagem 3D da ferrugem mostrando sua dimensão na posição indicada.

5.7. Arqueometalurgia

Na Arqueometalurgia, os pesquisadores interessam-se em estudar os procedimentos que as antigas civilizações dispunham no manejo dos metais conhecidos em cada época do desenvolvimento tecnológico, deixando suas marcas no tempo através da manufatura dos adornos, ferramentas e armas que utilizavam⁹⁸. Assim temos objetos característicos da primeira era do domínio dos metais pela humanidade conhecida como Idade do Cobre, cerca de 8.000 a.C., seguida pela idade do Bronze, cerca de 3.000 a.C., onde já se evidenciava um maior conhecimento das ligas metálicas. Após, tem início a Idade do Ferro, cerca de 1.200 a.C., tecnologia esta que mudou o mundo antigo, no tocante ao desenvolvimento de arados de Ferro, mais resistentes em relação ao Bronze e, principalmente ao fato de as armas serem mais fortes. A Arqueometalurgia é a ciência dentro da Arqueologia dedicada ao estudo de objetos desta natureza, e a técnica de ensaio não destrutivo e não invasivo de Tomografia com Nêutrons vem sendo amplamente utilizada para estudos da estrutura interna destes objetos, auxiliado os peritos na elaboração de teorias sobre os métodos de fundição e no desenvolvimento de moldes. Em 2012, participamos de um trabalho internacional que partiu da análise da estrutura interna de quatro machados metálicos da Idade

⁹⁸ REHREN, TH.; PERNICKA, E. Coins, Artefacts and isotopes. *Archaeometallurgy and Archaeometry. Archaeometry*, v.50, 2 232–248, 2008.

Média do Bronze do Oeste da Ibéria. A Tomografia com Nêutrons participou do projeto como uma das técnicas de Arqueometria, juntamente com análise de Espectrometria de Micro-Fluorescência de Raio-X. A técnica da Tomografia com Nêutrons foi determinante para se estudar as heterogeneidades internas dos machados, como trincas, poros e enormes espaços ôcos, invisíveis ao Raio-X, contribuindo assim com informações de relevância para a reconstrução de antigas técnicas de fabricação, por exemplo, o ângulo de inclinação que o molde era posicionado para que o gás escapasse facilmente enquanto o metal líquido era despejado⁹⁹.

Outra aplicação da Tomografia com Nêutrons em arqueometalurgia é o estudo em numismática. Para a cunhagem de uma moeda utilizava-se um malho, onde o cunho de anverso era gravado manualmente em um “tarugo” (pilha ou cunho superior). Um pedaço de metal, ouro ou electro aquecido era colocado sobre outro tarugo (troquel ou cunho inferior), que estava firmemente apoiado em um cepo. O moedeiro então desferia um golpe, uma pancada na pilha transferindo o cunho para o metal¹⁰⁰.

⁹⁹ FIGUEIREDO, E.; STANOJEV PEREIRA, M.A.; LOPES, F.; MARQUES, J.G.; SANTOS, J. P.; ARAÚJO, M. F.; SILVA, R.J.C.; SENNA-MARTINEZ, J. C. Investigating Early/Middle Bronze Age copper and bronze axes by micro X-ray fluorescence spectrometry and neutron imaging techniques. **Spectrochimica Acta Part B**, v. 122, p15–22. 2016.

¹⁰⁰ <<http://www.mbaeditores.com/2013/03/procedimentos-de-cunhagem.html>> Acessado em Julho de 2013.

No ensaio realizado para se determinar a autenticidade, uma moeda de ouro do imperador romano Valentiniano I (364-375 d.C.) foi submetida à análise por várias técnicas de ensaio não destrutivo, como a Microscopia óptica, Microscopia Eletrônica de Varedura (SEM), Proton-induced X-ray emission (PIXE) e, Tomografia com Nêutrons. Os resultados obtidos mostraram que a Tomografia com Nêutrons é uma importante ferramenta para o estudo de moedas antigas. A técnica nos permitiu verificar com facilidade a ausência de bolhas de ar em seu interior, demonstrada na homogeneidade de sua estrutura radiografada, assim elimina-se a possibilidade de procedimentos modernos de fabricação de moedas como a técnica da fusão, pois no exemplar que foi estudado não se observa em sua estrutura interna defeitos devidos às bolhas de ar aprisionadas no metal¹⁰¹.

¹⁰¹ CRUZ, J.; CORREGIDOR, V.; STANOJEV PEREIRA, M.; ALVES, L. C. Analysis of a IVth Century solidus by non-invasive techniques. <<http://www.cia-xi.uevora.pt/documentos/LivroDeResumos.pdf>> Acessado em agosto de 2016.

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

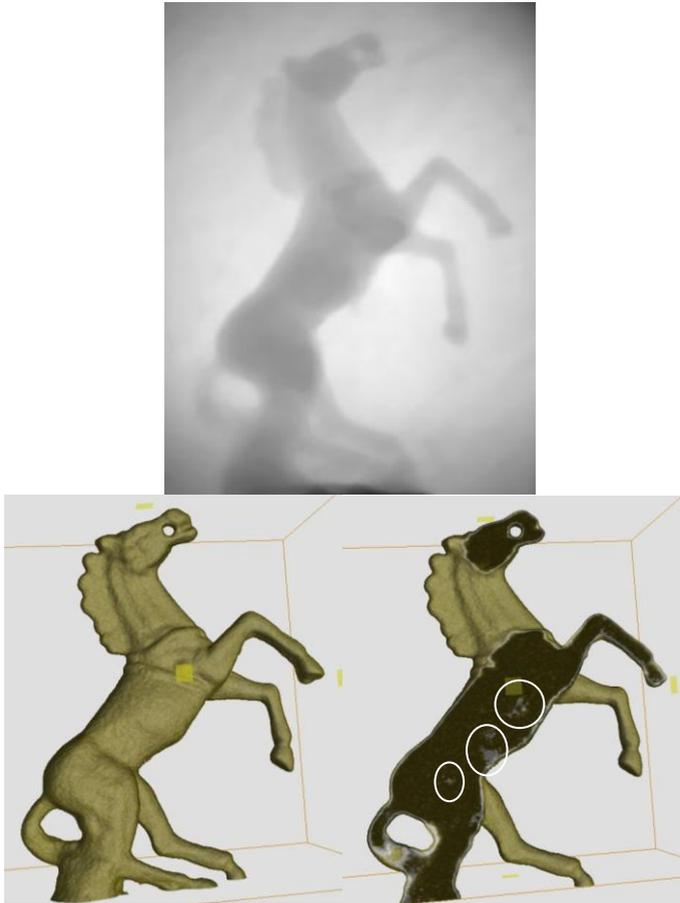


Figura 52. Estatueta equina em bronze. Radiografia (topo), Tomografia do corpo inteiro (esquerdo), Tomografia do interior mostrando áreas de vazios (direito).

5.8. Concreto de Engenharia

Diferentemente do que se pensa o concreto e a argamassa já eram usados na antiguidade pelos romanos para construção de suas lindas arcadas, extraordinárias abóbadas e magestosas cúpulas, muitas existentes até o dia de hoje como testemunhas de uma grande época de desenvolvimento e tecnologia jamais vistos até então. Uma destas construções é o Panteão em Roma, erguido com concretos de diferentes materiais no ano de 27 a.C. por Marco Agripa, arquiteto de César Augusto.

Contudo, devido a fatores humanos como o uso de materiais de baixa qualidade, e ambientais como a exposição ao sol e as intempéries, o concreto interage com o ambiente ao qual está circunscrito e sofre alterações químicas e estruturais, ocasionados pelo movimento da água estrutural, bem como a ação de outras substâncias líquidas e gasosas que transportam agentes agressivos através de fissuras e poros existentes no concreto, tornando a estrutura potencialmente vulnerável a ataques e consecutiva deterioração.

Estas fissuras são pequenas descontinuidades que, sob resistência mecânica, podem propagar-se dando origem a falhas macroscópicas na estrutura.

Na literatura encontramos o uso da radiografia com Raios-X para estudar as características internas

do processo de solidificação do concreto, bem como as fissuras na argamassa. Embora as fissuras tenham sido identificadas com esta técnica, Najjar¹⁰² e Aderhold¹⁰³ publicaram um estudo que demonstrou a eficácia da radiografia com nêutrons para este propósito, uma vez que a radiografia de Raios-X não tem resolução suficiente para inspecionar as fissuras mais finas.

Samaha e Hover¹⁰⁴ publicaram outro estudo que confirma a superioridade da radiografia com nêutrons devido a resolução na imagem ser melhor quando comparado com o raio-X, contudo as amostras necessitam ser previamente secas, a fim de eliminar a umidade.

O concreto comum é composto de vários elementos que juntos formam um material com um baixo coeficiente de atenuação para nêutrons (ver Tabela 4). A impregnação das fissuras com uma substância com alta absorção de nêutrons resultará em uma imagem com boa nítidez, com alto contraste

¹⁰² NAJJAR, W. S.; ADERHOLD, H. C.; HOVER, K. C. The Application of Neutron Radiography to Study of Microcracking in Concrete. **Cement, Concrete, and Aggregates**, CCAGPD p. 103-109, 1986.

¹⁰³ ADERHOLD, H. C.; HOVER, K. C.; NAJJAR, W. S. The Cornell Radiography Facility and its Applications to the Study of the Internal Structure and Microcracking of Concrete. **Proceedings of the Second World Conference on Neutron Radiography**, 16-20 June, Paris, France, 1986.

¹⁰⁴ SAMAHA, H.R.; HOVER, K.C. Influence of microcracking on the mass transport properties of concrete. **ACI materials Journal**, v. 89, n.4, p 416-424, 1992.

entre as fissuras e o material não impregnado circundante, permitindo uma melhor visualização das fissuras. Uma solução química composta de nitrato de Gadolínio é comumente usado como agente de contraste¹⁰².

Em 1997, o grupo de radiografia com nêutrons do IPEN-CNEN/SP publicou um trabalho sobre a utilização do equipamento instalado no BH-8 do Reator Nuclear IEA-R1 para estudar a viabilidade de aplicação neste campo, e concluiu que¹⁰⁵:

- A técnica de radiografia com nêutrons possui alta sensibilidade para identificação de fissuras;
- o processamento digital melhora a visualização das fissuras;
- a espessura mínima discernível dos depósitos de cristal de nitrato de gadolínio nas fissuras, pela técnica da radiografia com nêutrons, é de cerca de 0,6 μm . Este valor é de aproximadamente 25 vezes menor do que a avaliada para a radiografia de Raios-X convencional.

¹⁰⁵ PUGLIESI, R.; ANDRADE; M. L. G. Study of Cracking in Concrete by Neutron Radiography. **Appl. Radiat. Isot.** V. 48, n. 3, p. 339-344, 1997.

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



Figura 53. Amostra de concreto utilizado para ensaio de análise de fissuras e descontinuidades por radiografia com nêutrons.

Capítulo 6

Epílogo

6.1. Perspectivas

Os leitores desta obra puderam acompanhar no folhear das páginas, os trabalhos realizados nos últimos trinta anos por um grupo de pesquisa brasileiro que, à exemplo de outras centenas espalhados pelo país, labuta diariamente enfrentando os diversos tipos de adversidades que fazem parte da profissão para cumprir o compromisso assumido quando da defesa de Tese de Doutorado em Ciências: A propagação do conhecimento.

Uma destas adversidades que disse acima aconteceu inesperadamente no dia 16 de Maio de 2017. Exatamente às 09h35min, o Dr. Pugliesi e eu estávamos preparando o equipamento de Tomografia com Nêutrons para obter imagens de um objeto do patrimônio histórico e cultural do Brasil: um vaso de cerâmica da tribo dos Macuxis, da aldeia Raposa Serra do Sol, localizada no Estado de Roraima.

Posicionada a amostra frente ao feixe de nêutrons, abrimos o primeiro estágio de proteção de radiação neutrônica, o *beam stopper* de água e, quando abrimos o segundo, o *beam stopper* de chumbo e polietileno borado, ao invés de vermos um círculo luminoso com nuances de cinza, indicando as diferentes atenuações do nêutron pela amostra, vimos... nada! Apenas uma imagem negra.

Inicialmente pensamos que era problema de mal funcionamento da câmera CCD. Fechamos os dois *beam stopper*, desligamos e religamos a câmera

direcionando a lente para um local qualquer: A câmera estava ok! Respiramos aliviados, pois se trata de um equipamento importado e especial, desenvolvido para aplicação em astronomia, com CCD refrigerado e Pixel com dimensão de $9\mu\text{m}$, logo muito caro e, se avariasse estávamos em má situação.

Depois de mais algumas tentativas e teorias, admitimos que a navalha de Ockham era perfeitamente aplicável, assim concluímos, e depois constatamos, que o tubo colimador onde se localizam os filtros de bismuto contra a radiação gama e o *beam stopper*, estava totalmente preenchido de água, o que impossibilitava a passagem de nêutrons.

Foi um imprevisto e um choque, pois estávamos no auge do trabalho de utilização da Tomografia com Nêutrons para emprego no estudo de procedimentos para a preservação e restauro de objetos pertencentes ao patrimônio histórico e cultural e, além dos trabalhos de rotina, tínhamos que interromper nossa cooperação com o Grupo de Pesquisa do IPEN responsável pelo desenvolvimento de células de Hidrogênio; Com o Laboratório Nacional de Luz Sincrotron L.N.L.S., onde um dos pesquisadores demonstrou interesse nos resultados apresentados por nosso grupo no 5º Congresso Latino Americano de Arqueometria¹⁰⁶, cujo intuito

era a realização de estudos em diversos tipos de amostras de fósseis e, com o Grupo de Pesquisa do IPEN responsável pelo desenvolvimento de um Gerador de Molibdênio-99, usado para tratamento de câncer, onde a técnica da Tomografia com Nêutrons estava sendo utilizada com sucesso para identificar defeitos mecânicos como vazios e trincas em amostras de Urânio metálico, base para a produção do radiofármaco Mo-99.

Contudo, contrariando todas as piores expectativas, e contando com a ajuda preciosa dos amigos da Equipe de Radioproteção, Engenharia de Reatores, Equipe de Descontaminação e Operadores do Reator IEA-R1, afastamos à distância de 3 metros todo o equipamento, de cerca de quatro toneladas, da parede da blindagem biológica do Reator deixando, portanto, a saída do canal desobstruída para que, novamente em equipe, pudessemos retirar do *Beam Hole* o tubo danificado de cerca de 100 quilos, isso já no dia seguinte ao incidente.

O próximo passo foi refazer um novo tubo colimador, seguindo o mesmo procedimento descrito na Ref. 70, instala-lo no BH 14 do Reator IEA-R1, posicionar os filtros contra radiação gama e o *beam stopper* de água em seu interior, reposicionar o equipamento de Tomografia com Nêutrons junto à

¹⁰⁶ STANOJEV PEREIRA, M.A.; PUGLIESI, R.; ANDRADE, M. L. G. Tomografia com nêutrons para o estudo de objetos do patrimônio histórico e cultural. 5º Congresso Latino Americano de Arqueometria. IQ-USP, 7-11 de novembro de 2016.

blindagem biológica do Reator, e voltar a analisar as imagens bidimensionais da estrutura interna dos materiais estudados, formada pelo padrão de radiação neutrônica transmitida pelo objeto posicionado frente ao feixe de nêutrons, que ao atingir o cintilador gera luz, desviada do feixe direto por meio de um espelho especial posicionado em ângulo preciso para ser capturada pela câmera CCD, que está conectada à um computador que armazena as imagens para posterior processamento e reconstrução para análise em 3D.



Figura 54. Parte da equipe do Centro do Reator de Pesquisa (CRPq) do IPEN-CNEN/SP após movimentar a blindagem.

Os passos seguintes serão transcritos na forma de relatório de atividades para cada tarefa executada nos processos de montagem do tubo colimador.

24 de Maio de 2017: Compra dos tubos em Alumínio para construção do novo tubo colimador que será inserido no *Beam Hole*. Usinagem da flange redutora em Alumínio, que une os dois tubos de Alumínio, e da tampa frontal do tubo de menor diâmetro na oficina mecânica do IPEN.

05 de Junho de 2017: Contato com uma empresa especializada em tecnologia a Laser, para soldagem das flanges e dos tubos de alumínio.

13 de Junho de 2017: Tubo pronto, fomos busca-lo sob uma chuva torrencial. Carregamos o tubo no bagageiro do automóvel do Dr. Reynaldo e, com receio que caísse, embora bem amarrado, voltamos pela avenida com velocidade em torno de 30Km/h. Não ouvimos nada dos outros condutores devido a baixa velocidade de condução do automóvel pois, devido a chuva, os vidros estavam fechados. As partes que compõe o tubo colimador foram cortados e soldados pela primeira vez com tecnologia a Laser, sendo assim, foram feitos por nós, em nosso laboratório, os devidos testes de estanqueidade, os quais foram bem sucedidos.

14 de Junho de 2017: Recobrimos o interior e exterior do tubo com Grafite em pó e testamos os filtros de Bismuto em seu interior, bem como o

beam catcher primário de água, teste também bem sucedido.

19 de Junho de 2017: Um dos filtros de Bismuto mostrou estar com diâmetro maior que o tubo, desta forma houve a necessidade de usina-lo. Por necessidades técnicas operacionais a tarefa foi realizada pelo Dr. Reynaldo que operou o Torno, enquanto eu e o Dr. Marcos o assistíamos. Depois da usinagem, o filtro foi testado deslizando-o ao longo do tubo, procedimento que demonstrou o êxito da operação.



Figura 55. Dr. Reynaldo usinando um dos filtros de Bismuto no Torno Mecânico para a retirada de 0,5mm de espessura do objeto.



Figura 56. Término do processo de usinagem do Filtro de Bismuto no Torno Mecânico. Da esquerda para a direita, o Dr. Marcos Leandro segura a peça torneada.

22 de Junho de 2017: Na terça feira, 20 de Junho, o Dr. Reynaldo solicitou o afastamento do núcleo do Reator, para que pudessemos trabalhar em segurança. Hoje começamos a operação de instalação do novo tubo colimador, dos filtros de Bismuto e do *beam stopper* de água no *Beam Hole* 14. Começamos por retirar o *plug* de concreto e em seguida, inserimos o tubo no *BH*, operação que foi muito bem sucedida. Após, passamos para a instalação dos filtros de Bismuto, e depois inserimos o *beam stopper* de água no interior do tubo e, em seguida, o dispositivo na forma de cartola para lacrar todo o conjunto.



Figura 57. Visão do tubo colimador e do *beam stopper* de água, na mão do Dr. Reynaldo um dos filtros de Bismuto.

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



Figura 58. Abertura da comporta do *Beam Hole* 14 para a retirada do plug de concreto.



Figura 59. Retirada parcial do *plug* de concreto do *Beam Hole* com acompanhamento da proteção radiológica. Na mão do operador de proteção radiológica do IPEN um detetor de radiação gama.

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

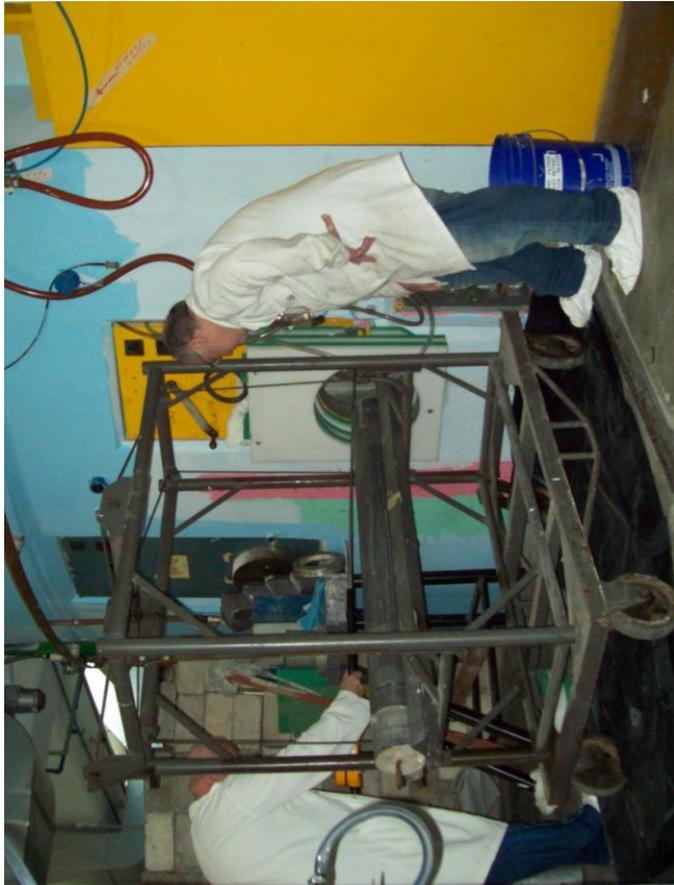


Figura 60. *Plug* de concreto totalmente retirado do *Beam Hole*. O afastamento do núcleo da proximidade dos *Beams Holes* permite a segurança radiológica dos trabalhadores nesta operação.

23 de Junho de 2017: Finalizou-se hoje a instalação do novo tubo colimador. Foram verificadas e testadas as conexões elétricas, o funcionamento do *beam stopper* de chumbo e a eficiência do *beam stopper* de água, que funciona com ar comprimido. Após, o *beam catcher* foi recolocado em sua posição com o uso de empilhadeira.



Figura 61. Finalização da instalação do novo tubo colimador com o posicionamento do *beam catcher*, o último estágio que compõe o equipamento de imageamento com nêutrons do IPEN.

26 de Junho de 2017: Realizado no dia de hoje o primeiro teste de operação do novo equipamento de imageamento com nêutrons do IPEN. A expectativa era grande, e o resultado foi excelente. Todos os recursos do equipamento estão funcionando plenamente, e nas vésperas do Reator Nuclear IEA-R1 do IPEN-CNEN/SP completar 60 anos de operação, e em plena forma.

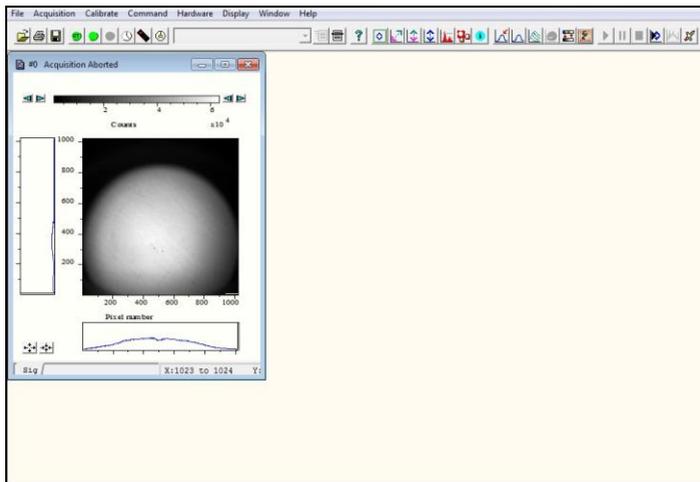


Figura 62. Tela do software de gerenciamento da câmera CCD: “Estamos de volta”, foi esta frase de satisfação que o Dr. Reynaldo disse ao ver esta imagem, do feixe direto, na tela do computador no dia 26 de Junho de 2017.

Assim, o último Capítulo desta obra ainda não foi escrito...

Marco A. Stanojev Pereira

ANEXO I

Árvore Acadêmica

- Marco A. Stanojev Pereira (2008)
- Reynaldo Pugliesi (1983)
- Laércio Antonio Vinhas (1970)
- Marcelo Damy de Souza Santos (1938)
- William Lawrence Bragg (1914)
- William Henry Bragg (1885)
- Joseph John Thomson (1883)
- John William Strutt – Lorde Rayleigh (1868)
- Edward Routh (1857)
- William Hopkins (1830)
- Adam Sedgwick (1811)
- Thomas Jones (1782)

- Thomas Postlethwaite (1789)
- Stephen Whisson (1761)
- Walter Taylor (1736)
- Robert Smith (1719)
- Roger Cotes (1706)
- Isaac Newton (1669)
- Isaac Barrow (1652). Universidade de Cambridge (Classica), orientador *James Duport* (1639), mas estudou matemática em Florença com *Vincenzo Viviani e Gilles de Roberval*.
- Vincenzo Viviani (1622–1703) professor na Universidade de Pisa,
- Galileo di Vincenzo Bonaiuti de' Galilei (1564–1642) professor na Universidade de Pádua
- Ostilio Ricci (1540 – 1603) professor na Accademia delle arti del Disegno

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

- Niccolò Fontana Tartaglia (1500-1557) professor de matemática em Veneza.



Figura 63. Nesta foto histórica, o orientador do meu orientador de Doutorado, Dr. Laércio Vinhas, em visita ao equipamento de imageamento com nêutrons durante o Workshop organizado para as comemorações dos 60 anos de operação do Reator IEA-R1 do IPEN, ocorrido em novembro 2017.

Marco A. Stanojev Pereira

ANEXO II

Equipe de Imageamento com nêutrons do IPEN-CNEN/SP



Reynaldo Pugliesi.

Nasceu em São Paulo no ano de 1951. Concluiu o Bacharelado em Física em 1975 pela Pontifícia Universidade Católica PUC-SP. Obteve os Graus de Mestre (M.Sc) e Doutor (Ph.D.) em Tecnologia Nuclear em 1978 e 1983, respectivamente, pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN/USP. Desde 1976 trabalha no Departamento de Física Nuclear do IPEN-CNEN/SP. De 1976 a 1988 trabalhou no grupo de pesquisa de espalhamento de nêutrons do IPEN-CNEN/SP. Desde 1988 é pesquisador responsável pelo grupo de imagem com nêutrons do IPEN.



Roberto M. Schoueri.

Nasceu em São Paulo no ano de 1964. Concluiu o Bacharelado em Matemática pela Universidade Paulista em 2012. Obteve o Grau de Mestre (M.Sc.) em Tecnologia Nuclear pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN/USP em 2016 com Projeto e construção do novo equipamento para tomografia com nêutrons, instalado no BH nº14 do Reator Nuclear de pesquisas IEA-R1, operacional desde 2012.



Marcos L. Garcia Andrade.

Nasceu em Sorocaba no ano de 1974. Concluiu o Bacharelado em Física em 1996 pela Universidade de São Paulo USP. Obteve os Graus de Mestre (M.Sc.) e Doutor (Ph.D.) em Tecnologia Nuclear em 2002 e 2008, respectivamente, pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN/USP.

Trabalha como Supervisor de Proteção Radiológica e, desde 2009, é pesquisador Colaborador do Grupo de imagem com nêutrons do IPEN-CNEN/SP.



Marco A. Stanojev Pereira.

Nasceu em São Paulo no ano de 1969. Concluiu a Licenciatura Plena em Química pela Universidade Camilo Castelo Branco em 1993. Obteve os Graus de Mestre (M. Sc.) e Doutor (Ph. D.) em Tecnologia Nuclear em 2000 e 2008, respectivamente, pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares IPEN/USP. De 2009 a 2014, trabalhou como Pesquisador Auxiliar no Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, Portugal, em tomografia e radiografia com nêutrons utilizando o Reactor Nuclear RPI/IST. Em 2017 concluiu o projeto de Pós Doutorado no IPEN sob o tema: “Tomografia com nêutrons aplicada ao estudo restauro e preservação de objetos do patrimônio histórico e cultural”. Desde 2014 é pesquisador colaborador do Grupo de imagem com nêutrons do IPEN-CNEN/SP.

