AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

# Projeto e implementação do equipamento para tomografia com nêutrons do IPEN-CNEN/SP

**Roberto Mauro Schoueri**

**Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Aplicações**

**Orientador:**
**Prof. Dr. Reynaldo Pugliesi**

**São Paulo**
**2016**

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**
**Autarquia associada à Universidade de São Paulo**

# Projeto e implementação do equipamento para tomografia com nêutrons do IPEN-CNEN/SP

**Roberto Mauro Schoueri**

**Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Aplicações**

**Orientador:**
**Prof. Dr. Reynaldo Pugliesi**

**Versão Corrigida**

**São Paulo**
**2016**

Aos meus pais ***Rubens*** e ***Rosa***

À minha esposa ***Vilma***

Aos meus filhos ***Pedro*** e ***Raquel***

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que contribuíram para realização deste trabalho, dentre os quais destaco:

O **Prof. Dr. Reynaldo Pugliesi**, pela clareza e assertividade na transmissão de seus conhecimentos e na orientação do trabalho.

Os colegas do Grupo de Imageamento, Dr$^{s}$**. Marcos Leandro G. Andrade** e **Marco Antonio Stanojev Pereira**, pelo auxílio direto e indireto.

Os colegas MSc. **Cláudio Domienikan** e MSc **Fábio de Toledo** pela vultosa ajuda com seu trabalho e conhecimento em elétrica e eletrônica.

Os colegas da Oficina (Usinagem, Montagem e Projeto), principalmente os Sr$^{s}$. **Antonio Reis Filho**, **Célio Miguel**, **Ismael Andrade da Silva**, **José Carlos Sabino**, **Ladislau Abílio da Silva**, **Oswaldo Ortolani de Aquino Jr.**, **Paulo Alves Teixeira**, **Reinaldo Justino dos Santos** e **Sergio Augusto Sá**, que contribuíram de maneira expressiva no projeto, fabricação e montagem do Equipamento para Tomografia com Nêutrons, objeto deste trabalho.

Os professores do curso do pós graduação, com especial agradecimento aos Prof$^{s}$. Dr$^{s}$. **Renato Semmler** e **Mário Olímpio de Menezes**.

**IPEN**, pela oportunidade e disponibilização de recursos humanos e materiais.

**FAPESP**, pelo apoio financeiro.

A **Agência Internacional de Energia Atômica**, pela oportunidade de interagir com pesquisadores e de visitar algumas das instituições de pesquisas mais modernas do mundo.

**Roberto**

## ÍNDICE ANALÍTICO

**Introdução**.....**5**

**Visão geral do trabalho**.....**10**

**Capítulo 1 - Fundamentos das técnicas de imageamento com nêutrons**

**1.1 – Nêutrons**.....**14**

**1.2 - Interação nêutron – matéria**.....**15**

**1.2.1 - Transmissão de Nêutrons pela Matéria**.....**16**

**1.3 – A técnica do imageamento com nêutrons**.....**17**

**1.3.1 – Histórico**.....**17**

**1.3.2 - Conceitos Básicos**.....**18**

**1.3.2.1 - Fontes de nêutrons**.....**20**

**1.3.2.2 - Colimador de Nêutrons**.....**21**

**1.3.2.3 - Conversor e meio sensível**.....**22**

**1.3.2.4 - Conceitos básicos sobre imagens analógicas e imagens digitais**.....**23**

**1.3.3 - Aspectos básicos sobre a obtenção de uma tomografia com nêutrons**.....**25**

**Capítulo 2 – Imageamento com nêutrons no IPEN-CNEN/SP**

**2.1 – Breve histórico**.....**28**

**2.2 - Instalação do equipamento no BH14**.....**31**

**2.2.1 - Desobstrução da área próxima ao BH14**.....**31**

**2.2.2 - Abertura do BH14**.....**31**

**2.2.3 Projeto e construção dos dispositivos do equipamento**.....**32**

**2.2.3.1 - Tubo colimador**.....**32**

**2.2.3.2 - Filtros contra radiação gama**.....**33**

**2.2.3.3 - Colimador de nêutrons**.....**33**

**2.2.3.4 – Diafragmas**.....**34**

**2.2.3.5 – Bloqueador do feixe de radiação gama**.....**35**

**2.2.3.6 – Posicionamento da câmera de vídeo**.....**36**

**2.2.3.7 – Proteção adicional à câmera de vídeo**.....**36**

**2.2.4 - Alinhamento à LASER do caminho do feixe de nêutrons e instalação dos trilhos**.....**37**

**2.2.5 - Montagem do tubo colimador, filtros, colimador e da blindagem**.....**38**
**2.2.6 – Descrição dos componentes do equipamento**.....**40**
**2.3 – Obtenção de uma tomografia neste equipamento**.....**42**
**2.4 – Caracterização do equipamento**.....**43**
**2.5 – Considerações sobre as outras técnicas de imageamento com nêutrons**.....**51**
**2.5.1 - Gd(Gadolínio) + filme de R-X**.....**52**
**2.5.2 - Dy(Disprósio) + filme de R-X**.....**53**
**2.5.3 - B(Boro) + Polímero**.....**53**
**2.5.4 – LiF(ZnS)(Fluoreto de lítio) + câmera de vídeo**.....**54**
**2.5.5 –Tempo - real com LiF(ZnS)(Fluoreto de lítio) + câmera de vídeo**.....**54**
**2.5.6 –Tempo - real com LIXI(Light - Intensifier – X-ray - Image) + câmera de vídeo**.....**54**

**Capítulo 3 - Aplicações das técnicas de imageamento com nêutrons**
**3.1 – Tomografias**.....**55**
**3.1.1 - Vaso cerâmico contemporâneo restaurado**.....**55**
**3.1.2 - Amostra arqueológica**.....**57**
**3.1.3 – Preservação de cerâmica com Paraloid B-72**.....**61**
**3.1.4 - Válvula para controle de fluxo de água**.....**62**
**3.1.5 – Cartucho de festim**.....**63**
**3.1.6 – Parafuso com ferrugem**.....**65**
**3.2 – Tempo – real**.....**68**
**3.2.1 - Inspeção em madeira**.....**68**

**Capítulo 4 - Considerações finais**
**4.1 – Equipamento**.....**70**
**4.2 - Atividades para futuro próximo**.....**70**
**4.3 - As técnicas de imageamento com nêutrons no Brasil e o Reator Multipropósito Brasileiro - RMB**.....**74**

**4.4 – Conclusão**.....**75**

**Anexos**.....**77**

**Referências bibliográficas**.....**81**

# Projeto e implementação de um equipamento para tomografia com nêutrons no IPEN-CNEN/SP

**Roberto Mauro Schoueri**

## RESUMO

Na presente dissertação, foi desenvolvido um equipamento para tomografia com nêutrons que está operacional e instalado no canal de irradiação 14 do Reator Nuclear de Pesquisas IEA-R1 do IPEN-CNEN/SP.

As imagens apresentadas neste trabalho, são de objetos que foram selecionados de modo a realçarem uma das principais aplicações da técnica, que é o estudo de materiais hidrogenados mesmo se envoltos por espessa camada de alguns metais. Neste equipamento, uma tomografia completa pode ser obtida em 400 s, com uma resolução espacial máxima de 205 μm. Estas características são comparáveis às dos equipamentos mais desenvolvidos em operação em outros países, e propiciam imagens com qualidade suficiente para que sejam realizadas análises tanto qualitativas quanto quantitativas dos objetos inspecionados.

A implementação da técnica da tomografia com nêutrons abre a possibilidade de novas linhas de pesquisa, pois disponibiliza uma nova ferramenta para inspeção de objetos, que fornece uma visão da sua estrutura interna, que nem sempre é possível por métodos de imageamento bidimensional.

# Design and development of a neutron tomography facility at the IPEN-CNEN/SP

**Roberto Mauro Schoueri**

## ABSTRACT

In the work reported in this dissertation, a facility for neutron tomography was developed and installed at the irradiation channel #14 of the IEA-R1 nuclear research reactor of IPEN-CNEN/SP.

Several selected objects were inspected, and the obtained images demonstrate the main characteristic of the present technique that is its capability to visualize hydrogenous rich substances.

In such facility, a tomography can be obtained in 400 s with a spatial resolution of 205 μm, and the obtained images have sufficient quality to allow qualitative and quantitative analysis. These characteristics are very similar to the ones of the top facilities around the world, and the quality of the provided images are sufficient to allow qualitative and quantitative analysis of the inspected object.

The implementation of the neutron tomography technique opens up the possibility of new research as it provides a new tool for inspection of objects, which provides a view of its internal structure, which is not always possible for two-dimensional imaging methods.

**Introdução**

O imageamento com nêutrons é um conjunto de técnicas de ensaios não destrutivos utilizado na investigação da estrutura interna de objetos, baseadas na atenuação de um feixe de nêutrons quando atravessa a matéria. Uma das principais características que sempre é mencionada, e que as tornam atrativas, é a possibilidade de utilizá-las para a inspeção de objetos ricos em Hidrogênio mesmo se envoltos por espessas camadas de alguns metais. Desta forma, as técnicas com nêutrons são complementares às que utilizam raios-X [1-5].

De uma forma geral, até por volta de 1990, as imagens fornecidas por nêutrons possuíam qualidade 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 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 se pode 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 [5-21].

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 departamento 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 equipamentos para imageamento com nêutrons [22, 23]. 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 > $10^6 n.s^{-1}.cm^{-2}$;
2- divergência angular do feixe ≤ $3^0$;
3- espectro de energia dos nêutrons conhecido;
4- fundo de radiação gama de pouca intensidade;
5- campo de irradiação com diâmetro ≥ 20cm;
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 1 abaixo [23].

| País | Local | Instituição | Equipamento | Fonte de Nêutrons | Fluxo de nêutrons ($cm^{-2}.s^{-1}$) | Divergência angular (L/D) | Dimensão Máx. do Feixe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Áustria | Viena | Atominstitut | Feixe dedicado ao Imageamento | TRIGA Mark-II, 250kW | 1.00E+05 | 125 | 90 mm diam. |
| **Brasil** | **São Paulo** | **IPEN** | **Feixe dedicado ao Imageamento** | **IEA-R1M 5MW** | **1.00E+06** | **110** | **25cm diam.** |
| Alemanha | Garching | TU Munich | ANTARES | FRM-II 25MW | 9.40E+07 | 400 | 32cm diam. |
| Alemanha | Garching | TU Munich | NECTAR | FRM-II 25MW | 3.00E+07 | 150 | 20cm diam. |
| Alemanha | Berlim | HZB | CONRAD | BER-II 10MW | 6.00E+06 | 500 | 10 cm x 10 cm |
| Hungria | Budapeste | KFKI | Feixe dedicado ao Imageamento | WRS-M 10MW | 6.00E+05 | 100 | 25cm diam. |
| Japão | Osaka | Universidade de Kyoto | Feixe dedicado ao Imageamento | MTR 5MW | 1.20E+06 | 100 | 16cm diam. |
| Japão | Tokai | JAEA | Feixe dedicado ao Imageamento | JRRM-3M 20MW MTR | 2.60E+08 | 125 | 25cmx 30cm |
| Coréia do Sul | Daejon | KAERI | Feixe dedicado ao Imageamento | HANARO 30MW | 1.00E+07 | 190 | 25cmx 30cm |
| Suíça | Villigen | PSI | NEUTRA | SINQ spallation source | 5.00E+06 | 550 | 40cm diam. |
| Suíça | Villigen | PSI | ICON | SINQ spallation source | 1.00E+07 | 350 | 15cm diam. |
| EUA | Pensilvania | Pen State University | Feixe dedicado ao Imageamento | TRIGA 2MW | 2.00E+06 | 100 | 23cm diam. |
| EUA | Gaithersburg | NIST | CNR | NBSR 20MW | 2.00E+07 | 500 | 25cm diam. |
| EUA | Sacramento | McCleallan RC | Feixe dedicado ao Imageamento | TRIGA 2MW | 2.00E+07 | 100 | 23cm diam. |
| África do Sul | Pelindaba | NECSA | SANRAD | SAFARI-1 20MW | 1.60E+06 | 150 | 36cm diam. |

Tabela 1. Equipamentos para imageamento com nêutrons que possuem propriedades referentes ao estado da arte.

Com o intuito de complementar as informações de 1 a 9, cabe mencionar outras partes integrantes destes equipamentos [22, 24].

- reator nuclear ou acelerador de partículas;
- filtros contra radiação gama;
- seletor de energia dos nêutrons;
- colimador;
- bloqueadores de feixes de radiação;
- dispositivos para posicionamento do objeto como mesa giratória e elevadores manuais;
- sistemas para a captura da imagem que incluem cintiladores, diversos tipos de conversores (nêutron – radiação ionizante), filmes, polímeros e câmeras de vídeo;
- blindagem.

A ideia de instalarmos um equipamento para tomografia com nêutrons no “Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares” IPEN-CNEN/SP, surgiu em 2009, como consequência do desenvolvimento, pelo grupo de trabalho, de diversas técnicas de imageamento bidimensionais com nêutrons e de processamento de imagens digitais. Desta forma, como o caminho para a obtenção de uma tomografia passa pela aquisição de imagens bidimensionais digitais empregando um sistema com câmera de vídeo, o desenvolvimento de um equipamento para tomografia não partiria do patamar “zero”, pois a viabilidade de obtenção de imagens bidimensionais com a qualidade e tempo de aquisição desejáveis já havia sido comprovada e, além disto, a maior parte da infraestrutura disponível seria também utilizada [25-32]. Assim, o custo geral para o seu desenvolvimento e implementação não seria elevado, pois a parte mais dispendiosa, que é a geração de um feixe de nêutrons adequado, já estava operacional e disponível. Foi com esta certeza e inspiração que submetemos à FAPESP um projeto de pesquisas para a construção de um equipamento para tomografia com nêutrons, o qual está instalado no Reator Nuclear de Pesquisas IEA-R1 do IPEN-CNEN/SP. A primeira tomografia foi obtida em meados de novembro de 2010 [5]. Devido a problemas técnicos, os quais serão abordados no Capítulo 2, este equipamento que

estava instalado no canal de irradiação 08 ou BH08, foi transferido para o BH14 deste mesmo reator, onde está operacional desde fins de 2011 [33].

Como pode ser verificado, o equipamento para imageamento com nêutrons do IPEN-CNEN/SP está mencionado na tabela 1 e, exceto pelos parâmetros 5, 8 e 9 (parcialmente), reúne 6 das 9 características relativas a um equipamento no “estado da arte”. Como esta tabela foi publicada com dados adquiridos em 2010, cabe ressaltar que os dados referentes ao nosso equipamento são ainda aqueles referentes ao instalado no BH08. O atual, instalado no BH14, possui várias melhorias que serão abordadas e detalhadas no decorrer deste trabalho. No presente, temos condições de obter imagens por diversas técnicas de imageamento, mas visando o objetivo principal deste trabalho, será dada ênfase à da tomografia com nêutrons. Atualmente podemos obter uma tomografia em aproximadamente 7 minutos, com uma qualidade, tanto referente à sensibilidade para discernir espessuras como à resolução espacial, suficientes para a realização de análises qualitativas e quantitativas. A figura 1 abaixo é uma versão artística do equipamento para tomografia com nêutrons, na qual são destacados alguns dos seus componentes individuais.

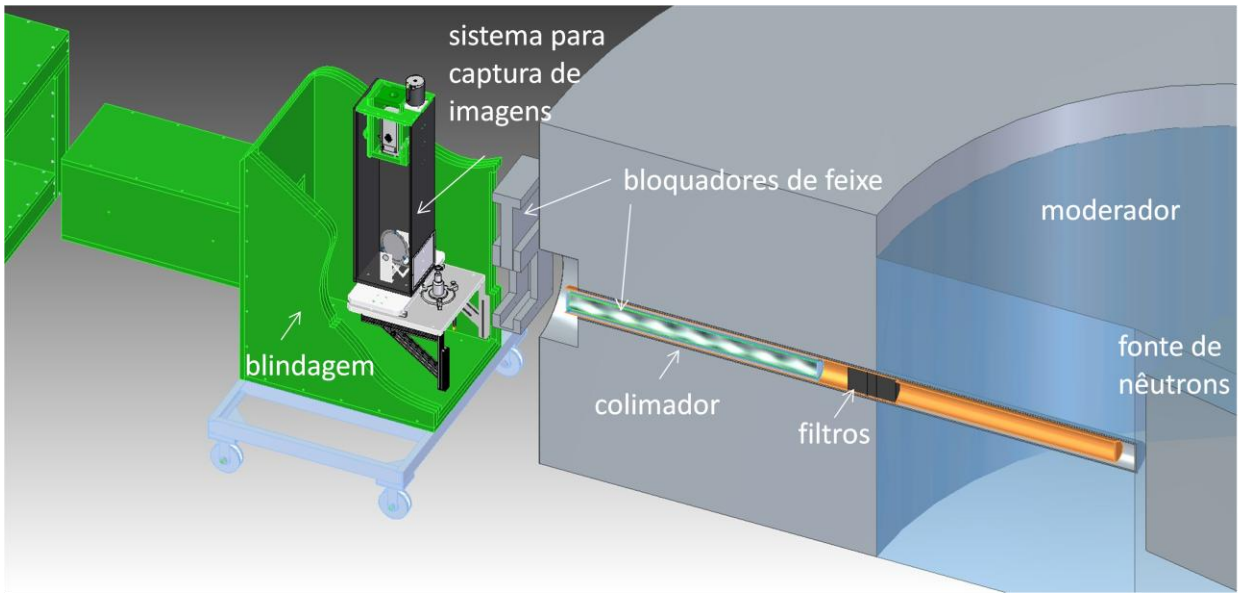



Figura 1. Diagrama esquemático do equipamento de imageamento com nêutrons do IPEN-CNEN/SP.

## Visão geral do trabalho

### Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver e tornar operacional um equipamento para tomografia no IPEN-CNEN/SP, de modo a disponibilizar uma metodologia de ensaios não destrutivos capaz de permitir a inspeção da estrutura interna de objetos, por meio de imagens tridimensionais sob a ótica dos nêutrons. Isto permitirá a implementação de novas linhas de pesquisa, pois existe a possibilidade do estudo de novos tipos de objetos, bem como a obtenção de novas imagens de objetos que já foram inspecionados pelas outras técnicas de imageamento bidimensional.

### Motivações

As principais motivações deste trabalho foram: a disponibilidade no IPEN-CNEN/SP de técnicas operacionais para imageamento bidimensional com nêutrons; a disponibilidade do reator nuclear de pesquisas IEA-R1 de 5MW capaz de fornecer a intensidade de nêutrons necessária para esta finalidade; o conhecimento adquirido nos anos anteriores que tornou possível o projeto e o desenvolvimento de um equipamento para tomografia eficaz e competitivo [28-30], [34].

### Divisão da Dissertação

A dissertação foi dividida em quatro capítulos.

No Capítulo 1 são apresentados os fundamentos das técnicas de imageamento com nêutrons, o que compreende a descrição dos princípios da interação dos nêutrons com a matéria, necessários para a compreensão tanto do equipamento quanto das técnicas de imageamento. São abordados os conceitos de seções de choque microscópica e macroscópica, e da transmissão dos nêutrons pela matéria.

É também apresentado um breve histórico a respeito da evolução das técnicas e dos conceitos básicos referentes ao imageamento com nêutrons. Dentre eles, destacamos a importância das fontes de nêutrons com ênfase aos reatores nucleares, dos colimadores e a sua função quanto à forma e divergência angular do feixe de nêutrons,

e dos tipos de conversores e meios sensíveis que são utilizados para a geração e captura de uma imagem. Foram enfatizados os conceitos fundamentais para a compreensão de imagens digitais, da conversão “imagem analógica” - “imagem digital”, pixel, voxel, faixa dinâmica, bem como das técnicas para a realização de operações matemáticas nestas imagens.

O capítulo termina com a descrição, dos procedimentos empregados para obter uma tomografia e da metodologia utilizada para a caracterização de um equipamento.

O Capítulo 2 é dedicado a uma abordagem detalhada do equipamento para tomografia com nêutrons. De modo a entender o caminho de como o grupo de trabalho chegou à situação atual de desenvolvimento, primeiramente será apresentado um breve histórico do imageamento com nêutrons no IPEN-CNEN/SP, contextualizando as técnicas e as épocas em que foram desenvolvidas. Em seguida é descrito em detalhes a instalação deste equipamento no BH14 do reator IEA-R1, iniciando pela desobstrução da área próxima ao canal, para dar lugar ao referido equipamento, e a determinação das dimensões internas deste canal visando o projeto e a construção dos seus componentes individuais, tais como, o tubo colimador, filtros contra radiação gama, colimador de nêutrons e diafragmas. Antes da instalação dos componentes, foi utilizado um “LASER” para conseguir um alinhamento otimizado entre o feixe de nêutrons e a posição de irradiação, de modo que os objetos em inspeção fossem “iluminados” com a maior área útil possível, e que a blindagem do equipamento estivesse posicionada corretamente. Todos os componentes foram então instalados, inclusive a câmera de vídeo com sua própria blindagem, cuja função primordial é proteger seu sensor de imagens do tipo CCD, contra danos de radiação.

Em seguida são descritos os procedimentos para a obtenção de uma tomografia neste equipamento.

Para finalizar este capítulo foram abordados dois temas. O primeiro referente à caracterização do equipamento por meio de três parâmetros importantes, a saber, o tempo de irradiação de um objeto para se obter a tomografia, a resolução espacial da imagem, e a sensibilidade para discernir variações de espessuras. O segundo sobre as outras técnicas de imageamento bidimensional com nêutrons que estão disponíveis

neste mesmo equipamento, e que utilizam filmes convencionais para raios-X, polímeros ou câmeras de vídeo, para a captura e registro da imagem.

No Capítulo 3 estão apresentadas algumas imagens de modo a se demonstrar a potencialidade tanto do equipamento que foi desenvolvido neste trabalho, quanto da técnica em si. Os objetos selecionados para esta finalidade são aqueles que possuem em sua estrutura materiais hidrogenados, pois representam a principal aplicação das técnicas de imageamento com nêutrons, e foram os seguintes:

- Vaso cerâmico contemporâneo restaurado (colado);
- Amostra arqueológica constituída por pedra e osso incrustado (com materiais orgânicos aderidos);
- Vaso cerâmico ao qual foi aplicada a resina acrílica conhecida como Paraloid B-72 para aglutinação deste material e proteção contra umidade;
- Válvula com corpo de alumínio para controle de fluxo mediante diafragma de borracha;
- Cartucho de festim para visualização da pólvora. É importante destacar que este objeto é frequentemente empregado para demonstrar o aspecto de complementaridade entre as técnicas de imageamento que utilizam raios-X e nêutrons;
- Parafuso de aço com ferrugem.

Para finalizar, serão apresentadas algumas imagens obtidas por uma das técnicas de imageamento bidimensional com nêutrons, e a seleção do objeto inspecionado visou o mesmo foco para o imageamento tridimensional. As imagens mostradas foram obtidas pela técnica em tempo-real, ou seja, a visualização do que está acontecendo no momento que acontece, e o objeto inspecionado foi uma amostra de madeira atacada por cupins.

No Capítulo 4 são apresentadas as considerações finais do trabalho. Os dados da Tabela 2.2 demonstram que o equipamento do BH14 é uma versão otimizada do anterior, que estava instalado no BH08 e suas características operacionais mais significativas são:

- tempo relativamente pequeno para a obtenção de uma tomografia, ~ 400 s, e resolução espacial intrínseca de 205 $\mu$m. Estes valores são significativos, pois são

comparáveis com aqueles dos equipamentos de tomografia com nêutrons mais desenvolvidos em operação [22];

- nível de dose de radiação na posição da câmera de vídeo reduzido, garantindo um aumento em sua vida útil de pelo menos um fator 50, quando comparado com o equipamento anterior instalado no BH08;

Dentre as atividades programadas para um futuro próximo constam a substituição do espelho com base de vidro, que é utilizado para a reflexão da imagem gerada no cintilador, em direção à câmera de vídeo (Capítulo 2), por um com uma base de silício, a qual é quatro vezes menos espessa, e deverá reduzir ainda mais a quantidade de danos causados no seu sensor CCD pela radiação espalhada. Com relação às aplicações, pretendemos dar ênfase a objetos de interesse de nossa herança cultural [5], bem como iniciar estudos visando a viabilidade para a localização e dispersão de água em células a Hidrogênio. Alguns resultados preliminares promissores estão apresentados no final deste capítulo.

Finalmente, com relação ao advento do Reator Multipropósito Brasileiro – RMB, está previsto um canal de irradiação exclusivo para esta finalidade. Considerando que a intensidade do feixe de nêutrons produzido será maior do que aquela no IEA-R1, será possível o desenvolvimento de novas linhas de pesquisa, pois permitirá tanto o aprimoramento das técnicas de imageamento já desenvolvidas no IPEN-CNEN/SP, quanto o desenvolvimento de outras novas, que já estão operacionais em outros países que possuem fontes de nêutrons similares [26, 27, 33].

Acreditamos que o presente trabalho atingiu seu principal objetivo que foi o de disponibilizar no IPEN-CNEN/SP um equipamento competitivo para tomografia com nêutrons no reator nuclear de pesquisas IEA-R1, por meio do qual é possível realizar uma inspeção tridimensional da estrutura interna de diversos tipos de objetos, permitindo, em alguns casos, a visualização de detalhes jamais conseguida por métodos de imageamento bidimensional.

# Capítulo 1 - Fundamentos das técnicas de imageamento com nêutrons

## 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 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 Rutherford" [35]. 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 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 $1{,}5\text{x}10^{-20}$e (e ≡ 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 em (1.1)

$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu} \tag{1.1}$$

O nêutron possui um comprimento de onda de DeBroglie associado à sua massa dado por [36, 37]:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{0{,}286}{E^{1/2}} \tag{1.2}$$

sendo:

$\lambda$ - comprimento de onda [Å]

$h$ - constante de Planck

$v$ – velocidade do nêutron

$m$ – massa do nêutron

$E$ – energia cinética do nêutron [eV]

**1.2 - Interação nêutron - matéria**

Pelo fato de o nêutron possuir carga líquida nula e momento magnético, a sua interação com a matéria ocorre mediante forças nucleares ou magnéticas, respectivamente. Devido à sua importância para o presente trabalho, será dada ênfase à primeira. Neste processo eles podem ser espalhados ou absorvidos pelos núcleos do material utilizado como alvo. No processo de espalhamento elástico, a interação pode ocorrer como resultado de uma colisão do tipo “bolas de bilhar” ou então o nêutron penetra no núcleo excitando-o, e este retorna ao seu estado fundamental emitindo um nêutron e a energia cinética do sistema nêutron - núcleo se conserva. No processo de espalhamento inelástico o nêutron penetra no núcleo, excitando-o o qual também emite um nêutron, mas neste caso a energia cinética do sistema não se conserva e parte dela é convertida em energia de excitação nuclear. No processo de absorção o nêutron penetra no núcleo deixando-o excitado o qual retorna ao seu estado fundamental mediante a emissão de partículas e/ou de radiações-$\gamma$.

A interação nêutron – núcleo é caracterizada por uma grandeza denominada secção de choque microscópica ($\sigma$), expressa na unidade “barn” (1barn$\equiv 10^{-24}$ cm$^2$). Classicamente é interpretada como uma área efetiva que o núcleo alvo apresenta ao nêutron para a ocorrência da interação. A secção de choque microscópica total ($\sigma_T$) para a ocorrência de qualquer um dos processos de interação, é expressa simbolicamente por:

$$\sigma_T = \sigma_{abs} + \sigma_{esp} \qquad (1.3)$$

sendo:

$\sigma_{abs}$ e $\sigma_{esp}$ as secções de choque microscópicas para absorção e espalhamento respectivamente [36, 37].

Devido às especificidades destas interações, os nêutrons são classificados de acordo com a sua energia cinética. Uma classificação usual é apresentada na tabela 1.1.

| **Classificação** | **Energia (eV)** |
|---|---|
| Lentos(frios) | $E < 0,01$ |
| Lentos(térmicos) | $0,01 < E < 0,5$ |
| Lentos(epitérmicos) | $0,5 < E < 10^4$ |
| Ressonância | $1 < E < 100$ |
| Rápidos | $10^3 < E < 20.10^6$ |
| Ultra-rápidos | $E > 20.10^6$ |

Tabela 1.1. - Classificação dos nêutrons de acordo com sua energia cinética.

Na região “Lentos” (a de interesse deste trabalho), a secção de choque de absorção cresce com o inverso da velocidade do nêutron, $\sigma_{abs} \alpha (1/v)$, enquanto que a de espalhamento é aproximadamente constante $\sigma_{esp} \sim$ cte [36].

### 1.2.1 - Transmissão de Nêutrons pela Matéria

Teoricamente a transmissão de nêutrons pela matéria é governada por uma lei matemática exponencial do tipo [36]:

$$\phi(x) = \phi_0 . e^{-\Sigma_T(v).x} \qquad (1.4)$$

sendo:

$\phi_0$ - fluxo de nêutrons incidente no material alvo ($n.s^{-1}.cm^{-2}$);

$\phi(x)$ - fluxo de nêutrons que passa pelo material e que não sofreu interação ($n.s^{-1}.cm^{-2}$);

“x” – espessura do material (cm);

$\Sigma_T(v)$ secção de choque total macroscópica do alvo, para nêutrons com velocidade (v), e representa a probabilidade do nêutron sofrer qualquer tipo de interação por unidade de caminho percorrido no material ($cm^{-1}$);

$\Sigma_T(v) = N.\sigma_T(v)$ - “N” é a densidade atômica do material alvo ($cm^{-3}$)

## 1.3 – A técnica do imageamento com nêutrons

### 1.3.1 - Histórico

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.

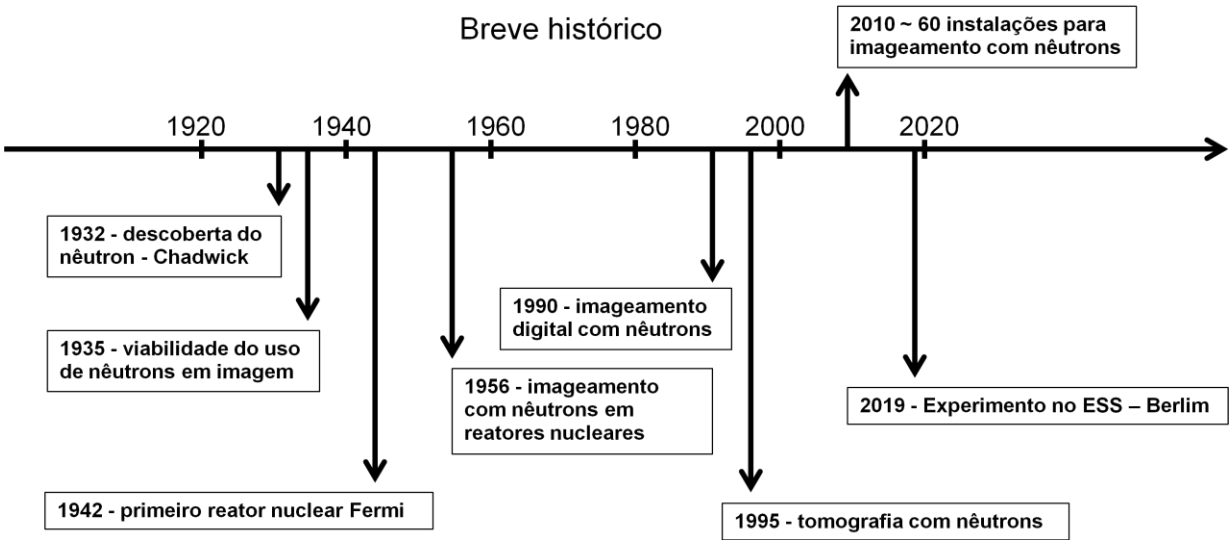



Figura 1.1. Histórico do desenvolvimento do imageamento com nêutrons.

A figura 1.1 mostra um diagrama do desenvolvimento das técnicas de imageamento com nêutrons [3, 34, 38, 39]. As pesquisas iniciais sobre radiografia com nêutrons foram realizadas por Kallmann e Kuhn em 1935 empregando uma fonte de nêutrons do tipo Ra-Be. Em 1956, Thewlis e Derbyshire publicam o primeiro trabalho utilizando um reator nuclear e apontaram os caminhos para as possíveis aplicações práticas desta nova técnica de ensaio não destrutivo [39]. A técnica permaneceu sem grandes desenvolvimentos, até que durante as décadas de 80/90 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 equipamentos operacionais para tomografia com nêutrons [1, 12, 13, 17, 40]. Esta última foi bastante disseminada e em 2010 já existiam cerca de 60 instalações ao redor do mundo. Para um futuro próximo, são esperados novos desenvolvimentos e avanços, uma vez que está prevista a operação de uma nova fonte de nêutrons em Berlim - Alemanha, baseada em um acelerador de partículas do tipo Spallation Source [ESS], capaz de prover intensidades de nêutrons 10 vezes superiores às disponíveis hoje em dia [42].

### 1.3.2 - 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 figura 1.2 mostra um gráfico comparativo destes coeficientes, referentes a nêutrons térmicos (25 meV) e raios-X de 125 keV, 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.** A figura 1.3 é uma imagem clássica que demonstra o caráter de complementaridade entre estas técnicas de imageamento [24].

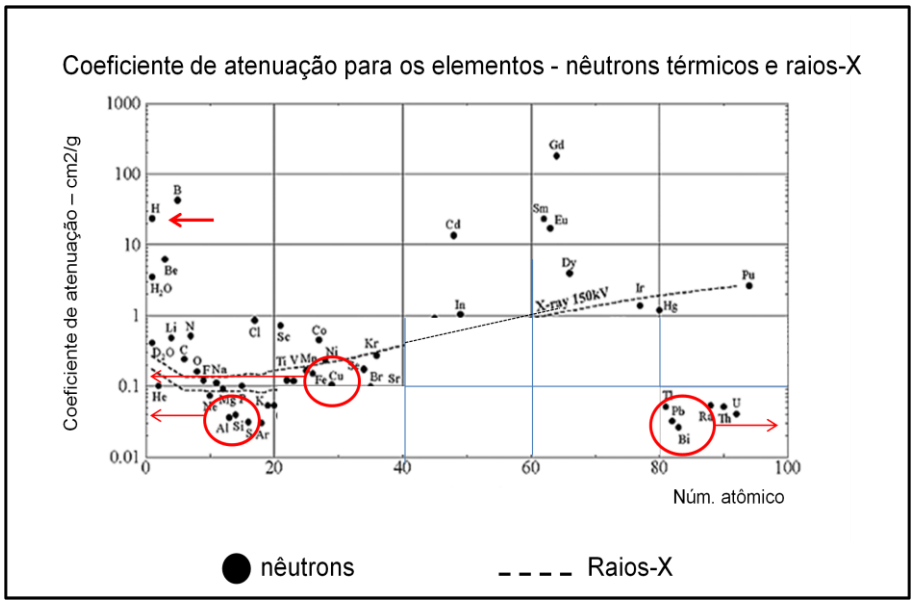



Figura 1.2. Comparação entre os coeficientes de atenuação para nêutrons e raios –X.

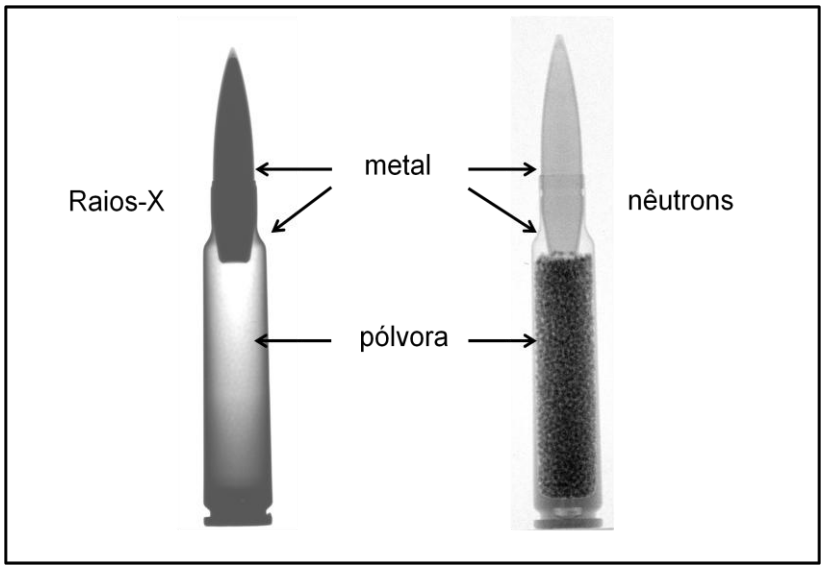



Figura 1.3. Exemplo clássico que mostra o caráter de complementaridade entre nêutrons e raios – X, utilizados em imageamento [3].

O procedimento básico para a obtenção de uma imagem por transmissão de nêutrons é semelhante ao das técnicas convencionais, e está esquematizado na figura 1.4. 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, 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 [2, 24].

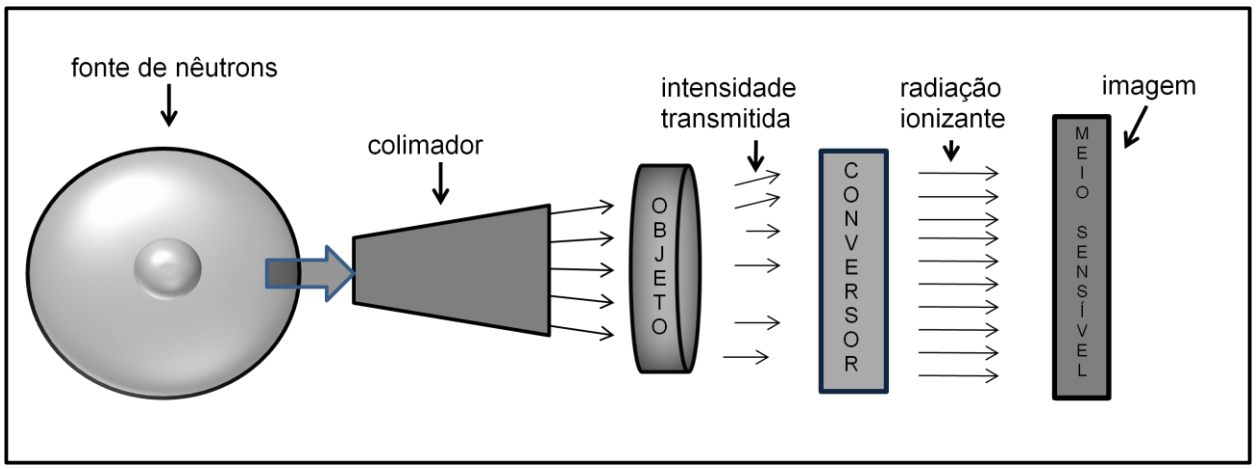



Figura 1.4. Diagrama esquemático de como se obtém uma imagem por transmissão de nêutrons.

**1.3.2.1 - Fontes de nêutrons**. Feixes de nêutrons podem ser gerados por diversas fontes tais como aceleradores de partículas, radioisótopos, ou reatores nucleares. Entretanto, como já mencionado anteriormente, por causa da necessidade de fluxos elevados, os quais permitem a obtenção de imagens de melhor qualidade, as fontes mais comumente empregadas são os aceleradores do tipo “spallation sources”, e os reatores nucleares [4, 19, 42]. Nestes casos, emergem dos núcleos atômicos com energias correspondentes às dos nêutrons rápidos. De uma forma geral, a faixa de energia de maior interesse para fins de imageamento é a dos nêutrons térmicos, uma vez que os valores dos coeficientes de atenuação dos elementos exibem grandes diferenças entre si, e porque os conversores apresentam as maiores eficiências para conversão do nêutron em radiação ionizante.

Devido à importância para o presente trabalho, serão somente considerados os reatores nucleares. Nestas fontes os nêutrons são gerados como consequência do processo de fissão, tipicamente de núcleos de urânio-235. Neste processo o núcleo de urânio se rompe em 2 fragmentos, há a liberação de energia, principalmente na forma de energia cinética destes fragmentos, de radiação-$\gamma$, e também ocorre 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 de modo a formar o núcleo do reator. Este núcleo é inserido em um meio moderador, como a água leve, por exemplo, e uma parte dos nêutrons emitidos na fissão é termalizada através de colisões elásticas com os núcleos de Hidrogênio da água, atingindo uma energia média de equilíbrio de ~ 25 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 dos nêutrons moderados, que são absorvidos por outros núcleos de urânio, e de uma maneira mais eficiente, pois $\sigma_{abs} \alpha$ 1/v [36, 44]. O núcleo do reator é cercado por um conjunto de elementos refletores cuja finalidade é a de minimizar o escape dos nêutrons do núcleo de modo a tornar mais eficiente o processo da reação em cadeia. Este processo é controlado por “barras de controle”, confeccionadas de materiais absorvedores de nêutrons, que são inseridas no núcleo do reator, e que limitam a sua população. A intensidade de nêutrons que é disponível para o imageamento, é constituída por aqueles que escaparam do núcleo e

que são conduzidos ao local de irradiação por meio de canais ou beam-holes (BH) construídos na blindagem biológica do reator [5, 24].

**1.3.2.2 - Colimador de Nêutrons.** Os colimadores são geralmente instalados no interior dos canais de irradiação e tem a finalidade de dar forma geométrica ao feixe de nêutrons. Dentre os mais empregados destacam-se o cilíndrico e o cônico divergente, este último mostrado na figura 1.5. Normalmente suas paredes internas são revestidas com materiais absorvedores de nêutrons e a radiação produzida pela sua absorção deve preferencialmente ficar retida nestas paredes, de modo a não participar do processo de formação da imagem [3, 24, 38].

A razão entre o seu comprimento (L) e o diâmetro (D) de entrada do feixe, define a divergência angular do feixe, e tipicamente varia entre $100 < L/D < 500$. Quanto maior a razão L/D menores serão as distorções (penumbra) na imagem, vide figura 1.6. Esta distorção é quantificada pela grandeza chamada "resolução geométrica" ($U_g$) e vem dada por [24]:

$$U_g = x/(L/D) \qquad (1.5)$$

sendo:

"x" a distância do objeto ao sistema filme - conversor

O fluxo "$\phi$" de nêutrons na saída do colimador é dado por[24]:

$$\phi=(1/16).(D/L)^2.\phi_i \qquad (1.6)$$

sendo:

$\phi_i$ o fluxo de nêutrons na entrada do colimador

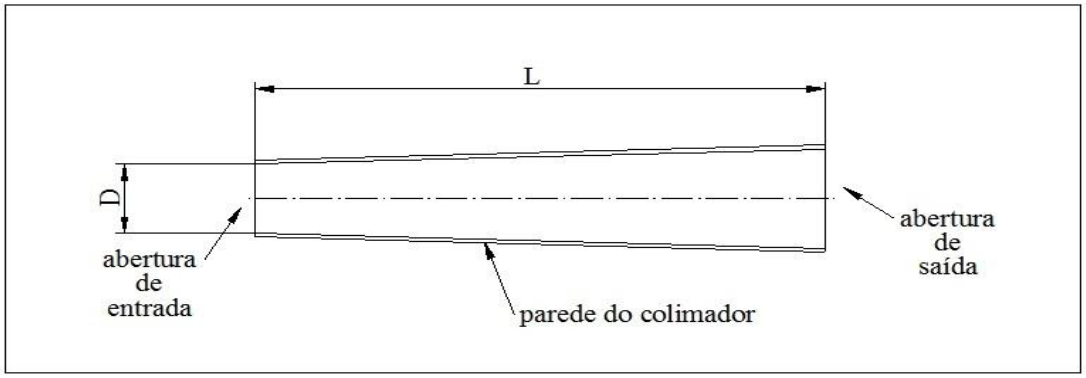



Figura 1.5. Esquema de um colimador do tipo cônico divergente.

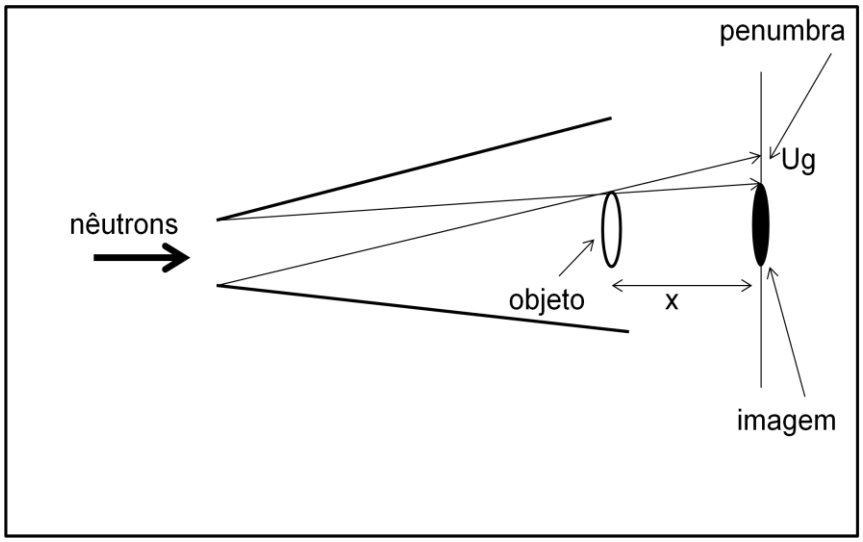



Figura 1.6. Efeito da divergência angular do feixe de nêutrons - penumbra.

**1.3.2.3 - 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 1.2 mostra algumas das combinações "conversor e meio sensível" mais comumente utilizadas [24].

| Conversor | Radiação ionizante | Meio sensível |
|---|---|---|
| Gadolínio (Gd) | $e^-$ | filme R-X |
| Disprósio (Dy) | $\beta,\gamma$ | filme R-X |
| Boro (B) | $\alpha$ | Polímero |
| Fluoreto de lítio (LiF) | $\alpha$,T(Trítio) | Sulfeto de Zinco (cintilador) + Câmera de vídeo (CCD) |

Tabela 1.2. Conversores e meios sensíveis, utilizados para a obtenção de imagens.

Dentre os exemplos mencionados, e devido à sua importância para o presente trabalho será dada ênfase ao conjunto LiF(ZnS) + câmera de vídeo com sensor de imagem CCD (**C**harged **C**ouple **D**evice). Neste caso uma mistura entre dois compostos, LiF e ZnS, em proporções que variam dependendo da finalidade do cintilador [24, 44,

45] e com uma espessura típica de 450 μm, é depositada em uma base de alumínio com 2 ou 3 mm de espessura. A reação nuclear responsável pela geração das partículas ionizantes é $^{6}Li(n,\alpha)T$. 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 escuro [47].

**1.3.2.4 - Conceitos básicos sobre imagens analógicas e imagens digitais.** As câmeras de vídeo podem fornecer tanto imagens analógicas quanto digitais, e no primeiro caso, a imagem analógica pode ser convertida em digital. Este processo é chamado de digitalização, e está ilustrado na figura 1.7. A imagem digital convertida é representada por uma matriz bidimensional, onde cada um de seus elementos é denominado PIXEL, abreviatura de "**pi**cture **el**ement", e cada um representa uma pequena fração da imagem original, e possui uma posição fixa, dada pelas coordenadas cartesianas **(x,y)**, e um número inteiro associado, que é representativo do brilho da parte da imagem original que ele representa, e que em uma escala de 8 bits, por exemplo, possui um intervalo ou faixa dinâmica de 256 ($2^{8}$) tons de cinza que varia entre zero (tom mais escuro) até 255 (tom mais claro). Alguns destes tons de cinza estão mostrados na escala da figura 1.8. Desde que os pixels têm números associados a si, podem ser processados matematicamente, ou seja, operações matemáticas podem ser aplicadas a eles. Isto originou a ciência do processamento de imagens digitais, que contém uma variedade muito grande de ferramentas para essa finalidade. A consequência de sua utilização é que, em comparação com a imagem analógica original, pode haver, por exemplo, uma melhoria no seu contraste, realce de bordas, minimização de ruído. Hoje existem diversos softwares comercializados e/ou abertos específicos para esta finalidade [22, 41], [48-50].

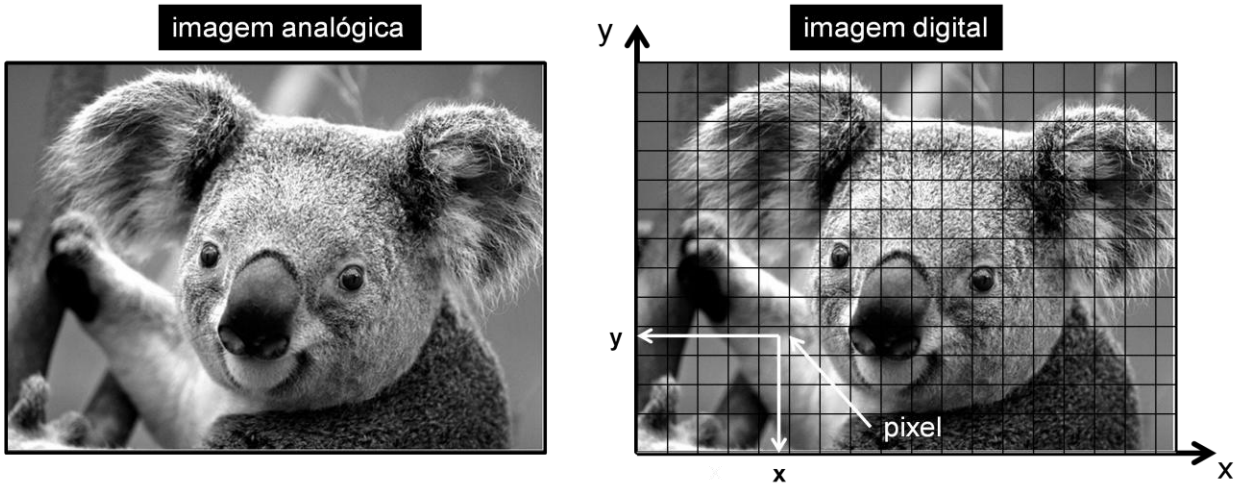



Figura 1.7. Processo básico de digitalização de uma imagem analógica bidimensional.

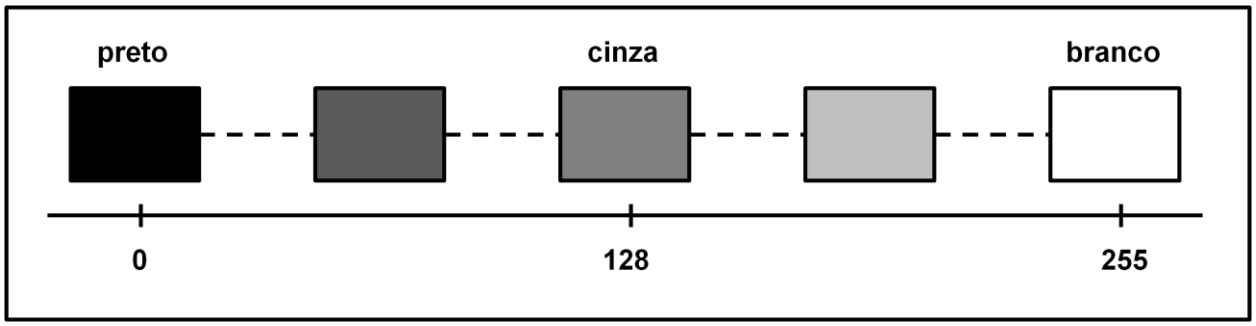



Figura 1.8. Alguns tons de cinza em uma escala de 8 bits.

No caso de interesse do presente trabalho, as imagens resultantes são tridimensionais e, neste caso, da mesma forma que um PIXEL é a unidade básica de uma imagem digital bidimensional, um VOXEL [51], abreviatura de "**vol**ume **el**ement" é a unidade básica de uma imagem digital tridimensional, como esquematizado na figura 1.9. 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.

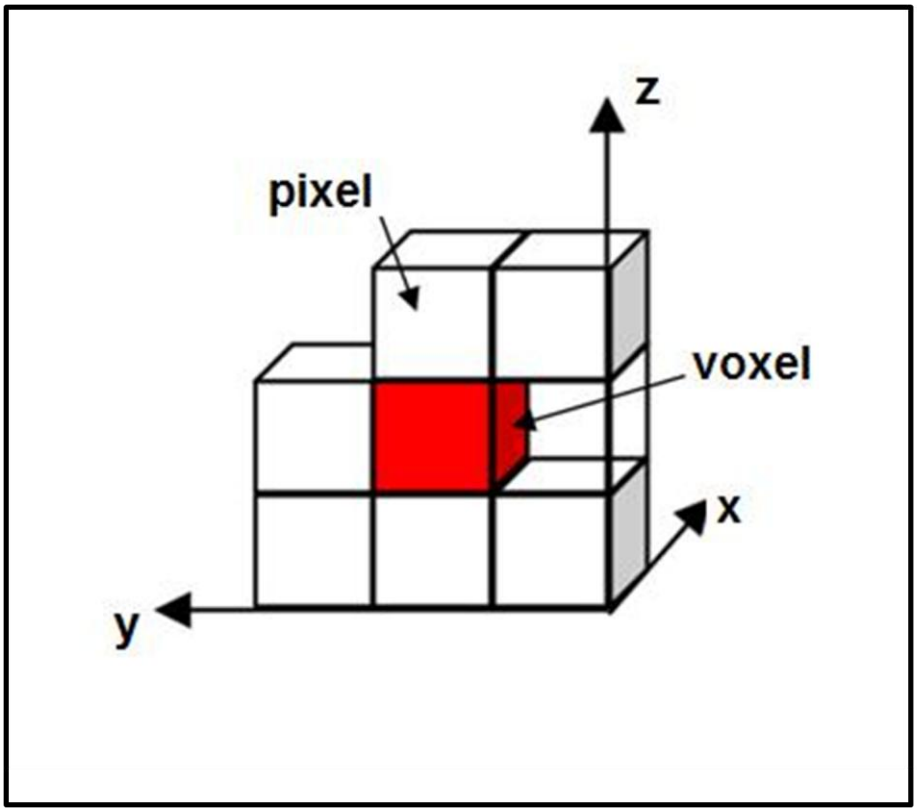



Figura 1.9. Comparação entre um PIXEL e um VOXEL.

### 1.3.3 - Aspectos básicos sobre a obtenção de uma tomografia com nêutrons.

O procedimento para a obtenção de uma tomografia com nêutrons [5, 44, 52] está esquematizado na figura 1.10 e pode ser descrito da seguinte maneira: o objeto a ser inspecionado é posicionado em uma mesa giratória e é irradiado no feixe de nêutrons; a intensidade transmitida pelo objeto sensibiliza um cintilador formando uma imagem bidimensional (2D) de sua estrutura interna. Para evitar exposição direta da câmera de vídeo, ou melhor, de seu sensor CCD à radiação, um espelho plano reflete a imagem gerada no cintilador em direção à câmera que está instalada a $90^0$ com relação ao feixe de radiação, e é então capturada. Devido a pouca intensidade da luz gerada pelo cintilador, o conjunto cintilador / espelho / câmera de vídeo é instalado no interior de uma caixa de alumínio vedada à luz ambiente. Ao término da captura, o objeto é girado uma fração de grau, e outra imagem é capturada. Após uma rotação completa de $360^0$,

o arquivo contendo todas as imagens bidimensionais é processado por um software para compor o arquivo das imagens reconstruídas, a “tomografia”.

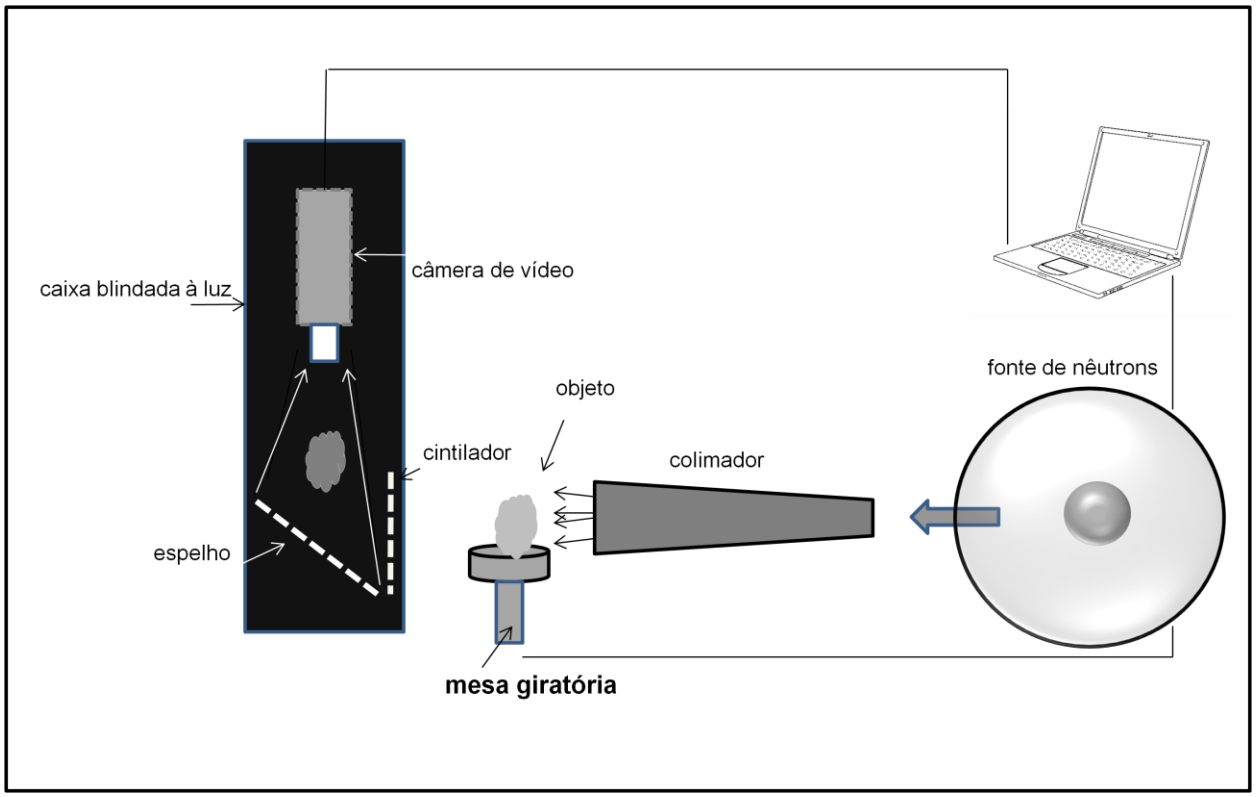



Figura 1.10. Diagrama esquemático de um equipamento atual usual para imageamento 3D com nêutrons.

Normalmente, um equipamento para tomografia com nêutrons é caracterizado mediante a quantificação de três parâmetros [5, 33]:

- Tempo de irradiação do objeto necessário para obter cada uma das imagens bidimensionais. Estas imagens devem ser obtidas em uma condição que possuam a maior faixa dinâmica possível, ou seja, que utilize a maioria dos tons de cinza no intervalo disponível, que se for de 8 bits são 256. Devido a fatores como as instabilidades, eletrônica do sistema de captura de imagens, e a de operação do reator, o tempo de irradiação não deve ser demasiadamente longo (máximo 1 ou 2 minutos por imagem), para que elas sejam capturadas sempre nas mesmas condições. 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.

- Resolução espacial é a distância mínima entre dois pontos de uma imagem de forma que eles possam ser distinguidos um do outro. Normalmente é avaliada em termos da resolução total (Ut), que é composta pela resolução geométrica (Ug) (item 1.3.2.2) e pela resolução intrínseca (Ui) do sistema de captura da imagem (cintilador, focalização da câmera, campo de visão, etc.). Um valor típico para a resolução espacial para um equipamento no estado da arte seria Ut ~ 50 – 200 $\mu$m [52].

- Sensibilidade para discernir espessuras. Para um material específico, este parâmetro é definido como a variação de espessura ($\Delta$x) do objeto, que é discernível por uma variação do nível de cinza ($\Delta$GL) na imagem.

# Capítulo 2 – Imageamento com nêutrons no IPEN-CNEN/SP

## 2.1 – Breve histórico

As atividades de imageamento com nêutrons no Centro do Reator de Pesquisas (CRPq) do IPEN-CNEN/SP iniciaram-se entre 1987 e 1988, quando foram utilizados os feixes dos canais de irradiação 03 e 10 do Reator Nuclear de Pesquisas IEA-R1, que nesta época operava a potência de 2 MW, para verificar a viabilidade de se obter radiografias com nêutrons. Devido aos bons resultados, em 1988 foi formado um grupo de trabalho para projetar e construir um equipamento versátil para imageamento, capaz de produzir imagens radiográficas por diversas técnicas que envolvem a transmissão de nêutrons, que ficou operacional em 1992 e foi instalado no canal 08 deste reator. Nesta época foram empregados conversores de Gadolínio, Disprósio e de Boro, combinados com filmes convencionais para raios-X e com polímeros para a obtenção das imagens. Entre 1998 e 2001 o equipamento foi otimizado e, foi instalado um sistema para imageamento em tempo-real. Nesta fase, foram utilizados novos conversores e foi implementado um sistema eletrônico para digitalização e processamento de imagens digitais, que permitiu um avanço significativo quanto a qualidade das imagens obtidas. Em 2005 o grupo desenvolveu técnicas de imageamento induzidas por nêutrons com a finalidade de inspecionar materiais finos com espessura da ordem de micra [25-29], [32, 34, 45]. A figura 2.1 mostra o aspecto da blindagem deste equipamento neste ano de 2010. Em 2009 a FAPESP aprovou um Projeto de Pesquisas (nº 09 50261 – 0) por meio do qual foi projetado e construído um equipamento para tomografia com nêutrons que foi instalado no interior desta mesma blindagem, e que se tornou operacional em 2010. A figura 2.2 mostra um diagrama das suas partes principais.

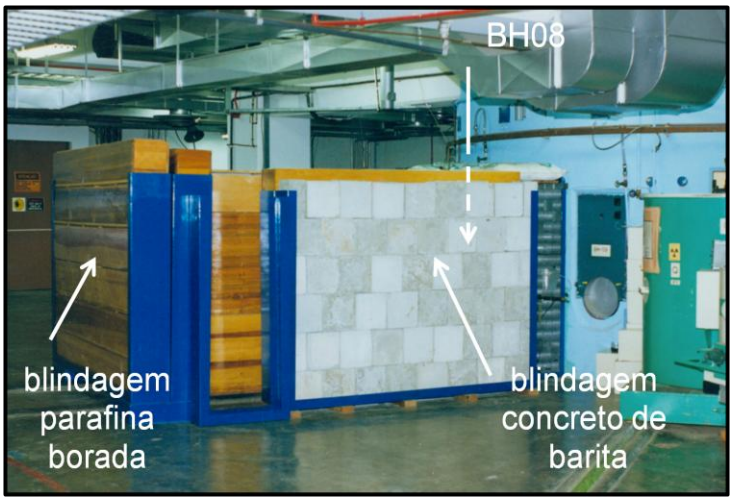



Figura 2.1. Blindagem do equipamento para imageamento com nêutrons instalado no BH08 do reator nuclear de pesquisas IEA-R1 em 2010 [5].

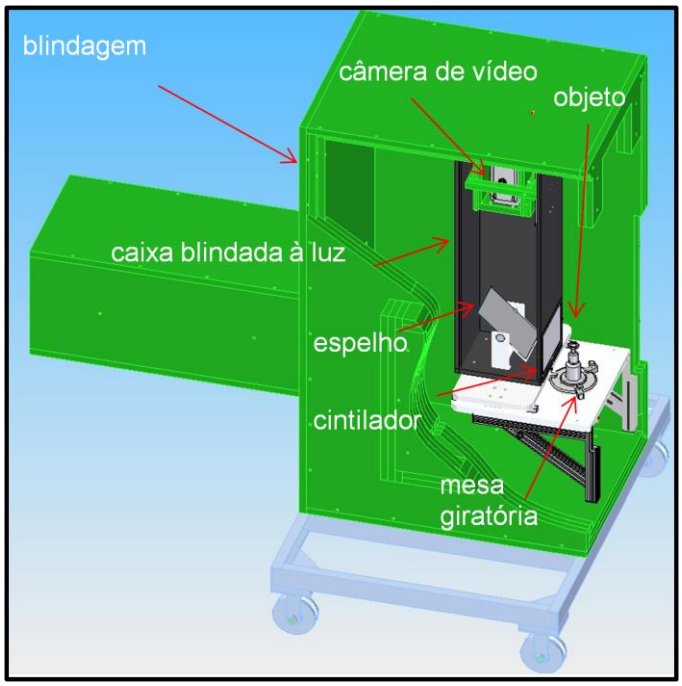



Figura 2.2. Diagrama esquemático do equipamento para tomografia com nêutrons do IPEN-CNEN/SP em 2010.

Após aproximadamente seis meses de utilização do equipamento para tomografia, percebemos que o sensor CCD da câmera de vídeo, empregada para a captura de imagens, estava muito danificado. Estes danos, que são induzidos por radiações principalmente a neutrônica, são em sua maioria permanentes e aparecem na imagem capturada como pontos brancos, mostrados na figura 2.3. A quantidade dos danos

estava anormalmente elevada mesmo porque, esta é uma câmera comumente utilizada para esta finalidade e no presente equipamento estava muito bem blindada contra radiação. Além disto, a câmera que já vinha sendo utilizada há alguns anos neste mesmo canal de irradiação, portanto em um ambiente de radiação similar, acumulou menos danos. Apesar de estes serem facilmente eliminados da imagem, mediante o uso de ferramentas de processamento ou diminuindo a temperatura do CCD, estes danos em sua maioria são permanentes. Isto significa que o uso contínuo e prolongado desta câmera nestas condições, aumentará continuamente a sua quantidade, inviabilizando o seu uso [33], [53-55]. Desta forma, as irradiações foram interrompidas e de imediato iniciado um estudo para minimizar a quantidade de radiação que atinge a câmera de vídeo. De maneira a reconstruir o equipamento e implementar as diversas melhorias, foi necessária a transferência do equipamento para outro canal de irradiação deste mesmo reator. O canal selecionado foi o BH14. Este canal é radial com relação ao núcleo do reator e a área ao seu redor permitia que estas melhorias pudessem ser implantadas. A figura 2.4 mostra a disposição de todos os canais ao redor do núcleo.

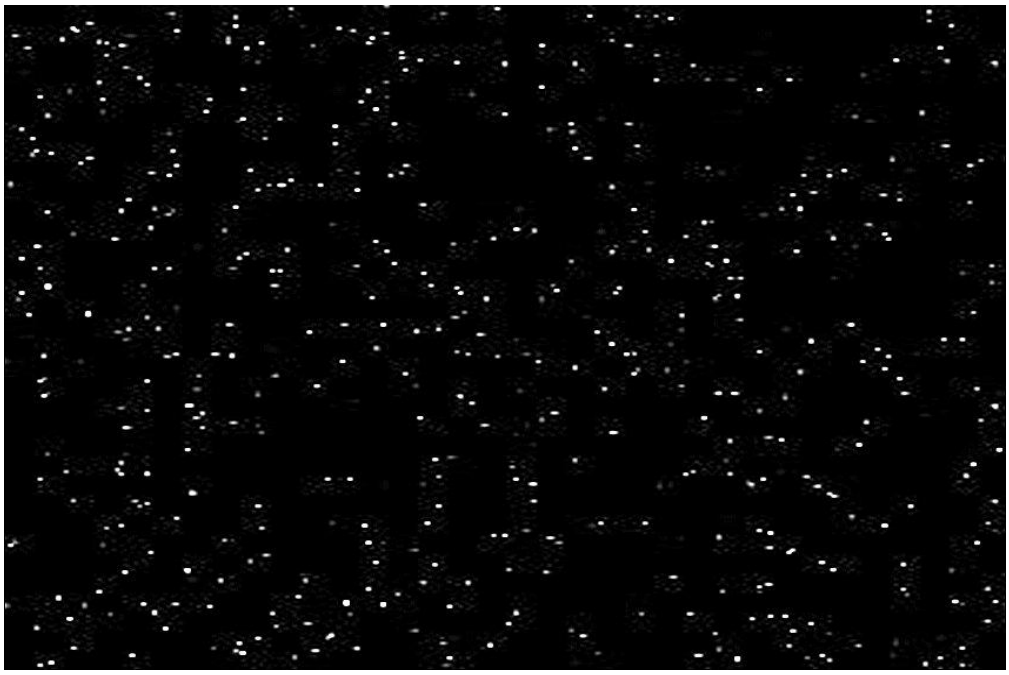


Figura 2.3. Danos (pontos brancos) causados pela radiação no sensor CCD.

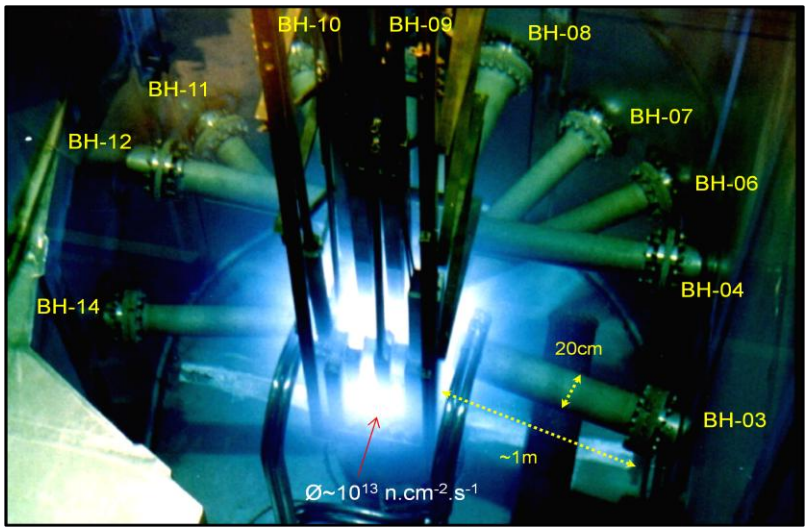



Figura 2.4. Canais para irradiação no reator nuclear de pesquisas IEA-R1.

## 2.2 - Instalação do equipamento no BH14

**2.2.1 - Desobstrução da área próxima ao BH14.** Consistiu da remoção do equipamento que estava instalado no BH12 (arranjo experimental para medidas de seção de choque de reações de fotofissão ($\gamma$,n) e ($\gamma$,f) [56]), localizado ao lado do BH14, como mostrado na figura 2.5(a). Esta remoção, figura 2.5(b), incluiu a retirada de módulos eletrônicos, detectores de radiação e de blindagens confeccionadas em chumbo, concreto de barita, parafina e polietileno, num total de aproximadamente seis toneladas de material.

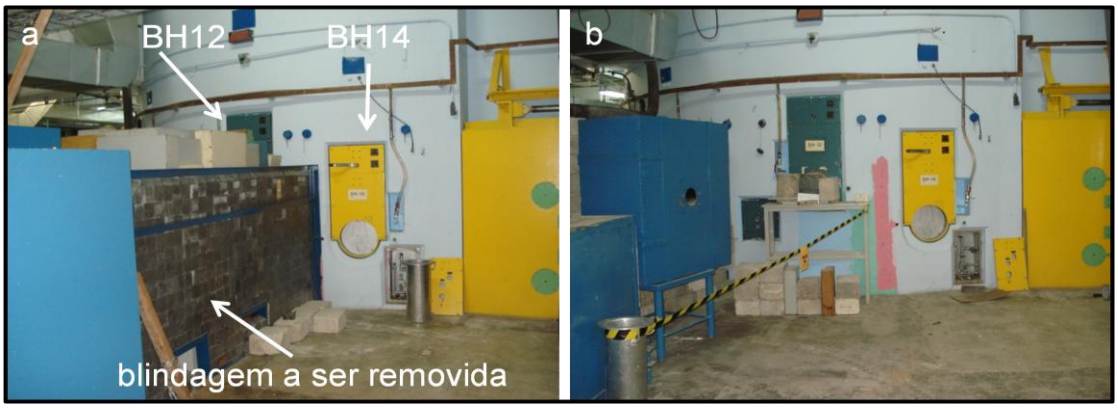



Figura 2.5. (a) Aspecto da blindagem que estava instalada no BH12; (b) Aspecto do local após a remoção da blindagem.

**2.2.2 - Abertura do BH14.** A abertura de um canal de irradiação consta basicamente da retirada de um “plugue” de concreto inserido em seu interior, este com dimensões

de ~ 6” de diâmetro externo e comprimento de 1,5 m. A finalidade da abertura é a medida das dimensões internas do canal de modo a permitir um projeto preciso tanto do tubo colimador como do colimador de nêutrons que serão instalados em seu interior. A dimensões medidas foram 6” de diâmetro interno e comprimento de ~ 2,5 m.

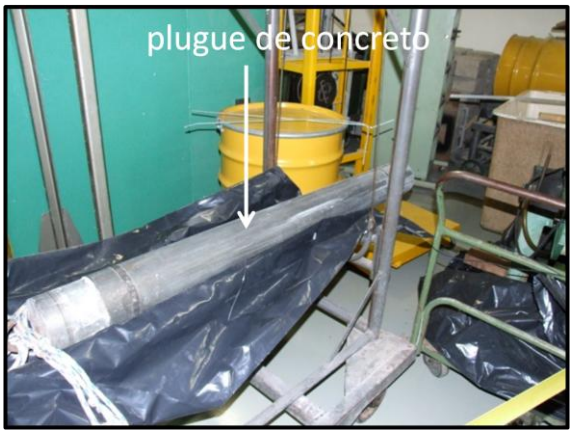



Figura 2.6. Plug de concreto retirado do BH14.

### 2.2.3 Projeto e construção dos dispositivos do equipamento

**2.2.3.1 - Tubo colimador.** A sua função é conter em seu interior o filtro contra radiação gama e o colimador de nêutrons. Como mostrado na figura 2.7,consta de dois tubos concêntricos de alumínio com espessura de parede 1/8”; o primeiro com diâmetro de 5,5” e comprimento 175 cm que é soldado ao segundo com diâmetro 4,5” e comprimento 116 cm (vide imagens do projeto no anexo A).

Figura 2.7. Tubo colimador.

**2.2.3.2 - Filtros contra radiação gama.** Foram confeccionados três filtros em Bismuto para minimizar a dose da radiação gama no local de irradiação das amostras. Como já mencionado, estes são inseridos no interior do tubo colimador e interceptam os feixes de radiação (nêutrons + gama) que vem do núcleo do reator. De acordo com experiências anteriores no BH08, a espessura necessária para atenuar a radiação gama a níveis desejáveis, e ao mesmo tempo não atenuar demasiadamente a intensidade dos nêutrons, deve ser de aproximadamente 25 cm [25-27]. De modo a facilitar a sua manipulação, o filtro foi dividido em três menores, como mostrado na figura 2.8; o primeiro, com diâmetro de 13 cm e comprimento 5 cm e os outros dois com o mesmo diâmetro e comprimento de 10 cm cada um.

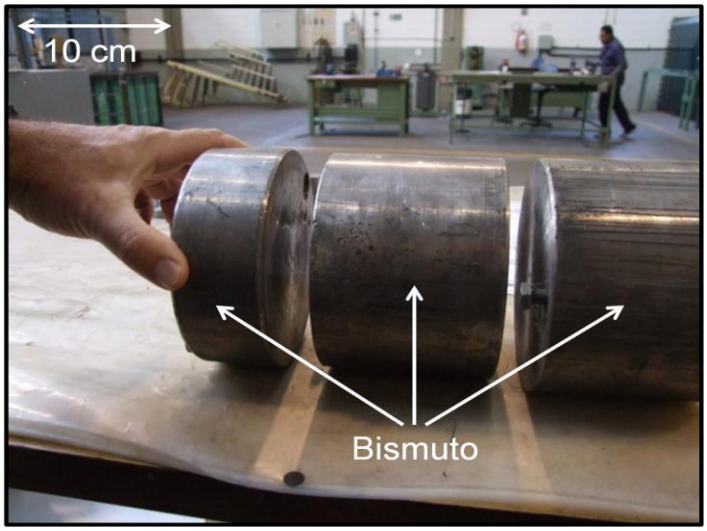



Figura 2.8. Filtros confeccionados em Bismuto e sua disposição no interior do tubo colimador.

**2.2.3.3 - Colimador de nêutrons.** Consta de dois tubos de alumínio concêntricos. O externo com diâmetro de 4” e o interno com 3,5”, ambos com espessura de parede de 1/8” e comprimento de 132 cm. Na figura 2.9(a) os tubos estão separados, e na figura 2.9(b) estão montados. Entre eles é adicionada uma blindagem contra nêutrons à base de parafina borada, conforme mencionado em 1.3.2.2. O tubo interno possui duas flanges confeccionadas em alumínio de espessura 1/8”, que são soldadas, uma na abertura de entrada e outra na de saída do feixe de nêutrons. Na condição de não irradiação, este tubo permanece cheio de água, atuando como um bloqueador ao feixe de nêutrons oriundo do núcleo do reator, que mantém o nível de dose neutrônica

adequado para a manipulação de amostras ou para quaisquer manutenções no equipamento. Na condição de irradiação, a água é retirada por meio de um sistema de ar comprimido, que é conduzido ao interior do tubo, por meio de outros dois tubos com diâmetro externo de 0,5” e comprimento de 80 cm, soldados na flange da abertura de saída do feixe de nêutrons, como mostrado na figura 2.9(a). O feixe de nêutrons emerge do colimador, com um diâmetro de 3,5” e com a forma geométrica de um cone que diverge ao longo de sua trajetória (vide imagens do projeto no anexo B).

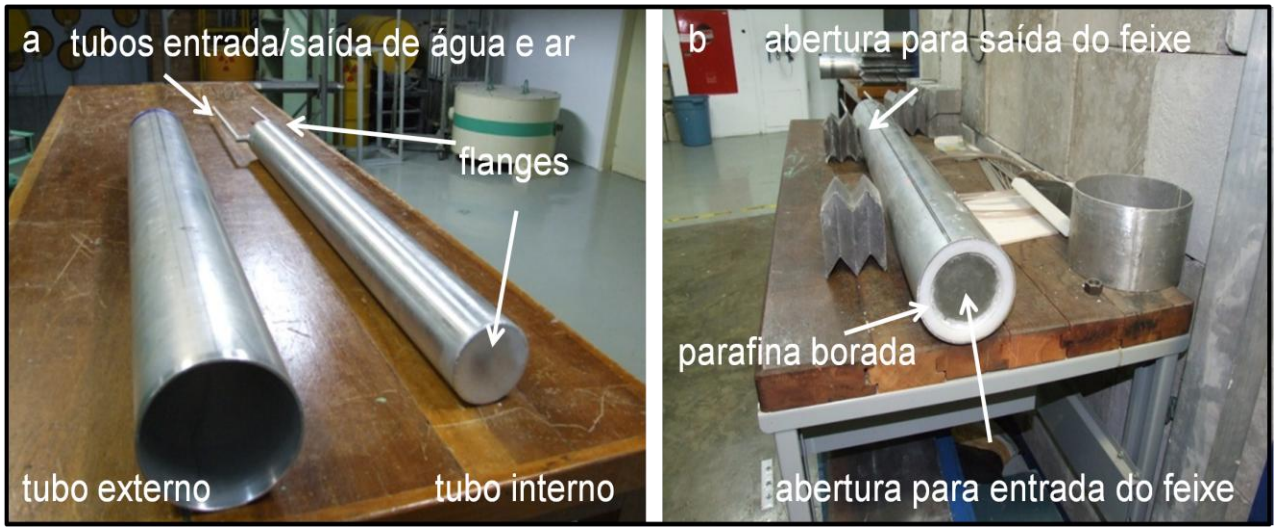



Figura 2.9. (a) Tubos que compõe o colimador de nêutrons; (b) Colimador montado.

**2.2.3.4 – Diafragmas.** Os diafragmas são blindagens cilíndricas que permitem a passagem livre do feixe de nêutrons pelo seu orifício central, e cujas paredes internas absorvem aqueles que são espalhados pelo ar ao longo de sua trajetória, minimizando a dose de nêutrons espalhados tanto ao redor do equipamento quanto na posição da câmera de vídeo. Para o presente, foram confeccionados três diafragmas cada um com comprimento de 20 cm, e com diâmetros internos crescentes de modo a acompanharem a divergência angular do feixe de nêutrons que emerge do colimador: o primeiro com diâmetro interno de 10 cm é posicionado junto à abertura de saída do colimador; o segundo com 11 cm é posicionado junto ao anterior e o terceiro com 12 cm é posicionado próximo ao objeto a ser inspecionado. A figura 2.10 mostra os três diafragmas que foram confeccionados, cada um com oito placas de polietileno borado (2,5%), intercaladas com lâminas de Cádmio e Chumbo.

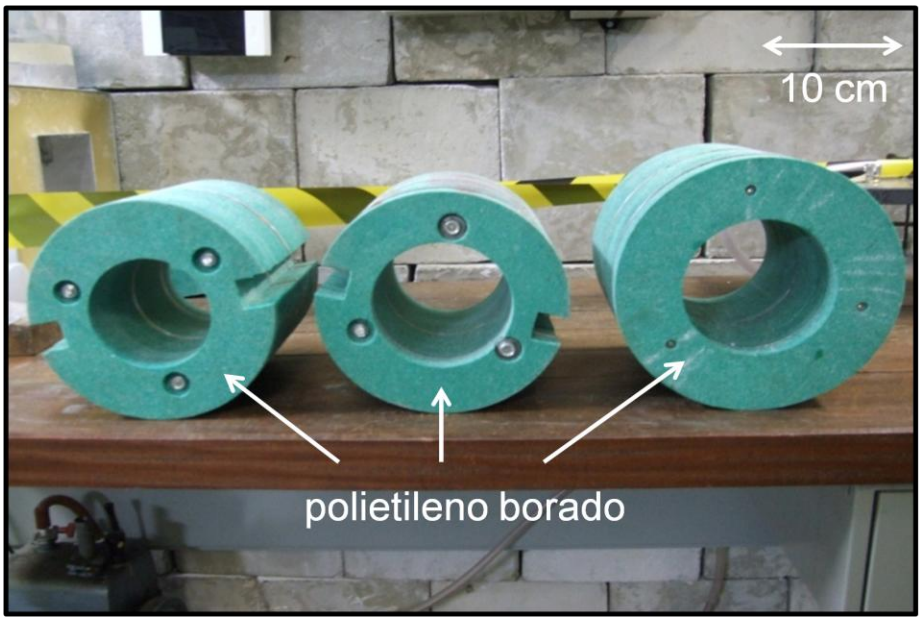



Figura 2.10. Diafragmas para o feixe de nêutrons.

**2.2.3.5 – Bloqueador do feixe de radiação gama.** Consta de um bloco sólido de Chumbo com dimensões de 40 cm x 40 cm e 25 cm de espessura, localizado próximo ao diafragma que está na abertura de saída do colimador de nêutrons. Na condição de não irradiação o bloco intercepta o feixe de radiação oriundo do núcleo do reator, o que mantém o nível de dose gama adequado para a manipulação de amostras ou para quaisquer manutenções no equipamento. Na condição de irradiação uma talha elétrica mantém o bloco suspenso de modo a dar passagem livre ao feixe, vide figura 2.11.

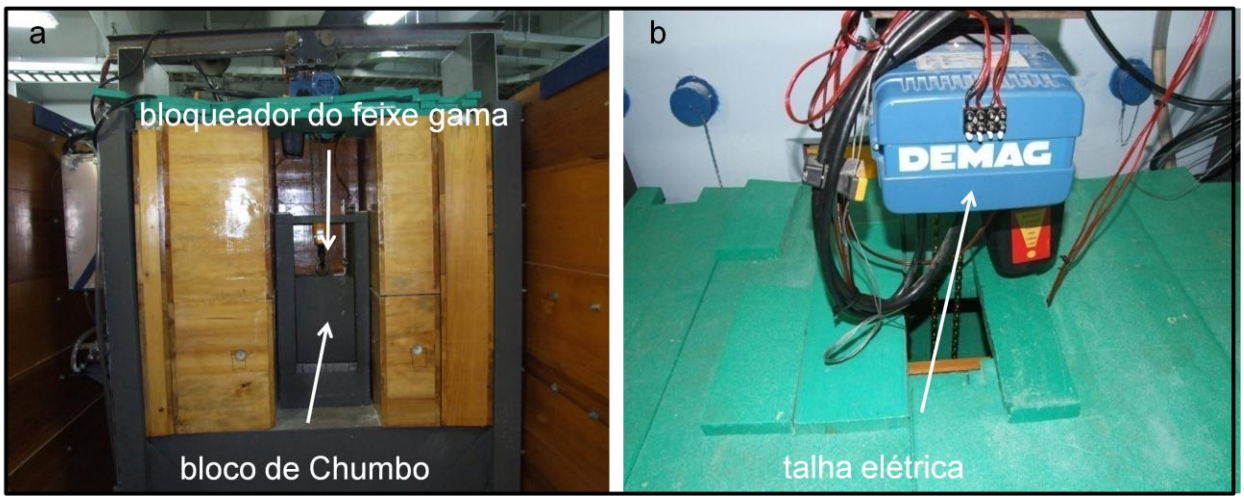



Figura 2.11. Bloqueador para o feixe de radiação gama: (a) Vista posterior; (b) Vista superior destacando a talha.

**2.2.3.6 – Posicionamento da câmera de vídeo.** No equipamento anterior, do BH08, a câmera de vídeo estava instalada no interior da blindagem, como mostrado na figura 2.12(a). No equipamento atual do BH14, a blindagem foi cortada na direção horizontal, de modo que a parte da caixa vedada à luz, que contém a câmera de vídeo, fique fora dela. Isto porque a quantidade de radiação espalhada (nêutrons e gama) na parte de fora é menor do que na de dentro, resultando em uma maior proteção ao sensor CCD da câmera de vídeo. O posicionamento atual da câmera está mostrado na figura 2.12(b).

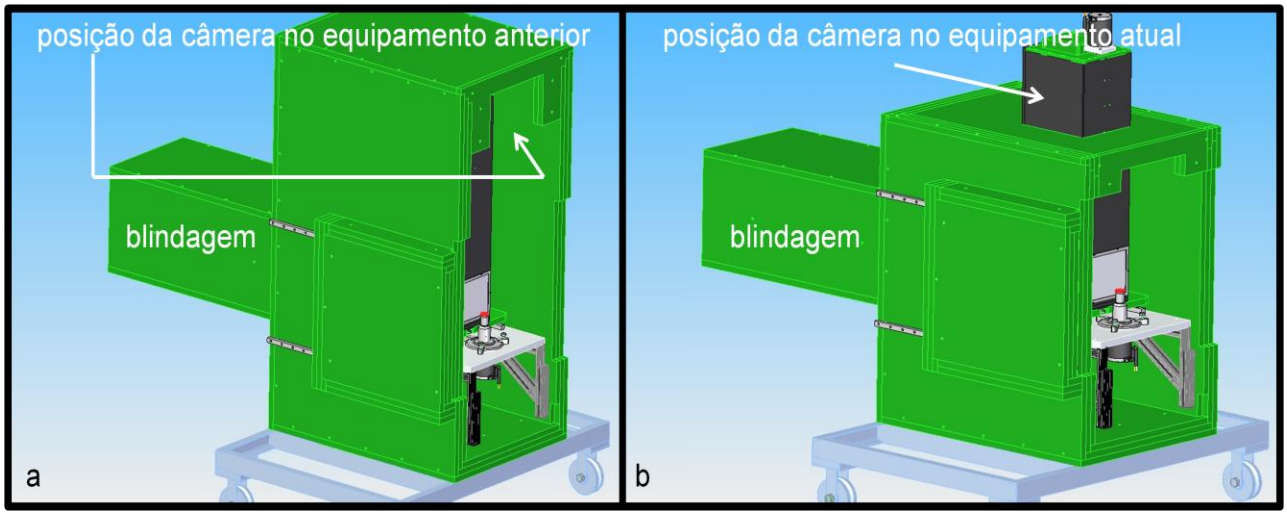



Figura 2.12. Posicionamento da câmera de vídeo: (a) Equipamento anterior; (b) Equipamento atual.

**2.2.3.7 – Proteção adicional à câmera de vídeo.** Consiste de duas blindagens contra nêutrons, pois esta é a principal radiação responsável pelos danos no CCD da câmera de vídeo [33, 53] ambas localizadas próximas à lente da câmera atrás da qual o CCD está instalado; a primeira com 15 cm de espessura, confeccionada em polietileno borado (2,5%), e com orifício central passante de modo a dar passagem livre ao feixe de luz refletido pelo espelho, com um diâmetro variável que diminui de 7,5 cm a 5 cm, à medida que se aproxima da lente da câmera; a segunda é um filtro de vidro borossilicato que é transparente à luz refletida pelo espelho, com 1 cm de espessura e diâmetro ~ 5 cm, encaixado no orifício de 5 cm da blindagem anterior, como mostrado na figura 2.13.

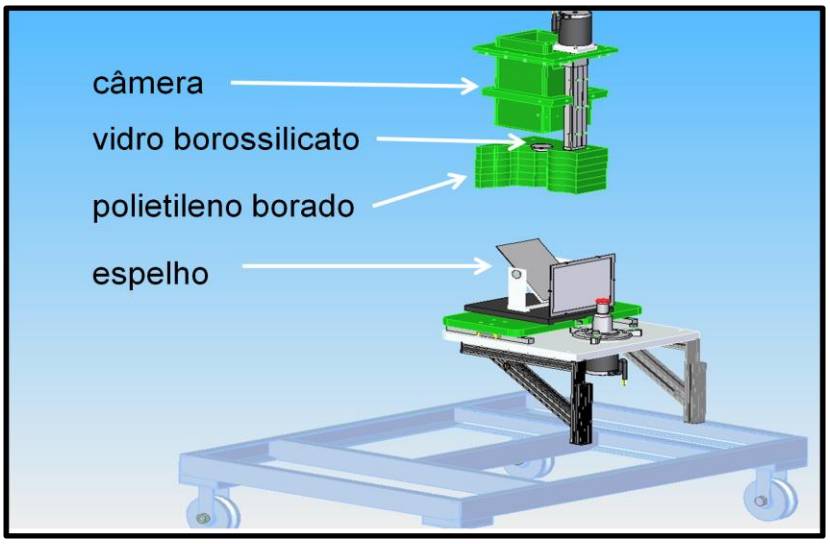



Figura 2.13. Blindagens adicionais situadas próximas a lente da câmera de vídeo.

**2.2.4 - Alinhamento à LASER do caminho do feixe de nêutrons e instalação dos trilhos.** Para este alinhamento foi utilizado um tubo de alumínio com diâmetro 5,5” e comprimento ~1,5 m, que foi inserido no interior do BH14, como mostrado nas figuras 2.14(a) e (b). Em uma de suas extremidades foi fixada uma peça em polietileno com um orifício passante e centralizado com 3 mm de diâmetro e, na extremidade oposta outra peça, centralizada à primeira, também em polietileno com um alvo em seu centro. O bastão Laser é fixado em um tripé e é acionado. Quando a luz Laser passa pelo orifício de 3 mm e atinge o alvo, é feita uma marca no chão do reator, na posição indicada por um prumo fixado ao tripé. Foram feitas 6 marcações em posições diferentes, as quais serviram de guias para a instalação dos trilhos do equipamento, vide figura 2.14 (c), sobre os quais as blindagens podem ser movimentadas.

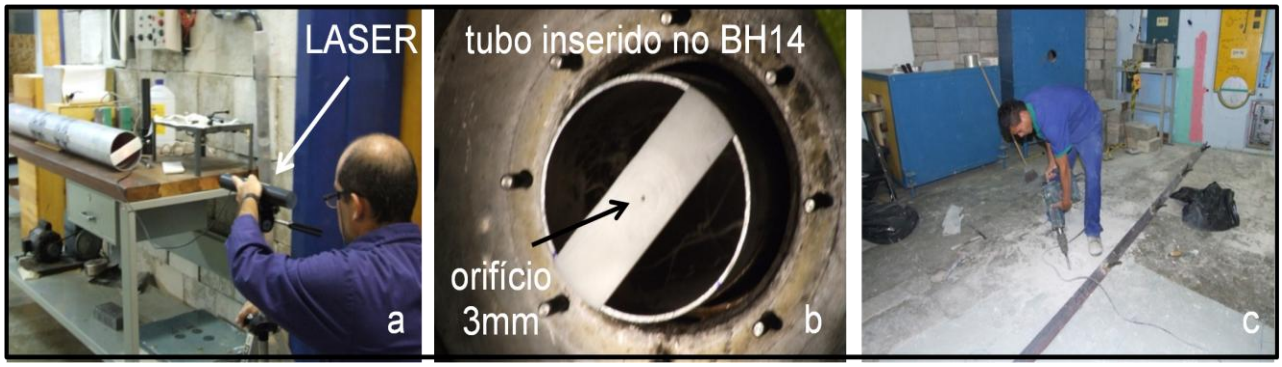



Figura 2.14. (a) Tubo de alumínio e teste do LASER; (b) Tubo de alumínio inserido no BH14; (c) Instalação dos trilhos no piso do reator.

**2.2.5 - Montagem do tubo colimador, filtros, colimador e da blindagem**. Nas figuras 2.15(a) e (b) estão mostrados os filtros, e o colimador de nêutrons já instalados no interior do tubo colimador, e na figura 2.16 a blindagem principal do equipamento posicionada sobre os trilhos, no BH14.

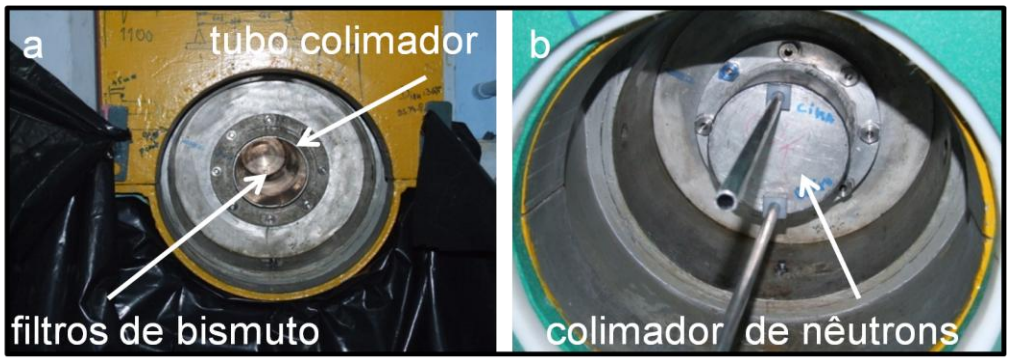



Figura 2.15. (a) Tubo colimador e filtros de bismuto; (b) Colimador de nêutrons, já instalado no BH14.

Figura 2.16. Blindagem principal do equipamento instalada no BH14.

O último dispositivo instalado no equipamento foi a blindagem denominada “beam catcher” [36], mostrado na figura 2.17, que tem a função de conter em seu interior os feixes de nêutrons e de radiação gama, durante as irradiações. Consta de uma blindagem maciça confeccionada em polietileno borado, parafina borada, chumbo e cádmio com uma massa total de ~ 6 toneladas, que está montada sobre uma plataforma móvel e esta sobre os trilhos mencionados anteriormente.

A figura 2.18 mostra o aspecto do equipamento completo instalado no BH14.

Figura 2.17. Montagem do “beam-catcher”.

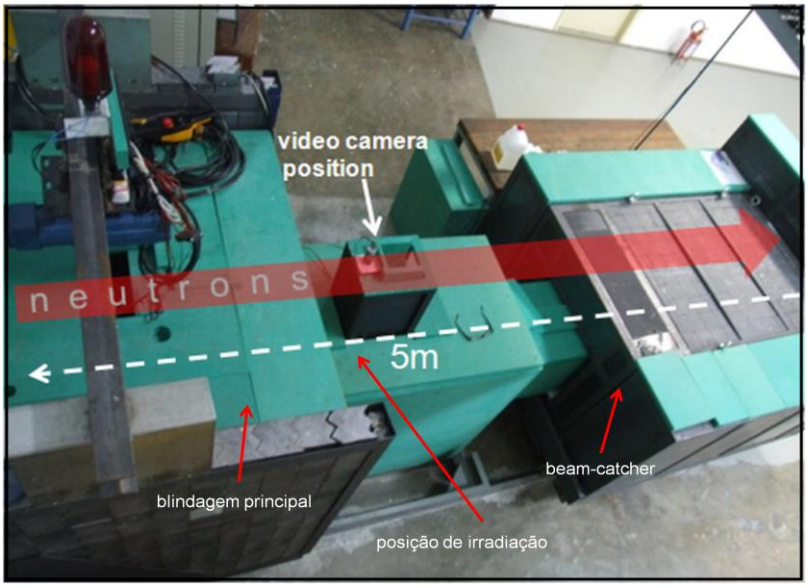



Figura 2.18. Aspecto do equipamento instalado no BH14.

### 2.2.6 – Descrição dos componentes do equipamento

**- Mesa giratória** (figura 2.19). Consiste de um corpo confeccionado em alumínio, de um motor de passos e um mandril no qual o porta-amostras, onde o objeto a ser investigado, é posicionado. Permite uma rotação completa de $360^0$ do objeto, com passos de $0{,}9^0$ (vide imagem do projeto no anexo C).

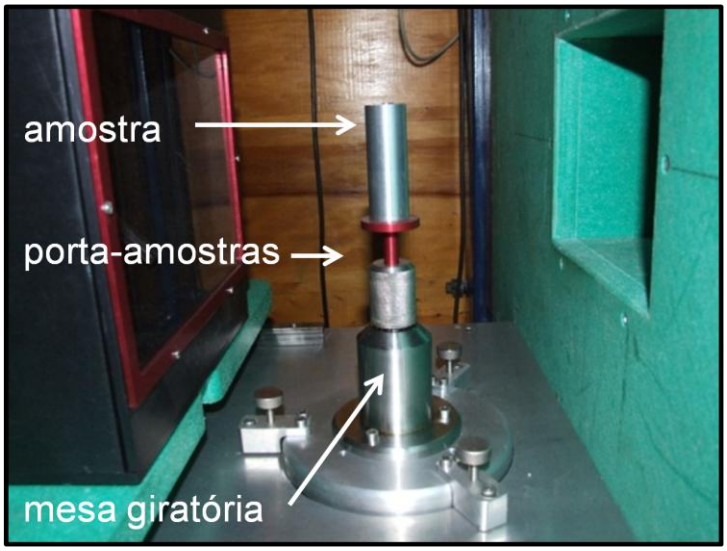



Figura 2.19. Detalhes do conjunto, mesa giratória e porta-amostras.

**- Cintilador** (figura 2.20). Tela composta pela mistura de duas substâncias, "Fluoreto de Lítio - 6 e Sulfeto de Zinco ativado com Prata ($^6$LiF – ZnS : Ag), com uma espessura de 450 μm, depositada em uma base de alumínio com 18 x 24 cm e 2 mm de espessura. Foi fabricado pela empresa Nuclear Enterprise e é comercialmente conhecido como NE-426.

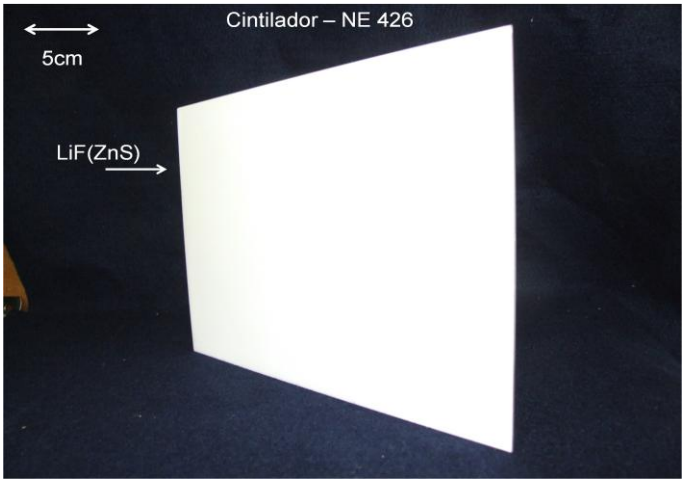



Figura 2.20. Cintilador NE-426 para nêutrons.

**- Espelho** (figura 2.21). Consiste de uma base de vidro comum com 18 x 24 cm e 3 mm de espessura, coberta com uma camada refletora de alumínio evaporado. Na figura é também mostrado o suporte no qual o espelho é apoiado, e que o posiciona a $45^0$ com relação ao feixe de nêutrons. Foi confeccionado nos laboratórios do Paul Scherrer Institute – PSI (Suíça) e possui elevada qualidade tanto no que se refere à não deformação da imagem, quanto à um elevado poder de reflexão.

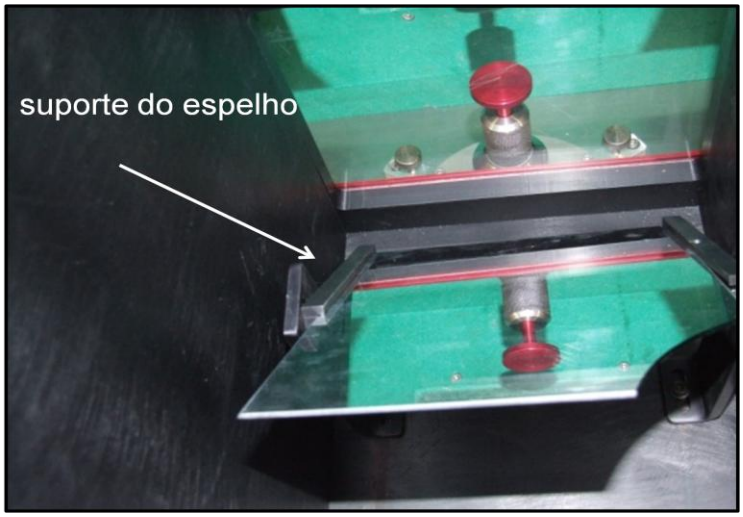



Figura 2.21. Detalhe do espelho e seu suporte.

**- Câmera de vídeo digital** (figura 2.22). Marca ANDOR, modelo ikon-M, 16 bits, com sensor CCD (1024 x 1024 pixels) e lente Nikon de 50 mm, f/1.2. Seu CCD é refrigerado por um dispositivo Peltier, podendo atingir – $90^0$ C e, a seleção da temperatura bem como a sua estabilidade são controlados pelo próprio software da câmera.

Figura 2.22. Câmera de vídeo empregada para a captura das imagens.

**- Caixa blindada à luz** (figura 2.23). Por causa da pouca intensidade da luz gerada pelo cintilador, o próprio cintilador, o espelho e a câmera de vídeo são instalados no interior desta caixa que é vedada à luz ambiente. Possui dimensões de 30 cm x 30 cm x 1,20 m e é confeccionada em alumínio, anodizado em preto de modo a minimizar o reflexo tanto da luz gerada pelo cintilador, quanto do ambiente que por ventura penetre em seu interior.

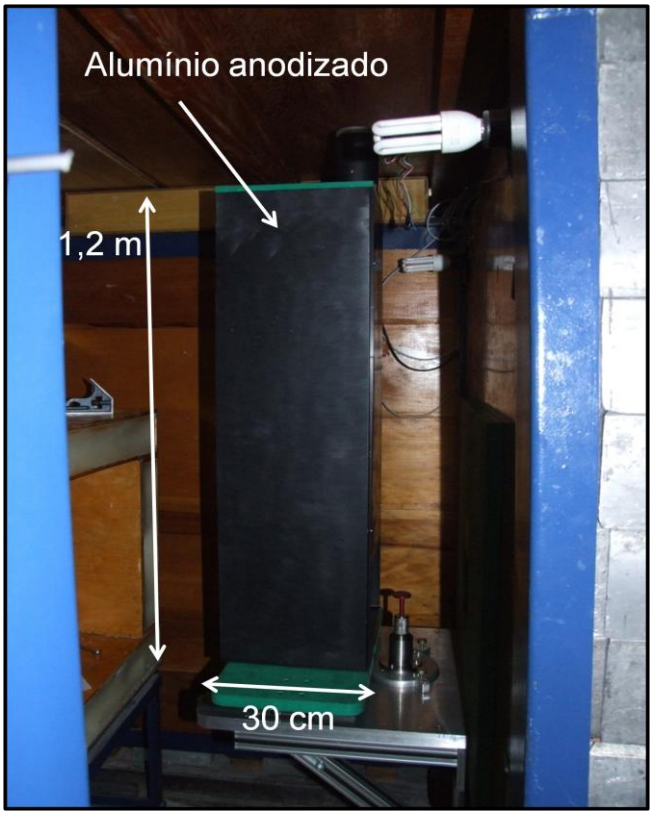



Figura 2.23. Caixa blindada à luz no interior da qual o conjunto espelho – cintilador e câmera são instalados.

### 2.3 – Obtenção de uma tomografia neste equipamento

Uma tomografia é obtida da seguinte forma: o objeto a ser inspecionado é posicionado no porta-amostras da mesa giratória e é irradiado no feixe de nêutrons. A intensidade transmitida pelo objeto passa primeiramente pela base de alumínio do cintilador sensibilizando-o e formando uma imagem 2D da estrutura interna do objeto. O espelho plano reflete a imagem gerada no cintilador, para a câmera instalada a $90^0$ com relação ao feixe de radiação, e é então capturada. Ao término da captura, o objeto é girado uma fração de grau $0{,}9^0$, e outra imagem é capturada. Após uma rotação

completa de $360^0$, o arquivo contendo todas as imagens, no presente 400, é processado pelo software Octopus – v.8.6 [49] para compor o que se chama de arquivo das imagens reconstruídas, que são as tomografias. Este arquivo é o dado de entrada para que outro software, o VGStudio – Max - v.2.2 [48], permita a visualização tridimensional (filme ou imagem), da estrutura interna do referido objeto. Certamente, ambos os softwares possuem diversas ferramentas para o processamento de imagens, tais como o ajuste de histograma, filtros e outras operações matemáticas entre imagens. Além disto, é muito importante mencionar que a partir dos parâmetros do equipamento de imageamento que são parte dos dados de entrada para os softwares, é possível quantificar a localização espacial precisa, bem como categorizar e dimensionar quaisquer partes de interesse de sua estrutura, como será demonstrado nas imagens apresentadas no Capítulo 3.

## 2.4 – Caracterização do equipamento

O presente equipamento foi caracterizado mediante a quantificação de três parâmetros [5, 33]:

**- <u>Tempo de irradiação.</u>** É o tempo necessário de irradiação de um objeto para obter cada uma das 400 imagens utilizadas na tomografia. Este tempo deve ser tal que permita a utilização da maior faixa dinâmica possível disponível, desde que haja linearidade entre o nível de cinza e o tempo de irradiação. Isto porque quanto maior a faixa dinâmica maior os detalhes exibidos na imagem obtida (Capítulo 1), e a linearidade é uma exigência do Software Octopus, para que a reconstrução das imagens seja perfeita [49]. No presente trabalho, este tempo foi obtido por meio da curva que relaciona o nível de cinza (Gray Level - GL) na imagem, em função do tempo de irradiação (T). Para esta finalidade, foram capturadas diversas imagens do feixe direto (sem objeto), no intervalo de $0,2 < T < 2$ s, e foram determinados os níveis de cinza das imagens, correspondentes à cada um dos tempos de irradiação. Os resultados obtidos estão mostrados na figura 2.24. Cada GL foi determinado mediante o uso de um software, Image - pro plus - v.7.0 [41], que calcula a média aritmética dos níveis de aproximadamente 10.000 pixels individuais que ocupam a área mostrada na mesma figura 2.24. O desvio padrão dos valores variou de 0,1% a 1%. Foi traçada uma

linha, por guia dos olhos, entre os pontos resultando um comportamento linear até T = 1,4 s. Para garantir as condições mencionadas acima (linearidade e utilização de maior faixa dinâmica possível), o valor adotado foi de T = 1 s, que é 80% do tempo de irradiação máximo que limita a região linear [49]. Durante a captura o sensor CCD da câmera de vídeo foi mantido a uma temperatura constante de -20$^0$C, e o reator estava operacional à potência de 4,5 MW. A baixa temperatura do CCD é necessária para minimizar o seu ruído eletrônico, pois conforme o tempo de irradiação aumenta, o ruído intrínseco da câmera aumenta concomitantemente, prejudicando a qualidade da imagem capturada.

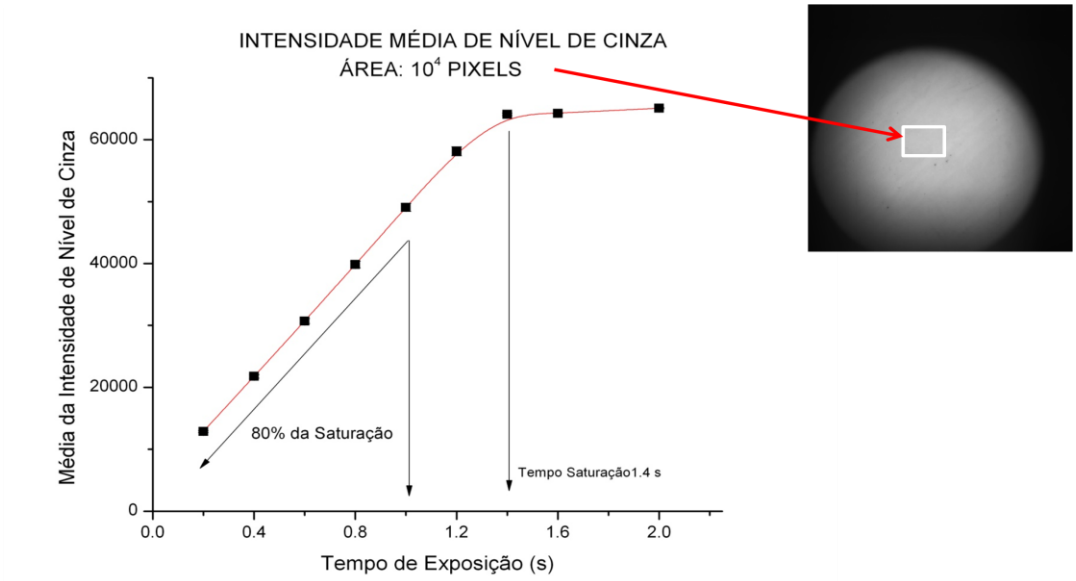



Figura 2.24. Comportamento do nível de cinza em função do tempo de irradiação.

**- Resolução espacial.** É a distância mínima entre dois pontos de uma imagem de forma que eles possam ser distinguidos um do outro. Como já mencionado anteriormente, normalmente a resolução é avaliada em termos da resolução total (Ut), que é composta pela resolução geométrica (Ug) oriunda da divergência angular do feixe de nêutrons e responsável pela penumbra na imagem (vide figura 1.6), e pela resolução intrínseca (Ui) do sistema de captura da imagem (cintilador, focalização da câmera, campo de visão, etc.) [57, 58]. No presente avaliamos somente Ui, que é a melhor resolução possível que o equipamento pode prover. Isto porque este parâmetro é fixo para o equipamento enquanto que Ug depende de cada objeto em estudo, ou

seja, de sua espessura, forma geométrica, que limitam a distância que o separa do cintilador. Esta contribuição pode ser avaliada por meio da expressão 1.5 do item 1.3.2.2.

Para a avaliação de Ui, foi seguido o seguinte procedimento:

- determinação do melhor foco para a câmera de vídeo. Isto foi feito mediante o ajuste manual de sua lente, de modo que a imagem dos orifícios, com 5 mm de diâmetro, do objeto padrão manufaturado em Cádmio, com dimensões 10 cm x 10 cm x 1 mm, mostrado na figura 2.25, e irradiado em firme contato com a base do cintilador, estivessem muito bem definidos. Para esta determinação, este objeto padrão foi irradiado durante T = 1s. Como no item anterior, durante a captura o sensor CCD da câmera de vídeo foi mantido à mesma temperatura constante de -20$^0$C, e o reator estava operando a 4,5 MW.

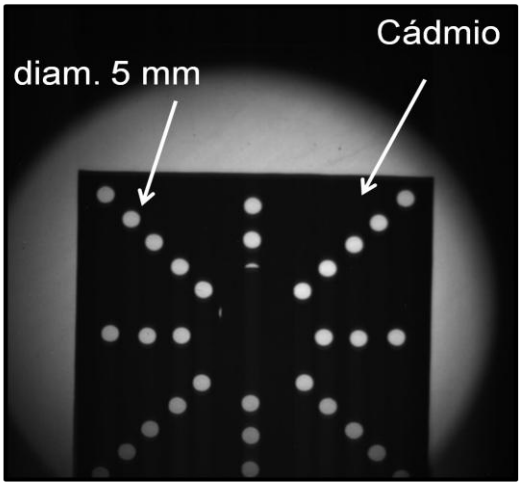



Figura 2.25. Imagem do objeto padrão utilizado para otimização do foco da lente.

- mantendo o melhor foco da lente, uma lâmina de Gadolínio com dimensões de 2 cm x 1 cm x 127 $\mu$m, foi também irradiada em firme contato com a base do cintilador e durante T = 1s. Como antes, a imagem foi capturada com o sensor CCD à -20$^0$C, e o reator a 4,5 MW. Após a captura, 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), (vide figura 2.26), mediante o uso do software Image – pro plus [41].

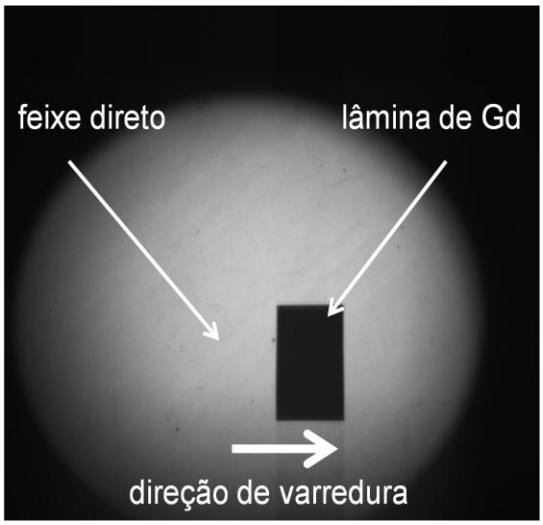



Figura 2.26. Imagem de lâmina de Gadolínio para obtenção da distribuição dos níveis de cinza.

- foram obtidas distribuições de níveis de cinza em 6 posições distintas da imagem da lâmina de Gadolínio, mostradas na figura 2.27.

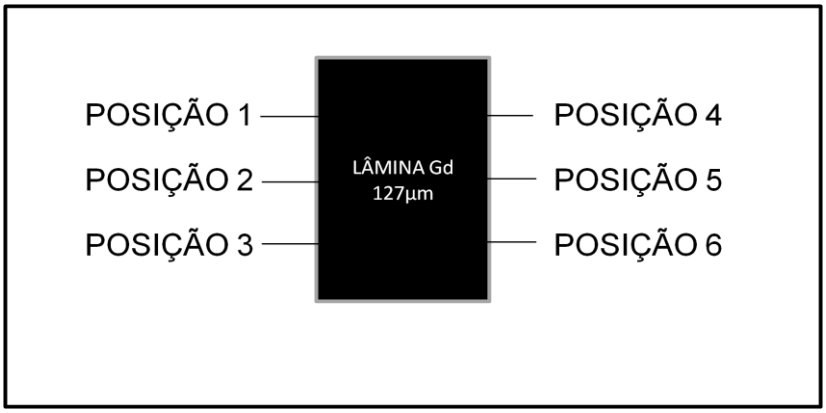



Figura 2.27. Posições na lâmina de Gadolínio em que as varreduras foram realizadas.

- ajuste da função ESF (2.1) (Edge Spread Function) às distribuições de níveis de cinza obtidas, e determinação dos respectivos valores de Ui por (2.2) [58, 59].

$$ESF = p1 + p2.\arctan\big(p3(x - p4)\big) \tag{2.1}$$

sendo:

$p_1$, $p_2$, $p_3$, $p_4$ - parâmetros livres no ajuste

“x” - coordenada de varredura

$$\mathrm{Ui} = 2/p3 \tag{2.2}$$

A tabela 2.1 mostra os resultados obtidos, e na figura 2.28 está o ajuste para o qual foi obtido o melhor valor de Ui = 205 ± 24 μm. As diferenças entre os valores obtidos para a resolução podem ser explicadas levando em conta as diferenças de proximidade de contato entre a lâmina de Gadolínio e a base do cintilador, bem como alguma irregularidade na borda da lâmina, induzida durante o seu corte.

| Posição da varredura | 1 | 2 | **3** | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Valor de Ui (μm) | 256±29 | 248±24 | **205±24** | 293±23 | 299±24 | 326±23 |

Tabela 2.1. Valores obtidos para a resolução espacial intrínseca do equipamento.

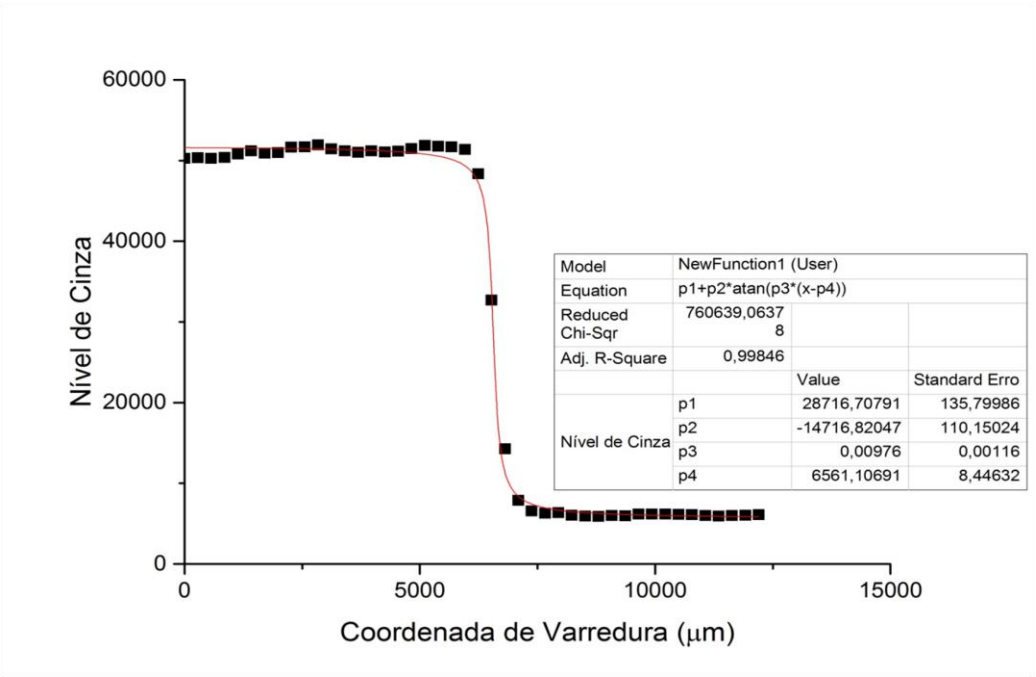



Figura 2.28. Distribuição dos níveis de cinza "GL" em função da coordenada de varredura para o melhor valor obtido para a resolução intrínseca.

**- Sensibilidade para discernir espessuras** [26, 33, 60]. Para um material específico, é definida como a variação de espessura (Δx) do objeto, que é discernível por uma variação de nível de cinza (ΔGL) na imagem, e é determinada por meio da curva que relaciona "GL" como função da espessura "x" do objeto irradiado. Os objetos padrão utilizados para este estudo foram cunhas com degraus confeccionadas em Lucite® e

em Ferro, com espessuras variando de 2 mm a 12 mm em intervalos de 2 mm. Estes materiais foram selecionados, pois o primeiro por conter elevada concentração de hidrogênio, representa, de modo aproximado, os materiais altamente espalhadores como água, cola, plásticos, borracha etc., e o segundo por possuir uma secção de choque total “meio espalhamento / meio absorção”, representa os outros metais como o cobre, aço, latão, materiais muito utilizados na pesquisa básica e em tecnologia. As cunhas foram irradiadas em T = 1 s, o mais próximo possível da base do cintilador, e como antes, durante a captura da imagem, o sensor CCD da câmera de vídeo foi mantido à $-20^0$C, e o reator estava operando à potência de 4,5 MW. A figura 2.29 mostra a imagem obtida das cunhas. É importante mencionar que nesta figura existe mais uma cunha (a última da direita), confeccionada em chumbo, a qual foi também analisada, mas por algum defeito em sua manufatura, a presença de bolhas em seu interior bem como a não homogeneidade do material, fizeram com que os seus dados fossem descartados. O nível de cinza GL para cada degrau foi avaliado fazendo uso do software Image - pro plus, e mediante a média dos níveis de ~1000 pixels em cada degrau, resultando em uma medida com desvio padrão entre 0,4% a 1% do valor lido.

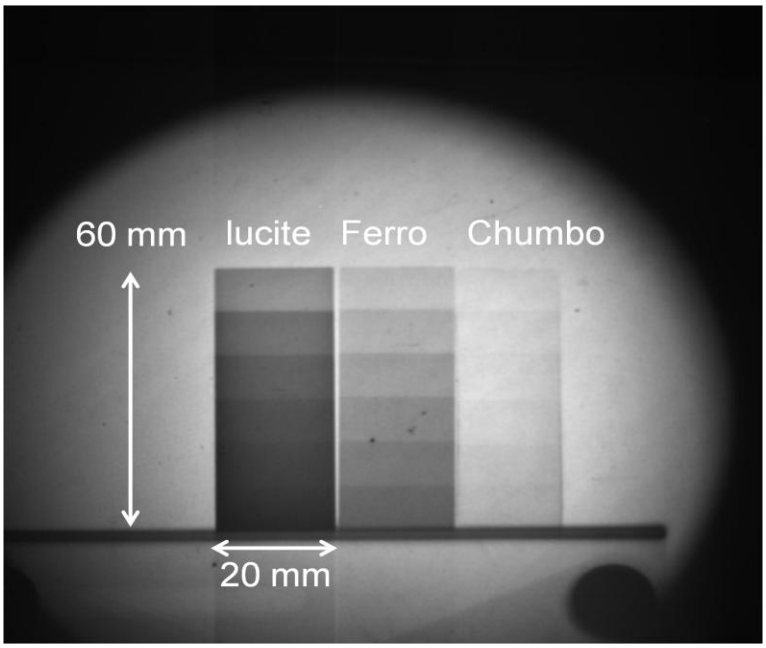



Figura 2.29. Imagens das cunhas com degraus dos objetos padrões utilizados.

As figuras 2.30 e 2.31 mostram os comportamentos dos dados de “GL *vs* x” bem como o ajuste da função exponencial (2.3) aos dados experimentais [26, 27, 33] para os materiais estudados.

$$GL = A * \exp(-B * x) + C \tag{2.3}$$

sendo:

A, B, C - parâmetros livres do ajuste

“x” - espessura de cada degrau.

A sensibilidade foi determinada por (2.4), que é a derivada de (2.3) [24]:

$$\Delta x = \Delta GL/(A * -B * \exp(-B * x)) \tag{2.4}$$

A figura 2.32 mostra o comportamento da sensibilidade em função das espessuras dos materiais estudados, bem como os valores das espessuras mínimas discerníveis pelo método, sendo de 0,23 mm para o Ferro e de 0,08 mm para o Lucite® [61].

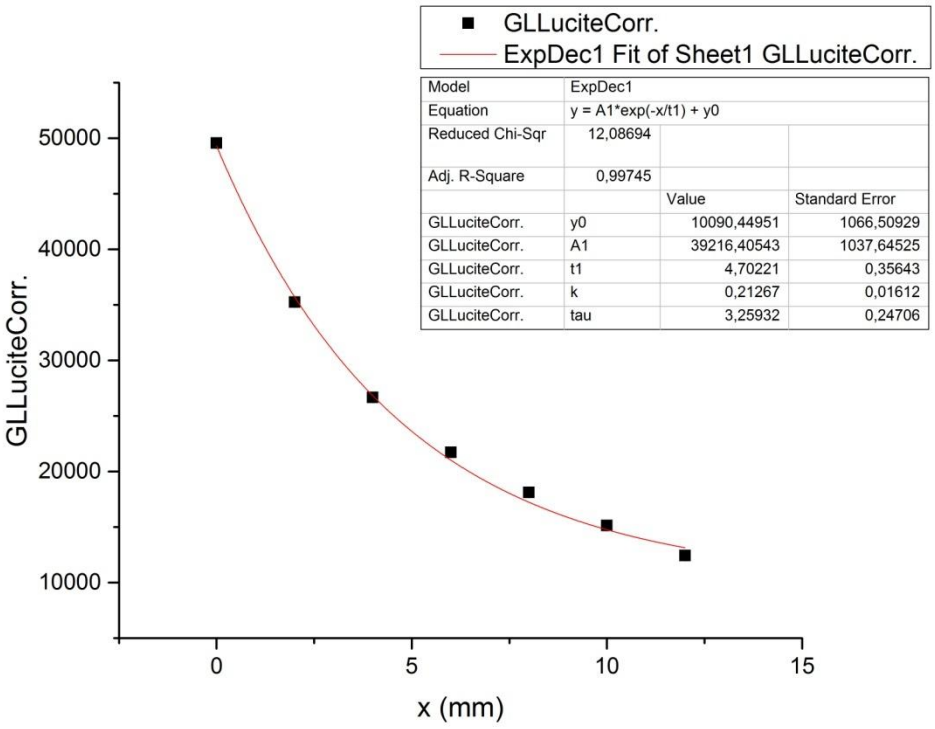



Figura 2.30. Comportamento da distribuição do nível de cinza “GL” em função da espessura “x” do Lucite®.

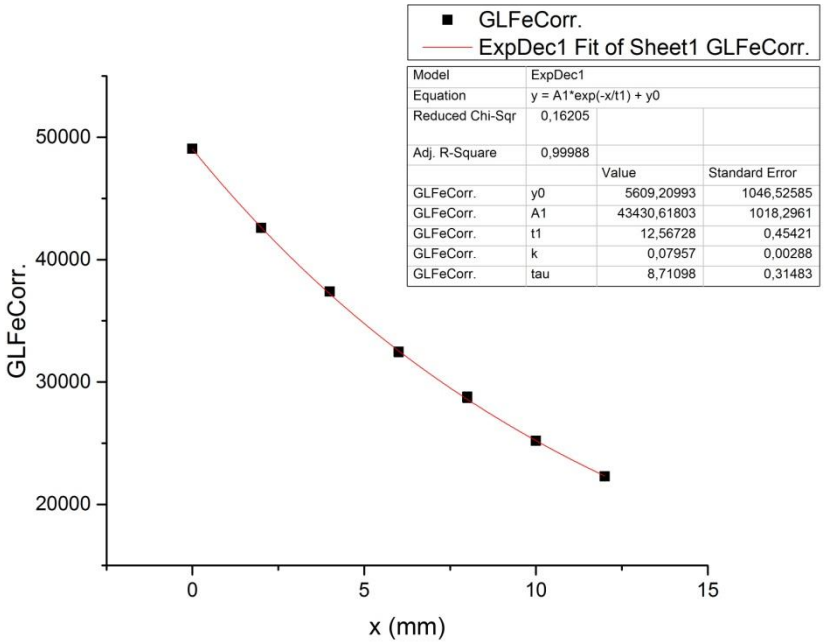



Figura 2.31. Comportamento da distribuição do nível de cinza “GL” em função da espessura “x” do Ferro.

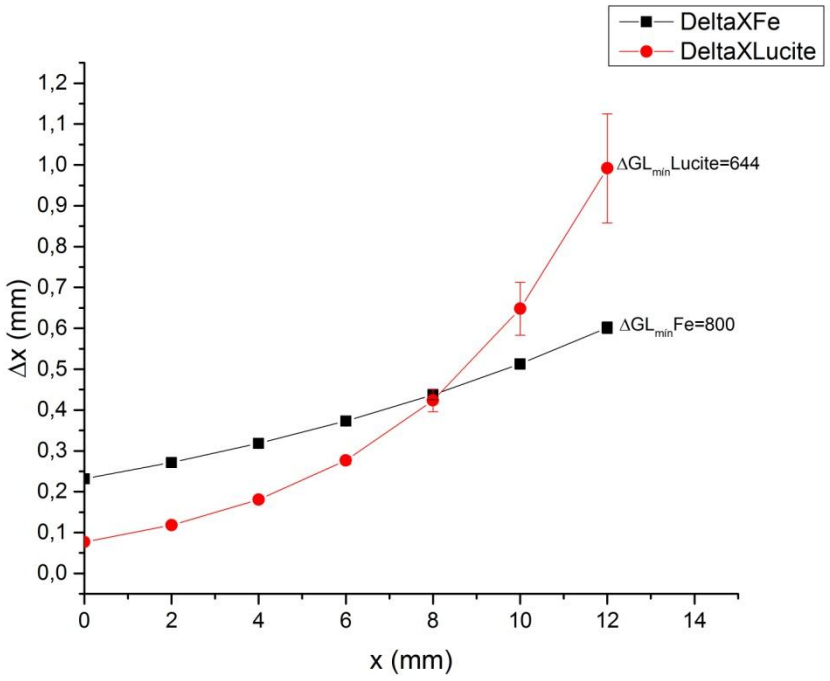



Figura 2.32. Comportamento da sensibilidade “Δx” em função da espessura “x” dos materiais ferro e Lucite®.

Para finalizar, a tabela 2.2 resume as principais características de ambos os equipamentos, o anterior instalado no BH08 e o atual no BH14, e demonstra que as melhorias implementadas elevaram a qualidade do atual no que se refere ao tempo de obtenção de uma tomografia e resolução espacial da imagem, o que consequentemente eleva a qualidade das imagens obtidas. Além disto, e tão importante quanto, é a garantia de que a câmera de vídeo, o dispositivo mais caro do equipamento, tenha uma vida muito mais longa. Somente para fixarmos ideias, dos ~1.000.000 de pixels físicos existentes no sensor CCD da câmera de vídeo, somente 12 são danificados em cada tomografia [5, 33, 53].

| **Canal de irradiação** | **14** | **08** |
|---|---|---|
| Fluxo na posição de irradiação ($n.s^{-1}cm^{-2}$) (folhas Au) | $8x10^6$ | $1x10^6$ |
| Tempo de irradiação por imagem (s) | 1 | 8 |
| Diâmetro do feixe-máx (cm) | 16 | 40 |
| Resolução espacial ($\mu m$) | $205 \pm 24$ | $347 \pm 26$ |
| Tempo/tomografia (s) | 400 | 3200 |
| Dose de nêutron/tomografia ($\mu Sv$) | 20 | 1111 |

Tabela 2.2. Comparação das características dos equipamentos para tomografia com nêutrons instalados no BH14 e no BH08 do reator IEA-R1 do IPEN-CNEN/SP.

## 2.5 – Considerações sobre as outras técnicas de imageamento com nêutrons.

É importante neste ponto do trabalho destacar a relevância das outras técnicas de imageamento com nêutrons. Isto porque 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 (item 2.3) com elevada qualidade, em termos de contraste, não é aval para a obtenção de uma tomografia com elevada qualidade. É necessário 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, embora o foco principal deste trabalho seja a tomografia, este item é dedicado a uma

breve descrição das outras técnicas de imageamento que envolvem a transmissão de nêutrons, e que estão disponíveis neste mesmo equipamento.

As irradiações são realizadas com o objeto próximo à posição em que as tomografias são feitas, sendo necessário somente substituir o sistema de captura de imagens, pelo conjunto “conversor / meio sensível” adequado. As técnicas atualmente disponíveis, bem como algumas de suas características operacionais estão apresentadas na tabela 2.3 [26, 30, 31, 34, 62, 63].

| **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) + câmera de vídeo | **1** | **205** | | | **digital** |
| 2D Tempo - real | LiF(ZnS) + câmera de vídeo | **1** | **205** | | | **digital** |
| 2D Tempo - real | LIXI + câmera de vídeo | **0,03** | 440 | | | analógica/**digital** |

Tabela 2.3. Técnicas de imageamento bidimensional que estão operacionais no IPEN-CNEN/SP.

**2.5.1 - Gd(Gadolínio) + filme de R-X.** Neste caso, o conversor de Gadolínio e o filme são inseridos no interior de um estojo (cassete) de alumínio blindado à luz, e o objeto em estudo é posicionado fora do estojo, o mais próximo possível dele, e este conjunto é irradiado no feixe de nêutrons. A intensidade de nêutrons transmitida pelo objeto atinge o conversor de Gadolínio causando uma reação nuclear que gera uma radiação ionizante, que sensibiliza o filme de R-X formando uma imagem latente. O filme é então revelado resultando na formação de uma imagem visível. 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 [3, 24].

**2.5.2 - Dy(Disprósio) + filme de R-X.** Neste caso, 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 2,38 h, que gera uma radiação ionizante. Em seguida, o Disprósio ativado e o filme de R-X são inseridos no interior de um estojo (cassete) de alumínio blindado à luz, e a radiação ionizante gerada sensibiliza o filme formando uma imagem latente. O filme é então revelado resultando na formação de uma imagem visível. 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. Pelo fato que a formação da imagem requer duas irradiações distintas, esta técnica é conhecida como indireta [3, 24].

**2.5.3 - B(Boro) + Polímero.** Neste caso, o conversor de Boro e o polímero são inseridos no interior de um estojo (cassete) de alumínio, 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 de Boro causando uma reação nuclear que gera uma radiação ionizante, que sensibiliza o polímero formando uma imagem latente. O polímero é então revelado o que resulta na formação de uma imagem visível. 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 são, a 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 formada em filmes de R-X [3, 30, 34].

**2.5.4 – LiF(ZnS)(Fluoreto de lítio) + câmera de vídeo.** Neste caso o conversor e o meio sensível são os mesmo empregados na técnica da tomografia e o procedimento para a obtenção da imagem é o mesmo daquele utilizado para obter uma das 400 imagens para a tomografia (2.4). Seus principais aspectos positivos são o tempo de irradiação de 1 s para a obtenção da imagem que é relativamente pequeno, a resolução espacial na imagem de 205 $\mu$m, e a imagem resultante ser digital.

**2.5.5 –Tempo - real com LiF(ZnS)(Fluoreto de lítio) + câmera de vídeo.** O equipamento utilizado é o mesmo mencionado anteriormente em 2.5.4 e a técnica é utilizada para amostras não estáticas, ou seja, para investigação de processos dinâmicos. 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.

**2.5.6 –Tempo - real com LIXI(Light - Intensifier – X-ray - Image) + câmera de vídeo.** O LIXI e o objeto são posicionados no local da mesa giratória (2.2.6) e o conjunto é irradiado no feixe de nêutrons. A intensidade transmitida pelo objeto sensibiliza o cintilador do LIXI formando uma imagem bidimensional (2D) de sua estrutura interna. Aqui também, para evitar exposição direta da câmera de vídeo à radiação, a câmera de vídeo está instalada a $90^0$ com relação ao feixe de radiação. O dispositivo Lixi possui um intensificador que amplifica a luz gerada no cintilador, o que propicia resolução temporal de aproximadamente 30 ms [25].

# Capítulo 3 - Aplicações das técnicas de imageamento com nêutrons

## 3.1 – Tomografias

### 3.1.1 - Vaso cerâmico contemporâneo restaurado

A cerâmica foi selecionada por ser um dos materiais mais comuns encontrados em sítios arqueológicos brasileiros. Consiste de elementos transparentes aos nêutrons, Carbono, Oxigênio, Magnésio, Alumínio, Silício, Potássio, Cálcio e outros, mas que possuem em sua estrutura moléculas de água, que por ser uma substância rica em Hidrogênio, a torna ideal para ser investigada por imageamento com nêutrons [11, 64]. O vaso, mostrado na figura 3.1, foi danificado e o dano induzido resultou em uma trinca oblíqua, dividindo-o em duas partes. Utilizando adesivo comercial (cola), material rico em Hidrogênio, o vaso foi restaurado e investigado por tomografia com nêutrons. A figura 3.2(a) mostra uma imagem 3D na qual parte do material cerâmico foi removido por meio de ferramentas de processamento do software VGStudio, deixando visível a trilha da cola. Na figura 3.2(b), utilizando outras ferramentas, a cola foi separada do material cerâmico, mostrando em detalhes como ela está distribuída. A figura 3.3 é um exemplo de utilização de uma das ferramentas de quantificação deste mesmo software, por meio da qual foi possível determinar que na posição indicada a espessura da trilha da cola é de ~ 2,52 mm.

Figura 3.1. Vaso cerâmico contemporâneo que foi restaurado e tomografado.

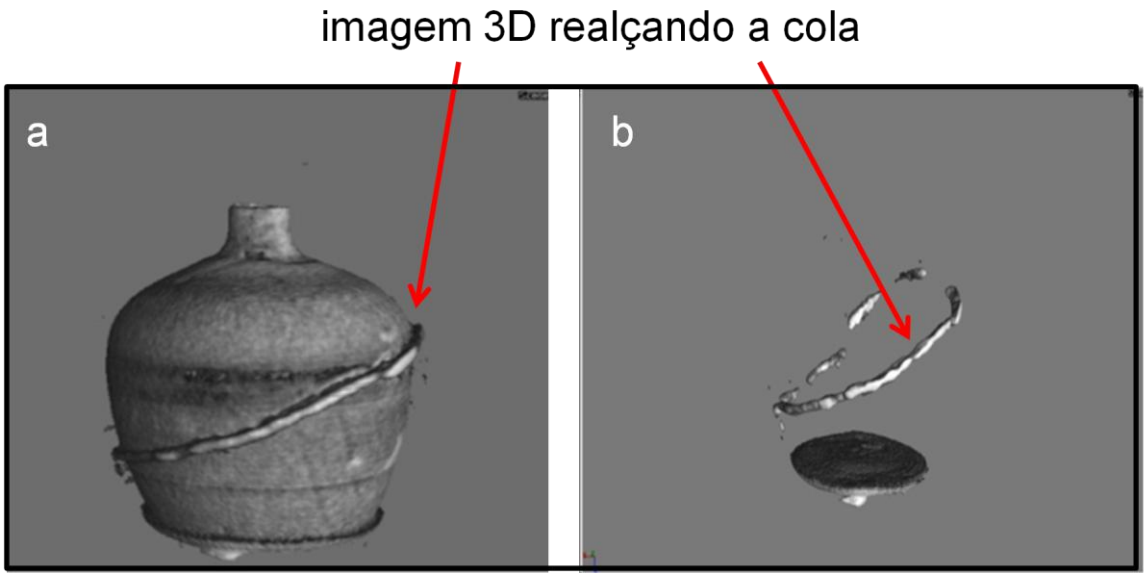



Figura 3.2. (a) Imagem 3D obtida; (b) Remoção do material cerâmico para realce da cola.

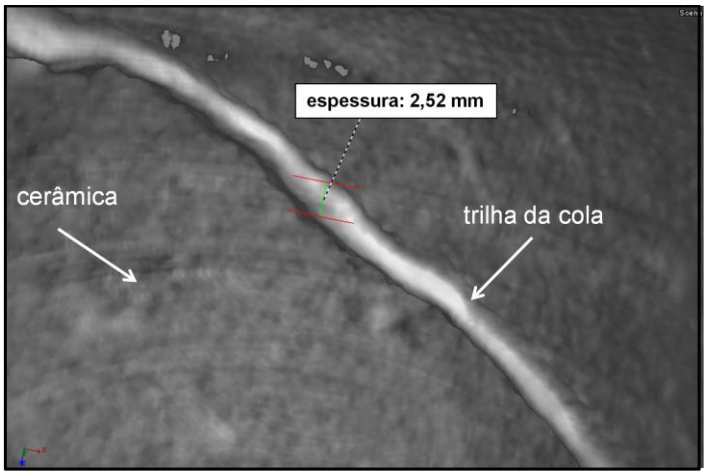



Figura 3.3. Imagem 3D com zoom mostrando detalhes da trilha da cola e sua espessura no local destacado.

Na figura 3.4 é mostrada uma das fatias (tomografias), na qual é possível observar uma falha, na estrutura interna do material cerâmico. De acordo com os dados extraídos dos softwares Octopus e VGStudio, foi possível constatar, que a falha está localizada a aproximadamente 4,9 cm do gargalo do vaso, possui comprimento máximo de 6,5 mm e largura máxima de 1,26 mm. De modo a verificar a precisão destas informações, o vaso foi fragmentado (vide figura 3.5) e mediante uma avaliação visual,

foi possível constatar que a falha é um vazio, ou bolha de ar incrustada na cerâmica, cuja localização e dimensões são aquelas fornecidas pelos softwares já mencionados.

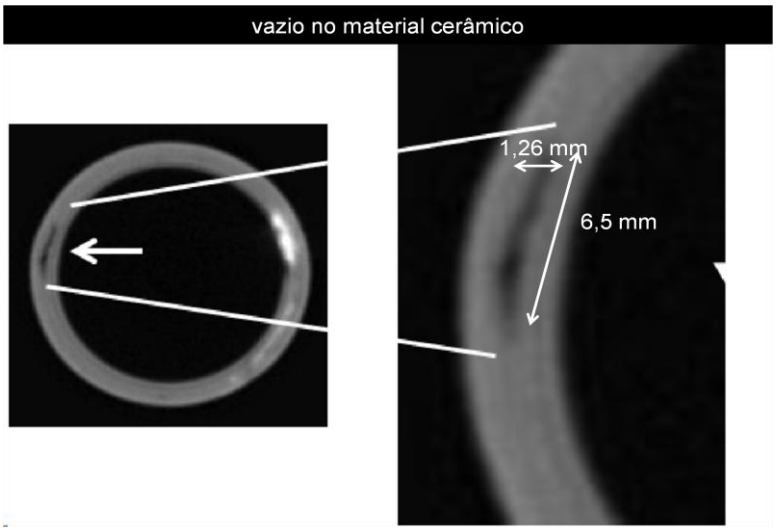



Figura 3.4. Fatia do arquivo das imagens reconstruídas (tomografia) mostrando uma descontinuidade (vazio) no material cerâmico.

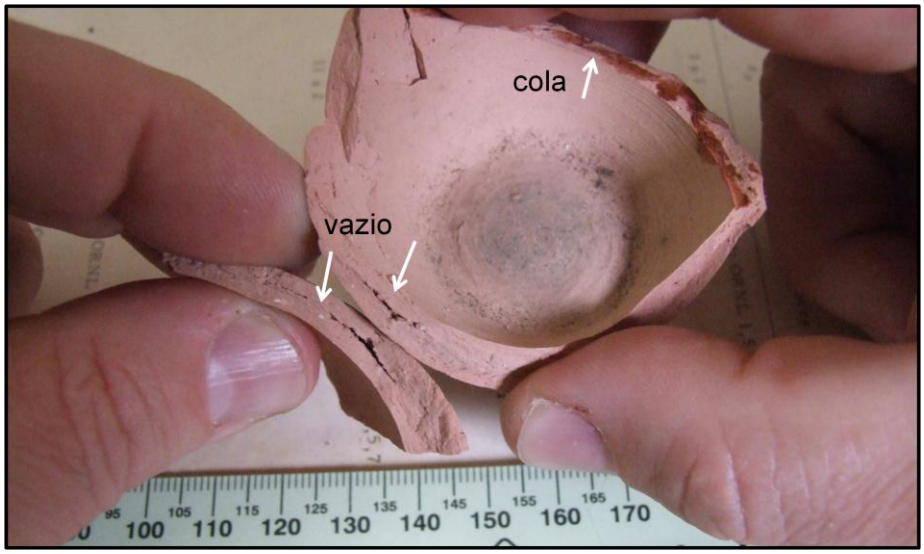



Figura 3.5. Verificação visual da existência do vazio.

### 3.1.2 - Amostra arqueológica

A figura 3.6 é uma amostra proveniente de escavações de um sítio arqueológico localizado na cidade de Jales, São Paulo. Consiste de um fragmento de osso parcialmente incrustado em rocha de origem fluvial, composta basicamente por grãos de quartzo e finas camadas de barro.

Figura 3.6. Amostra arqueológica mostrando o fragmento de um osso embutido em sua parte superior.

A rocha foi submetida à análise por tomografada com nêutrons, e uma sequência das imagens obtidas, está mostrada na figura 3.7. Como pode ser observado, estes tomos correspondem à profundidades crescentes com relação ao plano selecionado para a observação da amostra. Na figura 3.7(c), parte do osso começa a ser visível à 43,95 mm da superfície, e fica bem visível a 47,25 mm, como indicado pelas flechas na figura 3.7(d). Neste plano, o osso possui um comprimento de 38,8 mm e espessura máxima de 11,1 mm. Na figura 3.7(e), a 48,75 mm da superfície, o osso começa a desaparecer, se tornando não visível na figura 3.7(f), a 55,05 mm da superfície.

Por se tratar de uma amostra relativamente abundante neste sítio, e por ser a primeira vez que o grupo analisa este tipo de material, obtivemos a permissão de fragmentá-la e verificar se as observações das tomografias estavam corretas (vide figura 3.8). O exame visual da rocha fragmentada constatou a precisão dos dados extraídos das tomografias obtidas. Um especialista da Universidade de Brasília – UNB (Dr. Rodrigo Miloni Santucci), que foi nosso colaborador neste trabalho relatou, baseado nos restos de um dinossauro encontrado junto a esta rocha, que o osso pertence à parte do dedo de um *crocodylomorpha,* cujo desenho é mostrado na figura 3.9, datado do período cretáceo (aprox. 70 Ma).

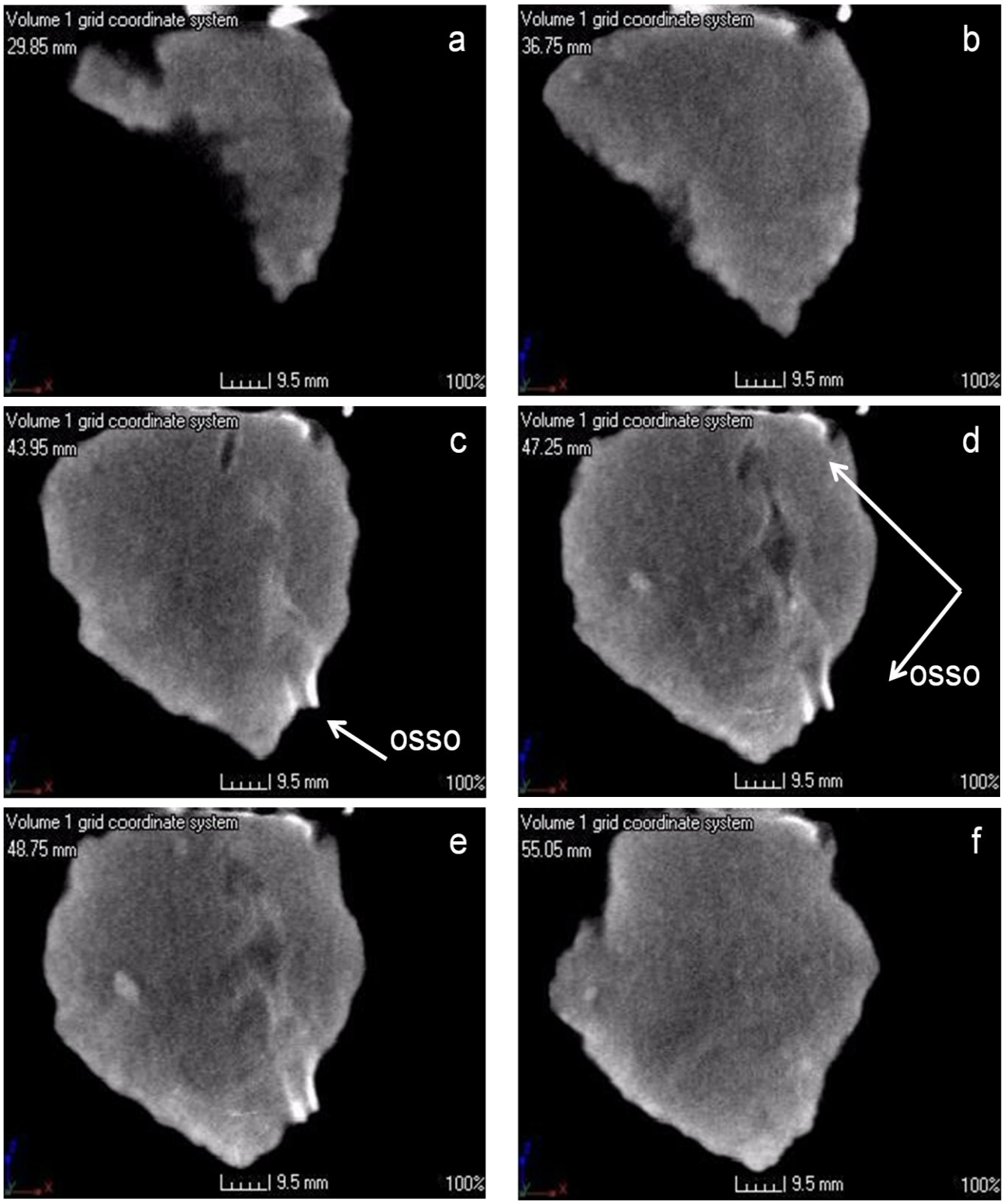



Figura 3.7. Sequência de imagens das fatias da tomografia da amostra mostrando detalhes do osso e sua localização no interior da rocha.

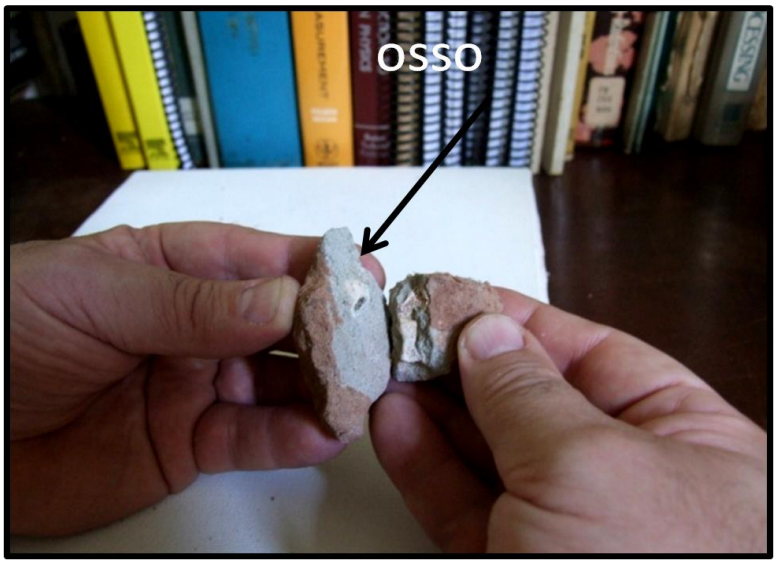



Figura 3.8. Fragmentação da rocha e comprovação visual das informações fornecidas pelas imagens.

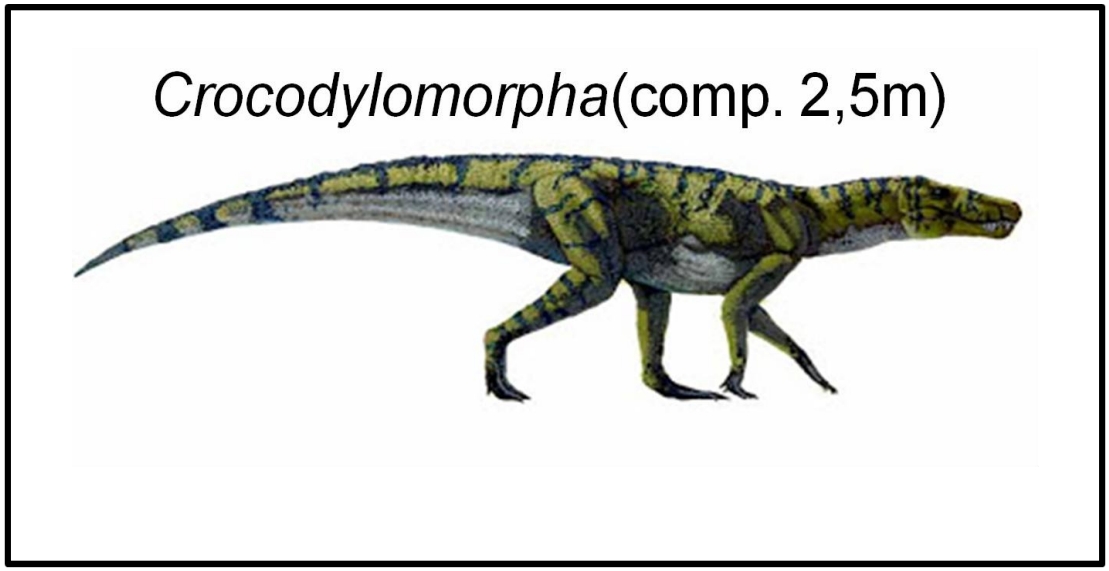



Figura 3.9. Desenho do *crocodylomorpha* (comp 2,5m).

### 3.1.3 – Preservação de cerâmica com Paraloid B-72

Paraloid B-72 é uma das substâncias consolidantes mais empregados por peritos na preservação e restauro de cerâmicas [18]. É uma resina acrílica que normalmente é diluída em algum solvente, antes de ser aplicada. No presente, foi diluída em acetona, em uma proporção padrão de 1:9 (em massa) [10] e aplicada em uma parte da superfície externa de um vaso cerâmico contemporâneo, por meio de um pincel, como mostrado nas figuras 3.10(a) e (b). O vaso foi tomografado com nêutrons e, na imagem 3D mostrada na figura 3.10(c), foi possível, empregando as ferramentas disponíveis no software VGStudio, determinar que a espessura da parede é 5,77 mm, distinguir regiões com e sem o Paraloid-B72, e verificar que penetrou apenas aproximadamente 1,2 mm na superfície demonstrando que somente uma parte da parede está protegida. O vaso foi fragmentado, figura 3.10(d), e não foi possível distinguir, à olho nu, as regiões internas com e sem Paraloid, o que demonstra a potencialidade de uso desta técnica para esta finalidade.

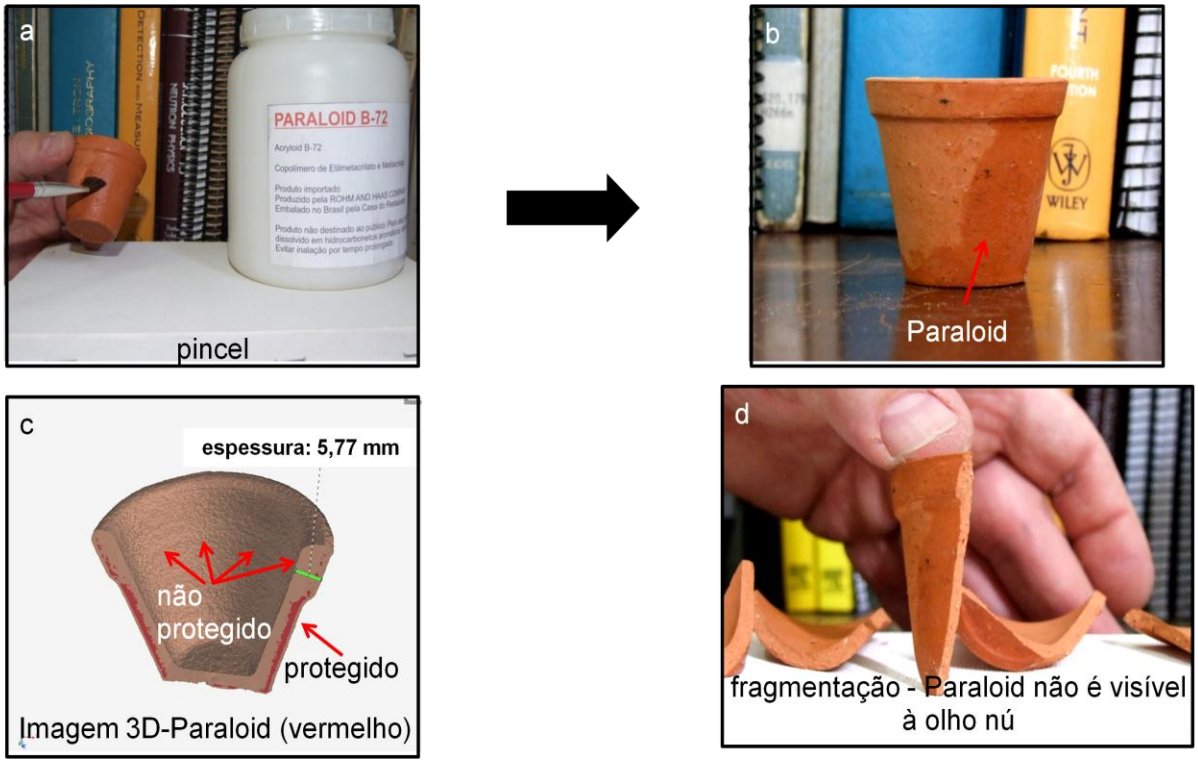



Figura 3.10. (a) Vaso cerâmico que foi tomografado, e a aplicação do Paraloid; (b) Aspecto da região com Paraloid; (c) Imagem 3D mostrando a penetração do Paraloid na parede do vaso; (c) Vaso fragmentado e a não visualização do Paraloid.

### 3.1.4 - Válvula para controle de fluxo de água

A válvula mostrada na figura 3.11(a) 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 3.11(b) é uma imagem 3D obtida por tomografia com nêutrons, na qual parte do corpo em alumínio foi removido por processamento no software VGStudio, de modo a realçar o diafragma, podendo assim estudá-lo e verificar sua integridade [33].

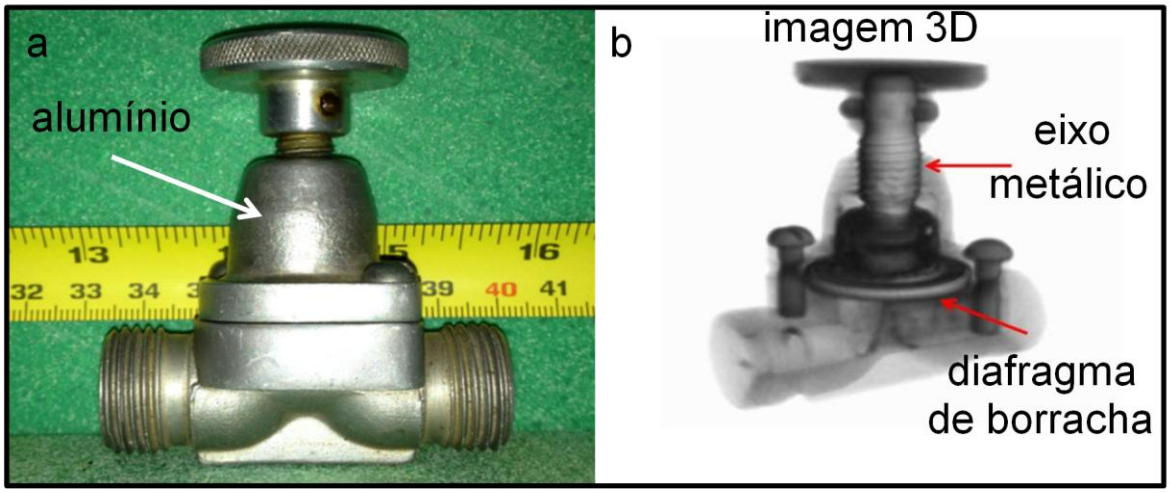



Figura 3.11. (a) Válvula tomografada; (b) Imagem 3D realçando o diafragma de borracha.

### 3.1.5 – Cartucho de festim

Este cartucho, mostrado na figura 3.12, consta basicamente de um invólucro metálico no interior do qual a pólvora é inserida. A pólvora é uma substância rica em Hidrogênio, o que torna desejável a sua inspeção pela técnica da tomografia com nêutrons.

Figura 3.12. Cartucho de festim tomografado.

As figuras 3.13, abaixo, são uma sequência de seis quadros de um “filme 3D”, feito a partir do arquivo das tomografias obtidas: na figura 3.13(a) o cartucho é mostrado inteiro, e seu invólucro metálico foi colorido artificialmente para se parecer com a cor original do latão; na 3.13(b) parte do invólucro metálico é removido o que expõe parte da pólvora; na figura 3.13(c) a pólvora é totalmente destacada do invólucro e na 3.13(d) o conjunto é girado ~$90^0$, de modo a exibir o local do invólucro onde a pólvora fica alojada; na figura 3.13(e) a pólvora é novamente inserida em seu local original e, na 3.13(f) o invólucro é então fechado.

Na figura 3.14 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.

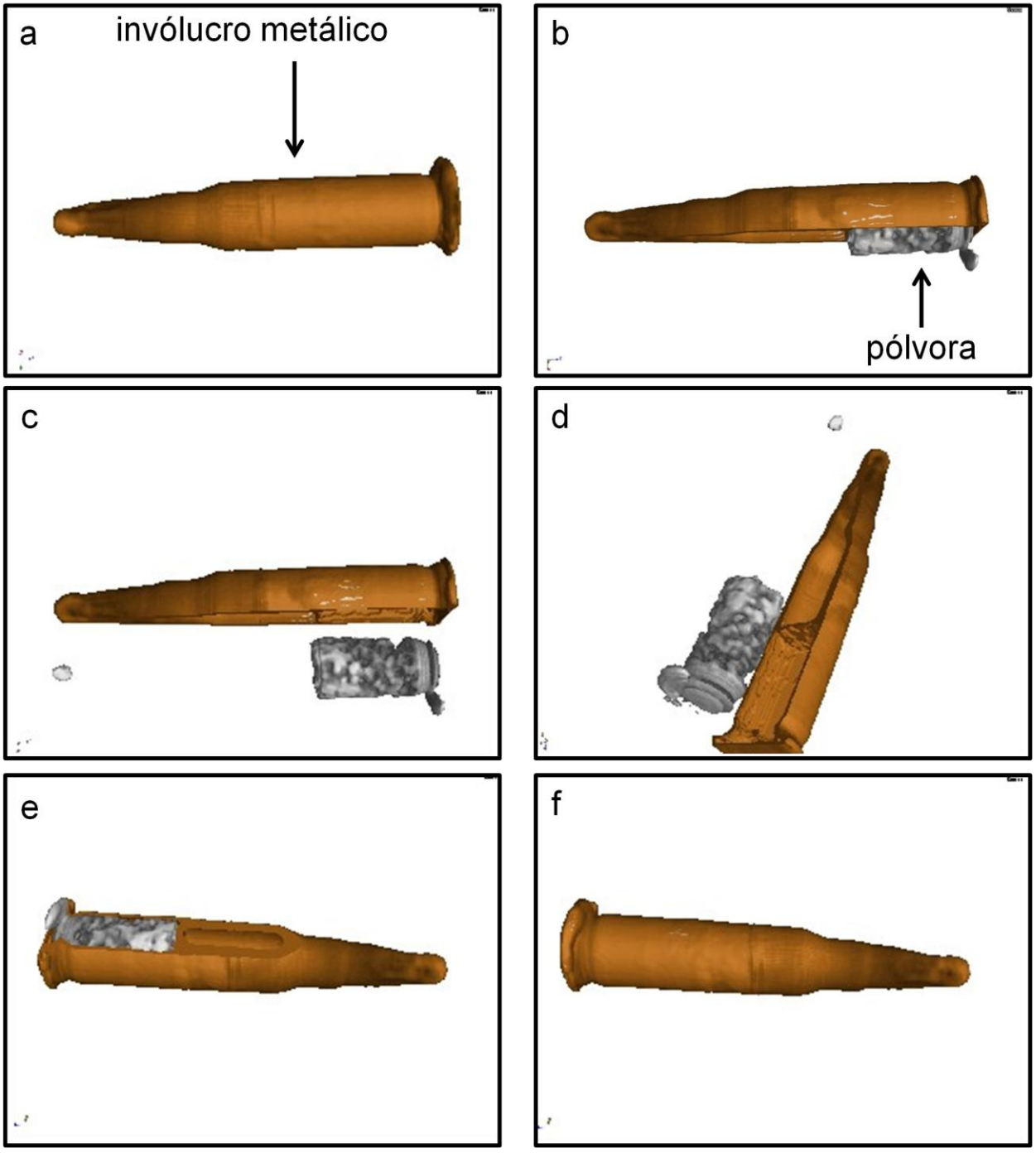



Figura 3.13. Sequência de imagens 3D mostrando detalhes da pólvora no interior da carcaça metálica.

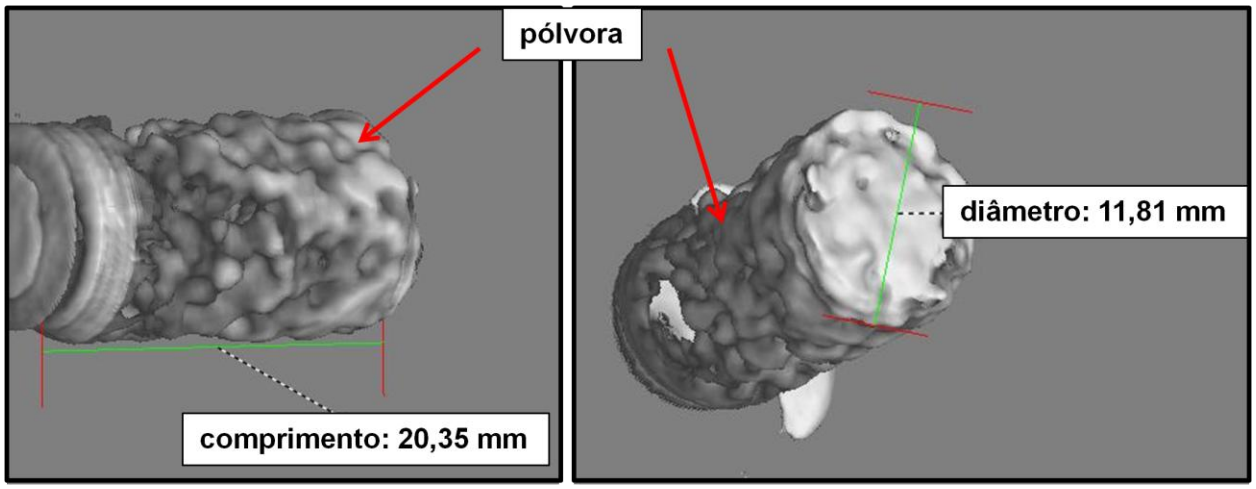



Figura 3.14. Imagens 3D da pólvora mostrando suas dimensões nas posições indicadas.

### 3.1.6 – Parafuso com ferrugem

O parafuso tomografado neste estudo, mostrado na figura 3.15, é 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 [65], 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 3.15. Parafuso com ferrugem tomografado.

As figuras 3.16 abaixo são uma sequência de seis imagens de um “filme 3D”, feito a partir do arquivo das tomografias obtidas. Na figura 3.16(a) o parafuso é mostrado inteiro, e sem detalhes da estrutura da ferrugem; nas figuras 3.16(b) e (c) parte do aço começa a ser removido progressivamente, por processamento no software VGStudio, até que reste somente a ferrugem, em 3.16(d); de modo a realçá-la, na figura 3.16(e) a ferrugem é colorida artificialmente, e na 3.16(f) é girada de modo a ficar perpendicular à sua posição inicial.

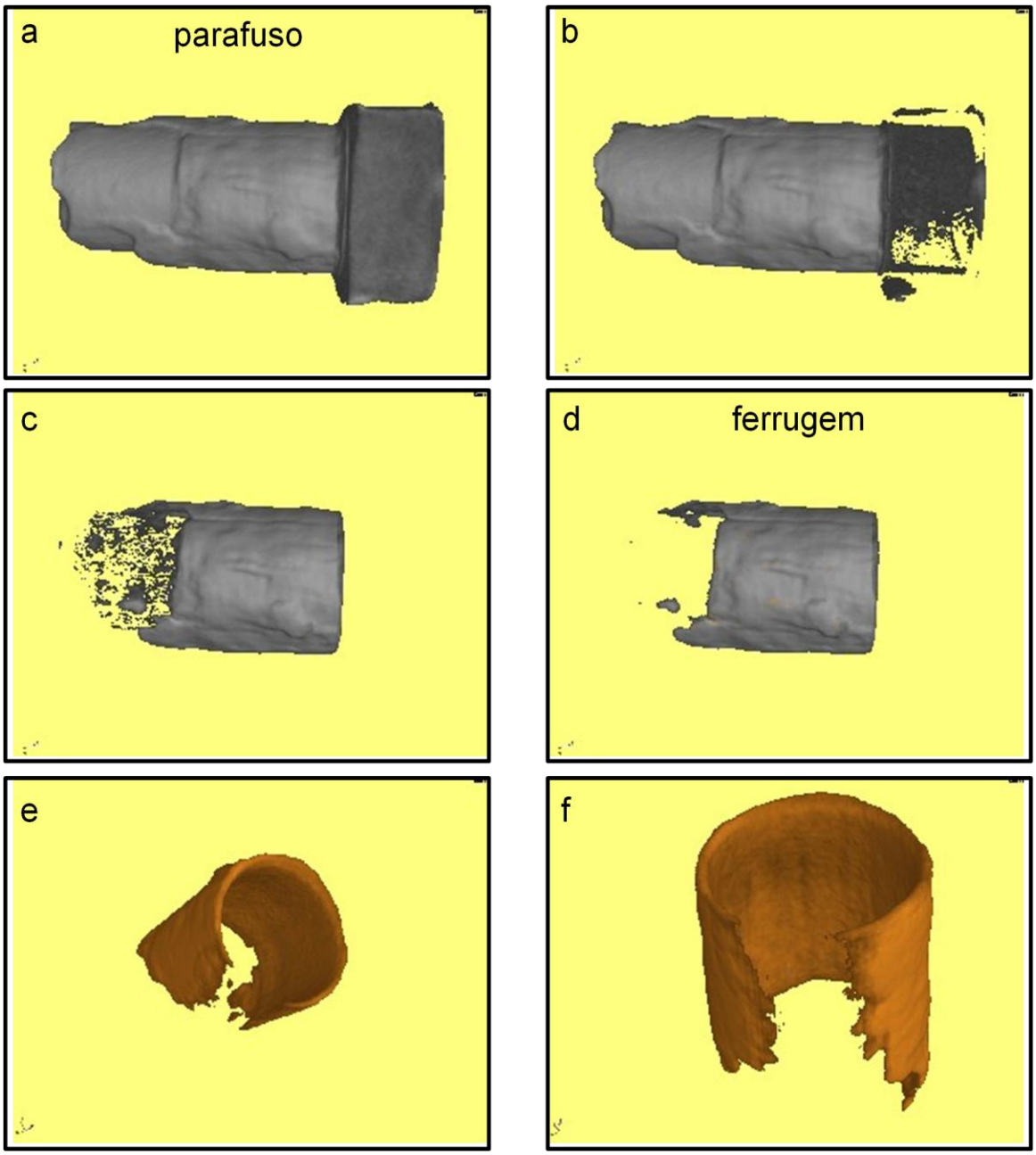



Figura 3.16. Sequência de imagens 3D mostrando detalhes da disposição da ferrugem.

Na figura 3.17 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.

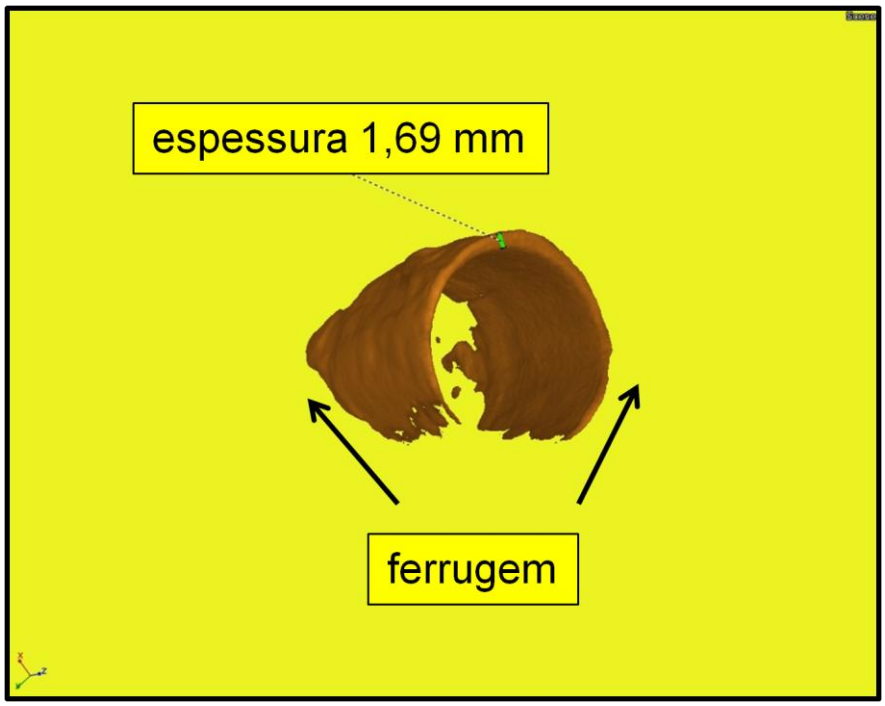



Figura 3.17. Imagem 3D da ferrugem mostrando sua dimensão na posição indicada.

## 3.2 – Tempo - real

### 3.2.1 - Inspeção em madeira

A figura 3.18 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 e a técnica empregada para a inspeção foi a do imageamento 2D em tempo - real, com resolução temporal de 1 s (vide tabela 2.3). A figura 3.19 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 3.19(a), (b), (c) e (d). Na reprodução em tempo-real foi possível verificar o movimento dos cupins em seu interior.

Figura 3.18. Pedaço de madeira que foi inspecionada pela técnica de tempo-real

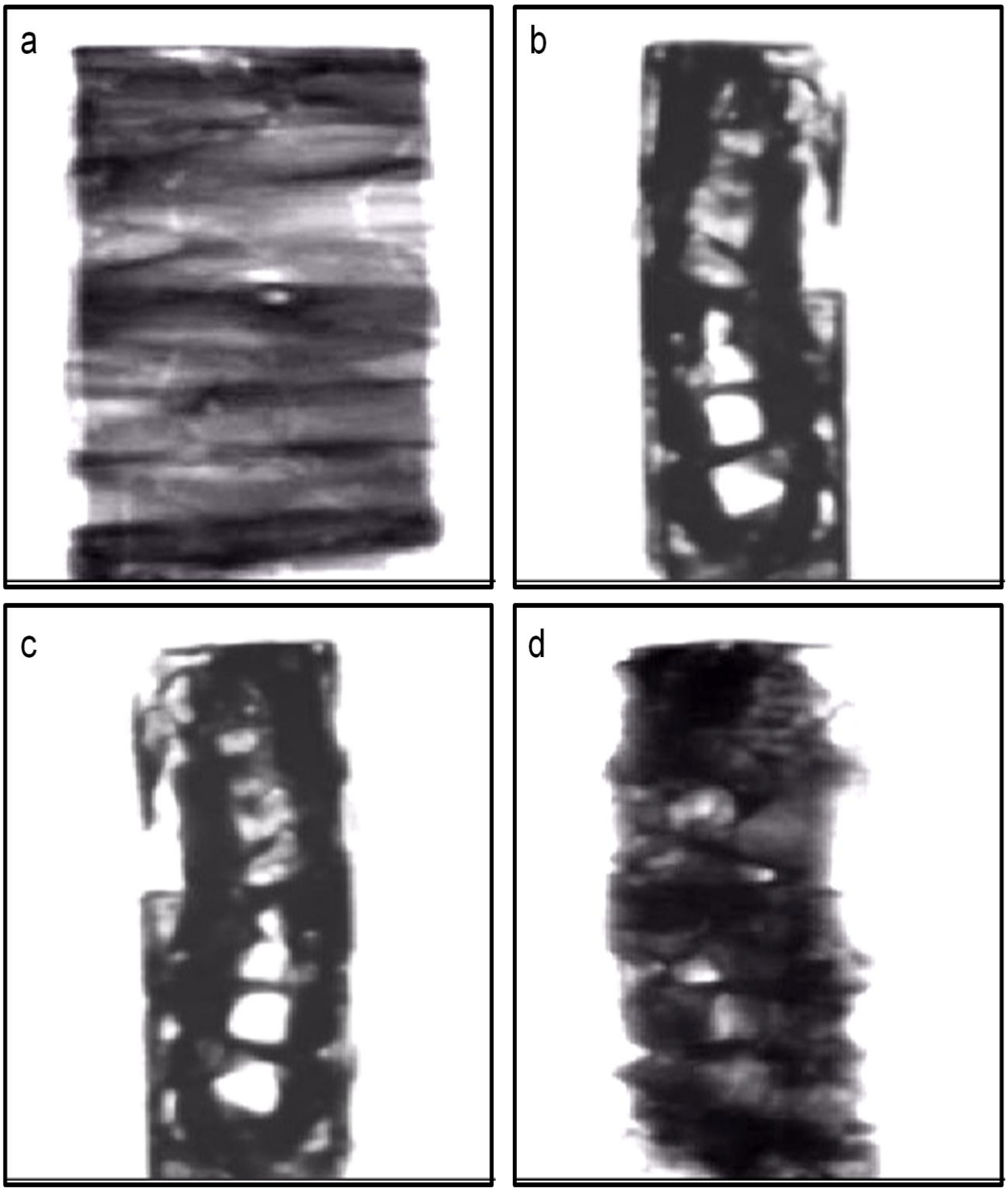



Figura 3.19. Sequência de imagens 2D mostrando detalhes da infestação de cupins no interior da madeira.

## Capítulo 4 - Considerações finais

**4.1 - Equipamento -** As imagens obtidas que estão apresentadas no Capítulo 3, demonstram a potencialidade do presente equipamento para o estudo da estrutura interna de objetos pela técnica da tomografia com nêutrons, que foi projetado e construído pelo grupo de trabalho, e que está instalado no BH14 do reator nuclear de pesquisa IEA-R1 do IPEN-CNEN/SP. As suas características operacionais mais significativas são:

- O tempo gasto para a obtenção de uma tomografia é de 400 s, o qual é 8 vezes menor do que para o equipamento anterior instalado no BH08. Além disto, ele é relativamente pequeno mesmo quando comparado com o de outros equipamentos para tomografia com nêutrons mais desenvolvidos em operação [5, 33, 66].

- A resolução espacial intrínseca é de 205 μm, a qual é menor do que os 347 μm obtidos no equipamento anterior do BH08. Esta melhoria foi devida ao aprimoramento no procedimento de focalização da câmera de vídeo, conseguido com o uso do objeto padrão de Cádmio mostrado na figura 2.25. Apesar deste valor ser relativamente elevado, quando comparado com o dos melhores equipamentos que estão operacionais [22], as imagens apresentadas no Capítulo 3 possuem qualidade suficiente para a realização de análises qualitativas e quantitativas.

- Com os cuidados para minimizar a intensidade de nêutrons espalhados na direção da câmera de vídeo, houve uma redução significativa na quantidade dos danos causados em seu CCD, o que garantiu um aumento de sua vida útil de pelo menos um fator 50 quando comparado com o equipamento do BH08.

- A versatilidade e simplicidade para adequação do equipamento para a obtenção de imagens por outras técnicas de imageamento bidimensional.

### 4.2 - Atividades para futuro próximo

Uma boa parte dos esforços despendidos nesta dissertação foram voltados à proteção do sensor de imagem CCD da câmera de vídeo, contra danos causados pelas radiações oriundas do núcleo do reator nuclear IEA-R1, visando aumentar a sua vida útil. Isto por se tratar de um dispositivo vital para a obtenção da tomografia, de custo

elevado, de difícil substituição e, mais difícil ainda a sua manutenção. Por estes motivos continuamos constantemente estudando maneiras de minimizar a quantidade de radiação que a atinge. Em uma das ideias elaboradas há alguns meses atrás, pensamos na possibilidade de substituir o atual espelho, que reflete a imagem do cintilador para a câmera de vídeo (vide figura 2.21). Este foi confeccionado no Paul Scherrer Institute – PSI (Suíça) e consiste de uma base de vidro comum com 2 mm de espessura, como mostrado na figura 4.1. A intenção é a de substituí-lo por outro com base menos espessa (menos material, menos espalhamento). O material selecionado para o novo espelho foi o Silício, na forma de “bolachas”, as mesmas utilizadas em painéis de conversão da luz solar em energia elétrica. Estas, além de ter composição química semelhante à base do espelho anterior (silicatos), são comumente comercializadas [67], e suas superfícies são altamente polidas e livres de deformações, o que é necessário para uma deposição perfeita da camada refletora de alumínio. Adquirimos algumas destas “bolachas”, com espessura de 0,5 mm, quatro vezes menor que a do espelho de vidro, e com diâmetro de 15 cm [53]. Nestas dimensões a sua superfície é auto sustentável, o que é primordial para a não deformação da imagem. A figura 4.2 é uma fotografia de uma destas “bolachas” ainda não espelhada. Estes novos espelhos em breve serão testados no equipamento, para a verificação de sua refletividade e de quanta radiação espalham em direção ao CCD da câmera de vídeo.

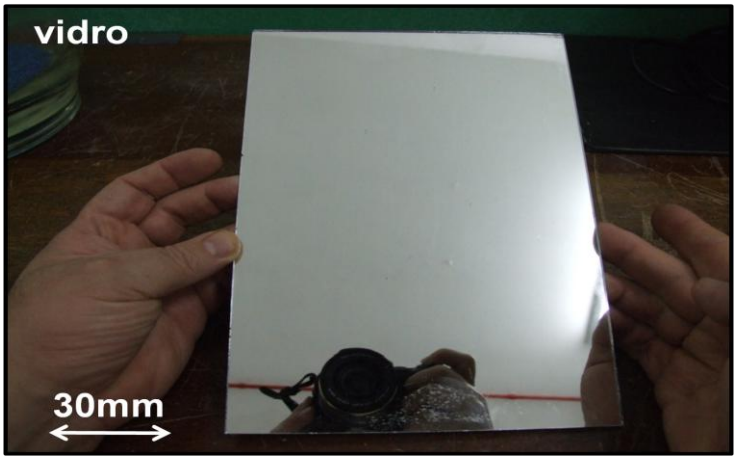



Figura 4.1. Espelho com base de vidro que está em uso no equipamento de imageamento com nêutrons.

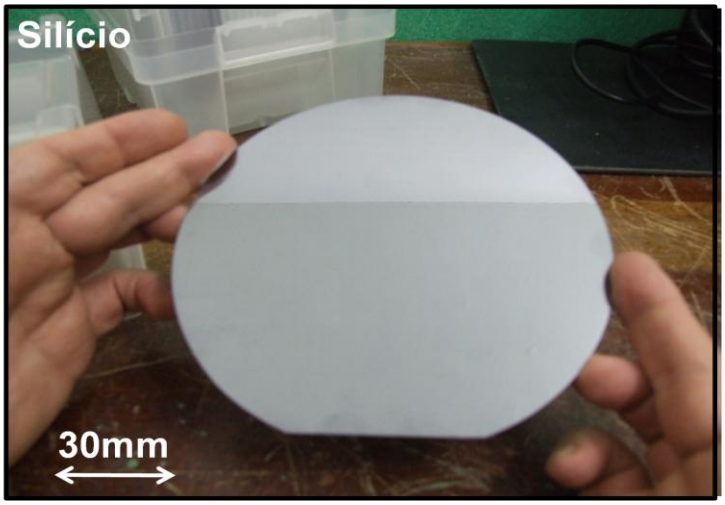



Figura 4.2. Espelho com base de Silício que será testado no equipamento de imageamento com nêutrons.

- Continuidade no estudo dos processos de restauração de objetos contemporâneos, similares aos de nossa herança cultural aplicando a técnica da tomografia com nêutrons.
- Continuidade no estudo do Software VGStudio para otimizar a visualização e a quantificação das imagens 3D.
- Estudo da possibilidade de otimizar a resolução intrínseca do equipamento dos atuais 205 μm para valores entre 50 e 100 μm, mediante a substituição do presente cintilador de LiF(ZnS) com espessura de 450 μm por um similar, mas com espessura menor [10, 45, 68].
- Aplicação da tomografia com nêutrons em células a Hidrogênio (PEM). Uma PEM (Proton Exchange Membrane) é um dispositivo que converte a energia armazenada nas ligações moleculares em eletricidade. Utiliza Hidrogênio ($H_2$) e Oxigênio ($O_2$) como combustível, e os produtos da reação química são água, eletricidade e calor. A figura 4.3(a) é uma célula montada, composta por duas paredes de alumínio que mantêm unidas outras duas de grafite. Entre as de grafite existe a "membrana de eletrodos" ou MEA (Membrane Electrode Assembly), onde a energia elétrica é gerada [21].

Recentemente a MEA mostrada nas figuras 4.3(b) e (c), composta por cinco camadas de membranas, com espessura total de 640 μm, foi enviada ao IPEN-CNEN/SP para ser tomografada com nêutrons, como uma tentativa de avaliar a

distribuição de água em seu interior, após ter sido imersa por algumas semanas. A MEA foi posicionada no porta-amostras mostrado nestas mesmas figuras, e este conjunto foi levado ao equipamento para ser tomografado. O resultado das tomografias está mostrado nas figuras 4.4. A figura 4.4(a) é uma imagem 3D da membrana inteira, a 4.4(b) exibe um corte vertical na imagem anterior, na qual podem ser observadas diversas estruturas (cor vermelho amarelada), localizadas na região central da membrana. Para evidenciá-las, esta figura foi ampliada na figura 4.4(b‘). Na figura 4.4(c) o conjunto das estruturas foi destacado da membrana, mostrando como estão distribuídas no interior de todo o seu volume. Estes resultados, embora ainda qualitativos, são promissores, pois a localização e a distribuição destas estruturas são exatamente aquelas de como a água estaria dispersa no interior da MEA. Caso isto se confirme, existe grande possibilidade do emprego do presente equipamento neste campo de pesquisa, para o estudo e desenvolvimento destas células. É importante mencionar que o fato de termos sido capazes de observar uma estrutura no interior de 640 μm, já é um grande avanço e reflete a qualidade do referido equipamento.

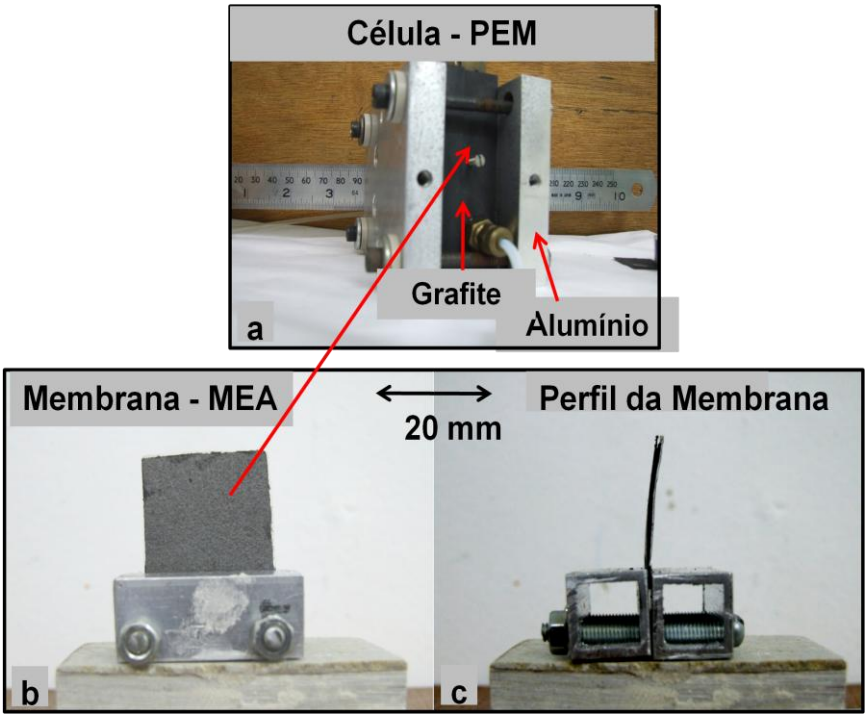



Figura 4.3. (a) Célula de hidrogênio montada; (b) e (c) Membrana tomografada: visão lateral e perfil respectivamente.

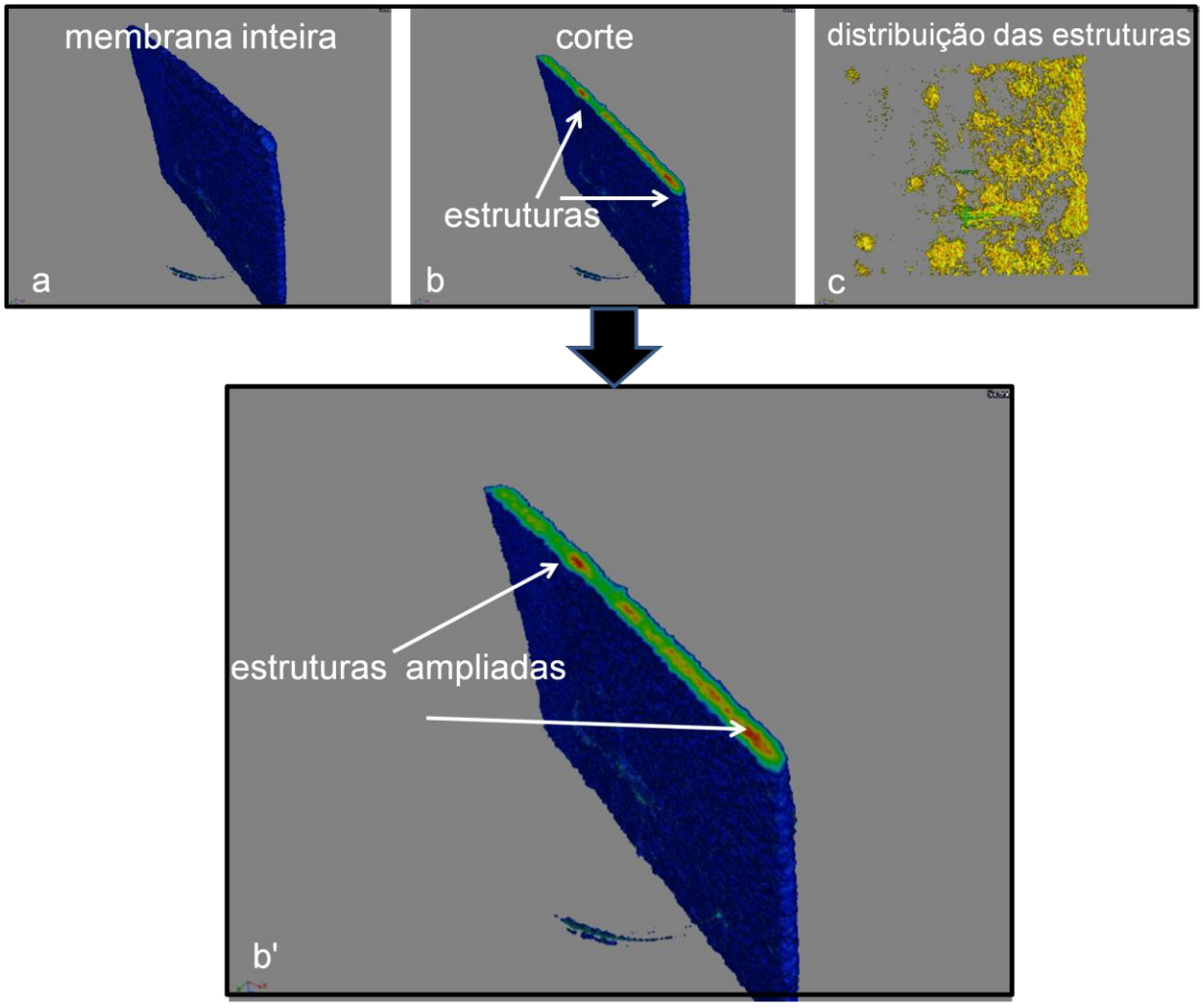



Figura 4.4. Imagens 3D da membrana: (a) Inteira; (b) Corte mostrando a possível visualização da água; (b') Imagem ampliada; (c) Estruturas destacadas do corpo da membrana, para melhor visualização e estudo.

## 4.3 - As técnicas de imageamento com nêutrons no Brasil e o Reator Multipropósito Brasileiro - RMB.

De acordo com o planejado, e a exemplo do que ocorre em outros grandes centros de pesquisas com nêutrons, como em ANSTO, NECSA, NIST etc., deverá haver no RMB um canal de irradiação dedicado para o desenvolvimento das técnicas de imageamento com nêutrons. Pelas características deste novo reator, este canal fornecerá um feixe de nêutrons mais intenso do que o atual fornecido pelo IEA-R1, e isto permitirá a implementação de novas técnicas de imageamento com nêutrons tais como a do contraste de fase e de nêutrons polarizados [7-9], [69]. Mas talvez o mais

importante, seja a possibilidade de obtenção de imagens por radiografia e tomografia, mediante a seleção da energia dos nêutrons que atingem o objeto [14, 15]. Estas perspectivas reunidas abrem muitas possibilidades no que se refere às novas linhas de pesquisas científicas e tecnológicas, parcerias com outras instituições, e o mais importante, a formação de recursos humanos nesta área promissora. Provavelmente, o melhor exemplo referente à diversidade de sua abrangência, seja o que está ocorrendo no centro de pesquisas Helmholtz Zentrum Berlim – HZB, cuja fonte de nêutrons é um reator nuclear, e que possui atualmente um dos cinco equipamentos para imageamento com nêutrons mais bem construídos que existe, no qual são desenvolvidas as pesquisas mencionadas acima. Com a previsão de seu fechamento previsto para 2019, o conhecimento adquirido será empregado na implementação de um novo equipamento para imageamento com nêutrons a ser instalado no novo European Spallation Source – ESS [42].

### 4.4 - Conclusão

De uma forma bem resumida, acreditamos que o presente trabalho atingiu seu principal objetivo que foi o de projetar, construir e tornar operacional um equipamento competitivo para tomografia com nêutrons instalado no reator nuclear de pesquisas IEA-R1 do IPEN-CNEN/SP. A sua implantação disponibiliza uma nova ferramenta para a inspeção de diversos tipos de objetos, principalmente os ricos em Hidrogênio, pois pode, em alguns casos, fornecer uma visão da sua estrutura interna com uma riqueza de detalhes jamais conseguida por métodos de imageamento bidimensional. Este fato abre diversas perspectivas referentes a novas linhas de pesquisa, e estabelece as condições para parcerias com outras instituições de pesquisa.

Pode-se ainda destacar o seguinte

- este equipamento é uma versão otimizada do anterior instalado no BH08.

- houve uma redução de um fator 50 na dose de nêutrons na posição da câmera de vídeo. Somente 12 pixels são danificados por tomografia o que garante centenas de tomografias com imagens de mesma qualidade [53].

- o tempo gasto para obter uma tomografia é muito pequeno, somente 400 s. Comparável aos dos mais importantes equipamentos para tomografia com nêutrons.

- a resolução espacial foi otimizada: 347 μm para 205 μm. Esse valor é ainda ruim se comparado com o dos melhores equipamentos. Embora existam alternativas para melhorá-lo, elas devem ser cuidadosamente consideradas, uma vez que levam ao aumento no tempo de irradiação e consequentemente, a um maior número de danos no CCD da câmera.

- as imagens obtidas demonstram o potencial do equipamento e da técnica para investigar a estrutura interna de objetos.

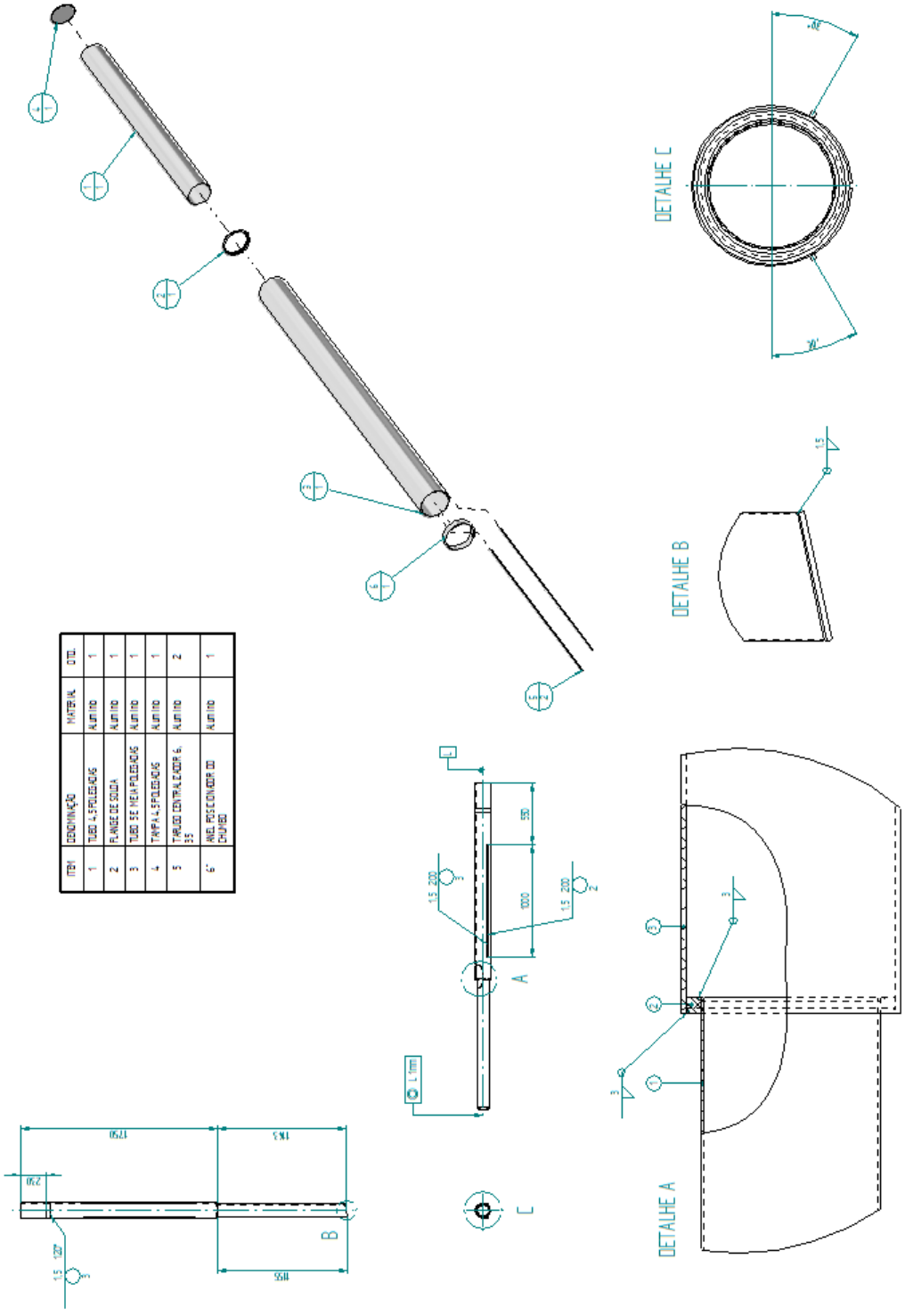
## Anexos

Anexo A – Imagens do projeto - detalhes dimensionais do Tubo Colimador

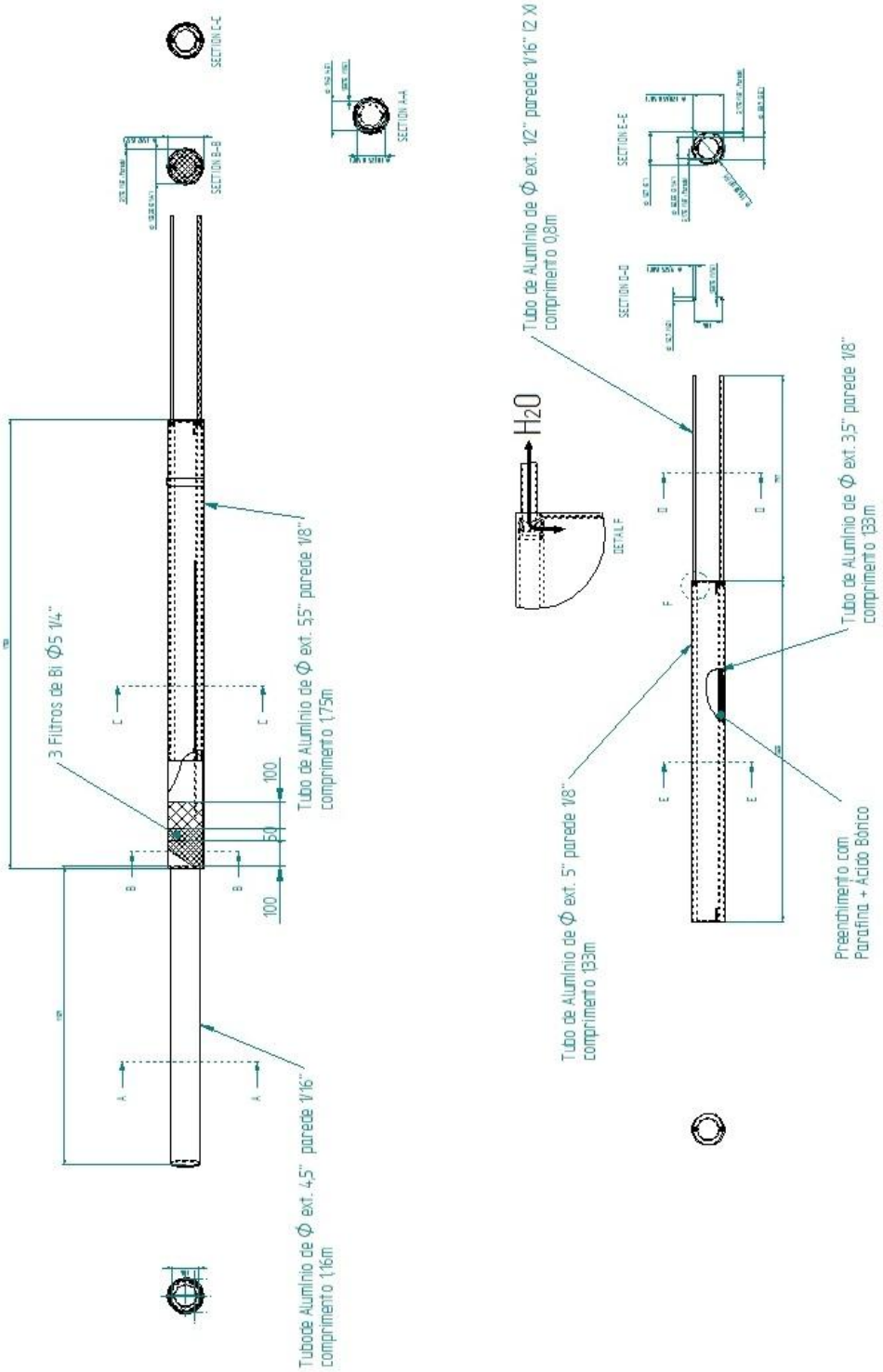
Anexo B – Imagens do projeto - detalhes dimensionais do Colimador de nêutrons

Anexo C – Imagens do projeto - vista explodida do conjunto Mesa Giratória

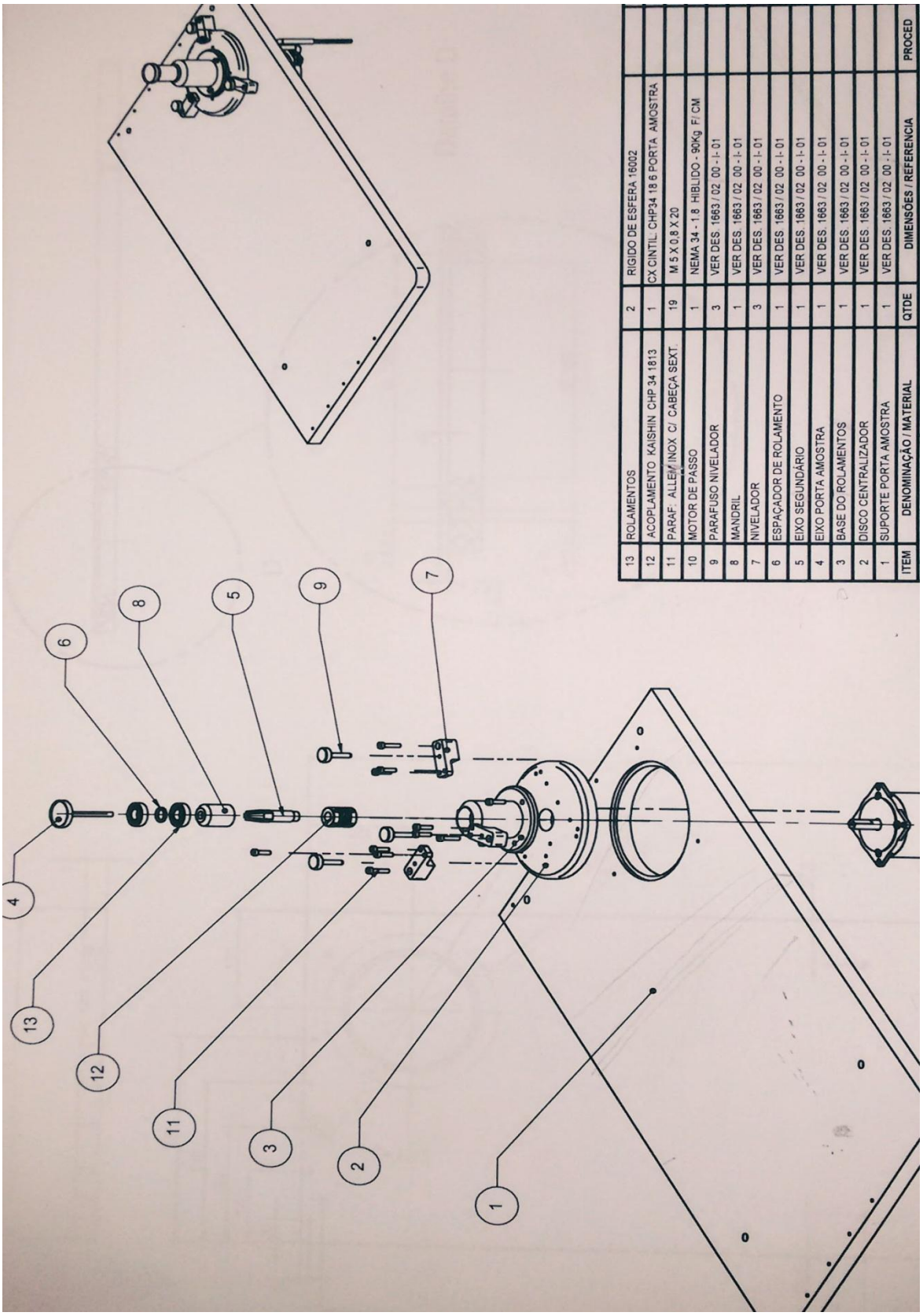
## Anexo A – Detalhes dimensionais do Conjunto Colimador



## Anexo B – Detalhes dimensionais do Tubo Colimador



## Anexo C – Vista explodida do conjunto Mesa Giratória



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS


[1] H. BERGER, ***Advances in neutron radiographic techniques and applications: A method for nondestructive testing***, *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 61, nº 4, p. 437–442, 2004.

[2] M. R. HAWKESWORTH, ***Neutron radiography. Equipment and methods***, 1977.

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

[4] P. VONTOBEL, E. H. LEHMANN, R. HASSANEIN, E G. FREI, ***Neutron tomography: Method and applications***, *Phys. B Condens. Matter*, vol. 385–386 I, p. 475–480, 2006.

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

[6] **"Neutron imaging – past, present and future - News and media - The NMI3 information portal."** [Online]. Available at: http://nmi3.eu/news-and-media/neutron-imaging-past-present-and-future.html. [Acessado: 05-dez-2015].

[7] N. KARDJILOV, I. MANKE, M. STROBL, A. HILGER, W. TREIMER, M. MEISSNER, T. KRIST, E J. BANHART, **"Three-dimensional imaging of magnetic fields with polarized neutrons"**, *Nat. Phys.*, vol. 4, nº 5, p. 399–403, mar. 2008.

[8] F. PFEIFFER, C. GRÜNZWEIG, O. BUNK, G. FREI, E. LEHMANN, E C. DAVID, **"Neutron phase imaging and tomography."**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 96, nº 21, p. 215505, jun. 2006.

[9] N. KARDJILOV, E. LEHMANN, E. STEICHELE, E P. VONTOBEL, **"Phase-**

**contrast radiography with a polychromatic neutron beam"**, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 527, nº 3, p. 519–530, jul. 2004.

[10] M. A. S. PEREIRA, J. MARQUES, J. SANTOS, C. BURBIDGE, M. DIAS, E M. PRUDÊNCIO, **"Neutron Imaging Techniques Applied To Studies In The Archaeological And Cultural Heritage Fields"**, *Mediterr. Archaeol. Archaeom.*, 2013.

[11] J. RANT, Z. MILIC, J. ISTENIC, T. KNIFIC, I. LENGAR, E A. RANT, **"Neutron radiography examination of objects belonging to the cultural heritage."**, *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 64, nº 1, p. 7–12, jan. 2006.

[12] B. SCHILLINGER, W. BLÜMLHUBER, A. FENT, E M. WEGNER, **"3D neutron tomography:: recent developments and first steps towards reverse engineering"**, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 424, nº 1, p. 58–65, 1999.

[13] N. KARDJILOV, A. HILGER, I. MANKE, M. STROBL, W. TREIMER, E J. BANHART, **"Industrial applications at the new cold neutron radiography and tomography facility of the HMI"**, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 542, nº 1–3, p. 16–21, 2005.

[14] E. H. LEHMANN, G. FREI, P. VONTOBEL, L. JOSIC, N. KARDJILOV, A. HILGER, W. KOCKELMANN, E A. STEUWER, **"The energy-selective option in neutron imaging"**, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 603, nº 3, p. 429–438, maio 2009.

[15] N. KARDJILOV, B. SCHILLINGER, E E. STEICHELE, **"Energy-selective neutron radiography and tomography at FRM."**, *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 61, nº 4, p. 455–60, 2004.

[16] N. KARDJILOV, I. MANKE, A. HILGER, M. STROBL, E J. BANHART, **"Neutron imaging in materials science"**, *Materials Today*, vol. 14, nº 6. p. 248–256, 2011.

[17] B. WINKLER, **“Applications of Neutron Radiography and Neutron Tomography”**, *Rev. Mineral. Geochemistry*, vol. 63, nº 1, p. 459–471, jan. 2006.

[18] M. PRUDÊNCIO, S. PEREIRA, E J. MARQUES, **“Neutron tomography for the assessment of consolidant impregnation efficiency in Portuguese glazed tiles (16th and 18th centuries)”**, *J. Archaeol. Sci.*, vol. 39, nº 4, p. 964–969, 2012.

[19] B. SCHILLINGER, **“ANTARES - State of the Art Neutron Imaging Instrument and Cultural Heritage applications”**, 2014.

[20] F. SALVEMINI E F. GRAZZI, **“Non-invasive characterization through X-ray fluorescence and neutron radiography of an ancient Japanese lacquer”**, *Archaeol. …*, 2013.

[21] D. S. HUSSEY, D. SPERNJAK, A. Z. WEBER, R. MUKUNDAN, J. FAIRWEATHER, E. L. BROSHA, J. DAVEY, J. S. SPENDELOW, D. L. JACOBSON, E R. L. BORUP, **“Accurate measurement of the through-plane water content of proton-exchange membranes using neutron radiography”**, *J. Appl. Phys.*, vol. 112, nº 10, p. 104906, nov. 2012.

[22] IAEA, **“Neutron Imaging: A Non-Destructive Tool for Materials Testing.”** [Online]. Available at: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1604_web.pdf. [Acessado: 07-dez-2015].

[23] E. H. LEHMANN, P. VONTOBEL, G. FREI, G. KUEHNE, E A. KAESTNER, **“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.*, vol. 651, nº 1, p. 1–5, set. 2011.

[24] H. HARDT, P., VON DER ROETTGER, ***Neutron Radiography Handbook: Nuclear Science and Technology***. Springer, 1981.

[25] M. O. DE. MENEZES, PUGLIESI, REYNALDO, **“Radiografia com nêutrons em**

**tempo-real.”**. 2000. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

[26] M. L. A. GARCIA, **“Radiografia com Elétrons Induzida por Nêutrons”**, 2008. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

[27] M. A. STANOJEV PEREIRA, **“Radiografia com partículas alfa induzida por nêutrons”**, 2008. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

[28] R. PUGLIESI, F. PUGLIESI, E M. A. STANOJEV PEREIRA, **“Comparison of Digital Imaging Systems for Neutron Radiography”**, *Brazilian J. Phys.*, vol. 41, nº 2–3, p. 123–128, abr. 2011.

[29] R. PUGLIESI, L. . GERALDO, M. L. . ANDRADE, M. A. . PEREIRA, E M. J. . MAIZATO, **“Inspection of an artificial heart by the neutron radiography technique”**, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 424, nº 1, p. 248–251, nov. 1999.

[30] R. PUGLIESI E M. A. STANOJEV PEREIRA, **“Study of the neutron radiography characteristics for the solid state nuclear track detector Makrofol-DE”**, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 484, nº 1–3, p. 613–618, maio 2002.

[31] R. PUGLIESI, M. A. S. PEREIRA, M. A. P. V. DE MORAES, E M. O. DE MENEZES, **“Characteristics of the solid state nuclear detector CR-39 for neutron radiography purposes”**, *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 50, nº 2, p. 375–380, fev. 1999.

[32] M. A. STANOJEV PEREIRA, R. PUGLIESI, E F. PUGLIESI, **“Neutron induced alpha radiography”**, *Radiat. Meas.*, vol. 43, nº 7, p. 1226–1230, ago. 2008.

[33] R. M. SCHOUERI, C. DOMIENIKAN, F. DE TOLEDO, M. L. G. ANDRADE, M. A. STANOJEV PEREIRA, E R. PUGLIESI, **“The new facility for neutron tomography of IPEN-CNEN/SP and its potential to investigate hydrogenous**

**substances”**, *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 84, p. 22–26, 2014.

[34] M. P. M. ASSUNÇÃO, R. PUGLIESI, E M. O. DE MENEZES, **“Study of the neutron radiography characteristics for the solid state nuclear track detector Makrofol-E”**, *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 45, n$^{o}$ 8, p. 851–855, ago. 1994.

[35] J. CHADWICK, **“The Existence of a Neutron”**, *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 136, n$^{o}$ 830, p. 692–708, jun. 1932.

[36] L. F. CURTISS, ***Introduction to NEUTRON PHYSICS***. Massachusetts: Boston Technical Publishers, Inc, 1965.

[37] L. V. GUREVICH, I.I. & TARASOV, ***Low-Energy Neutron Physics***. Amsterdan, North dHollan, 1968.

[38] P. BRYANT, L.E. & MCENTIRE, **“Radiography and radiation testing”**, *Am. Soc. Nondestruct. Test. (Nondestructive Test. Handbook)*, n$^{o}$ 2nd edition, 1985.

[39] C. O. FISCHER, **“The history of the first radiographs in Berlin”**, in *Fourth World Conference on Neutron Radiography*, p. 3–10.

[40] H. BERGER, **“Neutron Radiography – A state of art report”**, *NTIAC–SR–98–01. NASA (Center Aerosp. Information)*.

[41] Media Cybernetics, **“image pro plus 7.0.”** .

[42] **“ESS - The Multi-Purpose Imaging beamline.”** [Online]. Available at: https://europeanspallationsource.se/imaging

[43] N. KARDJILOV, A. HILGER, I. MANKE, M. STROBL, M. DAWSON, S. WILLIAMS, E J. BANHART, **“Neutron tomography instrument CONRAD at HZB”**, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 651, n$^{o}$ 1, p. 47–52, 2011.

[44] L. R. MURRAY, ***Nuclear reactor physics***. N.J.: Prentice-Hall Inc., 1957.

[45] J. BANHART, N. KARDJILOV, I. MANKE, A. HILGER, M. DAWSON, E T.

KANDEMIR, “**Neutron Tomography** In: Second Australian Tomography Workshop”, 2008.

[46] S. KOERNER, E. LEHMANN, E P. VONTOBEL, **“Design and optimization of a CCD-neutron radiography detector”**, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 454, nº 1, p. 158–164, nov. 2000.

[47] Kodak, **“Kodak image sensors, Users Manual”**, nº Ccd, 2008.

[48] V. Graphics, **“VG Studio Max.”** Heidelberg; Alemanha.

[49] Octopus, “Octopus 8.6.” 2011.

[50] K. CASTLEMAN, ***Digital Image Processing***, 1st ed. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

[51] STEVE SEITZ, **“From Images to Voxels.”** Washington, 2000.

[52] “IAEA Neutron imaging: **A Non-destructive Tool for Materials Testing**. IAEA–TECDOC, 2008–1064”, 2008.

[53] R. PUGLIESI, M. L. G. ANDRADE, M. S. DIAS, P. T. D. SIQUEIRA, E M. A. S. PEREIRA, “Study of pixel damages in CCD cameras irradiated at the neutron tomography facility of IPEN-CNEN/SP”, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 804, p. 59–63, 2015.

[54] N. BASSLER, **“Radiation damage in charge-coupled devices.”**, *Radiat. Environ. Biophys.*, vol. 49, nº 3, p. 373–8, ago. 2010.

[55] G. LINDSTRÖM, **“Radiation damage in silicon detectors”**, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. …*, 2003.

[56] R. . SEMMLER, **"Montagem e calibração de um novo arranjo experimental para a produção e utilização de radiação gama de captura de nêutrons térmicos"**.,1993. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

[57] A. L. WADE, J.R., A.L. HOWARD, **“Experiments at Argonne National Laboratory. Nuclear Technology”**, *Nucl. Technol.*, vol. 76, n° 3, p. 408–419, 1987.

[58] A A HARMS E A ZEILINGER, **“A new formulation of total unsharpness in radiography.”**, *Phys. Med. Biol.*, vol. 22, n° 1, p. 70–80, 1977.

[59] M. WROBEL E L. GREIM, "**Resolution functions and unsharpness in neutron radiography"**, GKKS/e/12 ed. Geesthacht, Germany: GKKS, 1988.

[60] R. PUGLIESI E E. LEHMANN, **“Neutron-induced electron radiography using an imaging plate.”**, *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 62, n° 3, p. 457–60, mar. 2005.

[61] **“Perspex acrylic sheets - cast acrylic, extruded acrylic, made in the UK - Perspex.”** [Online]. Available at: http://www.perspex.co.uk/products/perspex-cast-acrylic-(1)/perspex-cast-acrylic/. [Acessado: 14-dez-2015].

[62] M. O. DE. MENEZES, **“Desenvolvimento E Aplicação Da Técnica Da Radiografia Com Nêutrons Por Conversão Direta E Indireta”**, 1994. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

[63] M. L. G. ANDRADE, **“Caracterização de Sistemas Filme-Conversor para Radiografia com Nêutrons”**, 2002. Dissertação (Mestrado). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

[64] C. S. MUNITA, P. M. S. OLIVEIRA, R. G. TOYOTA, E. G. NEVES, C. C. DEMARTINI, E D. P. SCHAAN, **“Chemical Characterization of Marajoara Pottery”**, STI/PUB/1501 Companion CD - IAEA Radiation Technology Series No. 2. 2011.

[65] P. ATKINS, ***Chemical Principles****, 5th Edition as Edited by David Laude of University of Texas*. W H FREEMAN & Company, 2010.

[66] IAEA, **“IAEA-TECDOC-628/Rev. 3”**, 2014.

[67] **“Microchemicals GmbH.”** Ulm, Alemanha.

[68] J. S. BRENIZER, H. BERGER, C. T. STEBBINGS, E G. T. GILLIES, **“Performance characteristics of scintillators for use in an electronic neutron imaging system for neutron radiography”**, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 68, n$^{o}$ 9, p. 3371, 1997.

[69] A. GRIESCHE, E. DABAH, T. KANNENGIESSER, N. KARDJILOV, A. HILGER, E I. MANKE, **“Three-dimensional imaging of hydrogen blister in iron with neutron tomography”**, *Acta Mater.*, vol. 78, p. 14–22, 2014.