

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR

CNEN/SP

NEUTRONGRAFIA NO REATOR IEA-R1

Rinaldo Fuga

NEUTRONGRAFIA NO REATOR IEA-R1

Rinaldo Fuga

DEPARTAMENTO DE REATORES E CIRCUITOS EXPERIMENTAIS
RE/REN

CNEN/SP
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
SÃO PAULO - BRASIL

Série INFORMAÇÃO IPEN

INIS Categories and Descriptors

E17

IEAR-1 REACTOR
NEUTRON RADIOGRAPHY

Recebida em abril de 1983.

Aprovada para publicação em outubro de 1983.

Nota: A redação, ortografia, conceitos e revisão final são de responsabilidade do Autor.

NEUTRONGRAFIA NO REATOR IEA-R1

Rinaldo Fuga

RESUMO

Neutronografia no reator IEA-R1, utiliza feixe colimado de nêutrons térmicos vindo diretamente do caroço do reator.

Utiliza-se para a execução de um ensaio neutronográfico, um aparelho constituído por um colimador cônico de nêutrons com uma razão de colimação de 1/250, uma redoma destinada a colocar o objeto a ser ensaiado e por último, um cassete de irradiação com a finalidade de posicionar a chapa conversora de nêutrons, a qual tem a função de registrar a imagem latente do objeto ensaiado.

Neste trabalho, descreve-se em partes, o aparelho em uso e alguns dos resultados obtidos a título de exemplo.

Apresenta-se uma lista não limitativa das potencialidades da técnica.

INTRODUÇÃO

A neutronografia é um tipo de ensaio não destrutivo que utiliza nêutrons vindos de uma fonte que pode ser um reator nuclear, acelerador de partículas ou uma fonte radioativa de nêutrons.

A técnica neutronográfica^(1,5) é em princípio, bastante semelhante às técnicas clássicas de gamagrafia e radiografia-X, isto é, ao invés de um feixe de raios-X ou gamas, utiliza-se feixe de nêutrons. No entanto, a neutronografia possui um estágio a mais no processo, em relação as outras técnicas, que é o da conversão do nêutron em radiação ionizante, uma vez que o nêutron por si só não é capaz de sensibilizar diretamente um filme radiográfico comum.

Faz-se a conversão do nêutron em radiação ionizante mediante o uso de um material que possua certas características apropriadas, tais como, alta seção de choque de ativação, laminação relativamente fácil, menor reatividade possível com o ar ou água e disponibilidade no mercado. Material com essas características é dito conversor de nêutron.

Utilizam-se, basicamente, dois métodos de neutronografia. São eles os métodos direto e indireto.

No primeiro caso, o objeto, chapa conversora e filme radiográfico estão, nesta ordem e simultaneamente, expostos à radiação neutrônica. No segundo caso, o filme não se encontra presente durante a irradiação. Nesta condição, a chapa conversora registra a imagem do objeto e após finda a irradiação, ela é colocada sobre o filme radiográfico num local distante. Evidentemente, neste método indireto, além das características do conversor mencionadas anteriormente, deve-se adicionar a de manter o conversor com a imagem latente, por um período que não seja tão curto, para que a transferência do conversor do local de irradiação para o local de exposição do filme seja possível e que não seja tão longo, para que a chapa possa ser reutilizada. O método indireto apresenta vantagens e desvantagens com relação ao método direto. Uma vantagem significativa é a de evitar a influência das radiações ionizantes vindas da fonte neutrônica, que sensibilizariam o filme criando um componente indesejável. Este fato torna-se ainda mais relevante quando o objeto é radioativo, como é o caso, por exemplo, dos elementos combustíveis

já utilizados no reator. A desvantagem do método indireto reside no fato que em baixos fluxos neutrônicos, a ativação do conversor não é suficiente para impressionar o filme radiográfico.

1 – DESCRIÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO APARELHO

1.1 – Descrição do Aparelho

O aparelho neutrongráfico Figura 1.1, constitui-se, basicamente, por três partes essenciais e uma parte acessória.

1.1.1 – Colimador

1.1.2 – Redoma ou Câmara do Objeto

1.1.3 – Cassete de Irradiação

1.1.4 – Acessórios

1.1.1 – Colimador⁽²⁾

O colimador é uma estrutura com o formato de uma pirâmide retangular, truncada e oca, composta de um invólucro externo de chapas de alumínio, revestidos internamente por chapas de boral (liga especial de alumínio e carbeto de boro). O eixo deste colimador está sempre na horizontal.

A base dessa pirâmide consiste em uma chapa fina (5 mm), de alumínio polido, de espessura uniforme, destinada a selar o colimador e ao mesmo tempo permitir a passagem, sem perturbação, do feixe neutrônico.

A outra extremidade da pirâmide liga-se, por meio de soldagem, a um cone pequeno e oco de alumínio, denominado "nariz do colimador", que está revestido internamente de chapas de disprósio, índio, ouro, gadolínio e cádmio. O vértice deste pequeno cone foi truncado e substituído por um pequeno cilindro oco de alumínio de diâmetro igual a 8 mm para possibilitar a entrada do feixe neutrônico do colimador. Desta forma, essa abertura do cone funciona como uma fonte neutrônica puntual. Os nêutrons térmicos e epitérmicos que atingem o "nariz" do colimador, exceto pela abertura, são, quase na sua totalidade, absorvidos pelas telas dos diferentes materiais usados no revestimento interno do "nariz".

Preenche-se este colimador com um gás que apresenta baixa secção de choque microscópica total, a fim de evitar absorção ou espalhamento do feixe de nêutrons. Mantém-se a pressão deste gás igual à da coluna d'água que atua sobre as paredes externas do colimador. Este procedimento evita uma pressão excessiva sobre as paredes laterais do colimador e, especialmente, sobre a chapa fina de sua base.

Compensa-se a variação da pressão sobre o colimador, causada pela variação da temperatura da água da piscina ou pela variação do seu nível, por meio de dois tubos na forma de sifão, solidários ao aparelho neutrongráfico e se comunicando internamente com o colimador.

Faz-se a alimentação eventual do gás ou ar no colimador, por intermédio de uma haste munida de um tubo com um dispositivo que encaixa num orifício do colimador, e que após a injeção do ar ou gás é removido. Executa-se normalmente este procedimento a cada mês, para compensar as variações máximas de temperatura e nível de água ocorridas nesse período.

Na base do colimador, onde se localiza a chapa fina de alumínio, há um reforço na forma de bainha a fim de proteger tal chapa e servir como suporte de apoio para encaixe da redoma.

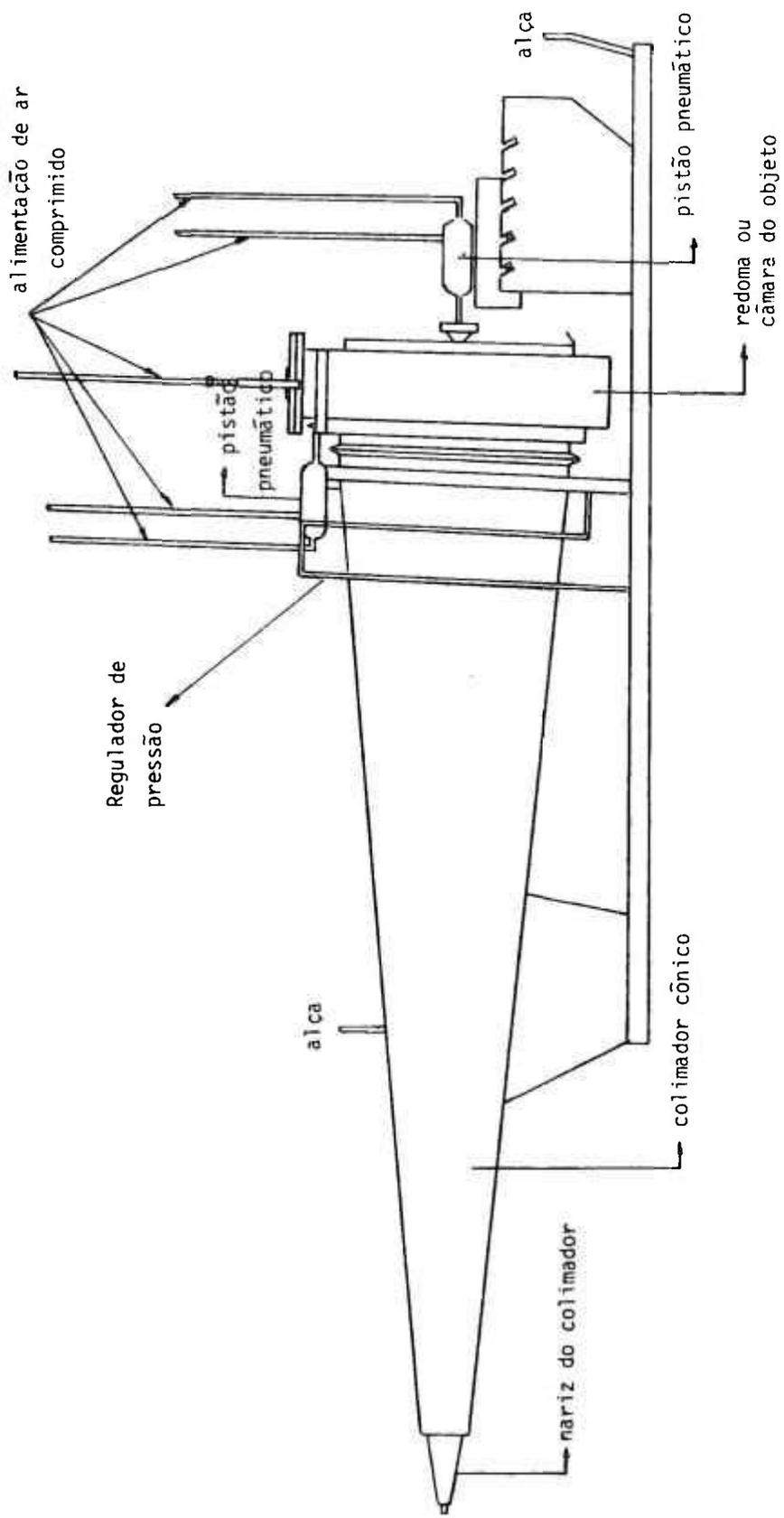


Figura 1.1 — Aparelho Neutronográfico Submerso do IEA-R1.

1.1.2 – Redoma ou Câmara do Objeto

A redoma Figura 1.2 é uma estrutura de forma paralelepipedal oca, aberta nas duas extremidades, formando assim uma espécie de segmento de tubo de secção reta quadrangular. As paredes desta estrutura compõem-se de chapas de alumínio e somente nas duas faces laterais há recobrimento interno com boral.

A parte superior desta redoma possui um reforço que se destina a funcionar como base para três tipos diferentes de cabeçotes, cada qual com uma função que será explicada posteriormente.

A parte inferior da redoma é totalmente aberta, a fim de possibilitar a expulsão de toda água da câmara, no instante da execução da neutrongrafia.

Faz-se a injeção e regulagem do ar, na redoma, mediante a utilização de dois orifícios existentes nas partes superior e inferior. Tais orifícios comunicam-se com o quadro de comando, por intermédio de tubos de polietileno.

Fixa-se o objeto na redoma, mediante o uso de um “macaco” pneumático, também ligado à de comando por tubos de polietileno.

Coloca-se ou remove-se a redoma do seu posicionamento exato, por intermédio de guias localizadas no reforço da base do colimador.

Conforme mencionou-se anteriormente, a redoma dispõe de 3 cabeçotes substituíveis, que são:

1.1.2.1 – Cabeçote “Diábolo”

1.1.2.2 – Cabeçote “Tampa”

1.1.2.3 – Cabeçote “A gelo”

1.1.2.1 – Cabeçote “Diábolo”

Este dispositivo Figura 1.3 compõe-se, basicamente, de um segmento de tubo circular de alumínio, revestido internamente por uma cobertura de borracha substituível. Essa borracha forma uma espécie de diafragma que pode contrair-se ou expandir-se por meio de alimentação de ar comprimido, vindo da mesa de comando, permitindo assim variação no diâmetro efetivo do segmento tubular.

Este procedimento possibilita a perfeita vedação da parte superior da redoma.

Utiliza-se este tipo de cabeçote quando deseja-se neutrongrafar peças cilíndricas de comprimento até 2 metros, e diâmetros desde 5 milímetros até 50 milímetros.

Este sistema possui um indicador de sinal de segurança, formado por um pequeno tubo de borracha fina, que funciona como um teleindicador da pressão diferencial, visto que o conjunto fica submerso a uma profundidade de, aproximadamente, 8 metros na piscina do reator.

1.1.2.2 – Cabeçote “Tampa”

Este dispositivo Figura 1.4 é o mais simples de todos e com a sua utilização pode-se executar grande parte dos ensaios neutrongráficos. Ele foi projetado e construído no IPEN e adaptado à redoma.

A vedação entre a redoma e esta tampa é feita com auxílio de “O” ring de borracha.

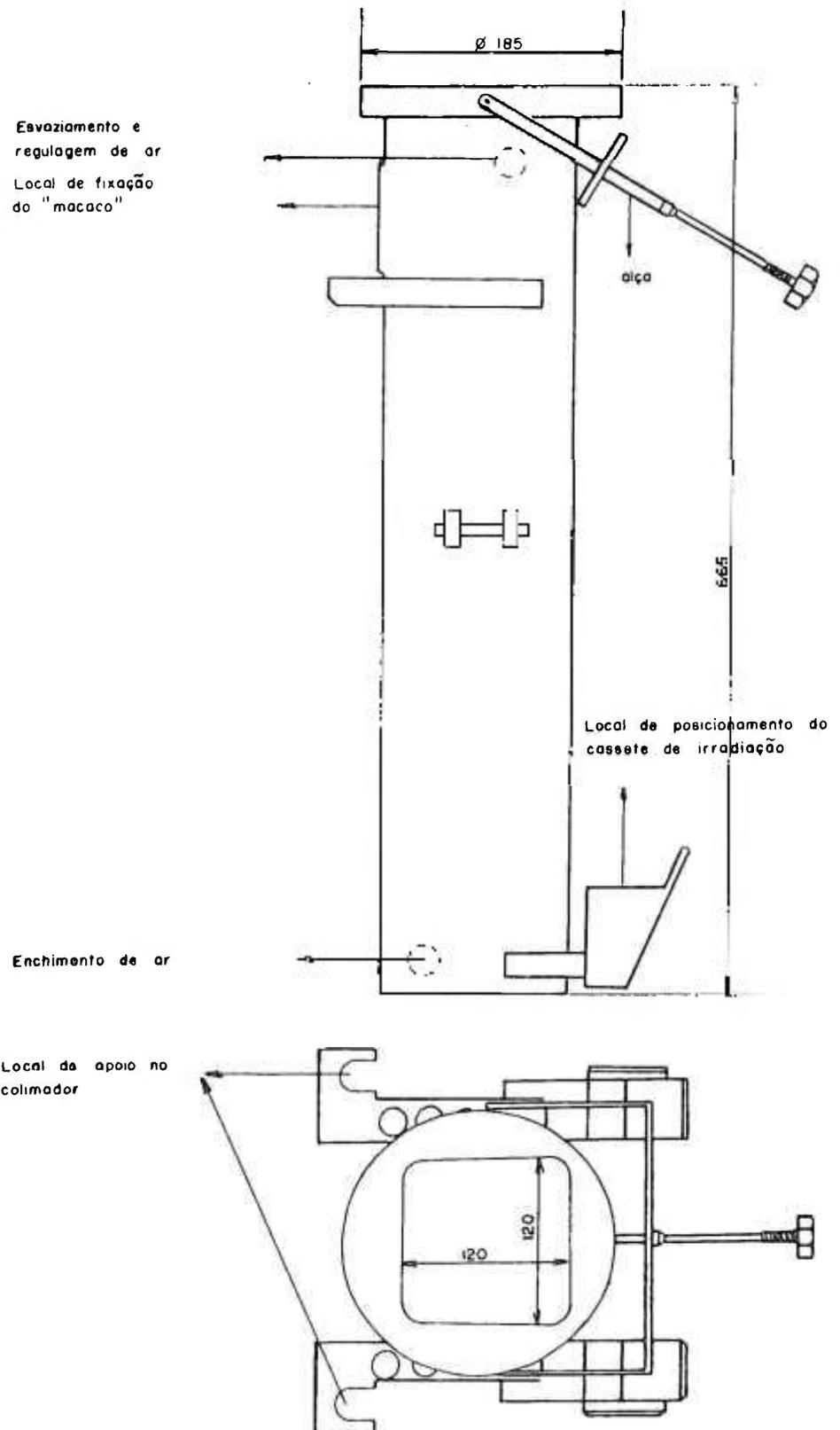


Figura 1.2 -- Redoma ou Câmara do Objeto (Dimensões em mm).

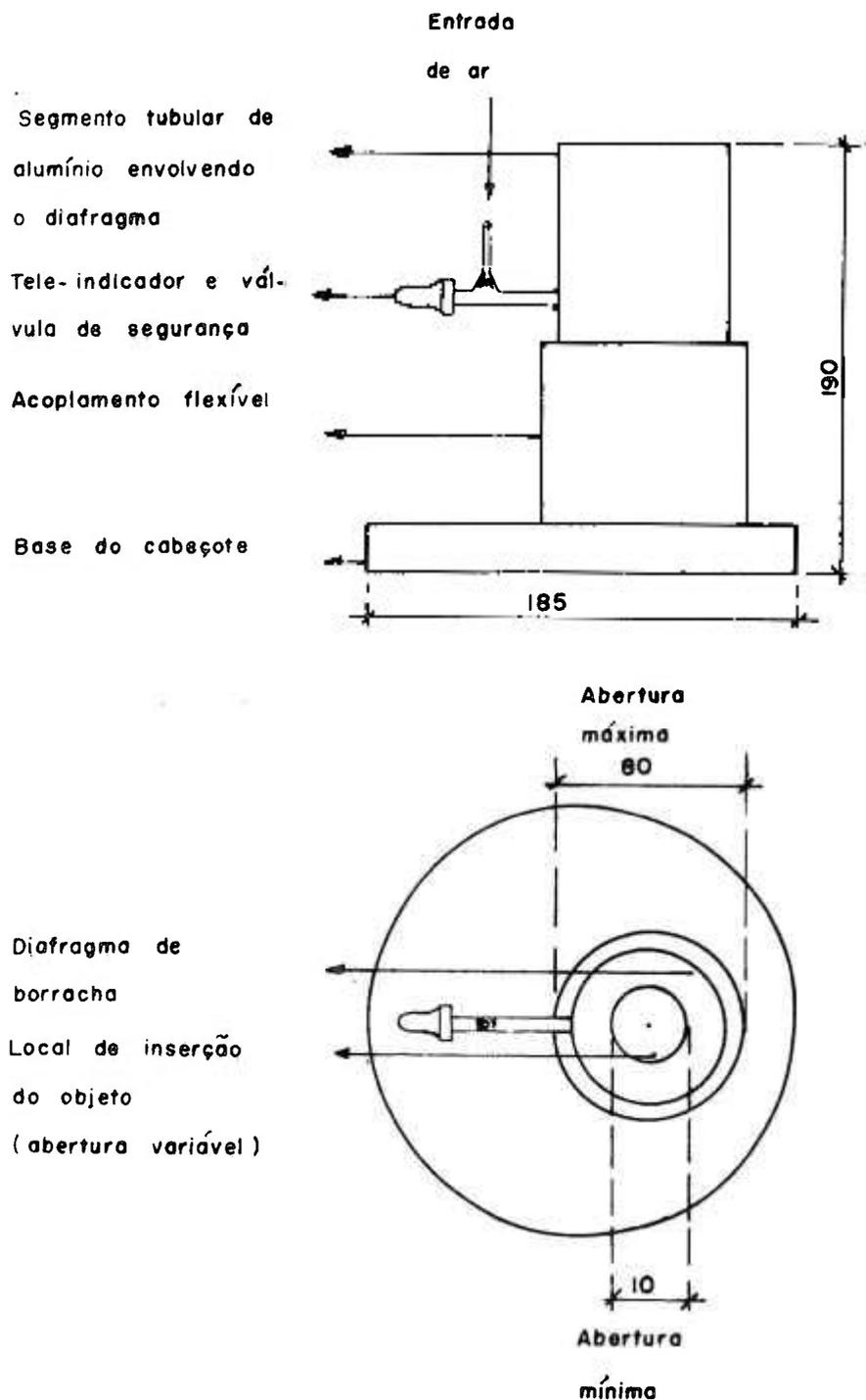


Figura 1.3 – Cabeçote "Diábolo" (Dimensões em mm).

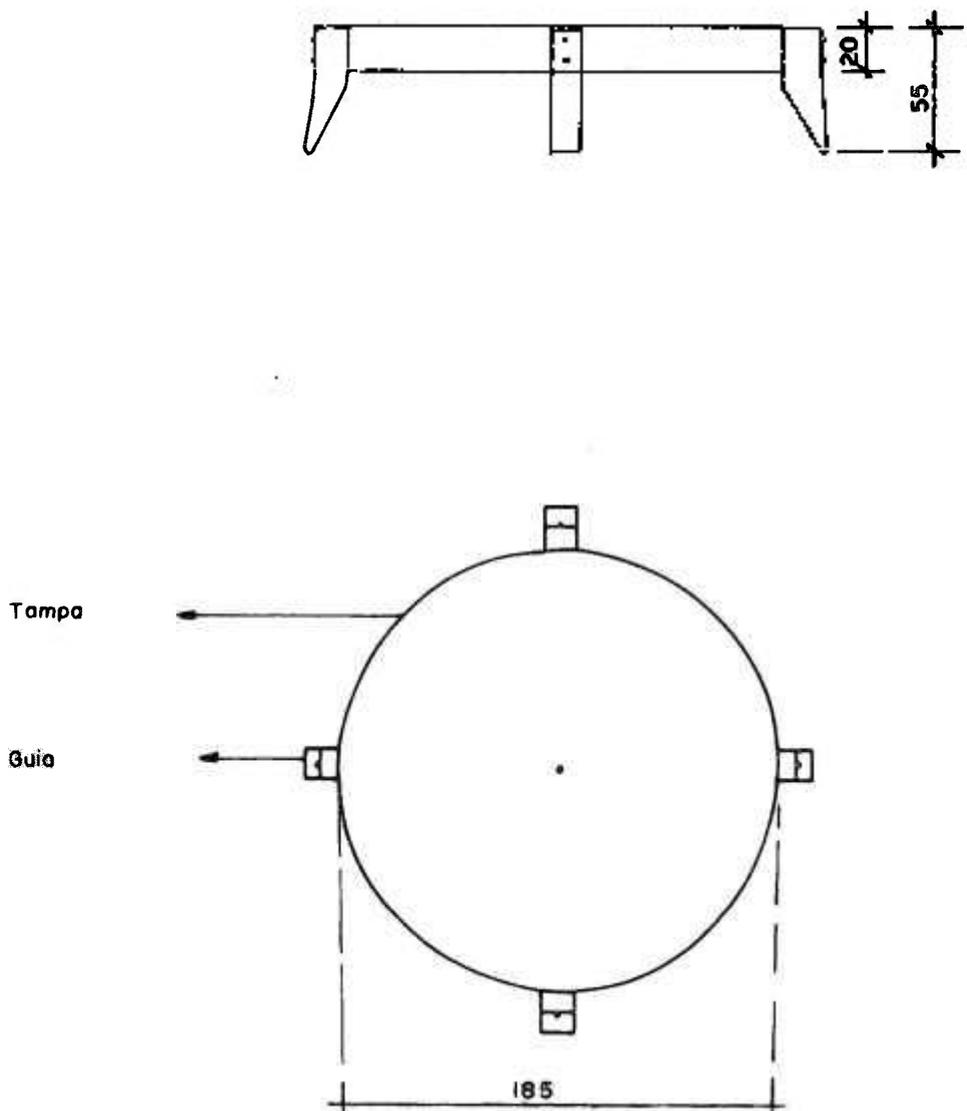


Figura 1.4 – Cabeçote "Tampa" (Dimensões em mm).

Posiciona-se a tampa manualmente, e a distância, por intermédio de guias localizadas na mesma.

Matém-se esta tampa sob pressão, contra a redoma, por meio de um parafuso localizado na alça móvel que se encontra presa às laterais da redoma.

Com este tipo de cabeçote, podem-se executar neutrongrafias de peças e objetos pequenos que não devem molhar-se ou umedecer-se.

1.1.2.3 – Cabeçote “A Gelo”

Este sistema Figura 1.5 é o mais complexo de todos e utiliza-se somente em casos muito especiais. Sua geometria se assemelha a um toróide. O invólucro externo é de aço inoxidável e internamente compõe-se de metais dispostos de forma a criar um gradiente de temperatura para formar gelo somente em regiões desejadas do toróide. Proceda-se ao resfriamento mediante o uso de nitrogênio líquido que vem de um reservatório sob pressão, através de um tubo de aço inoxidável revestido externamente por um isolante térmico. Mantém-se o nível de nitrogênio líquido dentro do toróide, com um medidor eletrônico de nível que aciona, em função de tal nível, uma válvula do recipiente pressurizado, permitindo assim a passagem ou não do nitrogênio líquido. Este tipo de cabeçote presta-se para executar ensaios em peças de secção reta não circular e razoavelmente longas.

1.1.3 – Cassete de Irradiação ou de Transferência

O cassete de irradiação, ou mais comumente chamado de cassete de transferência, é um dispositivo onde se coloca a chapa conversora e que a transporta até o local exposto ao feixe neutrônico. Após a irradiação com nêutrons, transfere-se a chapa conversora para um outro cassete (de Exposição) com auxílio de um dispositivo que será descrito posteriormente.

Utiliza-se de um “macaco” pneumático, idêntico ao utilizado para fixar o objeto dentro da redoma, para posicionar e manter o cassete de irradiação em contacto com a superfície externa da redoma.

1.1.4 – Acessórios

1.1.4.1 – Dispositivo Giratório de Transferência

Em local externo à piscina do reator há um dispositivo girante, por meio do qual se faz a transferência da chapa conversora, do cassete de irradiação para o cassete de exposição.

1.1.4.2 – Cassete de Exposição

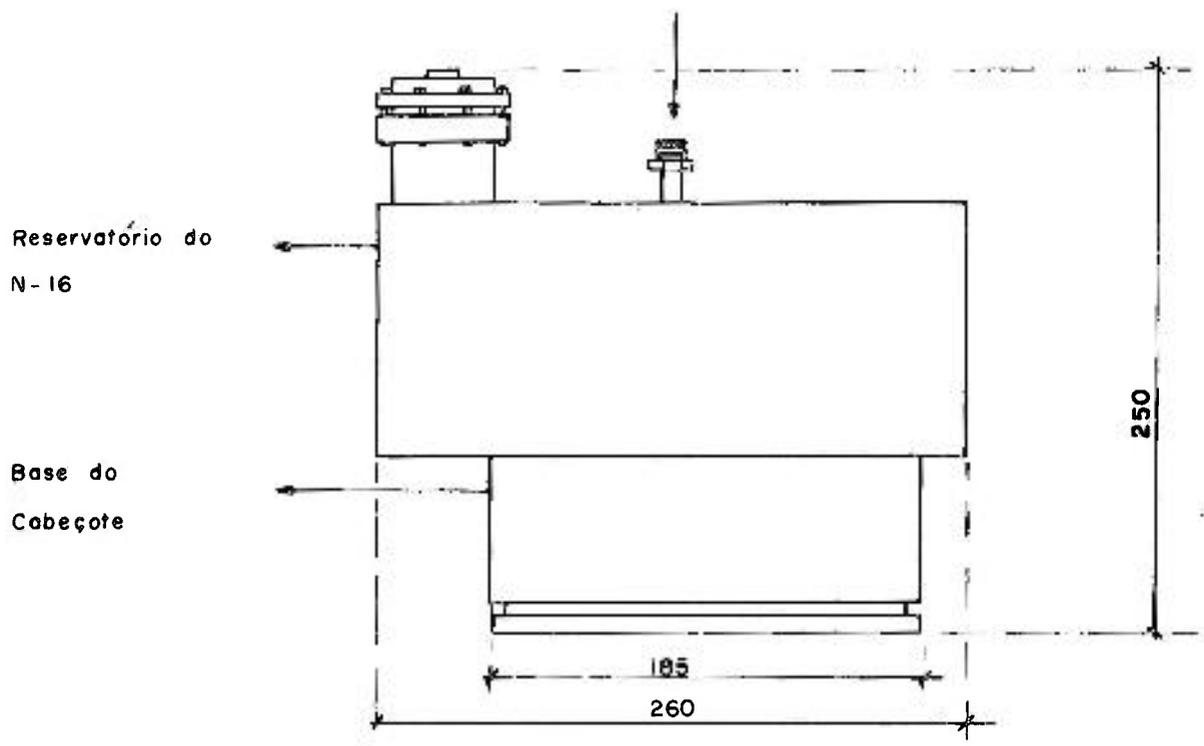
O cassete de exposição é um dispositivo de alumínio, com blindagem de chumbo, que recebe a chapa conversora do cassete de irradiação e a mantém em contacto direto com o filme radiográfico. Este cassete possui um sistema de travas, selamento e alavanca, com o objetivo de impedir entrada de luz e assegurar o máximo contacto do filme com o conversor.

A blindagem é para impedir que o operador esteja exposto à radiação durante o transporte do cassete.

1.1.4.3 – Quadro de Comando

Este quadro tem as funções de comandar os movimentos dos macacos, enviar ar comprimido à redoma e indicar e regular as pressões nesses componentes.

Medidor de Nível do Nitrogênio



Entrada do N-16 líquido

Saída do N-16 gasoso

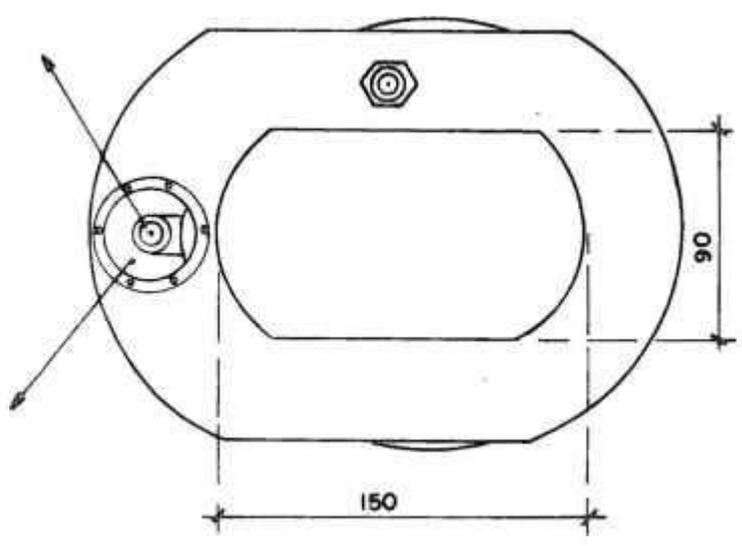


Figura 1.5 – Cabeçote "A Gelo" (Dimensões em mm).

1.2 – Localização do Aparelho

Dispõe-se, na piscina do reator, de duas pontes móveis que podem percorrer toda a extensão da piscina. Uma dessas pontes localizadas na parte semi-circular do tanque e sustenta uma treliça de alumínio que por sua vez mantém uma placa matriz onde está montado o caroço do reator. Este conjunto também funciona como suporte das barras de controle e segurança do reator, bem como de seus mecanismos de acionamento e detectores de radiação.

A outra ponte é semelhante à primeira, mas possui capacidade de carga reduzida.

Projetou-se esta segunda ponte a fim de permitir a execução de experiência junto ao reator entre elas a neutrongrafia.

Construiu-se uma treliça em alumínio, com dimensões próximas à do reator, e fixou-se nesta ponte. Na base da treliça montou-se um dispositivo neutrongráfico, de tal forma que o “nariz do colimador” ficasse à meia altura dos elementos combustíveis.

Nos parapeitos da plataforma da ponte, localizam-se os quadros de comando e o dispositivo (giratório) de transferência de chapa conversora.

2 – MONTAGEM E PROCEDIMENTO DE UM ENSAIO NEUTRONGRÁFICO UTILIZANDO O DISPOSITIVO SUBMERSO EXISTENTE

O tamanho e a geometria do objeto são os principais parâmetros para escolha do tipo de cabeçote que deve ser usado na redoma.

2.1 – Escolha do Cabeçote “Diábolo”

Pode-se introduzir o objeto diretamente no orifício do “diábolo” ou por intermédio de uma tubulação vedada na sua parte superior. Preenche-se o espaçamento restante do orifício mediante o insuflamento da borracha do diábolo, permitindo, assim, uma vedação da parte superior da redoma. A pressão nesta mangueira não deve ser excessiva, pois corre-se o risco de rompê-la, nem deve ser insuficiente porque a vedação seria inadequada. O indicador visual de segurança no fundo da piscina fornece uma indicação da pressão correta que está sendo aplicada. Uma vez efetuada a operação de evacuação, fixa-se o objeto na redoma mediante o “macaco” pneumático.

A pressão do ar comprimido dentro da redoma tem o mesmo valor que a pressão exercida pela coluna de água desde a parte inferior livre da redoma, até o nível de água da piscina. Uma sobre pressão na redoma causará formação de bolhas, indicando que deve-se proceder a uma redução imediata.

Normalmente, as pressões aplicadas à redoma situam-se em torno de 1 bar, ao passo que no macaco são da ordem de 2 bar.

2.2 – Escolha do Cabeçote “Tampa”

Coloca-se o objeto numa prateleira ou num recipiente totalmente vedado, fora da piscina (no caso de objeto que não deva ser de forma alguma molhado ou umedecido). Em qualquer um dos casos apoia-se o conjunto internamente e prende-se com o “macaco” na redoma. Fecha-se a redoma com esta “tampa”, utilizando-se de uma haste longa e da alça mencionada anteriormente. Efetua-se a evacuação da redoma, da mesma maneira que no caso anterior.

2.3 – Escolha do Cabeçote “A Gelo”

Uma vez fixo o cabeçote “A Gelo” no topo da redoma, introduz-se o objeto no orifício deste cabeçote. Injeta-se nitrogênio líquido no cabeçote por intermédio de tubos devidamente isolados. A água em contacto com a parte central do dispositivo, congela-se, vedando desta forma a parte superior da redoma.

A evacuação da redoma e a fixação do objeto são feitas de maneira análoga aos casos anteriores.

Após executar a neutrongrafia, derrete-se o gelo e preenche-se novamente a redoma com água.

2.4 – Posicionamento do Dispositivo para Obtenção das Neutrongrafias

Uma vez posicionado e fixo o objeto da redoma, utilizando um dos três cabeçotes, evacua-se a água existente no caminho do feixe neutrônico, coloca-se o cassete de irradiação com a respectiva chapa conversora e procede-se a operação de aproximação do aparelho neutrongráfico ao caroço do reator. Este procedimento é feito mediante o deslocamento da ponte móvel auxiliar, em direção ao núcleo do reator.

Introduz-se o “nariz” do colimador entre dois refletores de grafite na posição 15 do núcleo, que é local onde removeu-se um outro refletor de grafite, a fim de permitir a realização dos ensaios neutrongráficos. Em cada um dos trilhos onde se deslizam as rodas da ponte móvel auxiliar, há um “stopper” que impossibilita a passagem da ponte além de um certo limite, a fim de impedir colisão entre o aparelho neutrongráfico e o elemento grafite da posição 25 (Figura 2.1 e Figura 2.2).

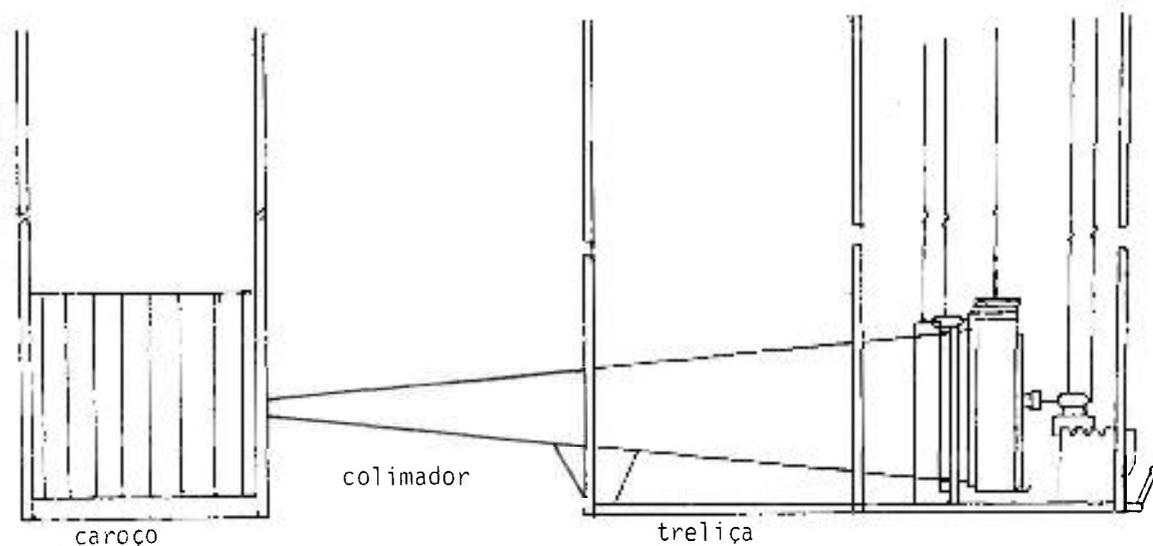


Figura 2.1 – Esquema do Conjunto na Posição Próxima ao Núcleo do Reator.

R Refletor

C Combustível

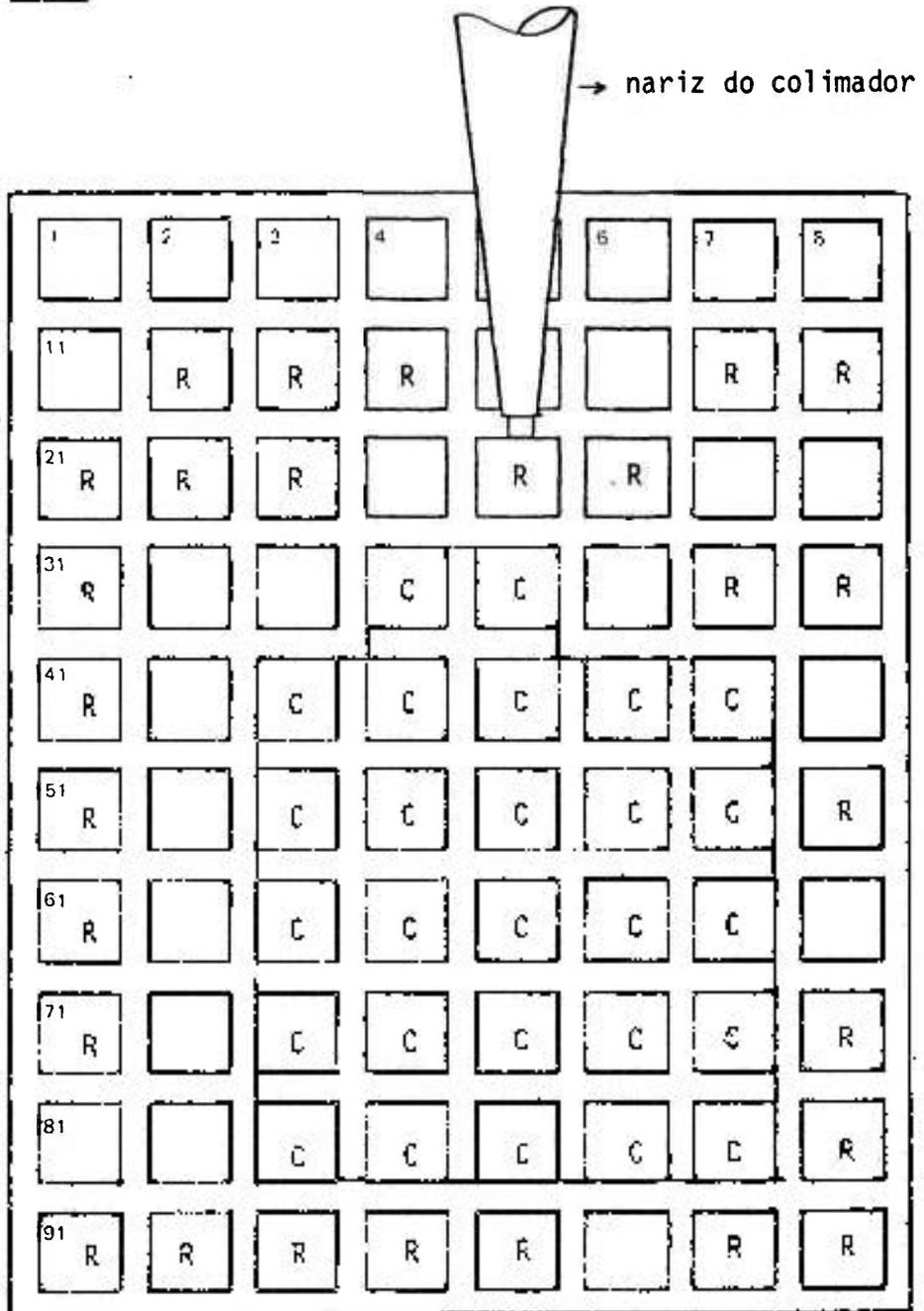


Figura 2.2 – Esquema do Núcleo do Reator.

O fluxo de nêutrons térmicos na abertura do colimador é da ordem de $10^{11} \text{ n}/(\text{cm}^2 \times \text{s})$. No objeto, este fluxo se reduz para um valor de $10^7 \text{ n}/(\text{cm}^2 \times \text{s})$, com uma razão de cádmio igual a 19 (medido com folhas de ouro).

O tempo de irradiação é uma função das características do objeto (como secção de choque microscópica total e espessura), do tipo de filme utilizado e ainda do grau desejado de escurecimento do filme (densidade óptica).

Normalmente, para um filme tipo A industrial, o tempo médio de irradiação é de 5 minutos.

Concluída a irradiação, retorna-se a ponte móvel auxiliar à sua origem, preenche-se a redoma com água e, eventualmente, retira-se em seguida o objeto. O cassete de irradiação, no entanto, deve permanecer por cerca de 10 meias vidas do Alumínio (23 minutos) dentro da água, para que a radioatividade da estrutura do cassete decaia suficientemente.

2.5 – Exposição do Filme à Radiação Ionizante Vinda do Conversor

No interior de uma câmara escura, carrega-se com dois filmes o cassete de exposição e transporta-se até o local da transferência. Coloca-se o dispositivo de irradiação no dispositivo giratório de transferência alinhado com este, o cassete de exposição.

Fixam-se os dois cassetes no dispositivo e executa-se um giro de 180° . Liberam-se as travas do cassete de exposição e, finalmente, o mesmo se faz com o cassete de transferência. Com a liberação destas travas a chapa conversora cai por gravidade entre os filmes. Transporta-se o conjunto (filmes e chapa conversora) para um local livre de radiações externas, onde o filme ficará exposto durante o tempo determinado em função dos parâmetros mencionados anteriormente. Esgotado esse tempo, revelam-se os filmes de maneira semelhante aos filmes expostos aos raios-X ou radiação gama, e os resultados são também da mesma forma interpretados.

3 – ALGUNS RESULTADOS OBTIDOS USANDO O APARELHO NEUTRONGRÁFICO EXISTENTE DO IEA-R1

A secção reta do feixe neutrônico, no local onde se encontra o objeto, é um retângulo com as dimensões aproximadas de 400 x 130 mm.

A razão de colimação, definida como a razão entre o diâmetro da abertura do colimador e a distância desde essa abertura até o objeto, a resolução geométrica, definida como o produto da razão de colimação pela distância entre o objeto e a chapa conversora (Figura 3.1), são dados por:

$$\text{Razão de Colimação} \quad K = \frac{d}{L} = \frac{8}{2000} = \frac{1}{250}$$

$$\text{Resolução Geométrica} \quad \Delta x = \frac{d}{L} \cdot a \quad \text{a} \quad 0.04\text{mm} \leq \Delta x \leq 0.4\text{mm}$$

onde:

L = distância entre abertura do colimador e objeto;

d = diâmetro da abertura do colimador;

a = distância entre o objeto e a chapa conversora, cujo valor máximo é de 100 mm e o mínimo de 10 mm.

A resolução espacial total do sistema que inclui a resolução inerente, relacionada com o filme e conversor utilizados, é para nosso caso, aproximadamente, igual a resolução geométrica. Esta resolução inerente⁽⁷⁾ para o conversor de disprósio de espessura (0,1 mm) em uso em nossos ensaios é de 0,2 mm.

Portanto, todos os resultados obtidos possuem uma resolução dentro do intervalo mencionado da resolução geométrica.

A seguir, descrevem-se exemplos de ensaios neutrongráficos:

A Figura 3.2 mostra a neutrongrafia de um manômetro. Pode-se facilmente notar o componente orgânico utilizado para a vedação do conjunto.

As partes metálicas aparecem com razoável contraste entre si, mas este contraste torna-se mais acentuado nas regiões de interface entre o metal e o material orgânico. O filme utilizado nesta neutrongrafia foi o Kodak A industrial. O tempo de irradiação foi de 5 minutos e a exposição foi de uma meia vida do Disprósio ($T_{1/2} = 2h20min.$). A chapa conversora utilizada foi de disprósio.

A Figura 3.3 mostra a neutrongrafia de uma chave de contacto usada para acionar a ponte móvel do reator. Notam-se os pinos usados para a formação do segredo da chave. O filme, tempos de irradiação e exposição e chapa conversora, foram os mesmos do caso anterior.

A Figura 3.4 mostra a neutrongrafia de um relê usado na cadeia de SCRAM do reator. Pode-se notar, também neste caso, um bom contraste entre os componentes orgânicos e metálicos.

As condições de irradiação e exposição assim como o filme e a chapa conversora utilizadas, foram as mesmas dos casos anteriores.

A Figura 3.5 mostra a neutrongrafia de uma fonte de cobalto-60 radioativa (cerca de 5 Curie de atividade).

Neste caso específico, uma radiografia ou uma gamagrafia seriam impraticáveis para se tentar avaliar o estado da fonte, visto que ela própria sensibilizaria o filme radiográfico. Uma autoradiografia seria possível, mas não traria boas informações sobre os detalhes da constituição da fonte. Um ensaio destrutivo também não seria uma boa solução, visto que se trata de um material radioativo.

A neutrongrafia é então, neste caso, a solução que apresenta mais vantagens.

Como se pode notar, a neutrongrafia da fonte foi feita juntamente com o cabo flexível que segura a cápsula onde se encerram os discos de cobalto. Isto permitiu verificar a integridade da ligação cabo-cápsula, sem necessidade de desmontar o sistema, evitando assim, riscos de irradiação de pessoas e eventuais danos ao dispositivo.

Embora a imagem neutrongráfica seja ligeiramente maior que o objeto, em virtude de divergência do feixe neutrônico, isso não introduz erro considerável na interpretação da imagem, visto que o objeto está próximo a chapa conversora.

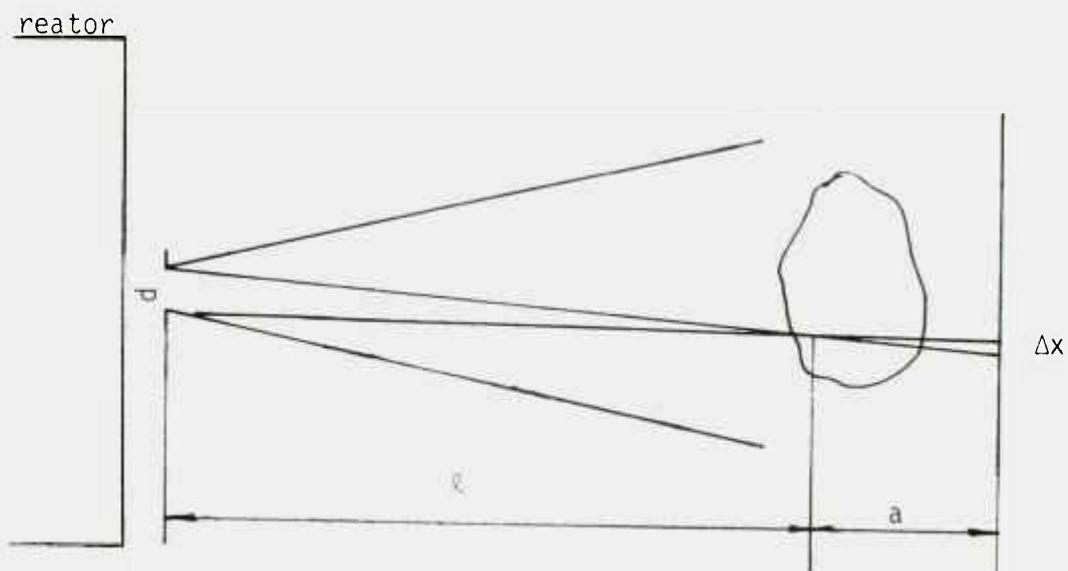


Figura 3.1 – Razão de Colimação e Resolução Espacial do Aparelho Neutrográfico do IEA-R1.



Figura 3.2 – Neutrografia de um Manômetro.

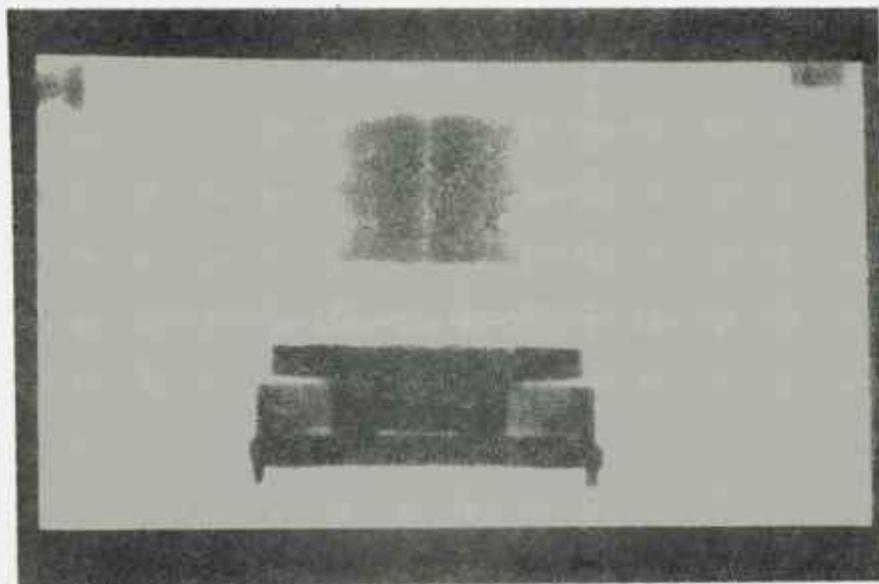


Figura 3.3 – Neutronografia de uma Chave de Contacto.

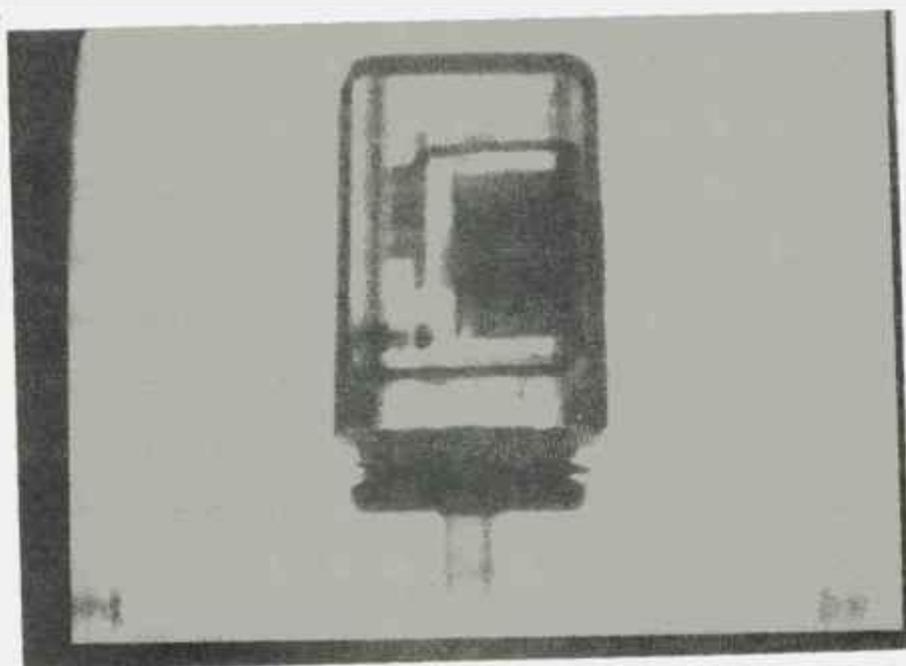


Figura 3.4 – Neutronografia de um Relê.

No entanto, se uma medida exata for necessária, basta somente fazer a correção geométrica nas medidas da imagem, uma vez que as distâncias entre fonte e objeto e objeto-conversor são conhecidas.

Por meio da neutrongrafia ilustrada na Figura 3.5, foi possível obter todos os dados dimensionais referentes aos discos de cobalto e a cápsula, bem como detalhes da montagem do disco com precisão de 0,5 mm.

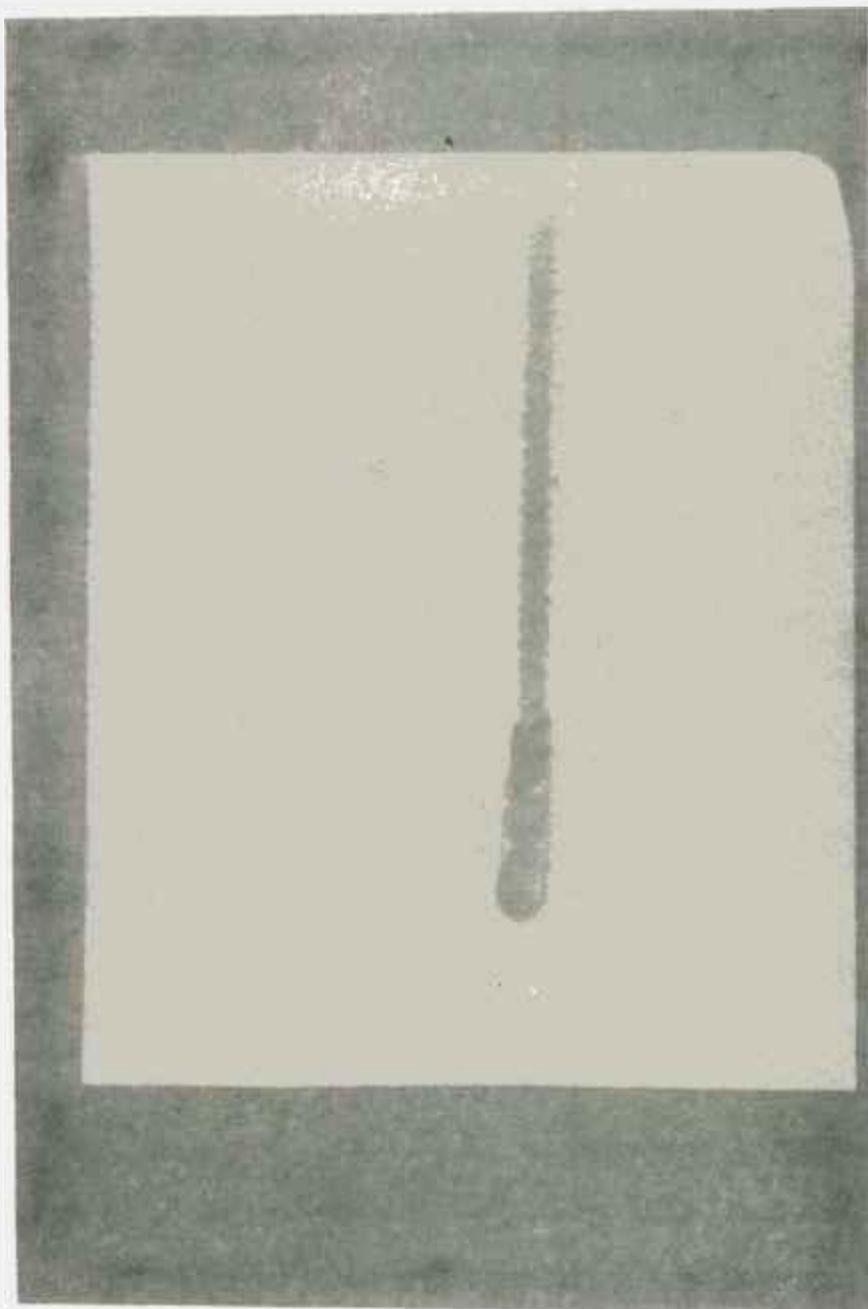


Figura 3.5 – Neutronografia de uma Fonte de Cobalto-60 (5 Curie).

4 – POSSÍVEIS APLICAÇÕES DA NEUTRONGRAFIA UTILIZANDO O APARELHO NEUTRONGRÁFICO EXISTENTE NO REATOR IEA-R1

Várias aplicações podem ser feitas utilizando o aparelho neutrongráfico submerso na piscina do reator. Entre elas, podemos destacar as seguintes:

4.1 – Exames Gerais de Pós-Irradiação em Experimentos de Reatores⁽⁴⁾

4.1.1 – Medidas do conteúdo de U-235 em combustível enriquecido.

4.1.2 – Exames gerais para detectar deslocamentos de termopares, cabos condutores rompidos etc.

4.1.3 – Detecção de fendas e cisalhamentos em "pellets" combustíveis experimentais.

4.2 – Medidas de Pós-Irradiação de Amostras em um Experimento Selado do Reator

A medida do inchamento ("swelling") progressivo de uma amostra, causado pela irradiação, pode ser medida.

4.3 – Medidas de "Burn-up" de Materiais Usados para Controle do Reator⁽³⁾

O cádmio 113 (com secção de choque de absorção para nêutrons térmicos de 20.000 barns) transmuta-se, pela absorção de nêutrons, em cádmio 114, cuja secção de choque de absorção para nêutrons térmicos é baixa comparada com a do Cd-113.

Durante o tempo de permanência das barras no caroço, há uma queima do Cd-113. Uma inspeção física não mostra qualquer mudança sensível após esse período de irradiação; no entanto, a neutrongrafia revela as regiões e os graus de queima na barra.

4.4 – Detecção de Falhas em Materiais para Blindagem Neutrônica

Uma blindagem de nêutrons, para ser efetiva, não deve possuir vazios ou algum tipo de falha que possibilite o escape de nêutrons. A neutrongrafia pode ser usada, mediante simples detectores, para gravar qualquer feixe de nêutrons que porventura venha a ultrapassar a blindagem num ponto localizado.

4.5 – Detecção de Defeitos em Conjuntos

Borrachas, plásticos, óleo e outros materiais podem ser imediatamente detectados num conjunto e com isso certas providências corretivas podem ser tomadas.

Alguns exemplos são os seguintes:

4.5.1 – Localização correta de "O" rings e componentes de plásticos dentro do conjunto.

4.5.2 – Verificação dos componentes eletrônicos e microcircuitos.

4.5.3 – Detecção de defeitos de ligação entre borracha e metal.

4.5.4 – Detecção da presença de óleos e graxas.

4.6 – Detecção de Infiltração

Por intermédio da Neutronografia pode constatar-se eventual infiltração de fluídos em peças submetidas a altas pressões de água ou líquidos orgânicos.

4.7 – Inspeções de Peças Usando Líquidos Contrastantes

Os agentes contrastantes são componentes usados para melhorar a discriminação em uma neutronografia. Geralmente são substâncias de grande secção de choque de absorção ou de espalhamento. Ex: água, óxido de gadolínio, ácido bórico, parafina e álcool.

Alguns exemplos de técnicas de contraste:

- 4.7.1 – Impregnação dos materiais com agentes contrastantes para detectar áreas de alta porosidade.
- 4.7.2 – Recobrimento de objetos com tiras de material de alta secção choque, para conseguir uma melhor definição.
- 4.7.3 – Preenchimento de cavidades metálicas com água ou óxido de gadolínio, parafina, álcool etc.
- 4.7.4 – Para constatar a presença de resíduos em fundições, adiciona-se um material altamente absorvedor de nêutrons, como o boro, à areia usada na moldagem.

4.8 – Falhas em Adesivos

Os adesivos resinosos contém hidrogênio e portanto, a presença local de um adesivo é facilmente constatada.

Normalmente uma camada adesiva que serve como junção de duas partes metálicas em uma linha de colagem de duas placas, pode sofrer interrupção no processo de selagem da peça. Uma radiografia com nêutrons permitirá constatar esta falha e ainda verificar a uniformidade da espessura do adesivo.

4.9 – Explosivos^(6,8)

Explosivos são dificilmente analisados por gamagrafia ou radiografia -X, porque o hidrogênio, um dos seus constituintes principais, apresenta um coeficiente de atenuação muito baixo para essas radiações.

Entretanto, o coeficiente de atenuação do hidrogênio para nêutrons térmicos é elevado e portanto, uma pequena espessura de material explosivo pode ser facilmente detectada por neutronografias. Balas de revólver, detonadores, explosivos orgânicos, são exemplos onde pode ter aplicação o ensaio neutrongráfico.

No caso do IEA-R1, atualmente não se aconselha fazer experiências com esses materiais por motivos de segurança do reator, uma vez que o conjunto neutrongráfico está relativamente próximo ao núcleo do reator. No entanto, se existisse um dispositivo montado junto a um "beam hole", este tipo de trabalho seria possível.

4.10 – Exames Metalúrgicos

Sais de potássio e cloreto de sódio, que são frequentemente encontrados em magnésio fundido, podem ser detectados em virtude da considerável diferença entre os coeficientes de atenuação para nêutrons do metal e dos sais.

4.11 – Materiais com Elevado Número Atômico

Estes materiais possuem coeficientes de atenuação elevados para radiações-X e gama; no entanto, a maioria deles são transparentes a nêutrons térmicos. Portanto, espessuras consideráveis de materiais com alto número atômico podem ser inspecionados por neutrongrafia. Algumas aplicações referem-se à verificação das blindagens de chumbo e de urânio natural.

4.12 – Ligas de Materiais de Números Atômicos Próximos

Estes materiais possuem coeficientes de atenuação para radiação-X e gama, muito próximos entre si; portanto, uma radiografia não apresentaria contraste ou definição nas interfaces. No caso dos nêutrons, estes coeficientes são, geralmente, bastante distintos o que permite obter um bom contraste nessas regiões críticas. Ex.: Liga cobre/níquel; cromo/níquel; platina/ouro podem ser facilmente distinguidos em uma neutrongrafia.

4.13 – Migração Radial Diferencial de Urânio e Plutônio, dentro dos Combustíveis $UO_2 - PuO_2$

4.14 – Exames de Fontes Radioativas

Fontes radioativas para fins industriais como as de Co-60, Ir-192 principalmente, necessitam ser examinadas a fim de verificar a disposição do tarugo ou discos radioativos constituintes da fonte, dentro das cápsulas.

O sistema de ligação da cápsula com o cabo de manipulação ("rabicho") também deve ser meticulosamente examinado, para evitar o risco de rompimento, no instante em que a fonte se encontre fora da blindagem, que poderia ocasionar um acidente de exposição.

Como as fontes por si só já são radioativas, uma radiografia ou gamagrafia do conjunto seria impraticável, visto que o filme ao ser sensibilizado por duas fontes localizadas em pontos distintos, apresentaria uma indefinição de imagem.

O método indireto da neutrongrafia elimina este impasse, pois a chapa conversora é ativada somente por interação com os nêutrons, ignorando a radiação gama da fonte em exame.

4.15 – Exames de Objetos Arqueológicos em Peças de Museus

A neutrongrafia permite fazer exames de esqueletos fósseis, animais e madeiras petrificadas, fósseis marinhos, peças metálicas seladas contendo internamente objetos de madeira, animais, ossos etc.

CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentou-se a descrição do aparelho neutrongráfico "underwater" e sua capacidade para a execução de neutrongrafias, junto ao reator IEA-R1. Mostrou-se, a título de exemplo,

o resultado de algumas neutrografias obtidas com este aparelho. A técnicas em si sugere várias outras aplicações, particularmente no caso de materiais de interesse nuclear, bem como em ensaios de materiais radioativos.

A relação das aplicações mencionadas não é limitativa, principalmente pelo fato que esta técnica é relativamente recente em relação às outras técnicas de ensaios não destrutivos. O objetivo principal desta publicação é o de divulgar a disponibilidade e a potencialidade da técnica entre os potenciais usuários.

As limitações do uso do aparelho referem-se às dimensões e geometria do objeto, bem como ao perigo que ele possa oferecer à segurança do reator. Estes problemas, no entanto, podem ser contornados com a implantação de um novo aparelho neutrográfico, por exemplo, na saída de um "beam hole" disponível (atualmente o de nº 9). Porém, algumas modificações no método deverão ser introduzidas, visto que nesse caso, o fluxo térmico colimado de nêutrons é sensivelmente mais baixo do que no sistema existente.

ABSTRACT

Neutron radiography on the research reactor IEA-R1 utilizes a collimated neutron beam extracted directly from a face of the reactor core.

The neutron radiography device is composed of a conical neutron collimator, having a 1/250 collimation ratio, an object chamber and an irradiation cassette.

In this work each component on the system is described and some representative results are presented.

Selected examples of the potentialities of this technique are given.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS*

1. *At. Energy Rev.*, 15(2):121-368, 1967.
2. BARTON, J. P. Divergent beam collimator for neutron radiography. *Mater. Eval.*, 25:45A-6A, 1967.
3. BERGER, H.; TALBOY, J. H.; TYLKA, J. P. Determination of cadmium burn up in reactor control rods by neutron radiography. *Nucl. Sci. Eng.*, 18:236-41, 1964.
4. CARBIENER, W. A. Nondestructive examination of radioactive material using neutron radiography. *Nucl. Appl.*, 2:468-70, 1966.
5. KALLMANN, H. Neutron radiography. *Research*, 6:254-60, 1948.
6. LAPORTE, A. Industrial applications of neutronography in France. In: HAWKESWORTH, M. R. Radiography with neutrons; conference held in Bermingham 10-11 sep. 1973. London, BNES, 1975. p.151-6.
7. ROSSMAN, K. & LUBBERTS, G. Some characteristics of the lime spread-function and modulation transfer function of medical radiographic film and screen-film systems. *Radiobiology*, 86:235-41, 1966. apud *At. Energy Rev.* 15(2):219, 1967.
8. WALL, T. & GILLESPIE, P. Neutron radiography at Lucas Heights. *At. Energy Aust.*, 18(3):7-12, 1975.

(*) As referências bibliográficas relativas a documentos localizados pelo IPEN foram revistas e enquadradas na NB-66 da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

**COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**

Caixa Postal, 11049 – Pinheiros

CEP 05508

01000 – São Paulo – SP

Telefone: 211-6011

Endereço Telegráfico – IPENUCLEAR

Telex – (011) 23592 - IPEN - BR