

03163



**IMPLANTAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DA NEUTRONGRAFIA NO REATOR
NUCLEAR (IEAR-1) DO INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA**

Rinaldo Fuga

**DISSERTAÇÃO E TESE - IEA 127
IEA - DT - 127**

FEVEREIRO/1979

CONSELHO DELIBERATIVO

MEMBROS

Klaus Reinach -- **Presidente**

Roberto D'Utra Vaz

Helcio Modesto da Costa

Ivano Humbert Marchesi

Admar Cervellini

PARTICIPANTES

Regina Elisabete Azevedo Boretta

Flávio Gori

SUPERINTENDENTE

Rômulo Ribeiro Pieroni

**IMPLANTAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DA NEUTRONGRAFIA NO REATOR
NUCLEAR (IEAR-1) DO INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA**

Rinaldo Fuga

Dissertação para obtenção do Título de "Mestre em
Ciências e Tecnologia Nucleares" - Orientador Prof.
Dr. Rui Ribeiro Franco. Apresentada e defendida em
27 de setembro de 1977, à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo.

Série DISSERTAÇÃO E TESE IEA

INIS Categories and Descriptors

E17

Neutron radiography

Note: A redeção, ortografia e conceitos são de responsabilidade dos autores.

SUMÁRIO

Página

1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Primórdios do Desenvolvimento da Radiografia com Nêutrons	1
1.2 – Princípio da Neutronografia	6
1.3 – Fontes de Nêutrons	6
2 – DESCRIÇÃO DO IEAR-1	9
3 – COLIMAÇÃO DE NÊUTRONS	10
3.1 – Tipos de Colimadores	10
3.2 – Divergência Angular	10
4 – DETECÇÃO DE NÊUTRONS	15
4.1 – Interação do Nêutron com o Material	15
4.2 – Método Direto	17
4.3 – Método Indireto ou de Transferência	17
4.4 – Principais Materiais Utilizados como Chapas Conversoras	18
4.5 – Comparação dos Métodos	18
5 – POSSIBILIDADE DE UTILIZAÇÃO DO IEAR-1 EM NEUTRONGRAFIA	20
5.1 – Utilização dos “Beam-Holes”	20
5.2 – Utilização de Dispositivo Neutronográfico Mergulhado na Piscina	23
6 – DESCRIÇÃO DOS DISPOSITIVOS E TÉCNICAS UTILIZADAS	24
6.1 – Dispositivo com Colimador Tipo Tubos	24
6.2 – Medidas de Fluxo nas Posições a Neutronografar	24
6.3 – Mecanismo de Ativação das Folhas de Ouro	26
6.4 – Obtenção das Primeiras Neutronografias	33
6.5 – Desenvolvimento de Dispositivo Neutronográfico com Colimador Cônico	37
6.6 – Considerações sobre os Materiais Utilizados no Dispositivo	40
6.7 – Medidas de Fluxo no Dispositivo de Colimador Cônico	42
7 – CONTROLE DE QUALIDADE E GRADE DE ANTIESPALHAMENTO	42

7.1 – Penetrômetros	42
7.2 – Comparação de Qualidade	42
7.3 – Grade de Antiespalhamento	45
8 – APLICAÇÕES DA NEUTRONGRAFIA	45
9.1 – Aplicações	45
8.2 – Desenvolvimento Recentes	50
9 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS	50
9.1 – Placas Provas de Cádmió	51
9.2 – Disco de Alumínio com Diferentes Materiais de Ensaio	52
9.3 – Válvula Eletrônica RCA-5879	52
9.4 – Válvula de Controle de Fluxo	53
9.5 – Conector BNC	53
9.6 – Cilindro de Chumbo	54
9.7 – Motor Síncrono	54
10 -- CONCLUSÕES	62
APÊNDICE A – DADOS REFERENTES A NÊUTRONS	63
A.1 – Principais Reações Nucleares Induzidas por Nêutrons	63
A.2 – Classificação dos Nêutrons Quanto à sua Energia	63
A.3 – Utilização das Diferentes Energias dos Nêutrons	64
A.4 – Secção de Choque (Região Térmica) dos Diferentes Materiais Utilizados nas Partes Experimentais deste Trabalho	65
APÊNDICE B -- ESQUEMAS DE DECAIMENTO DOS PRINCIPAIS MATERIAIS UTILIZADOS COMO CHAPAS CONVERSoras BEM COMO SUAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E NUCLEARES, REAÇÕES UTILIZADAS ETC	71
APÊNDICE C – DEFINIÇÕES, CARACTERÍSTICAS DOS FILMES UTILIZADOS NAS RADIOGRAFIAS	76
C.1 – Composição de um Filme	76
C.2 – Processo de Formação da Imagem Latente no Filme	76
C.3 – Curva Característica de um Filme	76

C.4 – Velocidade, Contraste e Definição de Filmes	77
C.5 – Classes de Filmes Radiográficos Industriais	79
C.6 – Equivalência dos Filmes Utilizados em Várias Partes do Mundo	79

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
----------------------------------	----

LISTA DAS FIGURAS

	Página
1.1 – Coeficiente de Absorção de Massa Versus Número Atômico	5
1.2 – Esquema do Princípio Neutronográfico	7
2.1 – Vista Geral da Piscina do Reator	11
2.2 – Vista Isométrica do Compartimento de Operação do Reator	12
3.1 – Tipos de Colimadores	13
3.2 – Comparação do Colimador Multicanal com o Colimador Cônico	14
4.3 – Esquemas dos Métodos Utilizados em Neutronografia	16
5.1 – Razão entre Intensidade de Nêutrons Térmicos e Radiação Gama como Função da Espessura de Grafita Colocada no Caminho do Feixe	21
5.2 – Sistema de Blindagem para Experimentos Neutronográficos	22
6.1 – Conjunto Neutronográfico Montado	25
6.2 – Arranjo nº 95	30
6.3 – Atividade da Folha Conversora como Função do Tempo.	31
6.4 – Objeto a Neutronografar, Composto de Vários Materiais	34
6.5 – Positivos do Objeto Prova da Figura 6.4	35
6.6 – Mapeamento de Densidade do Filme	38
6.7 – Esquema das Trajetórias de Alguns Nêutrons no Colimador (Sem Revestimento de Cádmiu).	38
6.8 – Esquema das Trajetórias de Alguns Nêutrons no Colimador (Com Revestimento de Cádmiu).	38
6.9 – Dispositivo Neutronográfico com Colimador Cônico	39
6.10 – Localização do Dispositivo Neutronográfico com Relação ao Carço do IEAR-1	43
7.1 – Efeito da Grade Antiespalhadora no Feixe de Nêutrons Emergentes do Objeto	46
9.1 – Neutronografias e Gamagrafia de Folhas de Cádmiu Perfuradas	55
9.2 – Neutronografias e Gamagrafia de um Disco de Alumínio com Tarugos de (Cd, Cu, Al, U ₃ O ₈ , C, Fe e Latão) e Anel de Borracha	56
9.3 – Neutronografias e Gamagrafia de uma Válvula Eletrônica (RCA-5879)	57
9.4 – Neutronografias e Gamagrafia de uma Válvula de Controle de Fluxo de Ar	58
9.5 – Neutronografias e Gamagrafia de um Conector BNC	59
9.6 – Neutronografias e Gamagrafia de um Cilindro de Chumbo com Quatro Furos Radiais não Passantes Preenchidos com Graxa e com Água na Região Central do Cilindro	60
9.7 – Neutronografias e Gamagrafia de um Motor Síncrono de Quatro Rotações por Minuto e 2,50 Watts	61

A.1 – Gráfico Genérico da Secção de Choque Versus Energia do Nêutron	64
A.2 – Secção de Choque Total do Hidrogénio	65
A.3 – Secção de Choque Total da Água Leve (H ₂ O)	66
A.4 – Secção de Choque Total do ¹⁰ Boro	67
A.5 – Secção de Choque Total do Alumínio	68
A.6 – Secção de Choque Total do Cádmio	69
A.7 – Secção de Choque Total do Ouro	70
B.1 – Esquema de Decaimento do Disprósio	72
B.2 – Esquema de Decaimento do Índio	73
B.3 – Esquema de Decaimento do Ródio	74
B.4 – Esquema de Decaimento do Ouro	75
C.1 – Constituição de um Filme Radiográfico	76
C.2 – Curva Característica de um Filme Fotográfico	78

LISTA DAS TABELAS

	Página
I.1 – Coeficientes de Absorção dos Elementos para Nêutrons e Raios-X	3
I.2 – Fontes de Fotonêutrons	8
IV.1 – Materiais Utilizados como Chapas Conversoras	19
VI.1 – Medidas de Fluxos nas Posições A e B da Figura 6.10	44
B.1 – Abundâncias Relativas e Secções de Choque Eficazes dos Isótopos Naturais do Gadolínio.	71
B.2 – Energias das Radiações Beta e Gama do Disprósio	72
B.3 – Energias das Radiações Beta e Gama do Índio	73
B.4 – Energias das Radiações Beta e Gama do Ródio	74
B.5 – Energias das Radiações Beta e Gama do Ouro	75
C.1 – Comparação entre Filmes de Diversos Países	80

IMPLANTAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DA NEUTRONGRAFIA NO REATOR NUCLEAR (IEAR-1) DO INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA

Rinaldo Fuga

RESUMO

Radiografia com nêutrons, no IEAR-1, utiliza um feixe colimado de nêutrons vindo do caroço do reator e detecção fotográfica pelo método indireto ou de transferência. A folha de ouro é ativada pelo feixe neutrônico com o objeto prova colocado entre a folha e o feixe de nêutrons.

A folha ativada é então exposta a um filme de Raio-X para produzir radiografias.

Nas primeiras provas, utilizou-se como selecionador de direção de nêutrons um colimador tipo multicanal constituído de tubos de aço inoxidável arranjados dentro de um tubo de alumínio. Em seguida, este dispositivo foi aprimorado, introduzindo-se melhorias na divergência angular e redução de espalhamento de nêutrons.

Com o intuito de aprimorar ainda mais as radiografias desenvolveu-se um segundo tipo de colimador (cônico), utilizando-se ácido bórico como absorvedor e moderador de nêutrons.

Considerando-se a importância do fluxo de nêutrons térmicos como parâmetro para determinar a ativação da folha de ouro foram necessárias medidas deste fluxo em posições de interesse no reator. A dependência deste fluxo com o enegrecimento do filme também é discutida bem como outros fatores responsáveis por este efeito.

Obtiveram-se neutronografias de alguns objetos com a utilização do colimador cônico. Elas foram comparadas e discutidas com gamografias desses mesmos objetos.

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Primórdios do Desenvolvimento da Radiografia com Nêutrons

As primeiras radiografias surgiram no início deste século, logo após a descoberta dos raios-X por Roentgen. Analogamente, três anos após a descoberta do nêutron em 1932 por Chadwick, fizeram-se as primeiras radiografias utilizando nêutrons. Em 1935, na Alemanha, Hartmut Kallmann⁽²⁰⁾ e H. Kuhn iniciaram este estudo que resultou num grande número de patentes norte-americanas, alemãs e francesas.

Apesar das radiografias produzidas nesse então recente estudo não serem de alta qualidade, o esforço indicou alguns dos possíveis usos da radiografia com nêutrons.

Kallmann, em seu trabalho, utilizou como fonte de nêutrons um pequeno acelerador equivalente a uma fonte de duas a três gramas de Ra-Be. O fluxo de nêutrons rápidos produzidos por esta fonte era de 4×10^7 nêutrons/cm² xs que após moderado e colimado se reduzia a um baixo valor, insuficiente

portanto, para realizar uma boa neutrongrafia. Paralelamente a Kallmann, Peter (1946) iniciou também investigações em radiografias com nêutrons utilizando como fonte de nêutrons um acelerador equivalente a 13 Kilogramas de Ra-Be. Dessa forma, Peter pode obter radiografias em aproximadamente três minutos enquanto Kallmann e Kuhn necessitaram de quatro horas de exposição, mesmo com técnicas rápidas desenvolvidas por eles próprios, utilizando telas cintilado as.

A primeira radiografia com nêutron, utilizando um reator como fonte, foi feita por Thewlis e Derbyshire, em 1956.

O reator utilizado foi o BEPO, localizado em Harwell, na Inglaterra.

Após esta investigação, iniciada em Harwell, parece ter havido um período de quatro a cinco anos de estagnação nesta nova técnica de ensaio não destrutivo. Em 1960, todavia, em vários laboratórios, reiniciaram-se várias investigações independentes. Começaram a surgir novas idéias e aplicações.

Apesar do crescente interesse pela neutrongrafia (radiografia utilizando nêutrons) surgiram as seguintes questões:

- 1) Qual a vantagem da neutrongrafia sobre as demais técnicas (radiografias-X e gamagrafias) que além de estarem bem desenvolvidas são bem mais econômicas?
- 2) O que a neutrongrafia faz que as radiografias X e gama não fazem?

As questões levantadas podem ser respondidas de maneira simples com o uso da comparação dos efeitos da atenuação na matéria, pelos raios-X e nêutrons (térmicos) que podem ser observados na Tabela 1.1 e graficamente na Figura 1.1.

Coefficientes de absorção de massa (μ/ρ) são independentes da densidade e estado físico do absorvedor. Elas são definidas pela equação⁽²³⁾ seguinte:

$$I = I_0 e^{-(\mu/\rho)x}$$

onde

I é a intensidade do feixe na posição x

I_0 é a intensidade do feixe incidente

μ é o coeficiente de absorção linear

ρ é a densidade do material

Na comparação feita na Tabela 1.1 os nêutrons possuem comprimento de onda $\lambda = 1,08 \text{ \AA}$ e os raios-X, $\lambda = 0,098 \text{ \AA}$.

Várias conclusões podem ser tiradas a partir da Figura 1.1:

- a) o coeficiente de absorção de massa (μ/ρ) para os nêutrons pode ser muito maior ou muito menor do que os coeficientes para raios-X.
- b) é possível contraste de elementos com números atômicos próximos em radiografia com nêutrons, mas impossível em radiografia X.

Tabela I.1

Coeficiente de Absorção dos Elementos para Nêutrons e Raios-X^(*)

Elemento	Nº	Nêutrons ($\lambda = 1,08 \text{ \AA}$)			Raios-X ($\lambda = 0,098 \text{ \AA}$)		
		(μ/ρ) real	(μ/ρ) espalhamento	(μ/ρ) total	μ total	μ/ρ	μ
H	1	0,11	48,4	48,5		0,280	
Li	3	3,5	0,17	3,7	2,0	0,125	0,067
Be	4	0,0003	0,50	0,50	0,92	0,131	0,24
B	5	24		124	160	0,138	0,35
C	6	0,00015	0,26	0,26	0,60	0,142	0,33
N	7	0,048	0,43	0,48		0,143	
O	8	<0,00002	0,15	0,15		0,144	
F	9	<0,0003	0,11	0,1		0,146	
Ne	10	0,006		10,006		0,148	
Na	11	0,007	0,092	0,099	0,097	0,150	0,15
Mg	12	0,001	0,092	0,093	0,16	0,152	0,26
Al	13	0,003	0,033	0,036	0,97	0,156	0,42
Si	14	0,001	+0,043	+0,044	+0,10	0,159	0,37
P	15	0,002	0,060	0,062	+0,12	0,162	0,32
S	16	0,0055	0,023	0,029	0,058	0,166	0,33
Cl	17	0,33	0,255	0,59		0,176	
A	18	0,006		10,006		0,184	
K	19	0,018	0,031	0,049	0,042	0,191	0,16
Ca	20	0,0037	0,053	0,057	0,088	0,200	0,31
Sc	21	0,09	+0,175	+0,27	+0,68	0,208	0,52
Ti	22	0,044	0,075	0,119	0,54	0,217	0,98
V	23	0,033	0,060	0,093	0,56	0,227	1,4
Cr	24	0,021	0,044	0,065	0,46	0,238	1,7
Mn	25	0,083	0,024	0,107	0,79	0,250	1,8
Fe	26	0,015	0,126	0,141	1,1	0,265	2,1
Co	27	0,21	0,051	0,26	2,2	0,287	2,5
Ni	28	0,028	0,185	0,213	1,9	0,310	2,8
Cu	29	0,021	0,074	0,095	0,85	0,325	3,0
Zn	30	0,0055	0,039	0,045	0,32	0,350	2,5
Ga	31	0,015		10,015	10,089	0,380	2,3
Ge	32	0,011	0,071	0,082	0,45	0,41	2,2
As	33	0,020	0,056	0,076	0,44	0,44	2,5
Se	34	0,056	0,076	0,132	0,59	0,48	2,2
Br	35	0,029	0,045	0,074		0,52	
Kr	36	0,0002		10,0002		0,56	
Rb	37	0,0029	0,039	0,042	0,064	0,59	0,90
Sr	38	0,0048	0,065	0,070	0,18	0,61	1,6
Y	39	0,0053		10,0056	10,021	0,66	2,5
Zr	40	0,0006	0,046	0,047	0,31	0,71	4,6
Nb	41	0,0041	0,040	0,044	0,37	0,75	6,4
Mo	42	0,009	0,046	0,055	0,55	0,79	7,9

(*) Referência (9)

Tabela I.1

Coeficiente de Absorção dos Elementos para Nêutrons e Raios-X (Continuação)

Elemento	Nº	Nêutrons ($\lambda = 1,08 \text{ \AA}$)			Raios-X ($\lambda = 0,098 \text{ \AA}$)		
		(μ/ρ) real	(μ/ρ) espalhamento	(μ/ρ) total	μ total	μ/ρ	μ
Ru	44	0,009		†0,009	†0,11	0,90	11,1
Rh	45	0,53		*0,53	6,6	0,95	11,8
Pd	46	0,023	0,027	0,050	5,7	0,99	11,3
Ag	47	0,20	0,039	0,24	2,5	1,05	11,0
Cd	48	11,2		†11,2	†97	1,09	9,4
In	49	0,60		0,60	14,4	1,13	8,2
Sn	50	0,002	0,025	0,027	0,20	1,17	8,5
Sb	51	0,016	0,021	0,037	0,25	1,21	8,1
Te	52	0,013	0,018	0,031	0,19	1,25	7,8
I	53	0,018	0,018	0,036	0,18	1,33	6,6
Xe	54	0,083		†0,083		1,40	
Cs	55	0,077	0,032	0,109	0,20	1,46	2,7
Ba	56	0,0027	+0,015	+0,018	+0,068	1,52	5,7
La	57	0,023	0,040	0,063	0,39	1,60	9,8
Ce	58	0,0021	0,012	0,014	0,097	1,68	11,6
Pr	59	0,029	0,017	0,046	0,30	1,75	11,4
Nd	60	0,11	0,10	0,21	1,5	1,81	12,6
Sm	62	25		†25	†195	1,95	15,2
Eu	63	10		†10	†52	2,02	10,5
Gd	64	84		†84	†497	2,08	12,3
Tb	65	0,09		0,09	10,75	2,13	17,7
Dy	66	2,0		†2,0	†17,2	2,23	19,2
Ho	67	0,015		†0,015	†1,3	2,23	21
Er	68	0,36	0,054	0,41	2,0	2,40	11,4
Tm	69	0,25		†0,25	†2,3	2,48	23
Yb	70	0,076		†0,76	†0,42	2,55	14,0
Lu	71	0,22		†0,22	†2,1	2,63	26
Hf	72	0,20		†0,20	†2,3	2,72	31
Ta	73	0,044	0,023	0,067	1,1	2,80	47
W	74	0,036	0,022	0,058	1,1	2,88	56
Re	75	0,16		†0,16	†3,4	2,95	63
Os	76	0,028		†0,028	†0,63	3,02	68
Ir	77	0,80		†0,80	†18	3,09	69
Pt	78	0,015	0,035	†0,050	†11	3,15	68
Au	79	0,17	0,027	0,20	3,9	3,21	62
Hg	80	0,63	0,080	0,71	9,6	3,31	45
Tl	81	0,006	+0,021	+0,027	0,32	3,41	41
Pb	82	0,0003	0,034	0,034	0,39	3,50	40
Bi	83	<0,00003	0,029	0,029	0,28	3,57	35
Th	90		0,033	*0,033	*0,37	3,80	43
U	91	0,005	+0,023	+0,028	0,52	3,90	73

As unidades de μ são em cm^{-1} .

* Espalhamento somente

† Espalhamento não incluído

+ Espalhamento incoerente não incluído

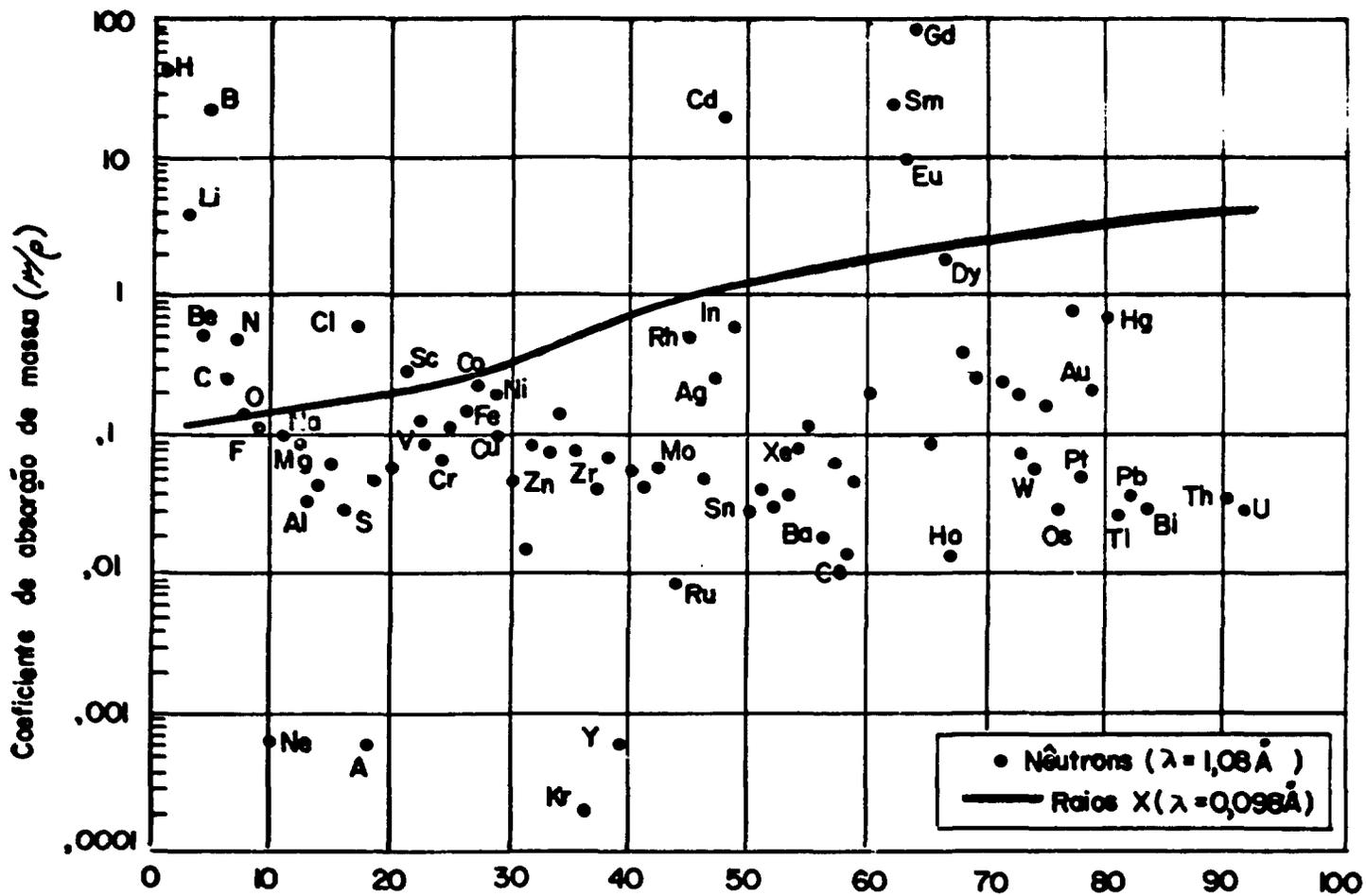


Figura 1.1 – Coeficiente de Absorção de Massa Versus Número Atômico⁽⁹⁾

- c) muitos dos elementos pesados espessos são impenetráveis para raios-X e quase transparentes a nêutrons
- d) o coeficiente de absorção de massa para raios-X possui dependência contínua com o número atômico, enquanto o coeficiente de absorção de massa para nêutrons é totalmente ao acaso.

Usando-se esses fatos, desenvolvem-se áreas nas quais radiografias com nêutrons podem completar as radiografias com raios-X e gamas. Muitas das tecnologias fotográficas são diretamente aplicáveis à radiografia com nêutrons.

1.2 – Princípio da Neutronografia

A neutronografia procede de um princípio idêntico à radiografia X, como pode ser visto no esquema teórico (Figura 1.2).

O gerador (a), uma fonte de nêutrons, é seguida de um colimador (b) que limita o diâmetro da fonte e fornece um feixe de nêutrons. Esses nêutrons, em seguida, atravessam o objeto a examinar (c) e são absorvidos de acordo com a transparência do material encontrado. O feixe emergente (d), imagem neutrônica do objeto, é recolhido num detector (e) cuja resposta em todos os pontos é proporcional à intensidade do feixe incidente. O detector, denominado "conversor", convenientemente exposto, fornece uma imagem latente sobre um filme, tela de televisão etc.

1.3 – Fontes de Nêutrons

As fontes de nêutrons são avaliáveis em três tipos gerais:

1.3.1 – Aceleradores

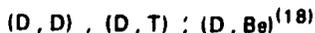
1.3.2 – Radioativas

1.3.3 – Reatores Nucleares

1.3.1 – Aceleradores

Os aceleradores de partículas emitem um feixe de íons de alta energia que colide com um alvo onde são induzidas reações nucleares.

Os mais comuns utilizam as reações:



Os nêutrons de altas energias produzidos por essas reações (3 Mev, 14 Mev, 5 Mev), devem ser termalizados para se fazer neutronografias.

Os fluxos máximos disponíveis são da ordem de 10^{11} n/cm² xs. Após termalizados fornecem um fluxo da ordem de 10^9 n/cm² xs.

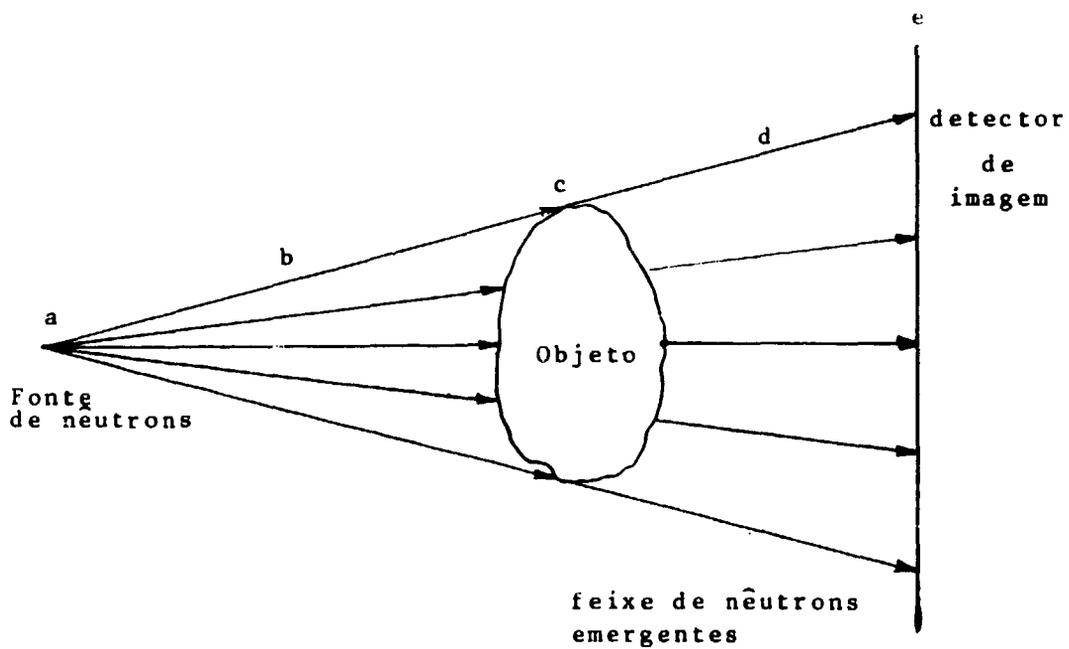


Figura 1.2 - Esquema do Princípio Neutronográfico

1.3.2 – Fontes Radioativas

Os nêutrons provenientes das fontes radioativas são de alta energia devendo portanto ser moderador.

Basicamente as duas mais importantes reações em fontes radioativas são (α, n) e (γ, n) .

Na Tabela 1.2 encontram-se as fontes radioativas mais utilizadas provenientes das reações (γ, n) .

Tabela 1.2

Fontes de Fotonêutrons⁽¹⁵⁾

Fonte	Meia vida (a)	Energia do gama (Mev)	Máxima energia do nêutron (Mev)	Produção padrão (b)
²⁴ Na-Be	14,8 h	2,76	0,83	13
²⁴ Na-D ₂ O	14,8 h	2,76	0,22	27
⁵⁶ Mn-Be	2,59 h	1,18 ; 2,13 ; 2,7	0,15 ; 0,30	2,9
⁵⁶ Mn-D ₂ O	2,59 h	2,7	0,22	0,31
⁷² Ga-Be	14,1 h	1,87 ; 2,21 ; 2,51	0,78	5
⁷² Ga-D ₂ O	14,1 h	2,51	0,13	6
⁸⁸ Y-Be	87 d	1,9 ; 2,8	0,158	10
⁸⁸ Y-D ₂ O	87 d	2,8	0,31	0,3
¹¹⁶ In-Be	54 m	1,8 ; 2,1	0,30	0,82
¹²⁴ Sb-Be	60 d	1,7	0,024	19
¹⁴⁰ La-Be	40 d	2,50	0,62	0,3
¹⁴⁰ La-D ₂ O	40 d	2,50	0,151	0,8
MsTh-Be	6,7 a	1,80 ; 2,62	0,827	3,5
MsTh	6,7 a	2,62 (ThC)	0,197	95
Ra-Be	1620 a	1,69 ; 1,75 ; 1,82		3,0
Ra-D ₂ O	1620 a	0,12		0,1

(a) As unidades de meia vida são minutos m, horas h, dias d e anos a.

(b) (10^4 n/seg x Curie) (1g a 1 cm)

Dentre as fontes tabeladas é a de Sb-Be a mais atrativa, em virtude de sua elevada produção de nêutrons por Curie de ^{124}Sb ; além do mais, as energias dos nêutrons produzidos são relativamente baixas (25 Kev).

As fontes radioativas apresentam a desvantagem de produzir fluxos de nêutrons relativamente baixos, da ordem de 10^6 n/cm² xs. Durante a moderação e colimação dos que são rápidos, o fluxo sofre uma queda de um fator de 10^3 a 10^4 do valor inicial. Dessa forma, o fluxo cai a um valor que é insuficiente para realizar uma neutrongrafia. Por esse motivo as fontes radioativas existentes não oferecem vantagens para este campo de pesquisa.

Existe, todavia, uma fonte (Califórnia 252)^(32,27) que produz nêutrons por fissão espontânea. Esta fonte é capaz de produzir 10^{11} n/cm² xs, para 30 mg do material e sua meia vida é de 2,2 anos. O inconveniente é seu custo elevadíssimo. Atualmente, vem-se desenvolvendo e aprimorando técnicas com o intuito de se produzirem fontes de Califórnia-252 a preços aceitáveis economicamente.

1.3.3 – Reatores Nucleares

Dentre os três tipos de fontes de nêutrons, os reatores são os mais importantes porque eles podem produzir fluxos de nêutrons térmicos colimados acima de 10^6 n/cm² xs.

Embora os reatores nucleares existentes tenham sido construídos para outras finalidades, muito deles são utilizados também para ensaios neutrongráficos, principalmente de materiais de interesse nuclear.

Neste trabalho utilizamos o reator do IEA que fornece um fluxo térmico acima de 10^6 n/cm² xs, na região disponível para neutrongrafia.

2 – DESCRIÇÃO DO IEAR-1⁽²⁸⁾

O reator do INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA (IEAR-1) é do tipo piscina aberta contendo em média um volume de 272 m³ de água leve desmineralizada. Esta água, pertencente ao circuito primário, tem as funções de moderar os nêutrons que nascem rápidos, retirar o calor do reator, originado das fissões e finalmente a de blindar as radiações.

O calor dissipado na água do circuito primário é transferido à água do circuito secundário e esta transfere este calor ao meio ambiente auxiliada por corres de refrigeração.

O caroço do reator é constituído por uma placa matriz onde estão dispostos os elementos combustíveis normais e de controle, elementos refletores de grafita e elementos de irradiação.

Os elementos combustíveis são constituídos de placas paralelas contendo urânio enriquecido com 93%.

Estas placas, constituídas por uma liga de urânio e alumínio, são revestidas totalmente por uma camada de alumínio puro que evita escape dos produtos de fissão e mantém a necessária rigidez estrutural.

No elemento combustível de controle há lugar para inserção de barras absorvedoras de nêutrons que controlam a criticidade do reator.

Os elementos combustíveis e de controle são montados na região central da placa matriz. Este conjunto é cercado por elementos refletores de grafita cuja finalidade é a de homogeneizar o perfil do

fluxo, moderar nêutrons rápidos que são produzidos nas fissões e refletir os nêutrons nas regiões periféricas ao caroço, contribuindo dessa forma na economia de nêutrons.

O IEAR-1 opera atualmente em uma potência de 2 Mw correspondente a um fluxo térmico na região central do caroço da ordem de 10^{13} n/cm² xs.

Nas regiões periféricas do caroço onde estão colocados os dispositivos de neutrongrafia, o fluxo é da ordem de 10^{10} n/cm² xs.

As Figuras 2.1 e 2.2, respectivamente, mostram a piscina e o caroço. Observa-se que o caroço está suspenso por meio de uma estrutura metálica ligada a uma ponte que pode se deslocar ao longo de toda a piscina.

No plano, à meia altura do caroço, existem tubos cujo prolongamento de seus centros passam pela região central do conjunto crítico. Estes tubos denominados "beam holes" partem das superfícies laterais do caroço, conduzindo feixes de nêutrons para a região externa à superfície lateral da piscina onde são utilizados em experiências de Física Nuclear.

Estes extratores de feixes neutrônicos podem ser também utilizados para neutrongrafia.

3 – COLIMAÇÃO DE NÊUTRONS

Em radiografias com nêutrons térmicos, a fonte de nêutrons é geralmente uma ampla superfície de moderador com nêutrons difundindo em todas as direções. Entretanto, alguma seleção de nêutrons é necessária, a fim de obter uma radiografia nítida do objeto. Esta é a função do colimador.

3.1 – Tipos de Colimadores

Já se estudaram vários tipos de colimadores para nêutrons^(12,11), alguns dos mais usuais são vistos na Figura 3.1 (a, b, c, d).

O colimador tipo (d)⁽⁴⁾ possui a vantagem sobre o (c) porque absorve menos nêutrons nas paredes; entretanto a imagem do objeto é aumentada (Figura 3.2a) necessitando correções nas dimensões do objeto.

No colimador (d) o fluxo cai com o inverso do quadrado da distância à fonte, o que limita sua utilização em fontes de fluxo baixo.

No colimador (c) o fluxo é paralelo (Figura 3.2b), não necessitando de correções da imagem projetada do objeto, porém possui a desvantagem de formar sombreamento oriundo das paredes dos tubos, que pode ser diminuído, afastando o detector de imagem, do objeto.

3.2 – Divergência Angular

Para todos os colimadores citados, define-se divergência angular a relação $d = D/L$.

Esta relação está intimamente ligada com a nitidez da imagem do objeto formada, isto é, se L for aumentado e D diminuído, a divergência angular diminui tornando a imagem do objeto mais nítida.

A razão $d = D/L$ é também comumente chamada razão de colimação. Em neutrongrafia esta razão deve ser menor que 1/100 para se ter uma neutrongrafia de boa qualidade⁽²²⁾.

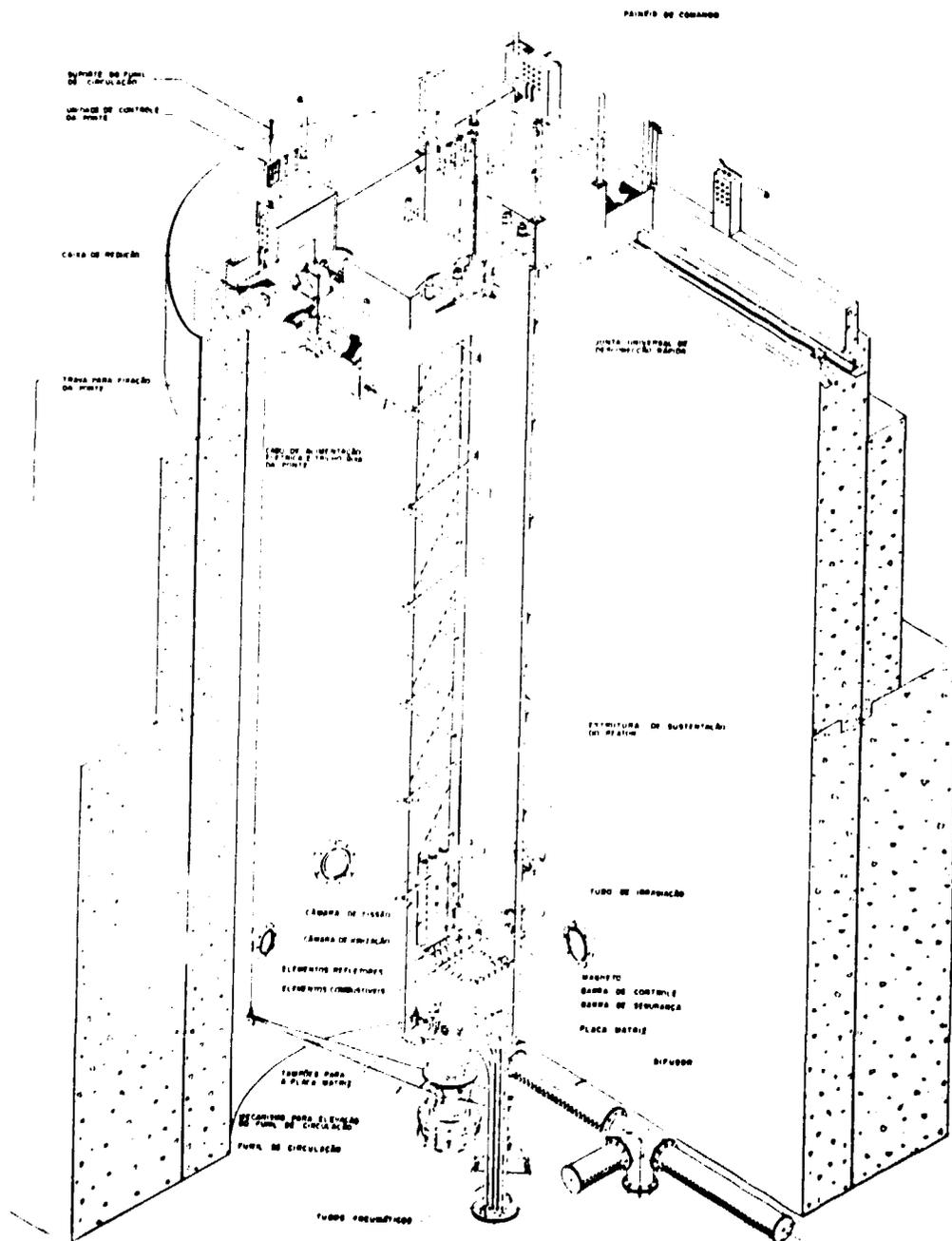


Figura 2.2 — Vista Isométrica do Compartimento de Operação do Reator IEAR-1

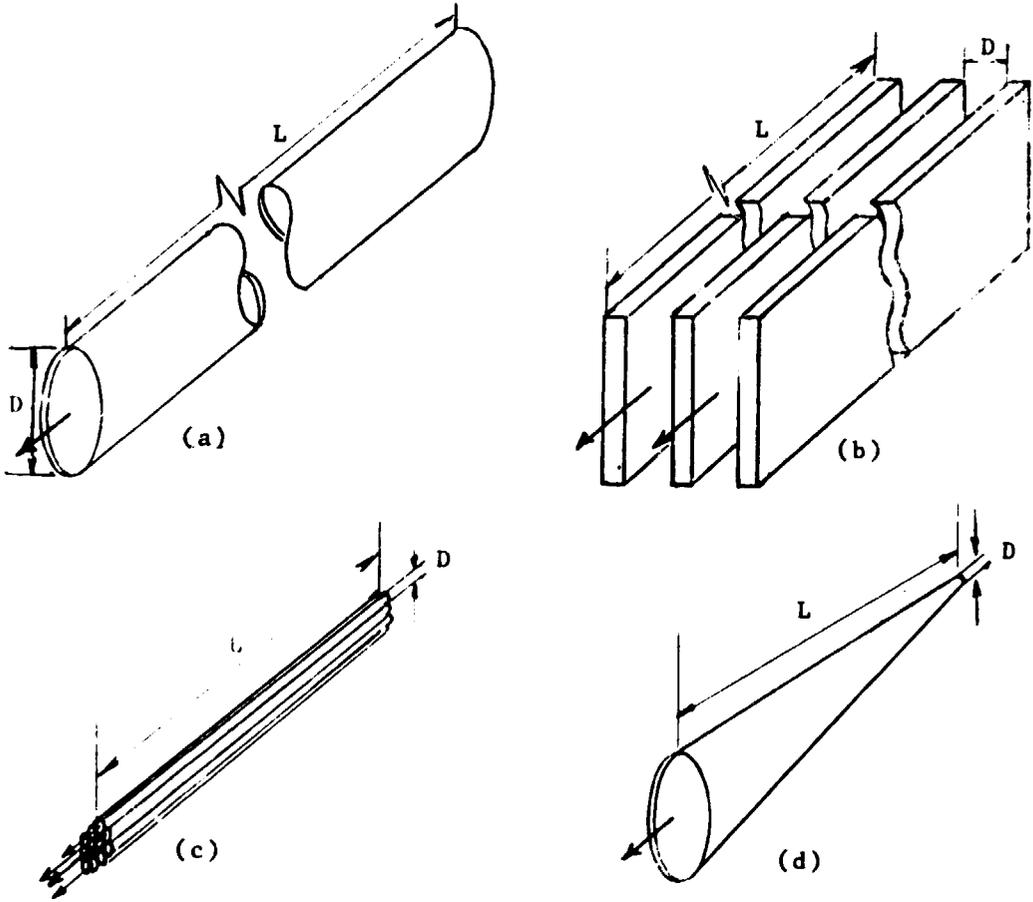


Figura 3.1 – Tipos de Colimadores

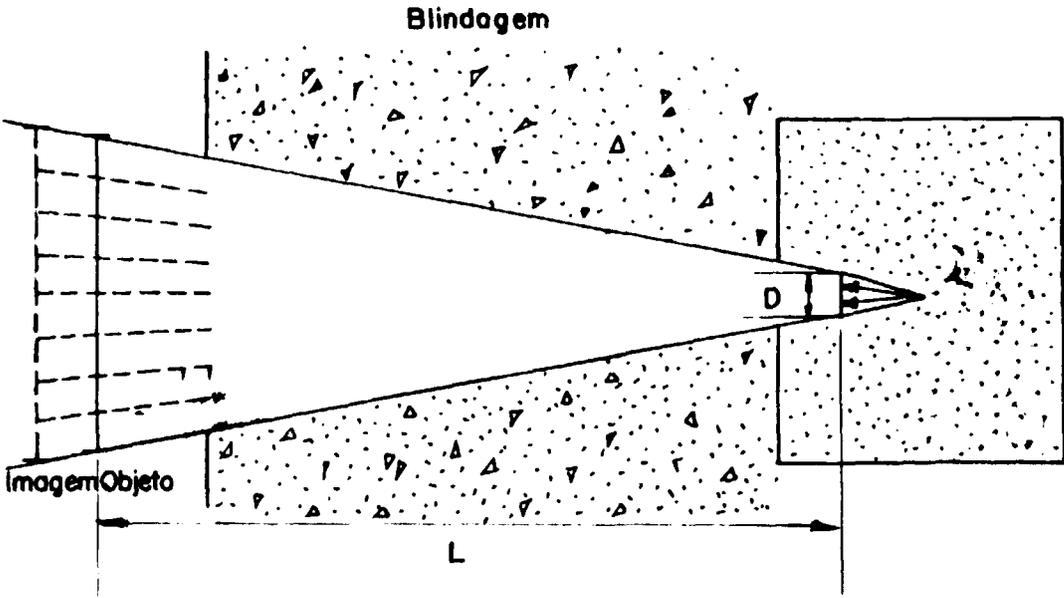


Figura 3.2a – Colimador Cônico

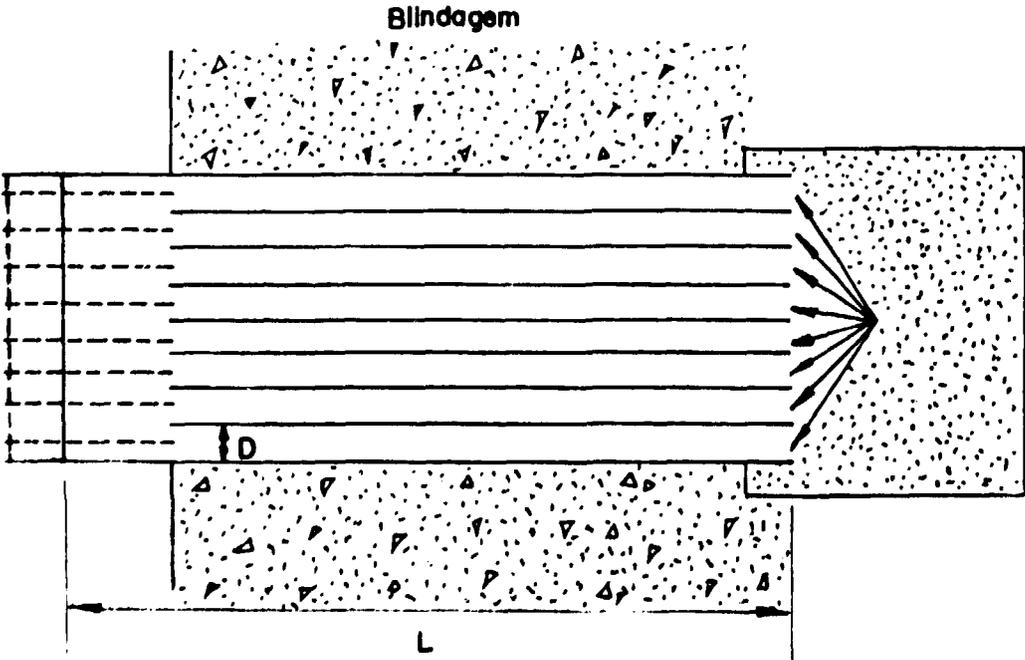


Figura 3.2b – Colimador Multicanal

Figura 3.2 – Comparação do Colimador Cônico com o Colimador Multicanal

Existe, entretanto, um compromisso entre a intensidade de fluxo e a divergência angular, principalmente no que tange ao colimador cônico, pois para diminuir a divergência angular d , D deve diminuir ou L aumentar, em ambos os casos o fluxo é reduzido. Portanto, pode-se encontrar uma situação ótima de fluxo e divergência angular para cada tipo particular de ensaio.

4 – DETECÇÃO DOS NÊUTRONS⁽³⁰⁾

4.1 – Interação dos Nêutrons com o Material (Apêndice A)

Os nêutrons não são partículas diretamente ionizantes, a visualização da imagem latente neutrônica necessita um intermediário denominado conversor. Os nêutrons provocam, sobre este conversor, uma reação nuclear não visível, causando uma emissão secundária ionizante, facilmente detectável.

De um modo geral, os conversores utilizam as reações nucleares seguintes (n,γ) ; (n,α) ; $(n, \text{produtos de fissão})$; $(n, \text{He})^3$ e seus efeitos secundários (decaimento radioativo, gamas de rearranjos de níveis excitados, β de conversão, ionização pelas partículas carregadas etc.).

As emissões dos conversores, quer sejam instantâneas ou retardadas, em seguida agem sobre os detectores de imagens mais clássicas filmes radiográficos (β e γ), fotomultiplicadores (televisão) pelos fótons sobre os ZnS.

O mecanismo de interpretação da imagem é o mesmo que em radiografia e gamagrafia:

Seja:

$\phi_0(E)$ = fluxo de nêutrons de energia E que incide sobre o objeto (colimado e uniforme).

$\Sigma/\rho(E)$ = coeficiente de atenuação de massa do material observado em função da energia E do nêutron.

d = espessura do objeto.

Em primeira aproximação o fluxo saindo do objeto é:

$$\phi(E)dE = \phi_0(E) e^{-(\Sigma/\rho(E))d} dE$$

Se desprezarmos a difusão e a deformação do espectro de nêutrons através da matéria, a reação induzida pelo fluxo de nêutrons ϕ_0 sobre um conversor (homogêneo em toda a sua superfície), é proporcional em todos os pontos à intensidade do fluxo recebido.

Entretanto, um feixe de nêutrons é comumente acompanhado de raios-X ou gama. É então necessário que se empregue um meio de detecção insensível a esta poluição do feixe, isto é, este feixe deve ser filtrado.

De um modo geral, distinguem-se dois métodos de detecção de imagem:

4.2 – Método Direto: Neste método o detector de imagem é colocado diretamente ao feixe juntamente com o conversor (Figura 4.3a).

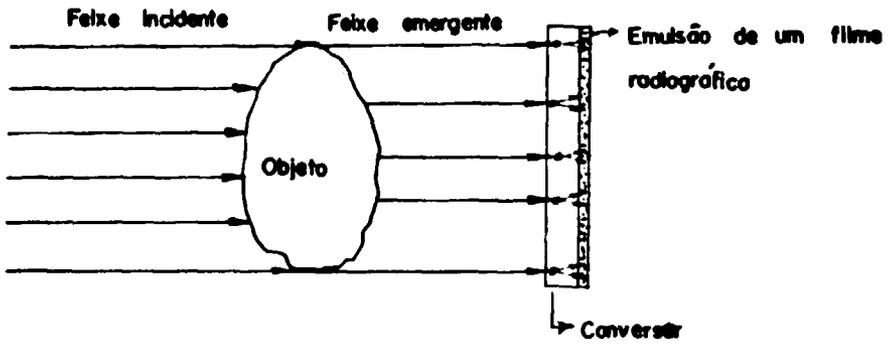


Figura 4.3a - Método Direto

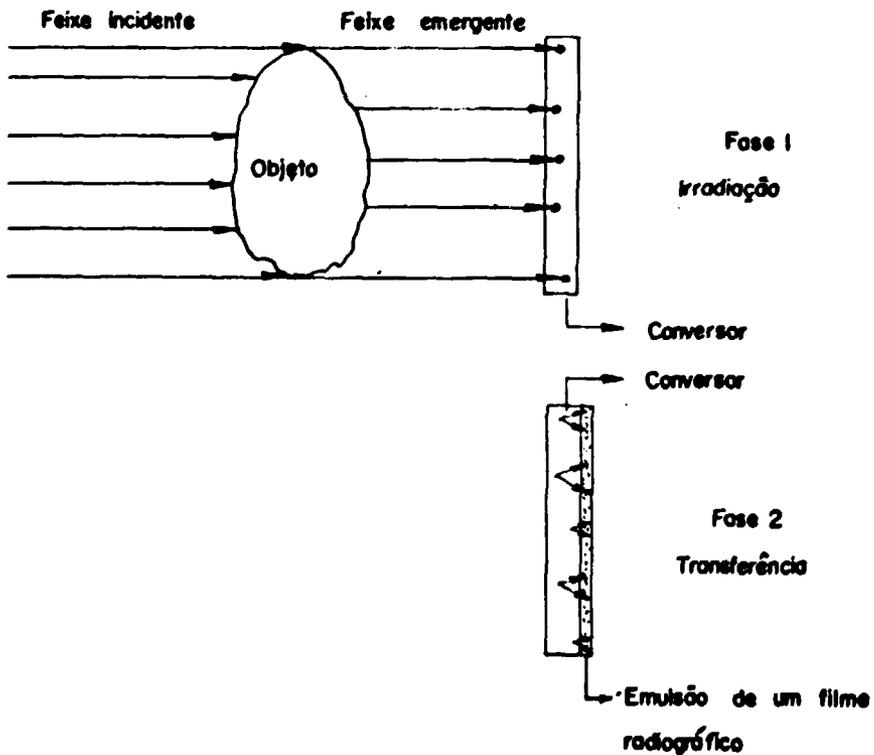


Figura 4.3 - Esquema dos Métodos Utilizados em Neutronografia

4.3 – Método de Transferência: Neste método, introduz-se no feixe um conversor que grava a imagem neutrônica, em seguida é colocado sobre um detector de imagem (sensível a radiações ionizantes) no qual a imagem neutrongráfica é então transmitida (Figura 4.3b).

4.2 – Método Direto

Neste método há dois casos a considerar:

1) O feixe é quase livre de poluição das radiações X ou gama, conseguido mediante a utilização de filtros. Desta forma pode-se utilizar um conversor e um detector de imagem sensível aos raios-X e radiações gama colocados juntos na direção do feixe.

1a) **Conversor Metálico:** (reação pronta (n, γ)), em contacto com um filme radiográfico.

1b) **Conversor Luminescente:** (conversor (n, α)), em contacto com o filme rápido (polaróide) ou filme radiográfico de sensibilidade elevada.

2) O feixe é poluído de radiações gama ou X, ou o objeto é por si mesmo radioativo (por exemplo, elemento combustível queimado). O detector de imagem deve então ser insensível à radiação X ou à radiação gama.

Conversores Metálicos

Os metais escolhidos para conversores metálicos devem possuir secção de choque eficaz considerável para que a taxa de reações com nêutrons seja elevada (Apêndice B).

O gálio-lítio é o melhor dos conversores metálicos em virtude de sua altíssima secção de choque eficaz.

Conversores Luminescentes

As partículas ionizantes produzidas no conversor não são reveladas por um filme, mas sim por intermédio de um cintilador⁽¹⁸⁾ do tipo sulfeto de zinco. Cada superfície elementar do conversor cintila com uma intensidade luminosa proporcional à quantidade de partículas ionizantes recebidas que também é proporcional à intensidade do fluxo de nêutrons incidentes. A imagem formada sobre o conversor apresenta assim variações de intensidades luminosas idênticas às variações de escurecimento de um filme resultante de uma neutrongrafia clássica.

Estes tipos de conversores possuem a vantagem de serem de alta velocidade (30 a 100 vezes mais rápidos que conversores metálicos)⁽²⁵⁾.

4.3 – Método Indireto ou de Transferência

Este método é utilizado quando a região fotográfica é submetida a radiações X ou gama ionizantes, por um feixe insuficientemente filtrado ou quando o objeto por si só é radioativo (por exemplo, elementos combustíveis queimados).

Neste caso o detector de imagem deve ser insensível ou exposto fora da zona do feixe, isto é, após uma transferência do conversor.

O conversor deve ter a característica de poder guardar a imagem criada pelo fluxo neutrônico durante um intervalo de tempo suficientemente longo.

A este fenómeno, utiliza-se o fenómeno da ativação de uma folha metálica fina. A atividade deste conversor em todos os pontos é proporcional à intensidade do fluxo de nêutrons incidentes.

$$A = n v \sigma N(1 - e^{-\lambda t})$$

onde

A é a atividade produzida (desintegrações/s)

$n v$ é a densidade de fluxo, freqüentemente chamada de fluxo de nêutrons; ele é o produto da densidade do nêutron e a velocidade do nêutron

N é o número de átomos inertes estáveis do isótopo a ser ativado

λ é a constante de decaimento

σ é a secção de choque de ativação em cm^2 (1 barn = 10^{-24} cm^2)

A emissão de radiações ionizantes do conversor ativado é também proporcional a este fluxo. Estas radiações retardadas são recebidas sobre um filme radiográfico clássico que fornece imagem visível.

4.4 – Principais Materiais Utilizados como Chapas Conversoras

A Tabela IV.1 fornece uma lista de materiais empregados como chapas conversoras com suas respectivas características⁽⁹⁾.

Materiais como boro, cádmio, lítio e gadolínio possuem pouca tendência de se tornarem radioativos, por isso eles são escolhidos para o caso do método direto. Os outros materiais citados na Tabela IV.1, tornam-se radioativos facilmente e são portanto melhores utilizados no método de transferência, embora também possam ser utilizados no método direto.

4.5 – Comparação dos Dois Métodos

Da análise precedente, resulta que o método de transferência é bem aplicável no caso de exames de objetos muito radioativos. A escolha de um método ou de outro é função dos seguintes parâmetros:

- a) Sensibilidade de detecção
- b) Insensibilidade às radiações gama ou X.
- c) Perfeição da imagem.

a) Sensibilidade de Detecção:

O método direto é cerca de dez vezes mais sensível do que o método de transferência no caso

Tabela IV.1

Materiais Utilizados com Chapas Conversoras

Material e isótopos envolvidos nas reações	Secção de choque p/ reação (barns)	Reação	Meia Vida
Gadolínio-157	240000	$^{157}\text{Gd}(n,\gamma)^{158}\text{Gd}$	
Gadolínio-155	65000	$^{155}\text{Gd}(n,\gamma)^{156}\text{Gd}$	
Samário-149	40800	$^{149}\text{Sm}(n,\gamma)^{150}\text{Sm}$	
Samário-152	140	$^{152}\text{Sm}(n,\gamma)^{153}\text{Sm}$	47 h
Cádmio-113	20000	$^{113}\text{Cd}(n,\gamma)^{114}\text{Cd}$	
Boro-10	3770	$^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$	
Disprósio-164	2000	$^{164}\text{Dy}(n)^{165\text{m}}\text{Dy}$	1,25 min
Disprósio-164	500	$^{164}\text{Dy}(n)^{165}\text{Dy}$	140 min
Lítio-6	910	$^6\text{Li}(n,)^3\text{H}$	
Índio-115	155	$^{115}\text{In}(n)^{115\text{m}}\text{In}$	54,1 min
Índio-115	52	$^{115}\text{In}(n)^{116}\text{In}$	13 s
Ródio-103	140	$^{103}\text{Rh}(n)^{104}\text{Rh}$	44 s
Ródio-106	12	$^{103}\text{Rh}(n)^{104}\text{Rh}$	4,5 min
Ouro-197	96	$^{197}\text{Au}(n)^{198}\text{Au}$	2,7 dias
Prata-107	44	$^{107}\text{Ag}(n)^{108}\text{Ag}$	2,3 min
Prata-109	2,8	$^{109}\text{Ag}(n)^{110\text{m}}\text{Ag}$	270 dias
Prata-109	110	$^{109}\text{Ag}(n)^{110}\text{Ag}$	24,2 s

de conversores metálicos e de cem vezes no caso de cintiladores, por causa de sua capacidade de integração.

A qualidade obtida com cintiladores é inferior à dos conversores metálicos no que diz respeito ao contraste e definição, porém é superior no que refere a sensibilidade.

b) Insensibilidade às Radiações Gama:

Por ordem de insensibilidade crescente tem-se:

- 1) Método direto, conversor metálico (altos fluxos)
- 2) Método direto, cintiladores (baixos fluxos)
- 3) Método indireto, (alto fluxo gama) insensibilidade às radiações gama e X parasita.

c) Perfeição da Imagem:

Se for utilizado um reator como fonte de nêutrons a intensidade do fluxo obtido é elevado, permitindo reduzir a espessura da chapa conversora e portanto minimizando o problema de espalhamento.

5 – POSSIBILIDADE DE UTILIZAÇÃO DO IEAR-1 EM NEUTRONGRAFIA

Para extrair-se feixe de nêutrons do caroço do Reator IEAR-1 podem ser consideradas duas possibilidades:

- 1) Utilizando-se os "beam-holes"
- 2) Utilizando-se dispositivos neutrongráficos mergulhados na piscina e próximos ao caroço do Reator.

5.1 – Utilização dos "Beam-Holes"

Como já foi mencionado anteriormente o Reator IEAR-1 dispõe de tubos "beam-holes" que ligam o caroço do Reator à região externa da piscina. Esses tubos, em número de 12, como podem ser vistos na Figura 5.2 são na maioria radiais em relação ao caroço e, portanto, podem fornecer feixes diretos de nêutrons. Como a parte ativa do caroço é envolvida por refletores de grafita que são também moderadores e como o conjunto é submerso em água, pode-se, em primeira aproximação, dizer que o feixe obtido é térmico.

Dentre todos os "beam-holes" o de número 9 além de se encontrar disponível para utilização em neutrongrafia, apresenta fluxo térmico de nêutrons (quando o reator opera à potência de 2 Mw), de 5×10^6 n/cm² xs.

O feixe neutrônico emergente do caroço é entretanto acompanhado por intensa radiação gama que é muito prejudicial quando se utiliza o método direto, pois sobreposta a neutrongrafia aparecerá uma gamagrafia indesejável.

Diminui-se o efeito desta radiação, utilizando-se materiais que são blindagens para gamas e não são para nêutrons.

O berílio e a grafita são exemplos comuns desses filtros de radiações gama.

Uma relação importante em neutrongrafia, quando se utiliza o método direto, é a razão entre a intensidade de nêutrons térmicos e intensidade da radiação gama.

Evidentemente, esta razão deve ser a maior possível para se conseguir boas neutrongrafias.

Normalmente, um valor desejável para esta relação é de 10^6 a 10^5 n/cm² xs, para cada mR/s de radiação gama (Figura 5.1).

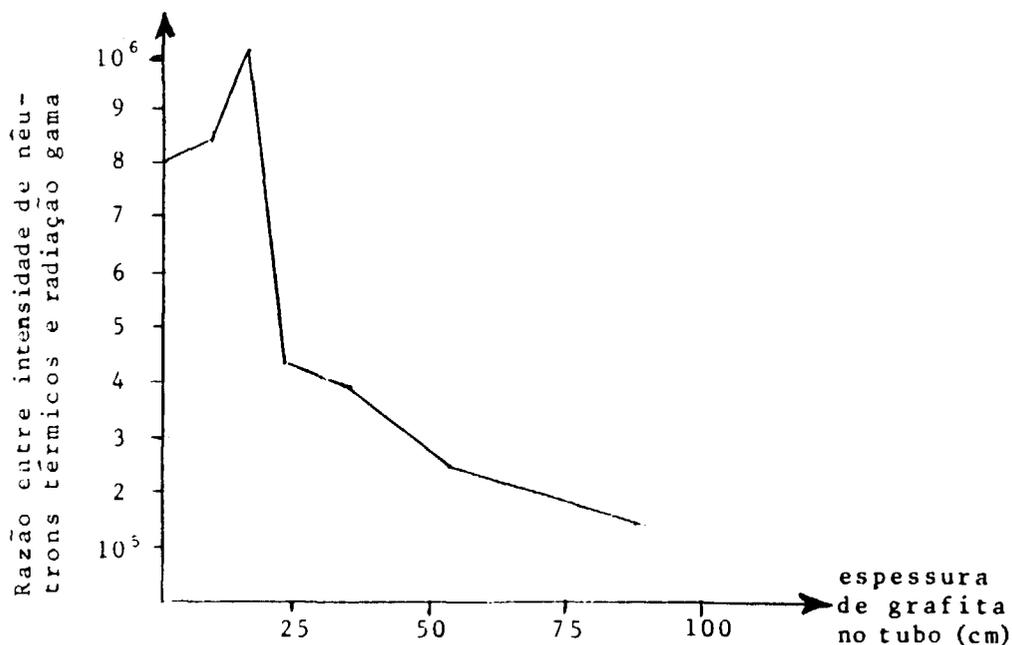


Figura 5.1 – Razão Entre a Intensidade de Nêutrons Térmicos e a Radiação Gama como Função da Espessura da Grafita Colocada no Caminho do Feixe⁽⁹⁾

A primeira consequência deste requisito é uma redução na intensidade do fluxo de nêutrons, pois os filtros para gama são também para nêutrons, embora em menor escala. Desta forma o fluxo neutrônico cai a um valor tal que a neutrongrafia se torna muito difícil de realizar-se.

Utilizando-se o método indireto esta poluição gama não causará problemas.

Além do baixo fluxo na saída dos "beam-holes" constituir problemas, surge também complicações atinentes às radiações nos arredores do local de trabalho.

É preciso construir (Figura 5.2) blindagens para a radiação gama e principalmente para nêutrons.

Para blindar a radiação gama que vem do carço, do objeto, da chapa conversora e das blindagens de nêutrons deve-se construir paredes adicionais de chumbo ou concreto.

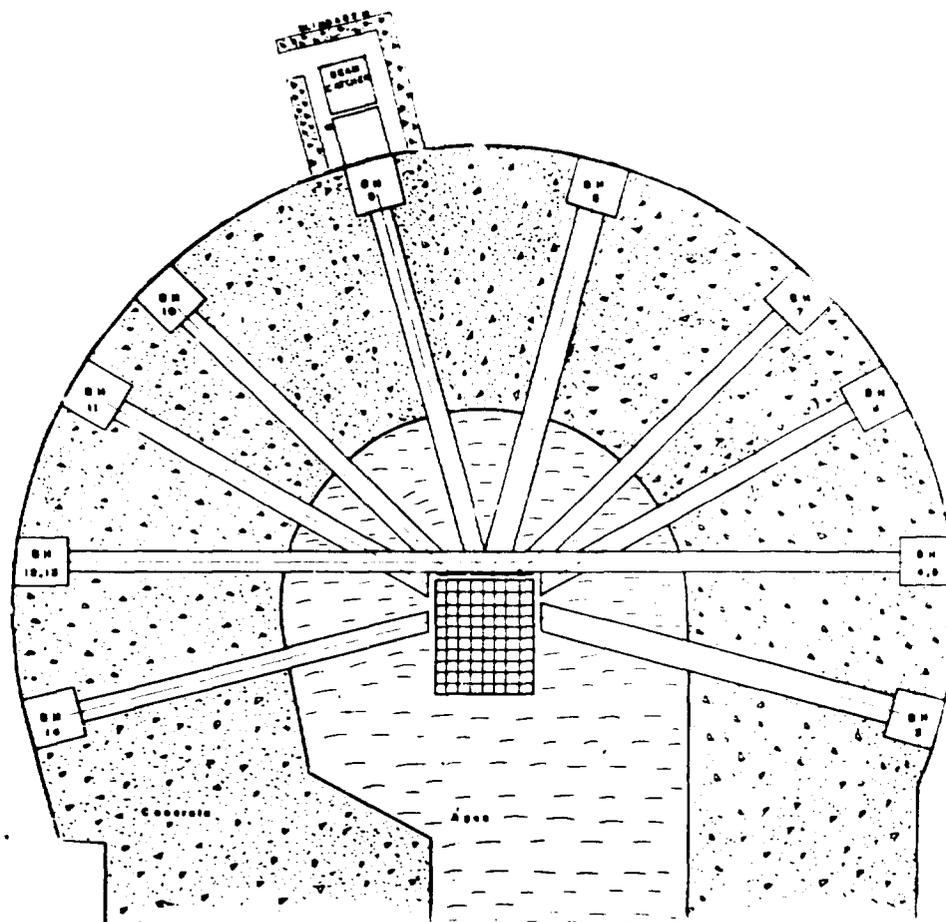


Figura 5.2 – Sistema de Blindagem para Experimentos Neutronográficos (Beam Hole Número 9 do IEAR-1)

Para blindar os nêutrons deve-se construir paredes de parafina com quantidades de boro (para absorver os nêutrons) ou água.

Além dessas blindagens é necessário blindar o feixe direto emergindo do objeto. Isso se consegue normalmente com os "beam-catchers", que são grandes blocos de parafina com boro, ocultos internamente onde penetra o feixe que será espalhado ou absorvido.

Além do sério problema de blindagens das radiações que são muito espalhantes, surge o inconveniente de radiografar com nêutrons, materiais radioativos ativados como é o caso dos elementos combustíveis já utilizados no Reator. Estes elementos são altamente radioativos e portanto devem estar encerrados em blindagens poderosas para conter as radiações (principalmente as radiações gama).

O conjunto "beam-catcher", dispositivo neutron-gráfico incluindo suportes para objetos radioativos e blindagens visivelmente trará problemas de espaço útil disponível.

Este conjunto é imprescindível tanto sob o ponto de vista de proteção radiológica quanto ao fato de radiações espalhadas no meio interferirem em outras experiências vizinhas sensíveis a estas radiações.

Diante de todas essas considerações a utilização de dispositivo imerso na água da piscina e perto do caroço do Reator parece mais compatível com a situação.

5.2 – Utilização de Dispositivo Neutronográfico Mergulhado na Piscina

Neste caso o dispositivo neutronográfico é imerso a uma profundidade de 2,50 da superfície da água da piscina, ficando aproximadamente à meia altura do caroço do Reator e perpendicular à face norte.

A grande vantagem deste processo é que o conjunto estando neste local a questão da blindagem fica solucionada.

Como no caso anterior, tanto o método direto como o de transferência pode ser aplicado.

A desvantagem deste processo decorre da dificuldade do manuseio do dispositivo nesta profundidade da piscina. Esta desvantagem entretanto é compensada amplamente quando se trata de ensaios com elementos combustíveis usados para verificar sua situação de queima. Se os "beam-holes" fossem utilizados para tal propósito, dever-se-ia lançar mão de poderosas blindagens para tais elementos combustíveis, o que tornaria impraticável a realização de tal ensaio.

Como o conjunto se encontra circundado pela água, ocorre inconvenientes de espalhamento de nêutrons devido a presença deste moderador que pode ser diminuída com a utilização de paredes de material fortemente absorvedor de nêutrons, a saber, cádmio, boro etc.

Pretende-se levar a efeito, futuramente, ensaios em elementos combustíveis já gastos do IEAR-1, para tanto baseando-se nesta meta o segundo processo será desenvolvido neste presente trabalho.

O método de transferência foi adotado em virtude da marcante presença das radiações gama de energias variadas e intensas provenientes principalmente do caroço do Reator.

6 – DESCRIÇÃO DOS DISPOSITIVOS E TÉCNICAS UTILIZADAS

6.1 – Dispositivo com Colimador Tipo Tubos

O primeiro dispositivo ensaiado, foi projetado e construído no COURP-AOMRP (Centro de Operação e Utilização de Reatores de Pesquisa – Área de Operação e Manutenção de Reatores de Pesquisa) e é formado por três partes (Figura 6.1):

- a) Colimador de nêutrons
- b) Câmara do objeto a neutrongrafar
- c) Suporte da chapa conversora

a) Colimador de Nêutrons

Consiste em um tubo de alumínio de 230 mm de comprimento selado nas duas extremidades por lâminas circulares de alumínio de espessura de 1 mm. O diâmetro interno deste tubo é de 40 mm e o externo é de 44,5 mm. Este tubo contém 28 tubos de aço inoxidável de 210 mm de comprimento, diâmetro interno 4,35 mm e externo 6,35 mm.

b) Câmara do Objeto a Neutrongrafar

Consiste em um cilindro oco de alumínio com diâmetro interno igual ao externo do colimador, diâmetro externo de 50 mm tendo comprimento de 100 mm.

Nesta câmara o objeto é fixado nas bordas da parede interna do tubo, na extremidade mais afastada do colimador.

Este tubo contém apenas o objeto e ar.

c) Suporte da Chapa Conversora

É uma tampa de alumínio que se ajusta com ligeira pressão na câmara.

Internamente a esta tampa há uma lâmina circular fina de alumínio que se adapta ao diâmetro interno desta tampa. Fixa rigidamente à lâmina encontra-se a chapa conversora de ouro de pureza 99,9% onde se formará a imagem latente do objeto.

Esta tampa, ao ligar-se com a câmara, permite que a chapa conversora fique em contato com o objeto.

6.2 – Medidas de Fluxo de Nêutrons nas Posições a se Neutrongrafar

6.2.1 – Considerações Teóricas

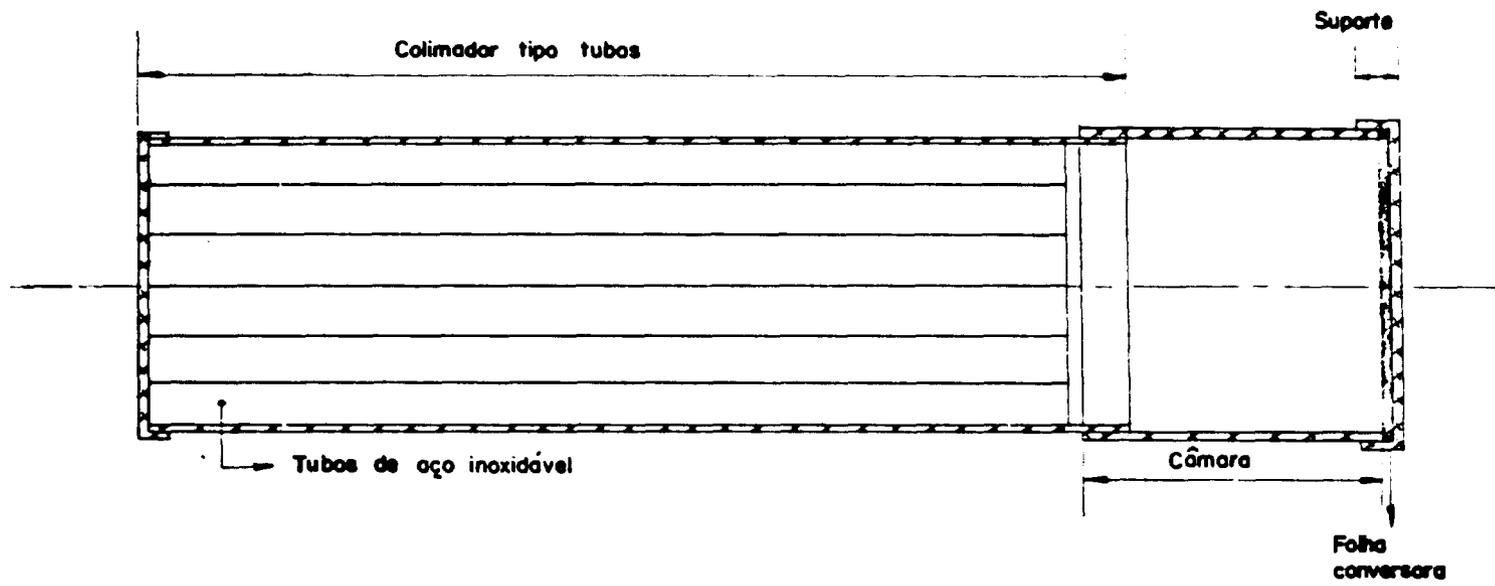


Figura 6.1 – Conjunto Neutronográfico Montado

O fluxo de nêutrons ϕ_0 é uma variável importante no tocante à questão de quanto uma fonte deve ser efetiva para impressionar uma emulsão fotográfica.

Assumindo que o fluxo não varie muito durante o tempo de irradiação (~ 1 hora) que por sinal é muito pequeno comparado com a meia vida das folhas de ouro utilizadas e que a folha é virgem às irradiações com nêutrons no instante $t = 0$, tem-se então que a atividade induzida na folha é:

$$A = A_{\infty}(1 - e^{-\lambda t_i}) \quad (6.1)$$

onde t_i é o tempo de irradiação, λ_i é a constante de decaimento do ouro ($\lambda_i = 0,693/T_{1/2}$), (sendo que $T_{1/2}$ é a meia vida do elemento em questão), A_{∞} é a atividade saturada, isto é, atividade atingida num tempo infinito de irradiação.

A atividade saturada é dada por:

$$A_{\infty} = \int_0^{\infty} N\sigma(E) \phi(E) dE \quad (6.2)$$

onde

N = Número de átomos do isótopo pai

$\sigma(E)$ = Secção de choque de ativação à energia E

$\phi(E)$ = Fluxo de nêutron à energia E

Assumindo que o fluxo térmico obedece uma distribuição Maxwelliana⁽²³⁾,

$$\phi_t(E) = \sqrt{\frac{4T}{\pi T_0}} \phi_0 \frac{E}{(KT)^2} e^{-E/KT} \quad (6.3)$$

podemos separar a integral anterior da seguinte forma:

$$A_{\infty} = \int N\sigma(E) \phi_t(E) dE + \int N\sigma(E) \phi_e(E) dE \quad (6.4)$$

térmica = A_t epitérmica = A_e

ou seja,

$$A_{\infty} = A_t + A_e \quad (6.5)$$

onde

E = Energia do nêutron

K = Constante de Boltzman

$T_0 = 293^\circ \text{K}$

T = Temperatura do moderador em $^{\circ}\text{K}$.

O fluxo ϕ_0 da equação (6.3) é definido como sendo o produto de n (Número total de nêutrons no intervalo de energia térmica) e v_0 (Velocidade de um nêutron à temperatura ambiente de 20°C ou 293°K que vale 2200 m/s).

$$\phi_0 = n v_0 \quad (6.6)$$

O fluxo térmico (equação 6.3, integrada em energia no intervalo térmico), é definida como o produto n (Número total de nêutrons no intervalo de energia térmica) e \bar{v} (Velocidade média dos nêutrons neste intervalo em cm/s).

$$\phi_t = n \bar{v} \quad (6.7)$$

onde

$$\bar{v} = \frac{\int_{\text{térmica}} v(E) \phi_t(E) dE}{\int_{\text{térmica}} \phi_t(E) dE} = v_0 \sqrt{\frac{4T}{\pi T_0}} \quad (6.8)$$

Portanto

$$\phi_t = \phi_0 \sqrt{\frac{4T}{\pi T_0}} \quad (6.9)$$

No intervalo térmico a folha de ouro obedece aproximadamente a lei " $1/v$ " dos absorvedores: isto é:

$$\sigma(E) = \frac{\sigma_0 v_0 g}{v(E)} \quad (6.10)$$

onde

σ_0 = Secção de choque de ativação à temperatura T_0

$v(E)$ = Velocidade do nêutron de energia E

g = Fator de correção para característica não " $1/v$ "⁽²³⁾.

Utilizando as equações (6.4), (6.3) e (6.10) temos:

$$A_- - A_0 = A_t$$

Por outro lado,

$$A_t = \int_{\text{t\u00e9rmica}} g N \sigma_o \frac{v_o}{v(E)} \sqrt{\frac{4T}{\pi T_o}} \phi_o \frac{E}{(KT)^2} e^{-E/KT} dE$$

$$A_t = N \sigma_o g \phi_o v_o \sqrt{\frac{4T}{\pi T_o}} \int_{\text{t\u00e9rmica}} \frac{1}{v(E)} \frac{E}{(KT)^2} e^{-E/KT} dE$$

Substituindo (6.8) vem que

$$A_t = N \sigma_o g \phi_o \bar{v} \frac{1}{v} = N \sigma_o g \phi_o \quad (6.11)$$

De onde se tira que:

$$\phi_o = \frac{A_t}{N \sigma_o g} \quad (6.12)$$

ou seja,

$$\phi_o = \frac{(A_- - A_0)}{N \sigma_o g} \quad (6.13)$$

Finalmente utilizando (6.9) vem que:

$$\phi_t = \frac{(A_- - A_0)}{N \sigma_o g} \sqrt{\frac{4T}{\pi T_o}} \quad (6.14)$$

No caso do IEAR-1 $T \approx T_o$ na posi\u00e7\u00e3o onde o fluxo \u00e9 medido e $g = 1,00$.

Portanto a equa\u00e7\u00e3o (6.14) torna-se:

$$\phi_t = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{A_- - A_0}{N \sigma_o} \right) \quad (6.15)$$

6.2.2 - Procedimento Experimental

A atividade saturada \u00e9 obtida atrav\u00e9s da medida da atividade da folha de ouro nua e usando a f\u00f3rmula (6.1).

$$A_- = \frac{A}{(1 - e^{-\lambda t_1})} \quad (6.16)$$

A atividade devida a nêutrons epitérmicos é determinada utilizando cobertura de cádmio na folha de ouro.

$$A_e = A_{\infty}(\text{cd}) = \frac{A(\text{cd})}{(1 - e^{-\lambda t_1})} \quad (6.17)$$

$$A_t = \frac{A}{(1 - e^{-\lambda t_1})} \frac{A(\text{cd})}{(1 - e^{-\lambda t_1})} \quad (6.18)$$

O arranjo do caroço na data desta experiência era o de número 95 (Figura 6.2).

O dispositivo neutrongráfico foi então colocado atrás do refletor da posição 6, sem o objeto.

As medidas foram feitas em quatro folhas de ouro sendo duas delas cobertas de cádmio.

Na extremidade do dispositivo, próximo ao refletor, foram colocadas duas folhas de ouro sendo uma delas coberta com cádmio. Na outra extremidade, procedeu-se de maneira idêntica.

O fluxo térmico obtido na localidade do refletor foi de $9,25 \times 10^9$ n/cm² xs e na outra extremidade (região do objeto) o fluxo alcançou $8,30 \times 10^8$ n/cm² xs.

Utilizando-se a atividade das folhas de ouro coberta com cádmio A' e nua A determinou-se a razão de cádmio ($R_{\text{Cd}} = \frac{A'}{A}$) que resultou no valor 22,1.

Dos resultados acima concluímos:

- 1) O fluxo na posição do objeto está muito acima do valor mínimo requerido para se neutrongrafar (10^4 a 10^5 n/cm² xs), sendo desta forma viável a realização de neutrongrafias.
- 2) A razão de cádmio obtida indica que o fluxo é quase térmico, o que é extremamente importante no caso do ouro que possui alta secção de choque de ativação para nêutrons térmicos (98 "barns").
- 3) O fluxo cai aproximadamente de um fator de dez na posição do objeto em relação a extremidade anterior.

6.3 – Mecanismo de Ativação da Folha de Ouro

Em primeiro lugar, a folha de ouro é centrada no suporte da chapa conversora tendo centro comum com o colimador.

O objeto é também centrado e colocado o mais próximo possível da folha de ouro.

O dispositivo global é inteiramente mergulhado na piscina e dirigido à superfície lateral do caroço onde o fluxo foi medido previamente.

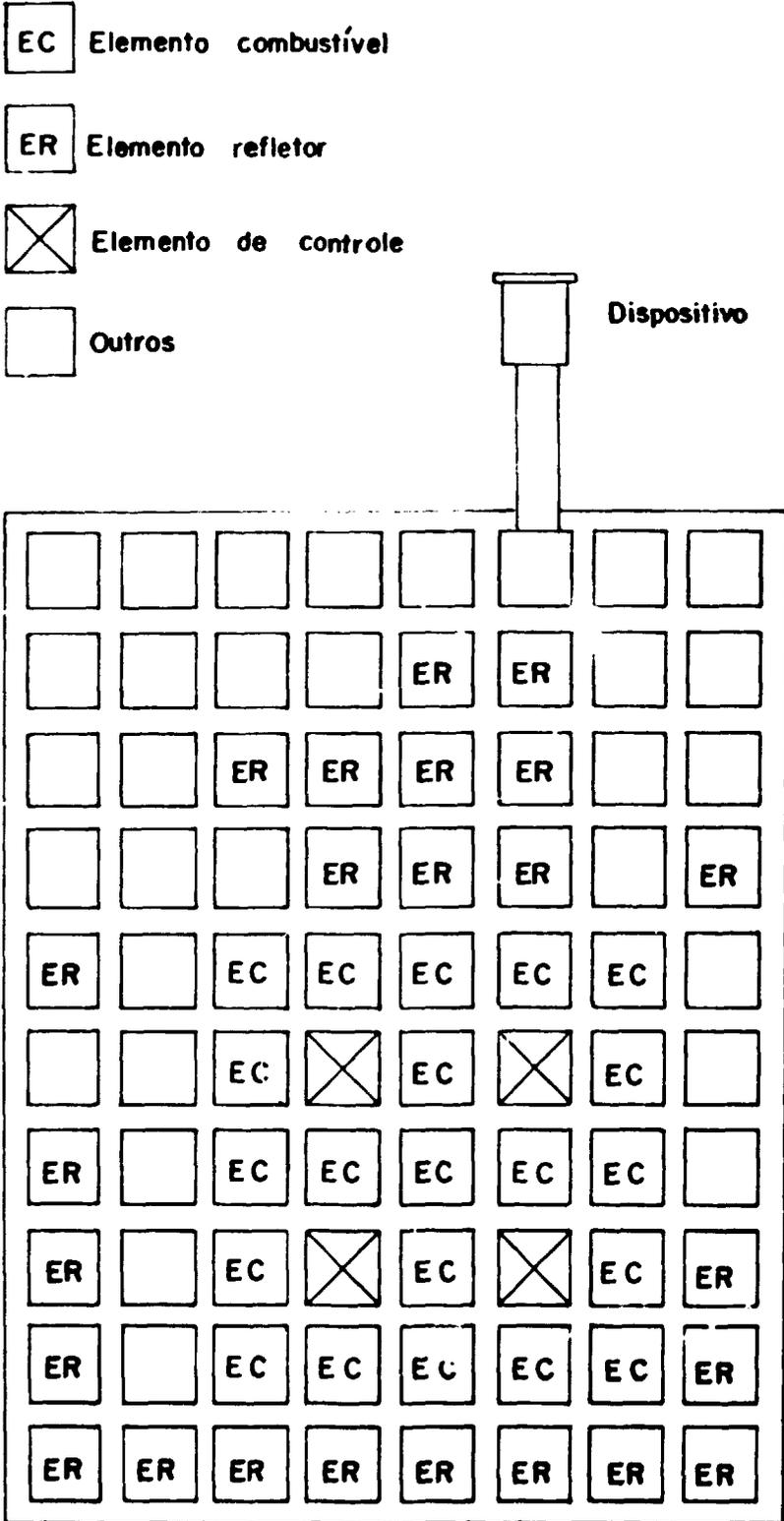


Figura 6.2 – Arranjo Número 95

Após um tempo de exposição que também é calculado, baseado no fluxo, o conjunto é removido dos arredores do carozo e deixado numa posição para decaimento das estruturas de alumínio ativadas. Em seguida o objeto é removido e a folha é colocada em contato direto com o filme de Raio-X.

A imagem é transferida ao filme por intermédio das radiações beta e gama ionizantes. Após um tempo de exposição necessário, o filme é revelado numa sala escura.

A folha metálica emite radiações beta e gama no decaimento.

A radiação beta é mais ionizante e portanto mais importante na exposição do filme.

B. L. Blanks e R. A. Morris⁽¹²⁾ obtiveram curvas características para radiografia com nêutrons, relacionando a densidade do filme, D , e a exposição beta.

Assumindo que a região linear é a de interesse podemos obter a relação seguinte:

$$D = \gamma \ln (KQ) - L \quad (6.19)$$

onde

γ = é o contraste do filme

L = é a insensitividade do filme à radiação emitida

Q = radiação beta emitida por unidade de volume da folha

$K = \frac{\text{radiação beta que colide por unidade de área do filme}}{\text{radiação beta emitida por unidade de volume da folha}}$

Quando a folha conversora é exposta a um fluxo de nêutrons e posteriormente é deixada decair, sua atividade varia de acordo com o gráfico da Figura 6.3.

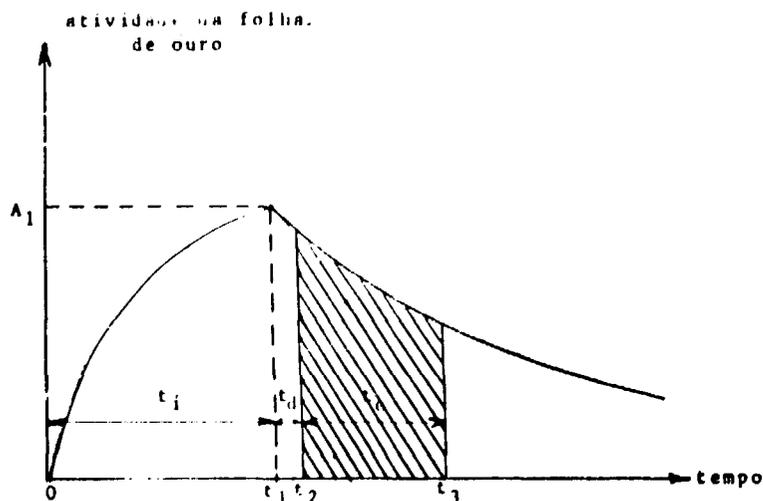


Figura 6.3 - Atividade da Folha Conversora em Função do Tempo

$t_i = t_1 - 0 =$ tempo de irradiação no reator.

$t_d = t_2 - t_1 =$ tempo de decaimento da folha antes de colocar em contato com o filme.

$t_e = t_3 - t_2 =$ tempo de exposição da folha ativada, no filme.

$$A_1 = N\sigma_0\phi_0(1 - e^{-\lambda t_i}) = N\sigma_0\phi_0(1 - e^{-\lambda t_i}) \quad (6.20)$$

Atividade da folha no final do tempo de irradiação, onde:

$N =$ densidade dos números de isótopos estáveis presentes.

$\phi_0 =$ fluxo neutrônico (constante durante a irradiação).

$\sigma_0 =$ secção de choque de ativação.

$\lambda =$ constante de desintegração $= 0,693/T_{1/2}$

$$N = \frac{N\rho F}{A} \quad (6.21)$$

$N =$ número de Avogadro.

$\rho =$ densidade do elemento.

$A =$ peso atômico em gramas do isótopo pai.

$F =$ fração da composição do material que é isótopo pai.

O número de partículas beta emitidas no intervalo de tempo, dt' , após a irradiação é $A_1 e^{-\lambda t'} dt'$. Portanto, o número de radiação beta emitida por unidade de volume da folha após a irradiação é:

$$Q(t) = \int_0^{t-t_1} A_1 e^{-\lambda t'} dt' \quad (6.22)$$

O número de betas emitidos durante a exposição no filme da folha é:

$$Q = \int_{t_d}^{t_d+t_e} A_1 e^{-\lambda t'} dt' = -\frac{1}{\lambda} A_1 (e^{-\lambda(t_d+t_e)} - e^{-\lambda t_d})$$

Usando (6.20), (6.21) tem-se:

$$Q = \frac{N\rho F\sigma_o\phi_o(1 - e^{-\lambda t_i})}{A\lambda} e^{-\lambda t_d} (1 - e^{-\lambda t_e}) \quad (6.23)$$

Substituindo (6.23) em (6.19) e rearranjando os termos obtém-se:

$$D = \gamma \ln \left\{ \frac{KN\rho F\sigma_o\phi_o}{A\lambda} [e^{-\lambda t_d} (1 - e^{-\lambda t_i}) (1 - e^{-\lambda t_e})] e^{-L/\gamma} \right\} \quad (6.24)$$

Como t_d , t_i e t_e são muito menores que $T_{1/2}$ (no caso do ouro), então se pode simplificar a expressão acima:

$$D \approx \gamma \ln \left[\frac{KN\rho F\sigma_o\phi_o}{A} \lambda t_i t_e (1 - \lambda t_d) e^{-L/\gamma} \right] \quad (6.25)$$

Esta equação é útil para determinar de que maneira muda a exposição (medida através da densidade óptica) de uma radiografia com nêutrons feita com a técnica de transferência.

Por exemplo, as seguintes grandezas implicam num aumento de D.

- 1) Aumentando o contraste do filme (γ).
- 2) Aumentando $\frac{\rho F}{A}$, densidade relativa do número de isótopos pai.
- 3) Aumentando σ_o , secção de choque de ativação.
- 4) Aumentando ϕ_o , fluxo de nêutrons.
- 5) Aumentando t_i , tempo de irradiação com nêutrons.
- 6) Aumentando t_e , tempo de exposição do filme.
- 7) Diminuindo t_d , intervalo de decaimento entre o final da irradiação e o início da exposição do filme.
- 8) Diminuindo a insensibilidade L do filme.

6.4 – Obtenção das Primeiras Neutronografias

O primeiro objeto a neutronografar (Figura 6.4) foi um disco de alumínio de diâmetro e espessura de 44,5 mm e 7,0 mm respectivamente, contendo cinco furos de diâmetros iguais e profundidades não superiores a 8 mm. Quatro desses furos são excêntricos em relação ao centro do disco e um é central.

O furo central foi preenchido com cádmio e os outros quatro restantes foram preenchidos, respectivamente, com ferro, parafina, plástico e lucite.

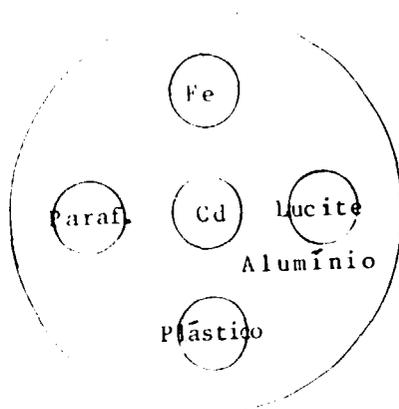


Figura 6.4 – Objeto a Neutronografia, Composto de Vários Materiais

Utilizamos esses materiais por causa de suas contrastantes diferenças de secção de choque em relação ao alumínio.

A chapa conversora de ouro utilizada possui espessura de 0,05 mm com área total de 20 cm² e pesa 1,97 gramas.

Uma vez estabelecido o valor do fluxo na posição do objeto, calculou-se o tempo que deveria ser irradiado para que atingisse uma atividade tal que a exposição da chapa conversora ao filme fosse da ordem de cinco minutos, com densidade óptica de 1,00 (Apêndice C); este tempo foi calculado em 60 minutos.

Foi desta forma realizada a primeira irradiação, a chapa conversora tendo sido colocada sobre o filme em quatro tempos de exposições (16, 8, 4 e 2 minutos, respectivamente).

Os filmes utilizados foram filmes Kodak tipo AA para raio-X (Apêndice C).

Após a revelação do filme, os positivos obtidos (Figura 6.5) foram analisados.

Como já se esperava, a neutronografia obtida estava indefinida embora pudesse notar os furos onde continham os materiais citados. Fez-se um mapeamento de densidade num dos negativos (Figura 6.6), utilizando um densitômetro. A finalidade da utilização deste aparelho foi a de obter medidas quantitativas da densidade em vários pontos do filme, uma vez que se torna difícil a análise a olho nu de pontos de densidades próximas.

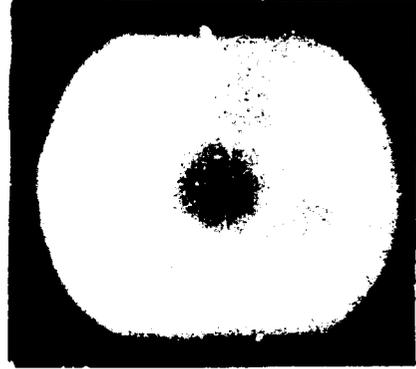
A má qualidade da neutronografia obtida é atribuída a uma série de fatores

1) baixo grau de colimação

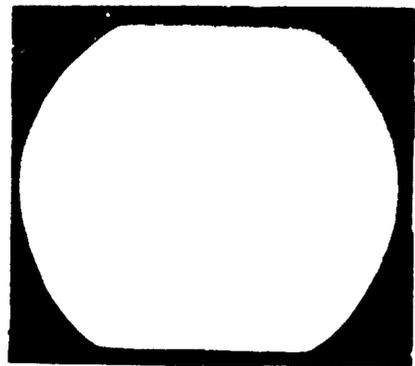
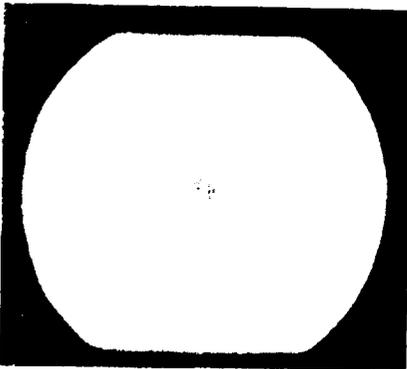
A razão de colimação para este tipo de colimador ($d = D/L$) é de aproximadamente 1/50 que é grande comparado com os bons colimadores cujos valores de d são inferiores a 1/100.

2) alto grau de espalhamento

Os nêutrons térmicos sendo fortemente espalhados⁽⁵⁾ por núcleos de ferro, parte considerável deles é espalhada no aço inoxidável antes de atingir o objeto. Dessa forma, a definição e contraste da imagem ficam prejudicadas.

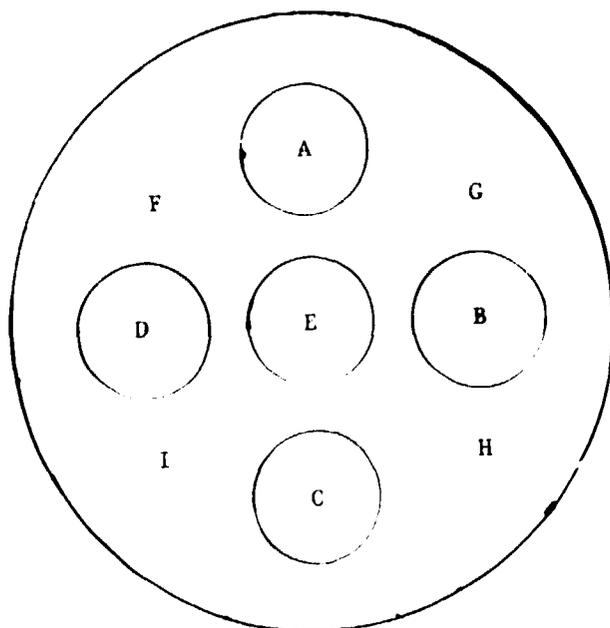


Figuras 6.5a – Tempo de Exposição 2 e 4 minutos, Respectivamente



Figuras 6.5b – Tempo de Exposição 8 e 16 minutos, Respectivamente

Figuras 6.5 – Positivos do Objeto Prova da Figura 6.4



Local da Medida	Material	Densidade
A	Ferro	1,30
B	Lucite	1,31
C	Plástico	1,25
D	Parafina	1,27
E	Cádmio	0,99
F	Alumínio	1,36
G	Alumínio	1,36
H	Alumínio	1,36
I	Alumínio	1,36

Densidade de Fundo (Região do Filme não Exposta à Radiação) $D_f = 0,46$.

Figura 6.6 – Mapeamento da Densidade do Filme (de Exposição = 4 min)

A maior parcela dos nêutrons espalhados provém de espalhamento na água dos nêutrons térmicos e também dos rápidos que são moderados e finalmente espalhados na direção do objeto.

Sendo finita a secção de choque de absorção do ouro, uma parcela de nêutrons também conseguirá atravessar a chapa conversora e ser retroespalhada na água e ativando esta chapa no seu verso. Também alguns nêutrons que são rápidos atravessam a chapa conversora facilmente (devido sua baixa secção de choque de absorção para nêutrons rápidos) e são moderados na água voltando na direção da chapa conversora.

Finalmente, existe também, embora em menor escala, espalhamento de nêutrons nas estruturas de alumínio do dispositivo.

Para reduzir esses efeitos, projetou-se um novo dispositivo semelhante ao primeiro, porém em tamanho maior (Figura 6.7) e com as correções seguintes:

- 1) Diminuição da divergência angular ou raio de colimação. Esta melhora na divergência foi conseguida aumentando proporcionalmente mais o comprimento do que o diâmetro interno dos tubinhos, isto é, a relação $d = D/L = 10/1000 = 100$.
- 2) Para evitar o espalhamento na água, o feixe de tubinhos (também em número de 28), foi envolvido por um tubo de cádmio em toda a extensão do colimador.
- 3) Para evitar o retroespalhamento⁽¹³⁾ dos nêutrons que atravessavam a chapa conversora de ouro construiu-se uma lâmina de folha de cádmio atrás da folha de ouro. Assim, os nêutrons térmicos que conseguissem atravessar a lâmina de ouro seriam absorvidos e os nêutrons rápidos que também conseguissem atravessar a lâmina de cádmio seriam moderados na água e ao serem retroespalhados seriam absorvidos no cádmio, não atingindo portanto a folha de ouro (Figura 6.8).

Um fenômeno inerente que ocorre neste tipo de colimador é o aparecimento, na imagem, de sombreamento provocado pelas paredes dos tubos, portadores do feixe. Para evitar esse sombreamento, o objeto deve ser colocado bem distante da extremidade do colimador onde terminam os tubos. A consequência deste procedimento é que a imagem vai perdendo cada vez mais sua definição. É então necessário jogar com estes dois fatores a fim de se encontrar uma situação ótima, o que é feito experimentalmente variando a distância do objeto para um mesmo fluxo de nêutrons, mesmas condições de obtenção da imagem fotográfica (exposição, revelação, fixação etc.).

6.5 – Desenvolvimento de Dispositivo Neutronográfico com Colimador Cônico

Em virtude dos problemas apresentados pelo colimador anteriormente descrito, desenvolveu-se um colimador cônico, utilizando o ácido bórico como moderador e absorvedor.

Como no caso anterior, este dispositivo neutronográfico é constituído basicamente da mesma maneira, variando apenas na parte do colimador (Figura 6.9).

a) Colimador

Constituído, internamente, por uma casca de alumínio cônica delgada, selada nas duas extremidades por lâminas delgadas de alumínio.

Externamente, é constituído por um tubo cilíndrico de alumínio, também selado nas extremidades.

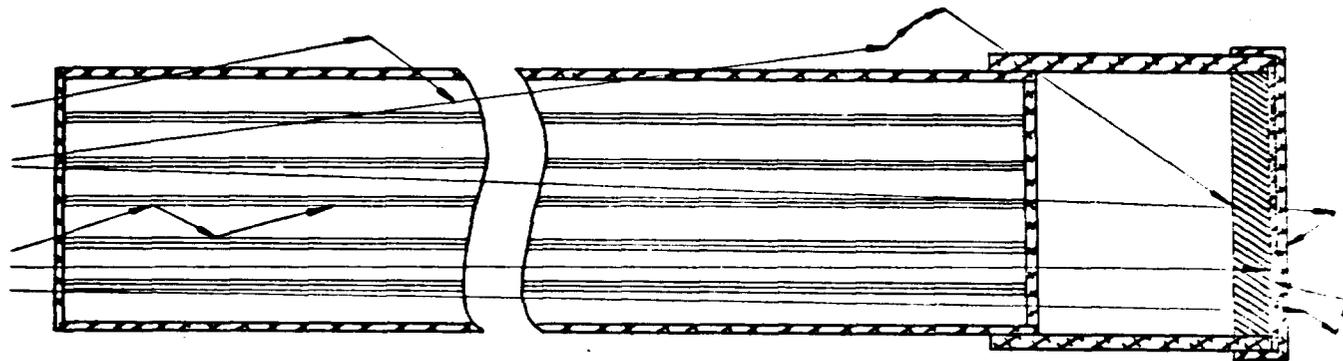


Figura 6.7 – Esquema das Trajetórias de Alguns Nêutrons no Colimador (Sem Revestimento de Cádmio)

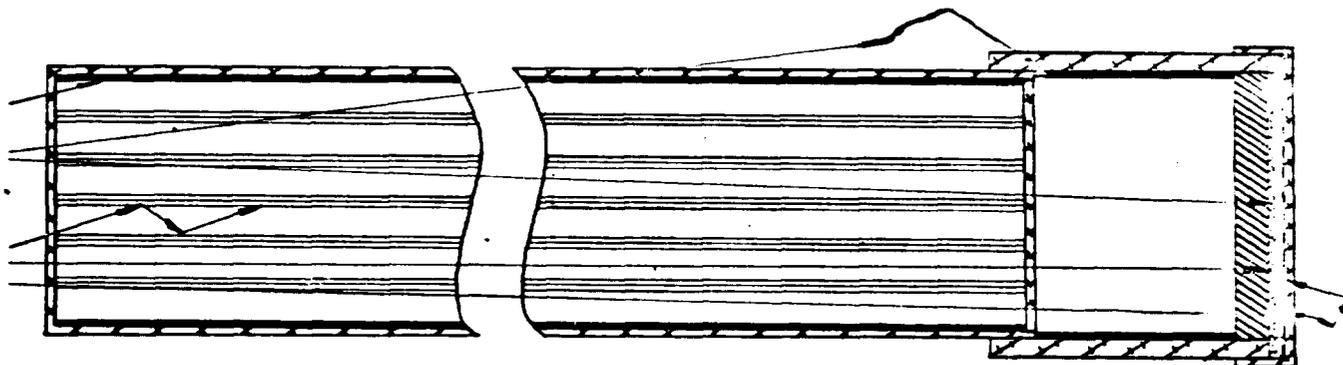


Figura 6.8 – Esquema das Trajetórias de Alguns Nêutrons no Colimador (Com Revestimento de Cádmio)

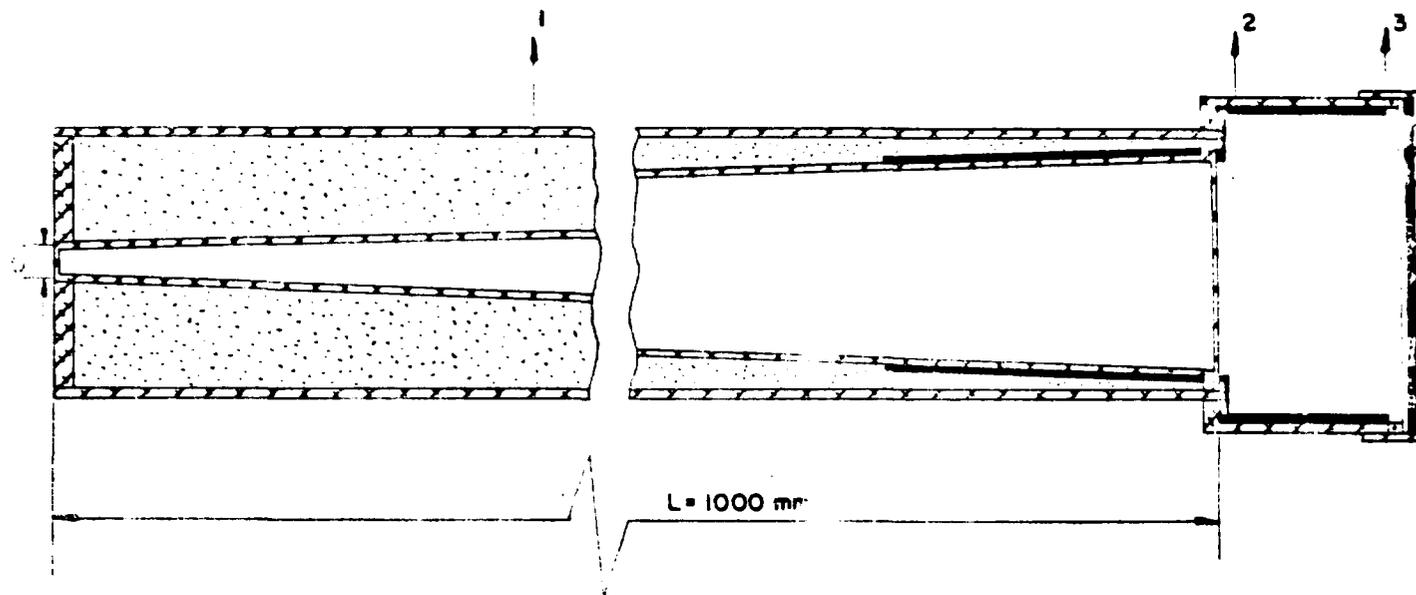


Figura 6.9 - Dispositivo Neutronográfico com Colimador Cônico

A região intermediária entre o cilindro e o cone é preenchida com ácido bórico.

O raio de colimação ou divergência angular é de 1/100.

b) Câmara

É constituída por um cilindro oco adaptado à parte externa do colimador e é destinada a conter o objeto a ser neutrografado.

c) Suporte da Chapa Conversora

É uma tampa de alumínio que se adapta à câmara do objeto e onde se coloca a folha conversora (Au).

A folha de ouro é colocada numa chapa delgada de alumínio que se adapta internamente ao suporte da chapa conversora.

A lâmina de alumínio contendo a folha de ouro é fixada por um anel delgado de aço.

6.6 – Considerações sobre os Materiais Utilizados no Dispositivo

6.6.1 – Alumínio⁽²¹⁾

É utilizado na estrutura do dispositivo por uma série de fatores:

- 1) Tendo meia vida muito curta (2,3 min) decai rapidamente após ser ativado, isto é, após 23 minutos ele decai 10 meias vidas, ou seja, de um fator da ordem de 10^3 . Entretanto, pelo fato do alumínio industrial conter impurezas de meias vidas longas, implicará numa atividade residual que felizmente é baixa.
- 2) Como já foi mencionado, o alumínio é usado como elemento estrutural do Reator. Portanto, a película de óxido de alumínio formada no dispositivo que possivelmente é liberada na água da piscina é mínima comparada com a quantidade formada nos elementos estruturais e além do mais existe tratamento químico (através de resinas iônicas) que reterão os produtos formados a partir do alumínio do óxido de alumínio.
- 3) Tendo densidade relativamente baixa ($2,7 \text{ g/cm}^3$), torna-se fácil o manejo do dispositivo na piscina.
- 4) É de fácil usinagem, de custo relativamente baixo, forma pouca quantidade de óxido e é encontrado facilmente no comércio.
- 5) Apresenta boa condução de calor, permitindo dissipar na água o calor gerado por radiações incidentes nos materiais que estão em contato com ele. Na região onde o alumínio fica em contato com o caroço a temperatura é mais elevada do que na outra extremidade, desta forma sendo o alumínio um bom condutor de calor este calor fluirá na direção oposta ao caroço.
- 6) Sua temperatura de fusão ($659,7^\circ\text{C}$) está muito além do valor onde ele está em contato com o caroço.

6.6.2 – Cádmió⁽²¹⁾

Por causa de sua alta secção de choque de absorção para nêutrons térmicos ele foi utilizado nas regiões críticas (próximas ao objeto), por motivos que já foram anteriormente explicados.

6.6.3 – Ácido Bórico⁽²¹⁾

Razões de sua escolha:

Cristalizado de solução aquosa, na forma branca brilhante e cerosa, pertence ao sistema triclinico.

Aliado à sua forma sólida, o ácido bórico (H_3BO_3), apresenta ponto de fusão relativamente alto ($170,9^\circ C$).

A presença de hidrogênio, como um de seus constituintes, a princípio já pode ser visto como um moderador de nêutrons rápidos.

A presença de boro⁽²⁾ na fórmula química informa que o ácido bórico é bom absorvedor de nêutrons, pois este elemento constitui um excelente absorvedor de nêutrons térmicos.

O ácido bórico, sendo pouco solúvel na água à temperatura ambiente, não terá facilidade de sair do sistema estanque, caso ocorra entrada de água no dispositivo.

Tanto o ácido, como a solução água ácido não atacam o alumínio.

O H_3BO_3 é facilmente encontrado no comércio, é barato e não oferece risco quanto ao seu manuseio.

Em presença de fluxo neutrônico, o ácido bórico comporta-se da maneira seguinte:

Se o nêutron incidente for térmico e atingir o boro do ácido bórico, ocorrerá a reação $^{10}B(n,\alpha)^7Li^{(30)}$. A radiação alfa produzida, devido ao curto alcance no alumínio ficará retida nele. Se o nêutron atingir o núcleo do hidrogênio ele será espalhado elasticamente até ser finalmente absorvido ao encontrar o núcleo de boro. Se o nêutron incidente for rápido e atingir o boro dificilmente ele reagirá, por ser baixa a secção de choque de absorção de nêutrons rápidos no boro. Dessa forma, o nêutron continuará seu percurso até colidir com átomos de hidrogênio e ser espalhado sucessivamente, até tornar-se térmico e finalmente ser absorvido no boro.

De todas estas características citadas as que sobressaem são:

- 1) O boro do ácido bórico é excelente absorvedor de nêutrons térmicos.
- 2) Baixa atividade induzida após a irradiação.

Apenas para completar este parágrafo sobre os materiais utilizados, convém ainda ressaltar que as partes de alumínio que selam o colimador e a lâmina de alumínio na qual o ouro é colocado deve ser a mais delgada possível para evitar espalhamento e retroespalhamento no feixe neutrônico.

No caso do colimador cônico, a quantidade de boro por unidade de comprimento do colimador vai diminuindo porque também o fluxo direto e os nêutrons espalhados vão diminuindo.

Os nêutrons que vem do carço são absorvidos na região que contém o boro e passam

facilmente na região interna do cone através de seu diâmetro menor. Os nêutrons que vêm externamente pelas laterais do cilindro também não atingem a região central do cone, pois são da mesma forma absorvidos pelo boro.

6.7 – Medidas de Fluxo no Dispositivo de Colimador Cônico

O dispositivo foi colocado na posição de número 6 do arranjo de número 98 (Figura 6.10).

Mediram-se os fluxos térmicos⁽³⁰⁾, e a razão de cádmio nos locais de contato do dispositivo com o caroco (A) e objeto (B) (Tabela VI.1).

7 – CONTROLE DE QUALIDADE

7.1 – Penetrômetro⁽⁹⁾

Julga-se, normalmente, a capacidade de uma inspeção radiográfica pela observação de imagens de várias peças provas, colocadas sobre o objeto de inspeção durante a exposição radiográfica.

Neste trabalho esta prova foi feita utilizando-se duas placas de cádmio de espessuras 0,5 mm e 1 mm colocadas paralelamente entre si e fixadas sobre um suporte circular de alumínio de 1 mm de espessura.

Estes objetos prova, tipo placa, são denominados penetrômetros, cuja espessura, T , é comumente dois por cento da espessura do objeto a se neutrongrafar. Estas placas possuem furos passantes com diâmetros múltiplos de T , isto é, $2T$, $3T$, $4T$ etc., que estão espaçados entre si de diferentes distâncias. Se tal penetrômetro, do mesmo material que o objeto e tendo a espessura de dois por cento do material base, puder ser observado, o penetrômetro é dito ser dois por cento ou ainda menor.

No caso da experiência feita, somente foram neutrongrafadas as placas de cádmio, as quais possuíam furos desde 1 mm até 5 mm, sendo que cada linha de furos representa um múltiplo da espessura das chapas de cádmio.

As distâncias entre os furos vão diminuindo à medida que se caminha para a região central das chapas.

O resultado desta experiência encontra-se no capítulo 9.

7.2 – Comparação de Qualidade

Vários sistemas têm sido utilizados para tornar precisas as comparações de certas qualidades em radiografias com nêutrons. Todos estes sistemas envolvem medidas de densidade óptica de radiografias de nêutrons com um densitômetro. R. L. Tomlinson⁽³⁶⁾ desenvolveu o "Contrast, Resolution and Scatter Indicator", "CRASI". Este indicador consiste em um disco de 25,4 mm de diâmetro de pó de boro, tendo em seu centro um furo que faz o papel de colimador. O escurecimento do filme, através do furo, se deve, principalmente, aos nêutrons não espalhados quando o penetrômetro é colocado adjacente ao suporte do filme. A diferença na densidade do filme entre a radiação de fundo ("background") e este feixe colimado fornece uma aproximação da porção do feixe total dos nêutrons espalhados.

A importância de identificar este componente do feixe não deve ser subestimado. Nêutrons espalhados afetam significativamente a qualidade radiográfica mas, freqüentemente, não são identificados como responsáveis na pobreza radiográfica.

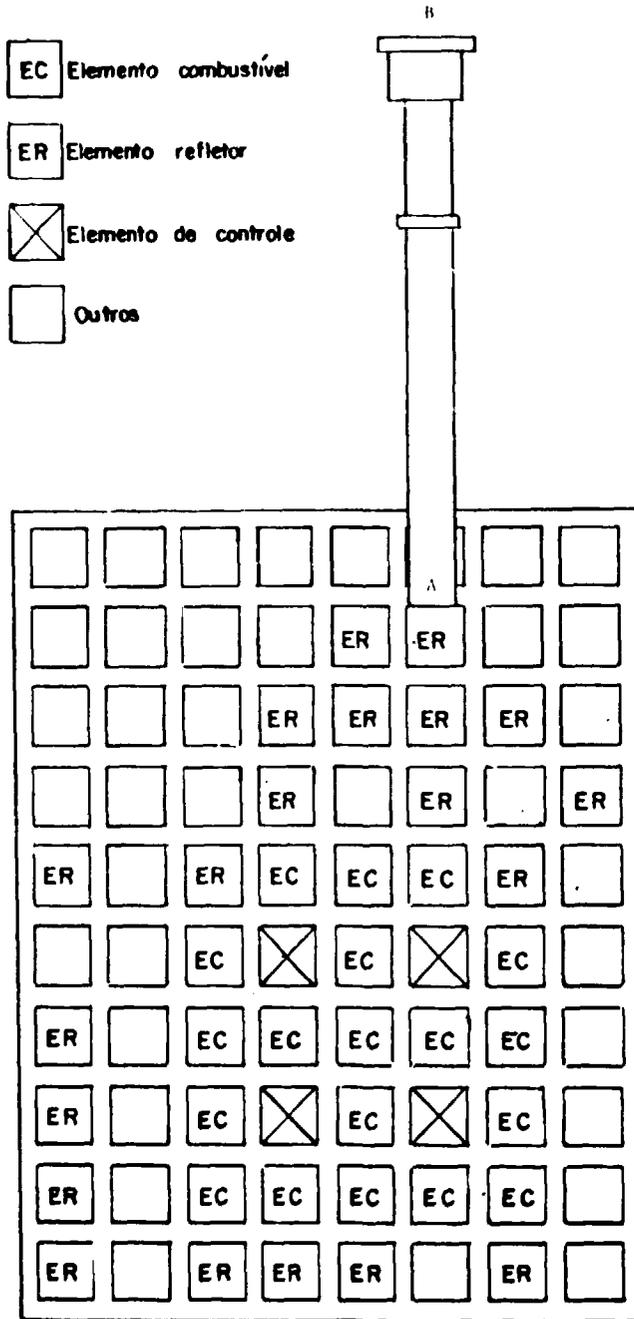


Figura 8.10 – Localização do Dispositivo Neutronográfico em Relação ao Cerco do IEAR-1

Tabela VI.1

Medidas de Fluxos nas Posições A e B da Figura 6.10

Número da Folha	Massa (g)	Situação da Folha	Fluxo Térmico ($n/cm^2 \cdot s$)	Razão de Cádmi	Erro Estatístico	Erro Sistemático
1 (A)	0,000854	Com Cádmi	$6,96 \times 10^{11}$	2,71	3%	5%
2 (A)	0,000727	Nua				
3 (B)	0,053762	Com Cádmi	$1,37 \times 10^7$	4,09	5%	10%
4 (B)	0,053597	Nua				

Encontra-se indicação de resolução utilizando fios de nylon e lucite (absorvedores), localizados nos quatro cantos do penetrômetro. Recomenda-se um dispositivo separado para necessidades específicas.

Utilizando-se o "CRASI" e um densitômetro, estabelece-se um sistema numérico para graduar um dispositivo de nêutrons espalhados, radiação gama de fundo, embaçamento (neblina) no filme devido ao espalhamento etc.

Finalmente, este indicador tem sido utilizado na otimização de tempo de exposição do reator versus o contraste do filme.

7.3 – Grade de Antiespalhamento

Como foi visto em capítulos anteriores, o feixe de nêutrons quando interage com o objeto, uma fração dele é atenuada mediante a absorção, outra é transmitida, isto é, não interage com o objeto e finalmente uma fração é espalhada. Cada material possui uma característica que pode ser mais ou menos absorvente ou espalhante. Materiais hidrogenados⁽³¹⁾, como plásticos, ceras, parafinas, graxas, borrachas e o caso particular do ferro são muito espalhantes. Isso traz sérios inconvenientes nas radiografias desses materiais, em virtude de criar borrões na imagem fotográfica. A indefinição nestes tipos de materiais é independente do fato do feixe estar excelentemente colimado, pois tal espalhamento sempre existirá.

A fim de prevenir o prosseguimento desses nêutrons espalhados que iriam certamente ativar a folha conversora, torna-se necessária uma grade antiespalhadora para remover esses nêutrons que alcançam a folha. Isto é representado esquematicamente pelas Figuras 7.2a e 7.2b.

Portanto, a grade de antiespalhamento impede os nêutrons espalhados de prosseguirem seu caminho, porém permite passagem livre para os não espalhados.

Esta grade é constituída por tiras de alumínio que são transparentes aos nêutrons e tiras de cádmio que são opacos aos nêutrons térmicos. Estas tiras são dispostas em camadas e o conjunto permanece atrás do objeto.

É evidente que estas tiras tem o inconveniente de tornar a imagem estriada, contudo evita-se este feito fazendo este conjunto mover-se num ritmo contínuo e constante, desaparecendo desta forma tais estrias.

Assim, as neutrongrafias de materiais altamente espalhantes, isto é, $\left(\frac{\sigma_{\text{abs}}}{\sigma_{\text{sc}}}\right) \geq 10$, tornam-se sensivelmente mais definidas.

8 – APLICAÇÕES DA NEUTRONGRAFIA E DESENVOLVIMENTOS RECENTES

8.1 – Aplicações

Uma boa radiografia deve discriminar claramente as várias partes do objeto e a Figura 1.1 e Tabela 1.1, podem ser utilizadas como um guia para essa observação.

As relativas espessuras dos diferentes materiais no objeto podem ser reconhecidas, mas de modo geral obtém-se boas imagens quando estes materiais possuem coeficientes de absorção acima de $1 \text{ cm}^2/\text{g}$ (por exemplo, o cádmio), pois estes materiais são geralmente opacos aos nêutrons.

Os materiais que possuem este coeficiente menor do que $0,1 \text{ cm}^2/\text{g}$ são geralmente transparentes aos nêutrons (por exemplo, o alumínio). Um objeto ideal a se neutrongrafar é aquele constituído de

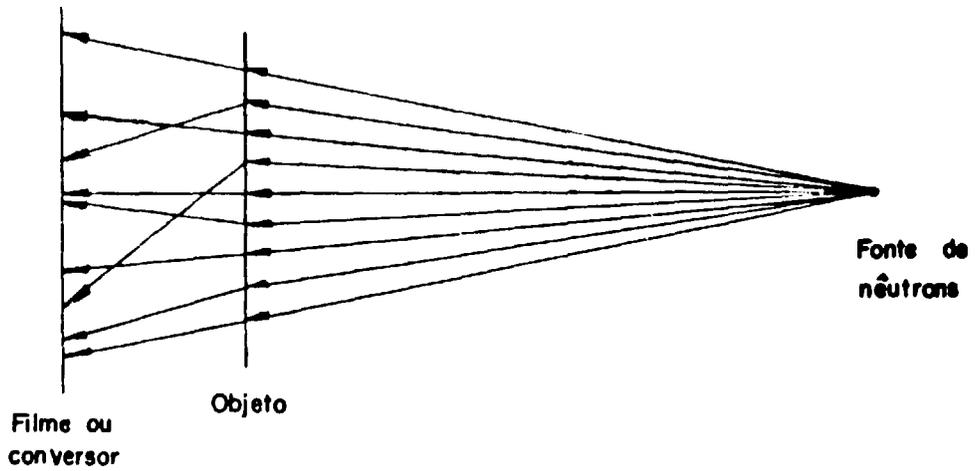


Figura 7.1a – Prova Sem a Grade Antiespalhadora

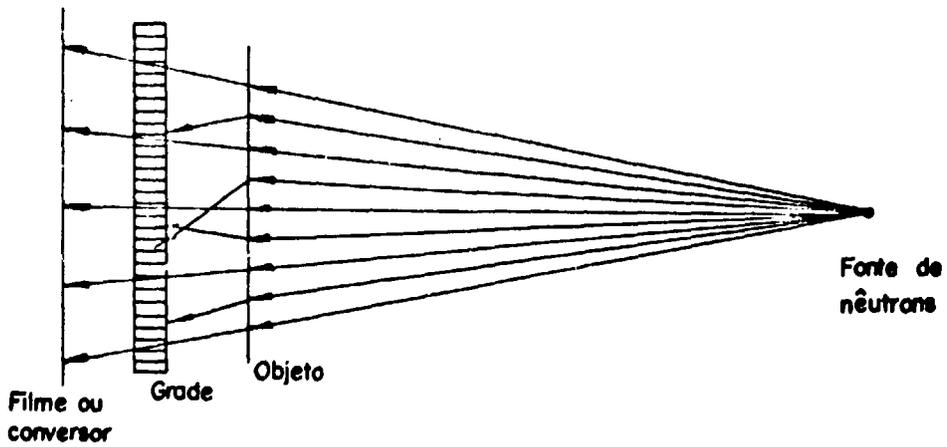


Figura 7.1b – Prova Com a Grade Antiespalhadora

Figura 7.1 – Efeito da Grade Antiespalhadora no Feixe de Nêutrons Emergente do Objeto

material opaco aos nêutrons, rodeado por material transparente a essas mesmas radiações (por exemplo, o cádmio circundado por alumínio). As aplicações desta técnica são descritas nos exemplos e um número de aplicações nucleares e não nucleares são dadas a seguir.

8.1.1 – Exames de Materiais Ativados (Pós-Irradiados) nas Experiências ou em Usos nos Reatores⁽¹³⁾

Este exemplo geral pode ainda ser subdividido nos seguintes itens:

- a) Detecção de craqueamento e estreitamento nas pastilhas de combustíveis experimentais.
- b) Detecção de isótopos diferentes numa espécie, isto é, discriminação do ^{235}U e ^{238}U nas pastilhas combustíveis.
- c) Medida do conteúdo de ^{235}U em combustíveis enriquecidos.
- d) Exames gerais para detecção de deslocamentos de termopares, cabos elétricos rompidos etc.

8.1.2 – Detecção de Hidretos

Hidretos podem ser avaliados até várias centenas de ppm (parte por milhão) em componentes de zircônio⁽²⁵⁾. Em neutrongrafias estes hidretos são facilmente observados em regiões da peça de zircônio. O método de detecção está sendo estudado e espera-se que as sensibilidades sejam melhoradas.

É possível também a detecção de hidretos e medidas em titânio e outros metais.

8.1.3 – Inspeção de Placas de Cádmio⁽¹³⁾

O cádmio, possuindo alta secção de choque, é facilmente detectável, portanto é possível verificar a homogeneidade e continuidade das placas.

8.1.4 – Materiais de Densidades Similares

Objetos constituídos por materiais de densidades semelhantes⁽⁹⁾, são de difícil detecção por raios-X por esta ser uma função linear com a densidade. Entretanto, tais combinações são facilmente separadas em neutrongrafia, pois a atenuação de nêutrons não é dependente da densidade do alvo.

Cobre-níquel, cromo-níquel e ouro-platina são exemplos de combinações facilmente detectáveis.

8.1.5 – Medidas de Pós-Irradiação de Amostras em Experimentos Selados (de Reatores)^(13,29,35)

Usa-se a neutrongrafia para medir turgescências progressivas de uma amostra com irradiação.

Elementos combustíveis ativos são radiografados e a imagem do elemento é medida com instrumento de medida óptica.

Elementos combustíveis de plutônio e urânio enriquecido são opacos aos nêutrons e portanto produzem boas imagens.

O zircônio é relativamente transparente aos nêutrons ($0,047 \text{ cm}^2/\text{g}$) e assim as medidas de amostras de zircônio necessitam uma técnica especial.

8.1.6 – Materiais Densos

Pode-se neutrongrafar (utilizando nêutrons epitérmicos)⁽¹³⁾ espessuras de chumbo, aço, molibdênio sintetizado, superiores a 15 cm, o que é quase impossível em gamagrafia, mesmo utilizando radiação gama altamente penetrante.

8.1.7 – Aplicações Médicas e Biológicas

Neste campo, a neutrongrafia está em estágio de pesquisa⁽³⁾, limitando-se apenas ao caso não humano (o nêutron é uma radiação que produz sérios danos no corpo humano em geral).

Entretanto, algumas vantagens sobre os raios-X podem ser delineadas:

- a) penetração no osso para estudar o tecido mole escondido atrás dele.
- b) localização de tumores (alto conteúdo de hidrogênio).
- c) Estudos de tecidos de vegetais e pequenos animais.

8.1.8 – Exames Metalúrgicos

Faz-se a inspeção de sais de potássio, cloreto de sódio presentes em peças de magnésio fundidas com neutrongrafia por causa das acentuadas diferenças nas secções de choque dessas substâncias.

8.1.9 – Medidas de Queima de Materiais de Controle de Reatores⁽¹¹⁾

O controle de reatores nucleares é mantido freqüentemente por meio da ação de barras de controle móveis contendo cádmio. O cádmio utilizado é a mistura isotópica natural, mas as reações de controle envolvem somente o isótopo ^{113}Cd que possui alta secção de choque (20000 barns).

Quando as barras de controle estão localizadas em regiões de fluxo neutrônico, de alta intensidade, por um longo tempo, muito do ^{113}Cd terá convertido nos isótopos de baixa secção de choque e o material convertido perderá dessa forma sua efetividade, não servindo portanto para controle do reator.

O isótopo ^{114}Cd é o mais convertido dos isótopos pela transmutação do ^{113}Cd .

Em breve, será feito estudo utilizando as barras absorvedoras do IEAR-1, para determinar este tipo de queima.

8.1.10 – Componentes Eletrônicos⁽²⁶⁾

As principais falhas em microcircuitos eletrônicos se devem a deslocamento do material isolante e descontinuidades.

8.1.11 – Componentes de Fibras de Boro Ligadas com Epoxy

Uma vez que o boro possui alta secção de choque facilmente pode se notar através da neutrongrafia as variações nas espessuras do epoxy-resina.

8.1.12 – Detecção de Falhas em Materiais de Blindagem de Nêutrons

Uma blindagem de nêutrons para ser efetiva não deve conter vazios ou fendas por onde os nêutrons possam escapar. Utilizam-se radiografias com nêutrons para inspecionar blindagens de nêutrons térmicos que passam através da blindagem. Este método mostrará os contornos da atenuação de nêutrons nos materiais na blindagem e a posição e tamanho de qualquer vazio significativo que possa estar presente.

8.1.13 – Explosivos^(37,75)

Basicamente, os explosivos são constituídos por materiais hidrogenados de difícil obtenção de radiografia X devido o baixo coeficiente de atenuação para esta radiação, todavia o coeficiente de atenuação para nêutrons térmicos é grande e uma pequena espessura de material explosivo facilmente é detectado.

Estes explosivos devem ser meticulosamente examinados e a neutrongrafia resolve este problema.

8.1.14 – Detecção de Defeitos em Conjuntos

Pode-se facilmente detectar a presença de óleos, plásticos e borrachas em conjuntos metálicos lacrados. São oferecidos, a seguir, alguns exemplos :

- a) verificação do posicionamento correto de anéis de borracha ("O" rings) e componentes de plástico dentro de conjuntos selados⁽²⁶⁾ ;
- b) detecção de falhas nas ligações entre borracha e metais (evitar vazamentos) ;
- c) detecção de óleos e graxas⁽³⁴⁾ .

8.1.15 – Inspeção por Agentes Contrastantes

Esses agentes são materiais de alta secção de choque de absorção e são utilizados para melhorar a discriminação numa neutrongrafia. A água, o ácido bórico, o óxido de gadolínio, a parafina, o álcool, são exemplos de agentes contrastantes.

Exemplo de técnicas de contrastes:

- a) a definição da parede de um objeto cilíndrico é melhorada quando se coloca em contato com ela, lâminas de cádmio.
- b) furos de objetos são preenchidos com água.
- c) localização de canais por meio de seu preenchimento com água ou parafina derretida.

- d) preenchendo as cavidades de metais fundidos com água ou óxido de gadolínio.
- e) impregnando os poros do material com agentes contrastantes para determinar regiões de alta porosidade.

8.1.16 – Verificação de Falhas nos Adesivos

Estas falhas são detectadas facilmente uma vez que os adesivos resinosos contém grande quantidade de hidrogênio. Nas regiões coladas com adesivos, qualquer descontinuidade será logo notada.

8.1.17 – Juntas Soldadas⁽¹⁷⁾

Materiais comuns para soldagens têm coeficientes de atenuação semelhantes àqueles dos materiais estruturais, comumente utilizados. Entretanto, coeficiente de atenuação de nêutrons para o boro e o cádmio que são constituintes de muitos materiais de soldas, são de maneira significativa maiores do que os materiais estruturais. Dessa forma, a neutrongrafia neste caso é de importância fundamental.

8.2 – Desenvolvimentos recentes⁽¹⁰⁾

Uma variante do método direto de detecção é a utilização de conversores luminescentes.

O interesse desse método é o de permitir exames de objetos em movimento (peças em movimento, situação de um fluido dentro de uma bomba) e o de aumentar a rapidez de exposição por uma série de peças que não necessitam de uma definição esmerada.

As reações $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$, $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$ presentes nos conversores apresentam a vantagem de possuir grande secção de choque eficaz e de emissão de partículas de alto poder ionizante que fornecem um bom rendimento fotônico sobre o cintilador.

Como a luminescência é fraca, mesmo com fluxos intensos, o exame direto do conversor é quase impossível sem um sistema de amplificação para os exames dinâmicos.

Há, atualmente, três métodos parecidos entre si para amplificar a luminescência e obter a imagem sobre um receptor de televisão⁽⁷⁾.

Pretende-se, logo que estiverem dominadas todas as técnicas clássicas de neutrongrafia, abordar este recente método de ensaio não destrutivo.

9 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As neutrongrafias obtidas são de objetos genéricos ou de peças simples de uso comum.

Paralelamente à neutrongrafia, foram também obtidas gamagrafias apenas para efeito comparativo.

As gamagrafias foram realizadas utilizando uma fonte de Irídio-192 (Meia Vida de 74 dias) ativada no IEAR-1, com 2,6 Ci.

(*) 1 Curie = 37 bilhões de desintegrações por segundo.

Nota-se, claramente, que as gamagrafias possuem maior definição do que as neutrografias. Isto era de esperar pois além dos problemas neutrográficos inerentes, os quais já foram mencionados, deve-se também levar em conta que a neutrografia está atualmente em desenvolvimento no IEA. Mesmo assim, há resultados em que a neutrografia supera a gamagrafia de forma insofismável.

A seguir serão expostos os resultados propriamente ditos, notando-se que em todas neutrografias obtidas o campo de imagem neutrográfica se reduz a um diâmetro de 60 mm.

9.1 – Placas Provas de Cádmiio (Figuras 9.1)

São placas de cádmio de 1 mm e 0,5 mm de espessura respectivamente, já mencionadas no capítulo 7.

Os furos na placa mais espessa vão desde 1 mm até 5 mm, enquanto na placa mais fina, vão desde 1 mm até 4 mm.

Em cada linha de furos, cada um deles está espaçado do outro com distâncias que vão aumentando, obedecendo a uma progressão aritmética de razão 0,5 mm para furos de todas as linhas.

As distâncias aos vizinhos mais próximos dos furos pertencentes à coluna vertical, central, em milímetros da placa mais espessa são:

1 linha (5 mm) : (5 + 0,5) ; 6,0 ; 6,5 ; 7,0 ; . . .

2 linha (4 mm) : (4 + 0,5) ; 5,0 ; 5,5 ; 6,0 ; . . .

3 linha (3 mm) : (3 + 0,5) ; 4,0 ; 4,5 ; 5,0 ; . . .

4 linha (2 mm) : (2 + 0,5) ; 3,0 ; 3,5 ; 4,0 ; . . .

5 linha (1 mm) : (1 + 0,5) ; 2,0 ; 2,5 ; 3,0 ; . . .

Idem para a placa de 0,5 mm.

9.1a – Neutrografias

Tempo de irradiação: 40 minutos.

Tempo da primeira exposição: 4,5 horas (Figura 9.1a).

Tempo da segunda exposição: 14 horas (Figura 9.1b).

9.1b – Gamagrafia

Distância fonte filme: 500 mm

Tempo de exposição: 19 minutos (Figura 9.1c).

9.1c – Comentários

Nota-se, na gamagrafia, superioridade atinente à definição, porém as diferenças entre as densidades das regiões com e sem cádmio é maior no caso da neutrongrafia.

Nas duas radiografias, percebe-se a influência da espessura da folha na impressão fotográfica.

9.2 – Disco de Alumínio com Diferentes Materiais de Ensaio (Figuras 9.2)

Chapa de alumínio de formato circular, com diâmetro de 82 mm e espessura de 2 mm, onde existem presos a ela tarugos de mesmas alturas (4,5 mm), porém de materiais diferentes.

O tarugo central é de cádmio enquanto os restantes, iniciando pela parte superior da Figura 9.2c, no sentido horário, são respectivamente, Cu, Al, U_3O_8 , C, Fe e latão.

Circundando o tarugo de cádmio existe um anel de borracha de 4 mm de espessura.

Na placa circular de alumínio existem 4 furos, de diâmetros crescentes, ao redor do tarugo de cádmio.

9.2a – Neutrongrafias

Tempo de irradiação: 40 minutos

Tempo da primeira exposição: 5 5 horas (Figuras 9.2a).

Tempo da segunda exposição: 15 horas (Figura 9.2b).

9.2b – Gamagrafia

Distância fonte filme: 500 mm

Tempo de exposição: 20 minutos (Figura 9.2c)

9.2c – Comentários

Os furos existentes na placa de alumínio não são vistos na neutrongrafia, mas são vistos na gamagrafia. Isso advém do fato de que o alumínio é quase transparente aos nêutrons e não para a radiação gama. Entretanto, o anel de borracha e o cádmio se sobressaem melhor nas neutrongrafias devido suas contrastantes diferenças de secções de choque comparadas com as dos outros elementos.

9.3 – Válvula Eletrônica RCA-5879 (Figuras 9.3)

9.3a – Neutrongrafias

Tempo de irradiação: 40 minutos

Tempo da primeira exposição: 6 horas (Figura 9.3a).

Tempo da segunda exposição: 15 horas (Figura 9.3b).

9.3b – Gamagrafia

Distância fonte filme: 500 mm.

Tempo de exposição: 20 minutos (Figura 9.3c).

9.3c – Comentários

Neste exemplo particular, como os materiais constituintes da válvula não apresentam grandes diferenças nos coeficientes de atenuação para nêutrons, a radiografia com nêutrons é mais pobre do que a radiografia com gama, tanto no aspecto de contraste como no de definição.

9.4 – Válvula de Controle de Fluxo (Figuras 9.4)

9.4a – Neutronografias

Tempo de irradiação: 80 minutos.

Tempo da primeira exposição: 7 horas (Figura 9.4a).

Tempo da segunda exposição: 15 horas (Figura 9.4b).

9.4b – Gamagrafia

Distância fonte filme: 500 mm

Tempo de exposição: 20 minutos (Figura 9.4c).

9.4c – Comentários

Os anéis de borracha, bem como a mola de aço e o vazio existente na válvula, embora com menor definição do que na gamagrafia, salientam-se mais nas neutronografias.

9.5 – Conector BNC

9.5a – Neutronografias

Tempo de irradiação: 80 minutos

Tempo da primeira exposição: 6 horas (Figura 9.5a).

Tempo da segunda exposição: 15 horas (Figura 9.5b).

9.5b – Gamagrafia

Distância fonte filme: 500 mm

Tempo de exposição: 20 minutos

9.5c – Comentários

Os anéis e o fio de plástico sobressaem muito bem nas neutrografias; os outros pormenores são melhores vistos na gamagrafia.

Este é um exemplo típico onde a neutrografia completa de maneira eficiente a gamagrafia.

9.6 – Cilindro de Chumbo (Figuras 9.6)

O cilindro possui 37 mm de comprimento por 58 mm de diâmetro externo.

Radialmente, o cilindro possui quatro furos de 6 mm, não passantes, preenchidos com graxa.

Axialmente, o cilindro possui uma cavidade cilíndrica de profundidade 32 mm preenchida com água e selada com fina tampa de alumínio.

O cilindro dentro do dispositivo neutrográfico foi envolvido por uma fita espessa de borracha.

9.6a – Neutrografias

Tempo de irradiação: 60 minutos

Tempo da primeira exposição: 7,5 horas (Figura 9.6a).

Tempo da segunda exposição: 15 horas (Figura 9.6b).

9.6b – Gamagrafia

Distância fonte filme: 500 mm

Tempo de exposição: 25 minutos

9.6c – Comentários

Este é um exemplo onde a neutrografia fornece, de maneira clara, muito mais informações a respeito do objeto do que a gamagrafia.

No caso da gamagrafia, sendo o chumbo alto atenuador desta radiação eletromagnética, praticamente impedirá os gamas de o atravessar. Por outro lado, o chumbo sendo transparente aos nêutrons, permitirá a visualização dos furos radiais preenchidos com material hidrogenado (graxa).

Outro pormenor que pode ser visto na radiografia com nêutrons é atinente à percepção de manchas que provavelmente são falhas na estrutura do objeto de chumbo.

9.7 – Motor Síncrono (Figuras 9.7)

9.7a – Neutrografias

Tempo de irradiação: 60 minutos

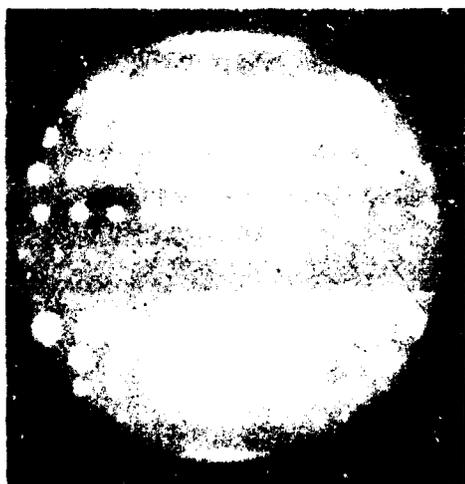


Figura 9.1a N

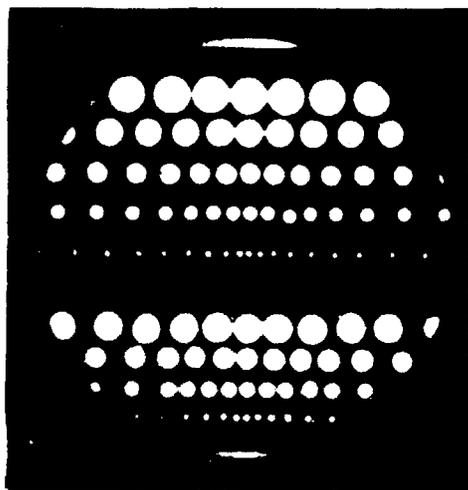


Figura 9.1b N

Figura 9.1c G

Figuras 9.1 – Neutronografias e Gamagrafia de Folhas de Cádmiio Perfuradas

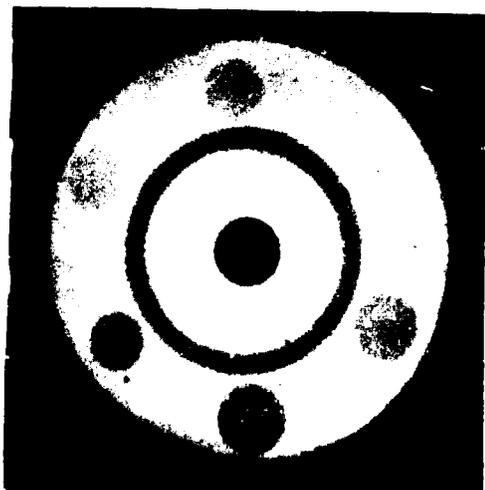


Figura 9.2a N



Figura 9.2b N

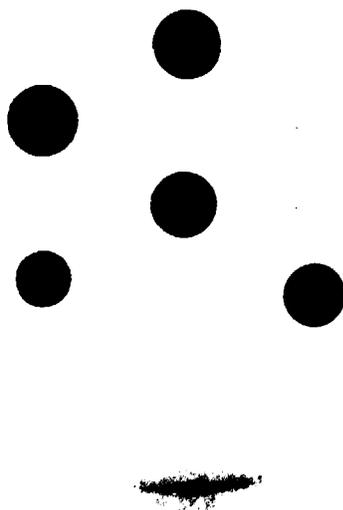


Figura 9.2c G

Figuras 9.2 – Neutronografias e Gamagrafia de um Disco de Alumínio com Terugos de (Cd, Cu, Al, U_3O_8 , C, Fe, Latão) e Anel de Borracha



Figura 9.3a N

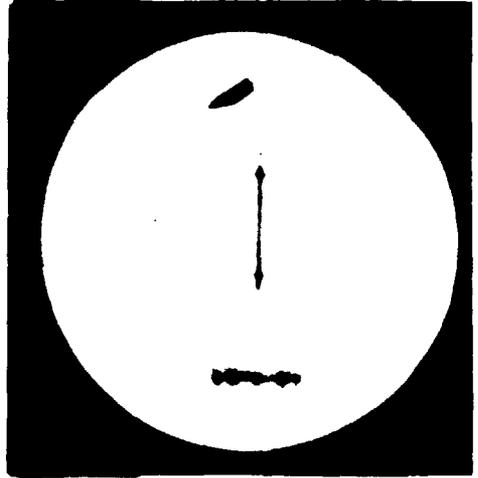


Figura 9.3b N



Figura 9.3c G

Figuras 9.3 – Neutronografias e Gamagrafia de uma Válvula Eletrônica (RCA-5879)



Figura 9.4a N



Figura 9.4b N



Figura 9.4c G

Figuras 9.4 - Neutrongrafias e Gamagrafia de uma Válvula de Controle de Fluxo



Figura 9.5a N

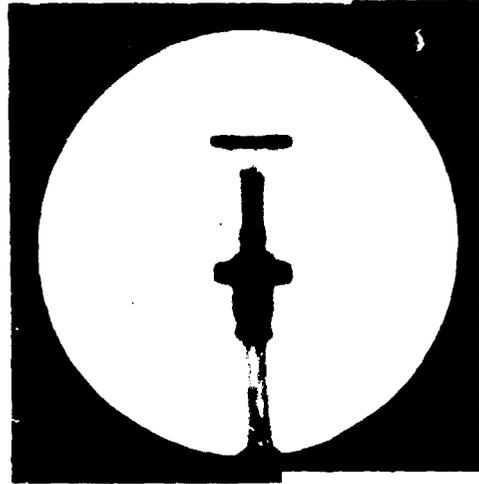


Figura 9.5b N



Figura 9.5c G

Figuras 9.5 - Neutronografias e Gamagrafias de um Conector BNC

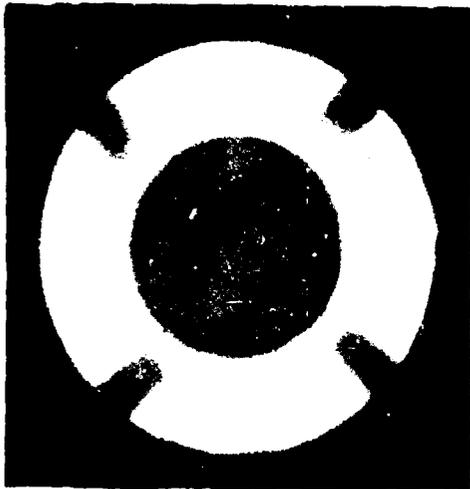


Figura 9.6a N

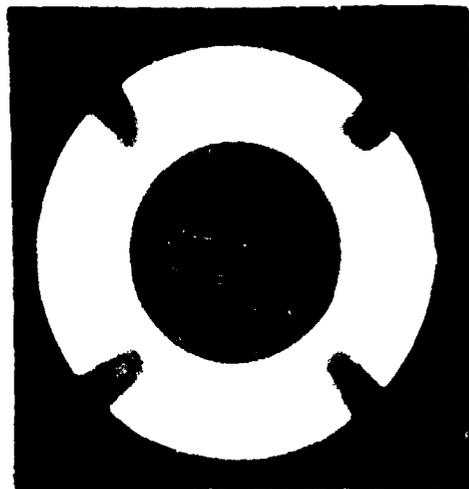


Figura 9.6b N



Figura 9.6c G

Figuras 9.6 – Neutronografias e Gamagrafias de um Cilindro de Chumbo com Quatro Furos Radiais não Passantes Preenchidos com Graxa e com Água na Região Central do Cilindro



Figura 9.7a N

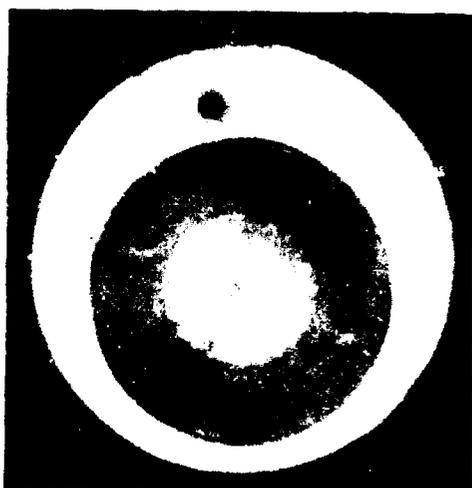


Figura 9.7b N

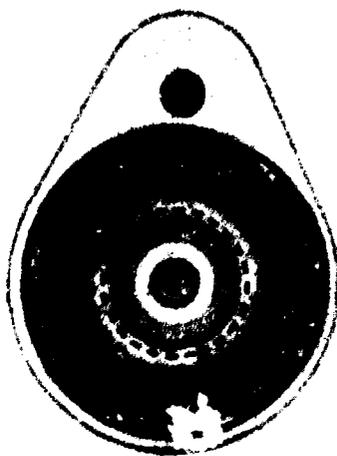


Figura 9.7c G

Figuras 9.7 – Neutronografias e Gamagrafia de um Motor Síncrono de 4 RPM e 2,5 Watts

Tempo da primeira exposição: 15 horas (Figura 9.7a).

Tempo da segunda exposição: 7 horas (Figura 9.7b).

9.7b – Gamagrafia

Distância fonte filme: 500 mm

Tempo de exposição: 21 minutos (Figura 9.7c).

9.7c – Comentários

Neste caso, nota-se uma qualidade superior da gamagrafia em relação à neutrongrafia, isto é, na gamagrafia pode-se perceber as engrenagens minúsculas do motor, o que com muita dificuldade se percebe na neutrongrafia.

10 – CONCLUSÕES

O dispositivo neutrongráfico constituído de colimador cônico contendo ácido bórico, juntamente com o reator de pesquisa do Instituto de Energia Atômica podem ser utilizados para produzir neutrongrafias.

Os valores do fluxo no local onde se localiza a placa conversora (aproximadamente a um metro do caroço) foram determinados como sendo da ordem de 10^7 n/cm² xs que são considerados bons para se efetuar ensaios neutrongráficos.

Os ensaios experimentais revelaram que o fluxo térmico de nêutrons bem como os outros fatores (tempo de irradiação, tempo de exposição, contraste do filme, tempo de espera etc.) estão de acordo com a relação obtida entre estes parâmetros e a densidade do filme.

As neutrongrafias obtidas com o dispositivo mencionado, dá uma visão de quão útil é a neutrongrafia como um ensaio não destrutivo. As comparações feitas com as gamagrafias dos mesmos objetos revelaram que a neutrongrafia além de constituir um ensaio não destrutivo de alta aplicabilidade serve também para completar pontos onde a gamagrafia falha.

Dos resultados experimentais obtidos nota-se que a neutrongrafia constitui instrumento poderoso quando se trata principalmente de ensaio com materiais leves (hidrogenados). Também ficou claro que materiais constituídos de elementos pesados, por exemplo, o chumbo, fornecem excelentes ensaios neutrongráficos.

Sendo a neutrongrafia uma técnica relativamente nova no Brasil e tendo em vista seu atual estado de desenvolvimento no IEA, pretende-se desenvolver, brevemente, as seguintes áreas onde ela será aplicada por excelência:

- 1) Desenvolvimento de uso industrial, baseando nos tópicos mencionados no capítulo 8.
- 2) Levantamento da queima relativa dos elementos combustíveis padrões e de controle do IEAR-1 e outros reatores futuramente existentes no Brasil.
- 3) Aplicações médicas e biológicas.

4) Controle de materiais bélicos.

APÊNDICE A

DADOS REFERENTES AOS NÊUTRONS

A.1 – Principais Reações Nucleares Induzidas por Nêutrons

A.1.1 – Espalhamento Elástico:

$n + X \rightarrow X + n$; reação nuclear do tipo (n,n), onde a energia interna do núcleo alvo X não varia, mas há, em geral, troca de energia cinética entre os núcleons. O núcleo é inalterado na sua composição isotópica.

A.1.2 – Espalhamento Inelástico:

$n + X \rightarrow X^* + n'$; reação nuclear do tipo (n,n') onde a energia interna do núcleo alvo X varia, com a conseqüente passagem para um estado excitado X^* e o nêutron perde energia cinética. Também neste caso o núcleo é inalterado em sua composição isotópica.

A.1.3 – Captura Radioativa:

$n + X^A \rightarrow X^{A+1} + \gamma$; reação nuclear do tipo (n, γ) onde o núcleo alvo X^A absorve um nêutron, passando para seu isótopo X^{A+1} com emissão de raios gama.

A.1.4 – Fissão Nuclear:

$n + X \rightarrow P_1 + P_2 + \nu n$; reação nuclear do tipo (n,f) onde X é um núcleo pesado que se rompe em dois núcleos menores de massas atômicas intermediárias, havendo libertação de ν nêutrons (ν , número inteiro).

A.2 – Classificação dos Nêutrons Quanto à sua Energia

Nêutrons Frios.	$E < 0,005$ eV
Nêutrons Térmicos.	$0,005 < E < 0,500$ eV
Nêutrons Epitérmicos.	$0,500 < E < 10^3$ eV
Nêutrons Intermediários.	$10^3 < E < 5 \times 10^5$ eV
Nêutrons Rápidos.	$E > 5 \times 10^5$ eV

A.3 – Utilização das Diferentes Energias dos Nêutrons

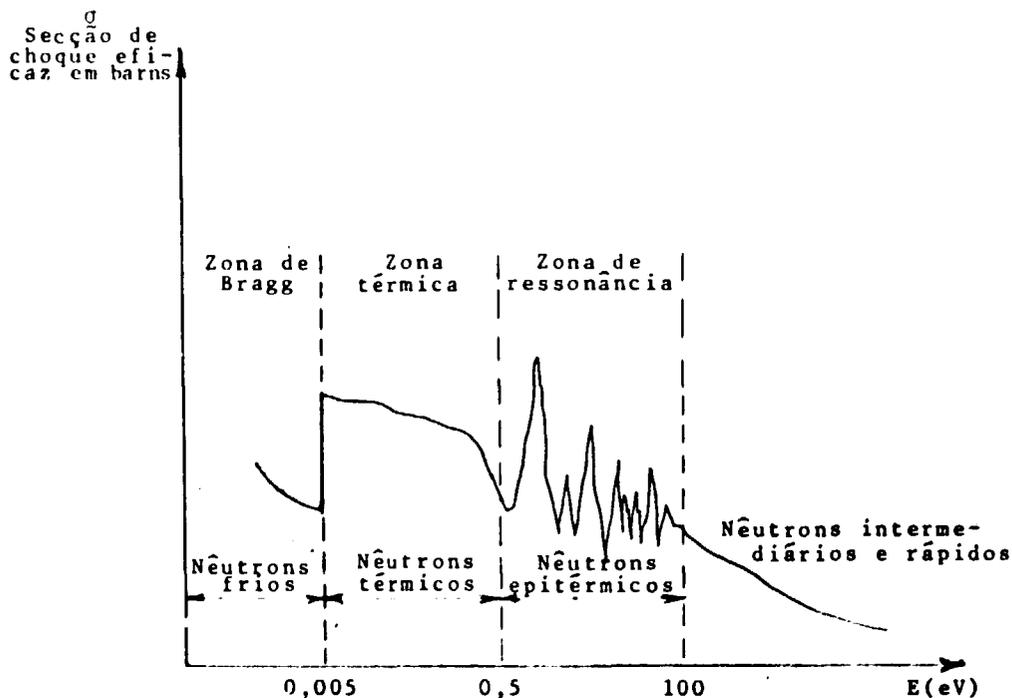
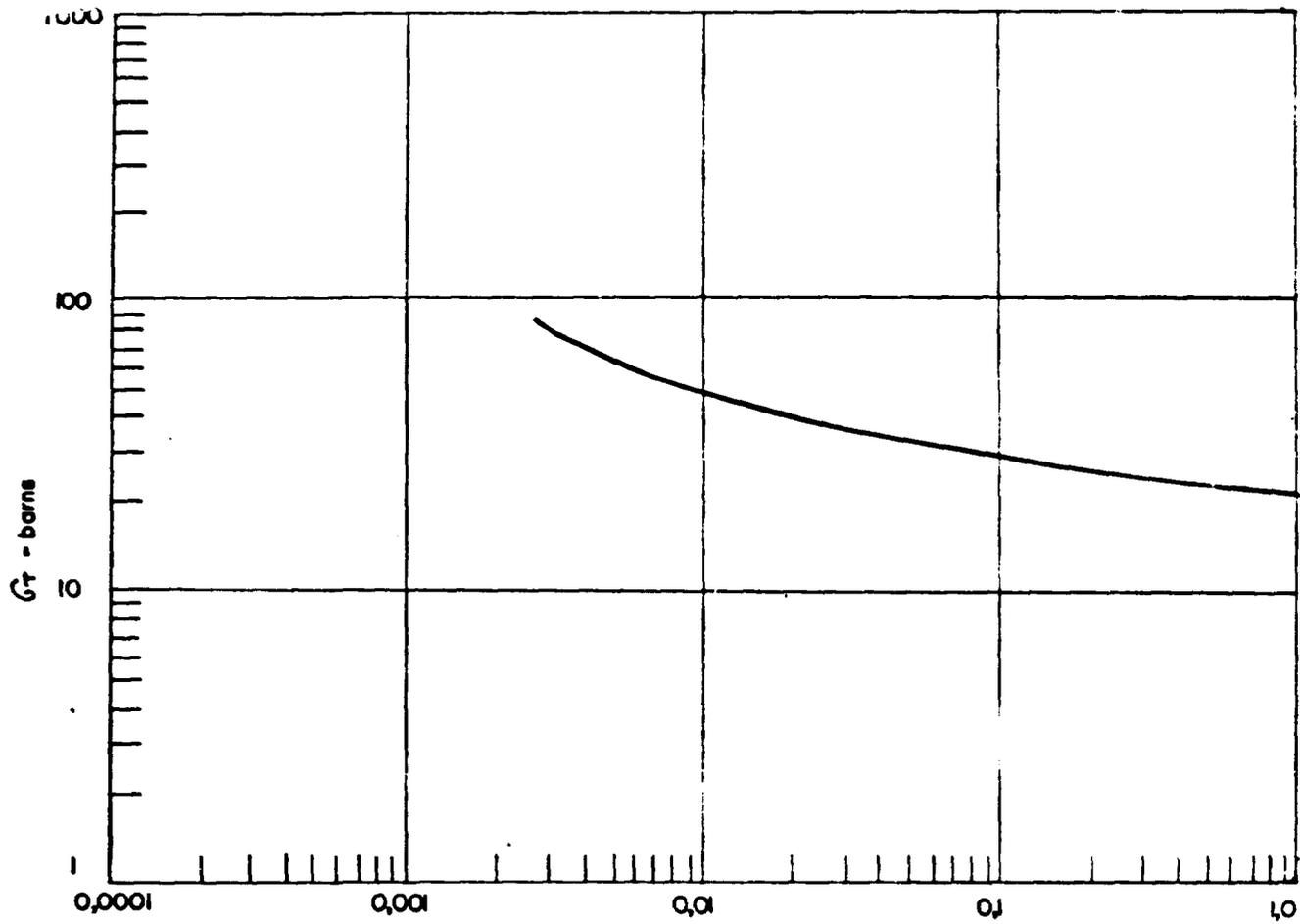


Figura A.1 – Gráfico Genérico da Secção de Choque Versus Energia do Nêutron

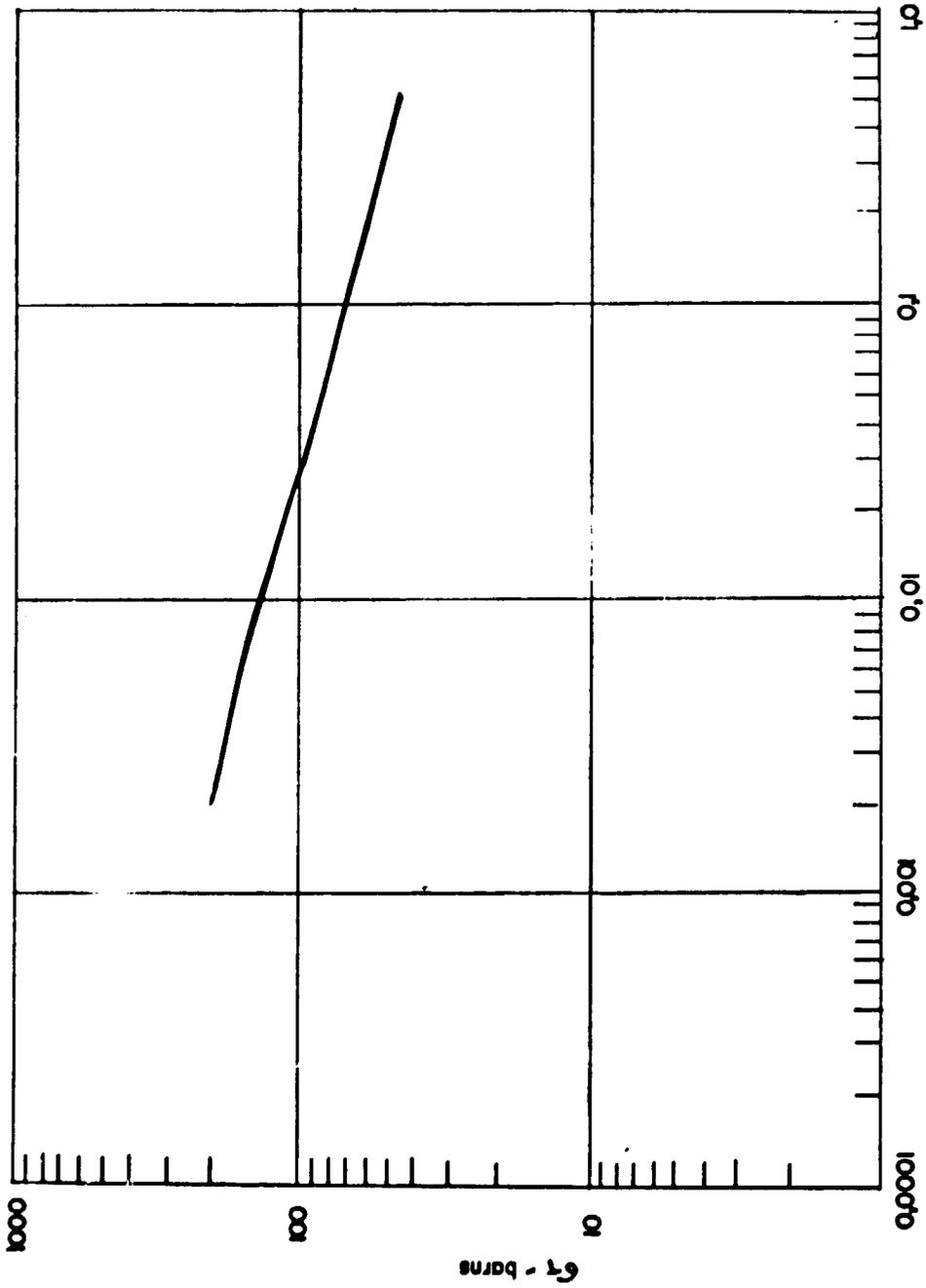
A.4 – Secção de Choque (Região Térmica) dos Diferentes Materiais Utilizados nas Partes Experimentais deste Trabalho⁽¹⁹⁾

- | | |
|--|------------|
| A.4.1 – Hidrogênio (H) ; | Figura A.2 |
| A.4.2 – Água Leve (H ₂ O) ; | Figura A.3 |
| A.4.3 – Boro-10 (B) ; | Figura A.4 |
| A.4.4 – Alumínio (Al) ; | Figura A.5 |
| A.4.5 – Cádmio (Cd) ; | Figura A.6 |
| A.4.6 – Ouro (Au) ; | Figura A.7 |



E - eV

Figura A.2 - Secção de Choque Total do Hidrogênio⁽¹⁹⁾



E - ev

Figura A.3 - Secção de Choque Total da Água Leve (H_2O)⁽¹⁹⁾

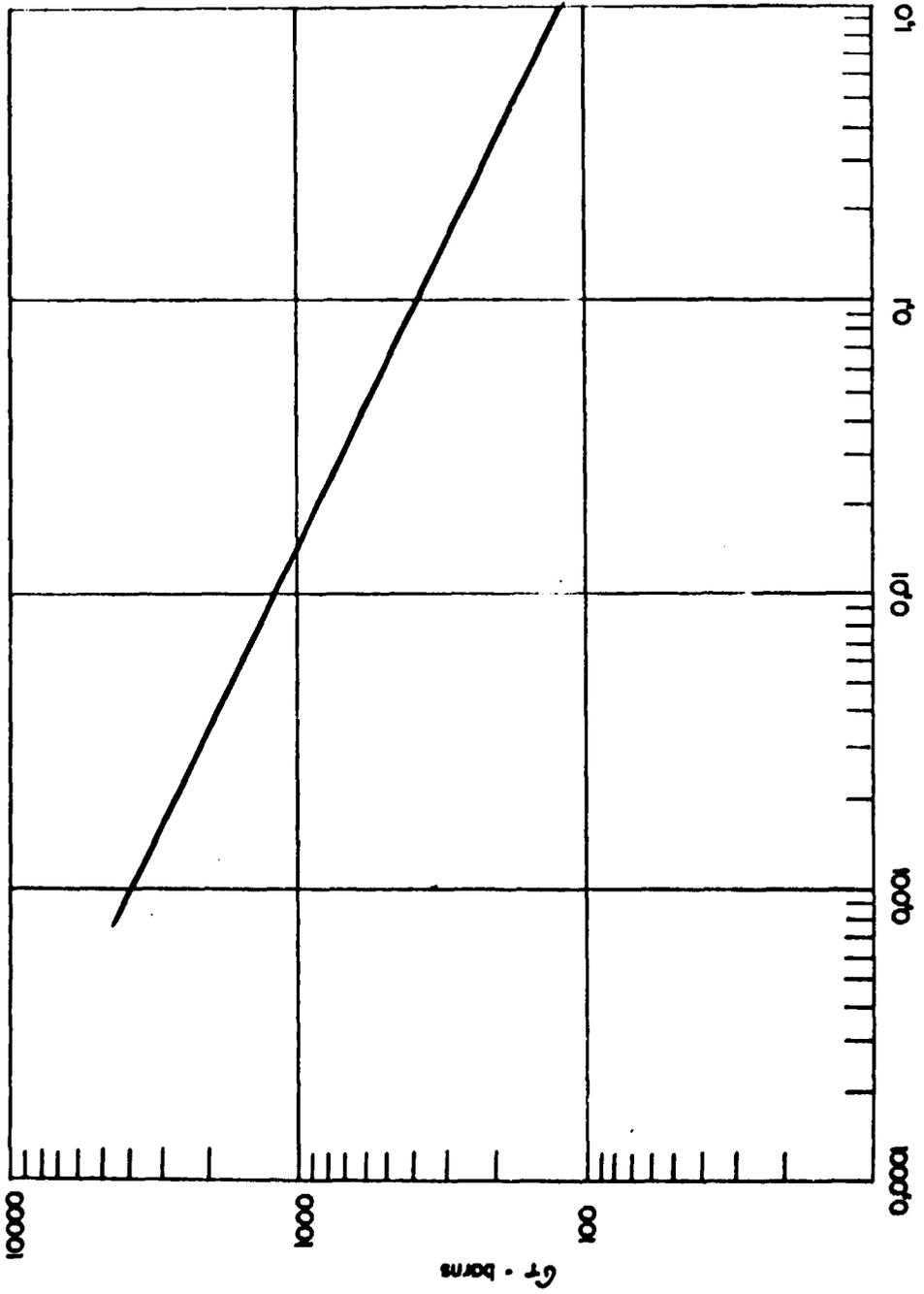


Figura A.4 - Secção de Choque Total do Boro-10⁽¹⁹⁾

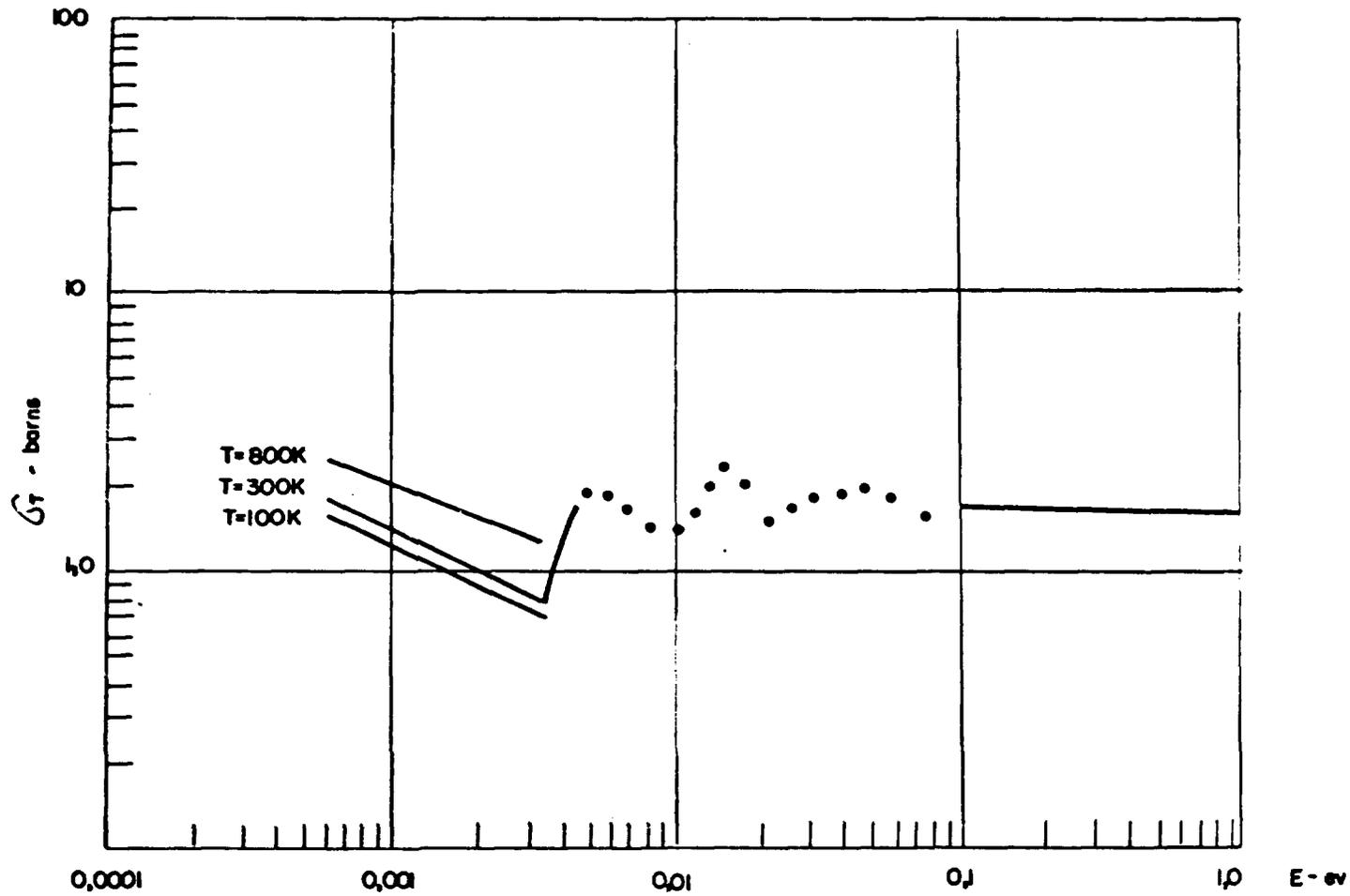


Figura A.5 - Secção de Choque Total do Alumínio⁽¹⁹⁾

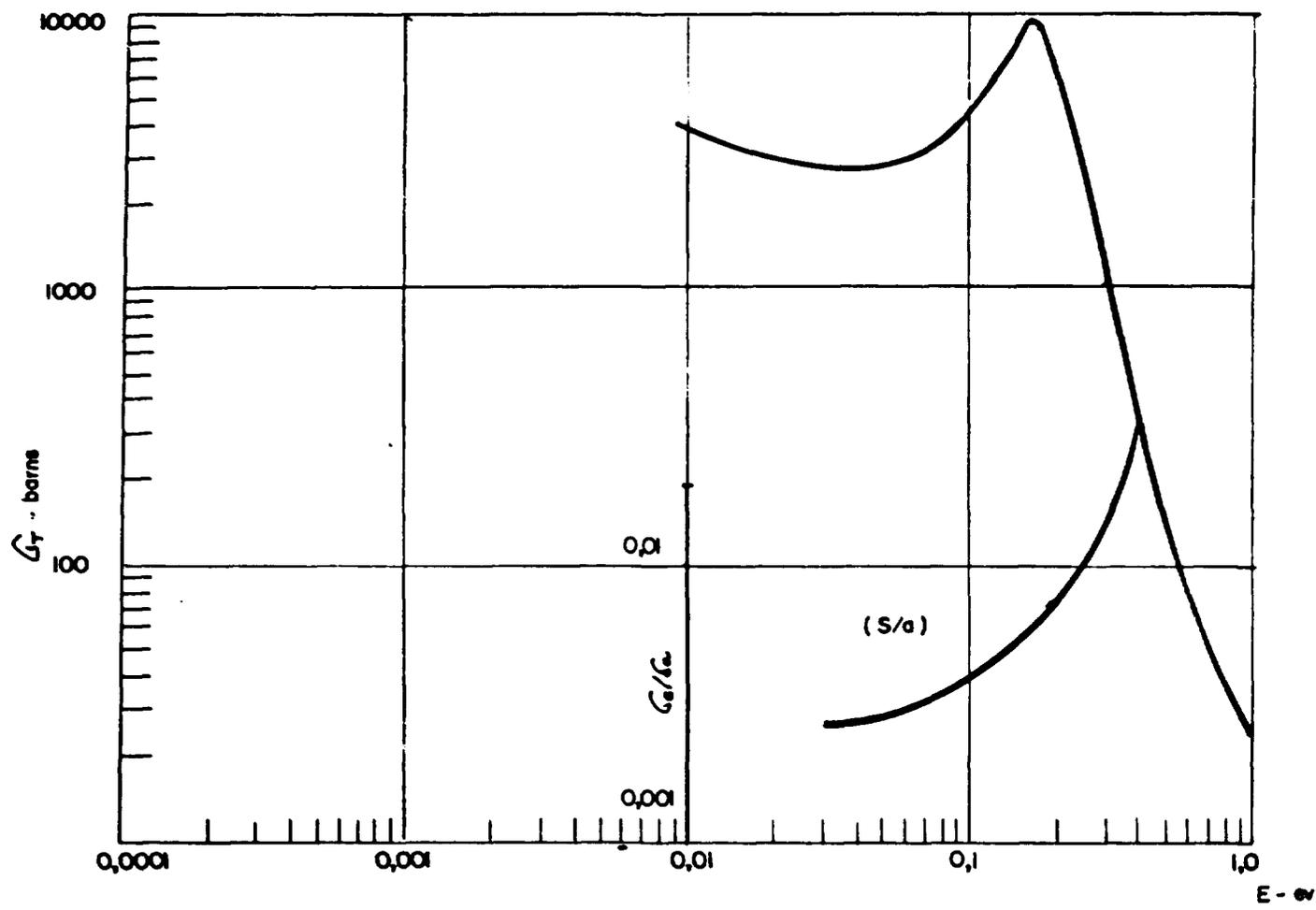


Figura A.6 - Sección de Choque Total do Cádmi¹¹⁹

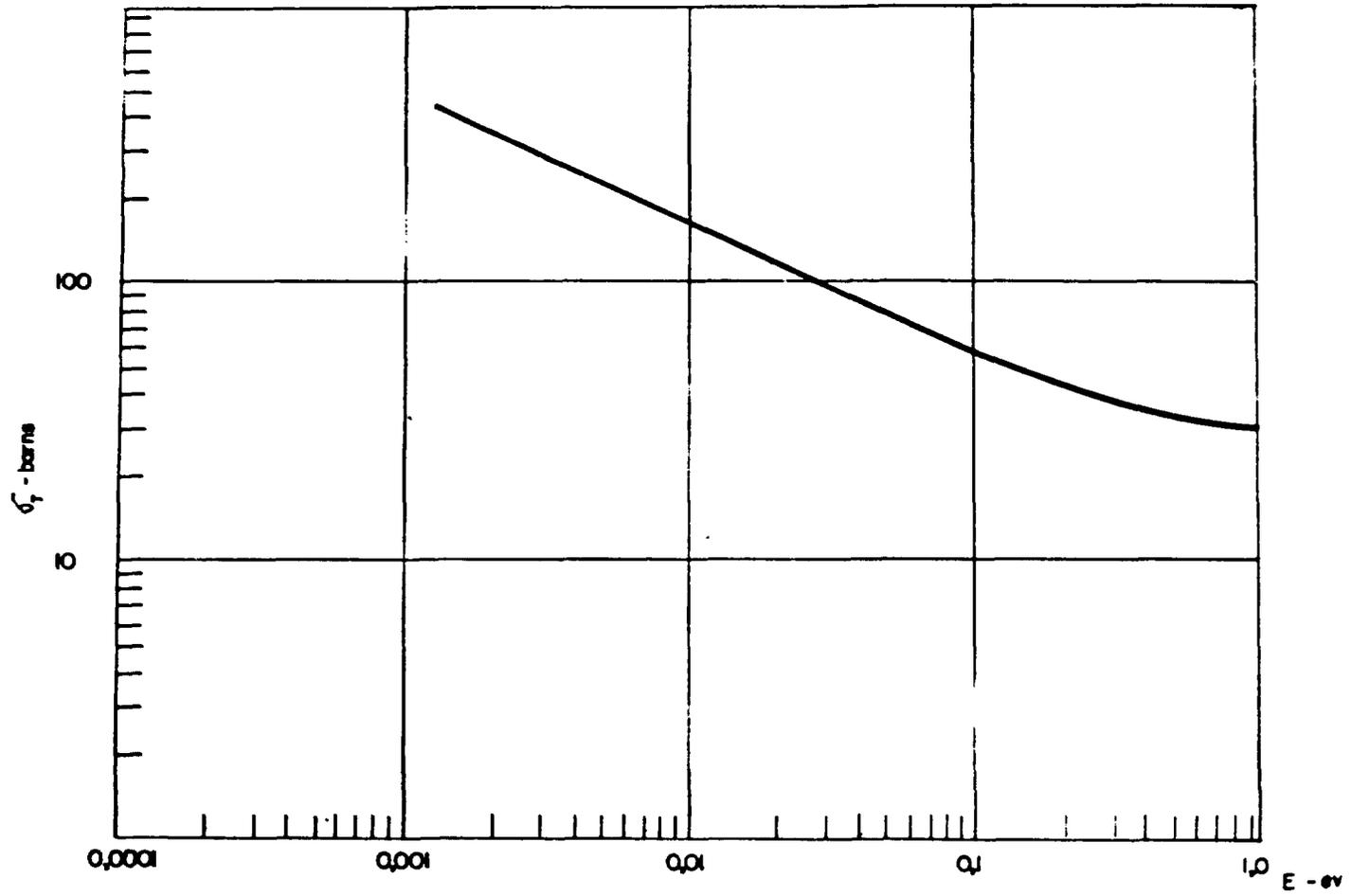


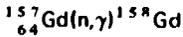
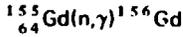
Figura A.7 - Secção de Choque Total do Ouro ^{197}Au

APÊNDICE B

Esquemas de decaimento dos principais materiais utilizados como chapas conversoras, bem como suas principais características físicas e nucleares, reações utilizadas etc.

B.1 – Gadolínio (Gd)^(6,9,12)

Reações Utilizadas:



Características Físicas e Nucleares:

Número atômico	64
Peso atômico	157,26
Densidade	7,95 g/cm ³
Secção de choque eficaz (abs.)	4,6 x 10 ⁴ b
Número de átomos por cm ³	3,05 x 10 ²²

Tabela B.1

Abundâncias Relativas e Secções de Choque Eficazes dos
Isótopos Naturais do Gadolínio

Isótopo	Abundância relativa	Secção de choque eficaz (b)	Meia Vida
¹⁵² Gd	0,200	125	230 dias
¹⁵⁴ Gd	2,15	desprezível	
¹⁵⁵ Gd	14,73	70000 ± 20000	
¹⁵⁶ Gd	20,47	desprezível	
¹⁵⁷ Gd	15,68	160000 ± 60000	
¹⁵⁸ Gd	24,87	3,9 ± 0,4	18 horas
¹⁶⁰ Gd	21,90	0,8 ± 0,3	3,6 minutos

A radiação que impressiona o filme é a gama de captura e o elétron de conversão de 70 KeV.

B.2 – Disprósio (Dy)⁽⁶⁾Reação Utilizada: $^{164}_{66}\text{Dy}(n,\gamma)^{165}\text{Dy}$

Porcentagem Isotópica: 28,18%

Densidade: 8,55 g/cm³ ^{165m}Dy $\sigma_{\text{at}} = 800 \pm 100 \text{ b}$ $T_{1/2} = 140 \text{ min}$ ^{165}Dy $\sigma_{\text{at}} = 2000 \pm 200 \text{ b}$ $T_{1/2} = 1,25 \text{ min}$

Tabela B.2

Energias dos Betas e Gammas do Disprósio

Energias dos Betas (Máx) (MeV)	Energias dos Gammas (MeV)
1,305 (80%)	0,985
1,215 (15%)	0,710
1,02 (1,4%)	0,629
1,0 (0,6%)	0,555
0,890 (1,0%)	0,515
0,305 (2,0%)	0,356
	0,275
	0,159
	0,108
	0,095

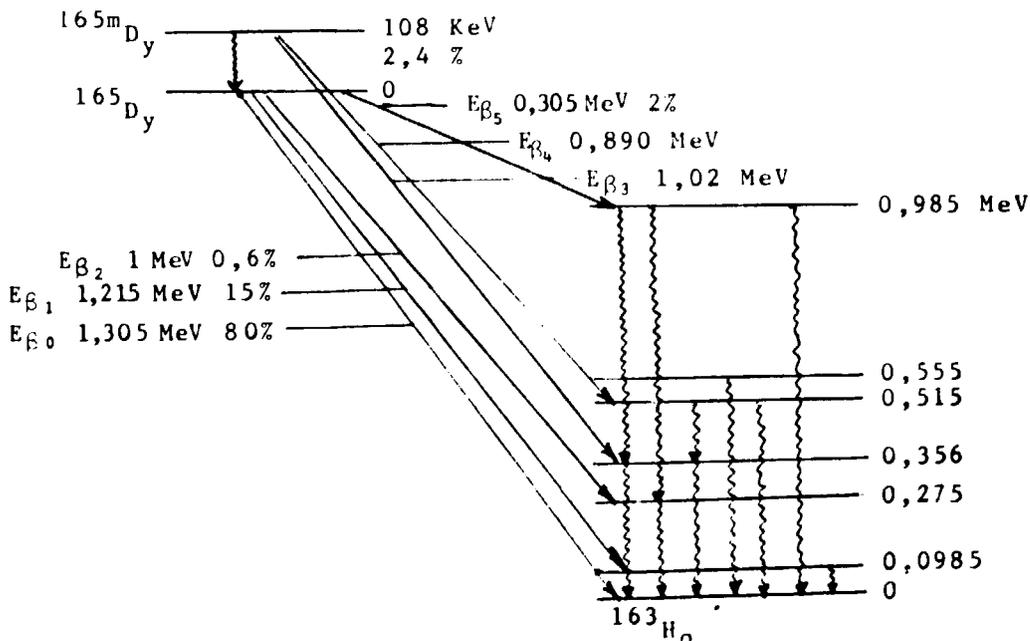


Figura B.1 – Esquema de Decaimento do Disprósio

B.3 – Índio (In^{61})

Reação Utilizada: $^{115}_{49}\text{In}(n,\gamma)^{116}\text{In}$

Porcentagem Isotópica: 95,77%

Meia Vida: $T_{1/2} = 54,12 \text{ min} \dots \dots \dots \sigma_{\text{at}} = 160 \pm 2 \text{ b}$
 $T_{1/2} = 14,10 \text{ s} \dots \dots \dots \sigma_{\text{at}} = 42 \pm 1 \text{ b}$

Densidade: $7,31 \text{ g/cm}^3$

Tabela B.3

Energias dos Betas e Gammas do Índio

Energias dos Betas (Máx) (MeV)	Energias dos Gammas (MeV)
1,00 (55%)	2,12
0,87 (36%)	1,76
0,60 (8%)	1,51
0,34 (1%)	1,29
	1,10
	0,83
	0,41
	0,14

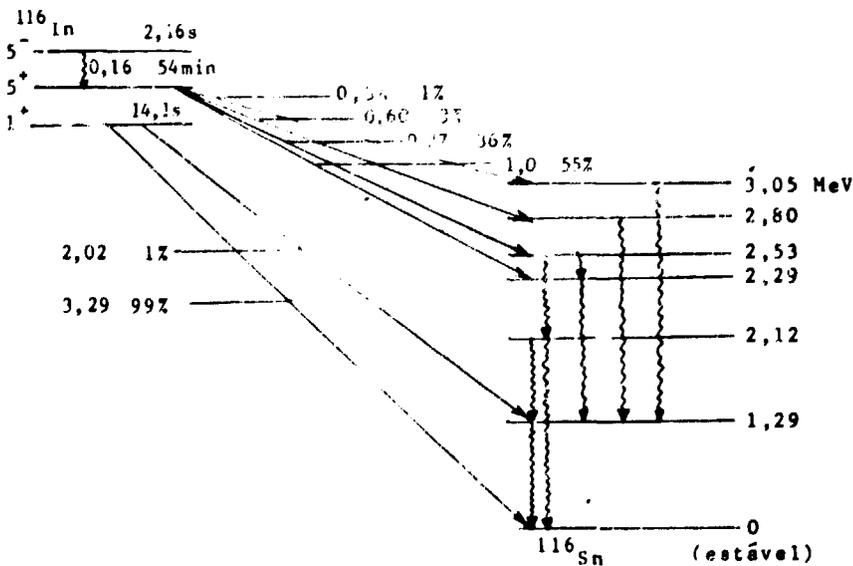


Figura B.2 – Esquema de Decaimento do Índio

B.4 – Ródio (Rh)⁽⁶⁾

Reação Utilizada: $^{103}_{45}\text{Rh}(n,\gamma)^{104}\text{Rh}$

Porcentagem Isotópica: 100%

Densidade: 12,4 g/cm³

Meia Vida: $T_{1/2} = 4,3$ minutos $\sigma_{\text{at}} = 12 \pm 2$ b
 $T_{1/2} = 44$ segundos $\sigma_{\text{at}} = 140 \pm 30$ b

Tabela B.4

Energias dos Betas e Gamas do Ródio

Energia dos Betas (Máx) (MeV)	Energia dos Gamas (MeV)
2,44 (97,9%)	1,53
1,88 (1,85%)	1,34
0,64 (0,11%)	1,24
0,48 (0,12%)	0,93
0,30 (0,026%)	0,780
	0,745
	0,556

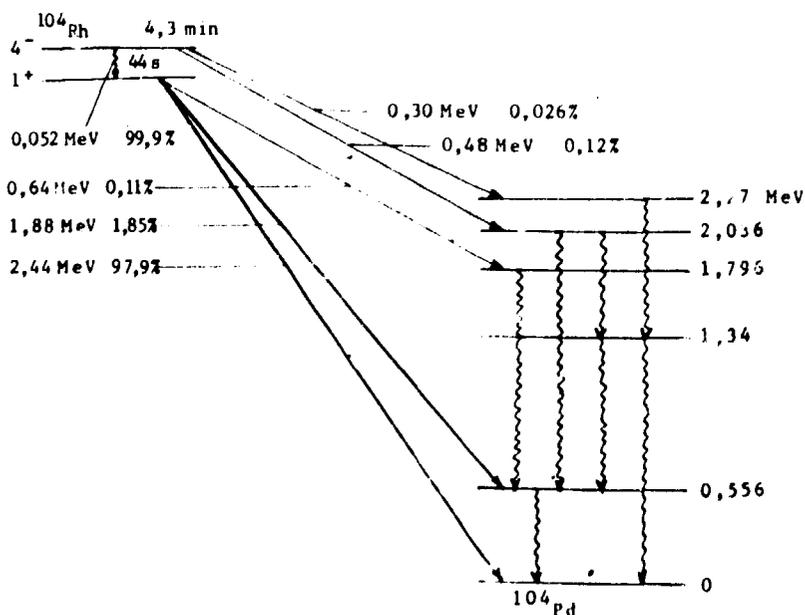


Figura B.3 – Esquema de Decaimento do Ródio

B.5 – Ouro (Au)⁽⁶⁾Reação Utilizada: $^{197}_{79}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$

Porcentagem Isotópica: 100%

Densidade: 19,32 g/cm³

Meia Vida: $T_{1/2} = 2,695$ dias $\sigma_{\text{at}} = 98,8$ b
 $\sigma_{\text{es}} = 9,3$ b

Tabela B.5

Energias dos Betas e Gamas do Ouro

Energia dos Betas (Máx) (MeV)	Energia dos Gamas (MeV)
0,957 (99%) 0,295 (1%)	0,411 (99%)

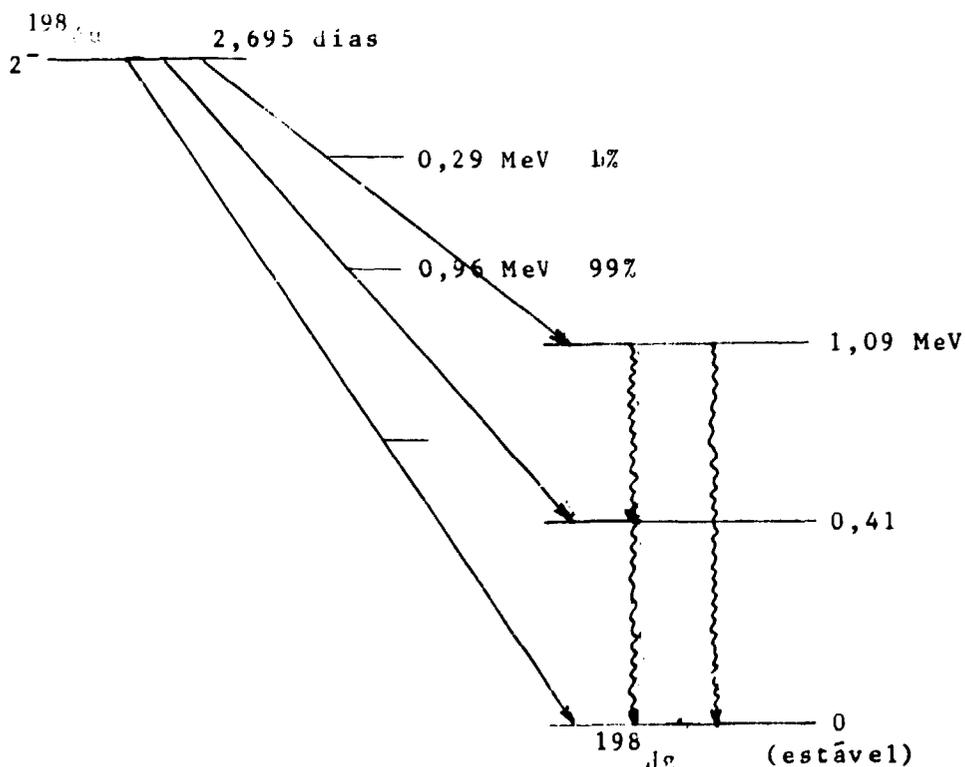


Figura B.4 – Esquema do Decaimento do Ouro

APÊNDICE C

Definições, características dos filmes utilizados nas radiografias ^(32,24)

C.1 – Composição de um Filme

Ele é constituído, basicamente (Figura C.1), por um suporte transparente azulado, recoberto por uma emulsão composta de suspensão de cristais de haletos de prata em gelatina. Esta emulsão se liga ao suporte por intermédio de um substrato e é protegida por uma camada protetora gelatinosa. O tamanho dos grãos existentes na emulsão varia de $0,5\mu$ a $1,5\mu$, dependendo da sensibilidade desejada.

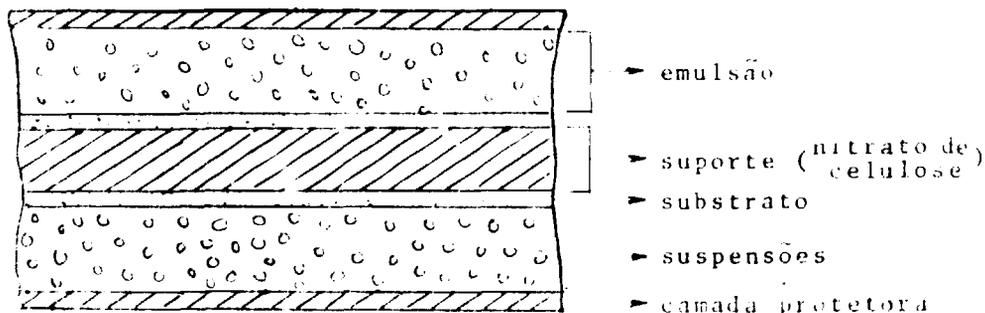


Figura C.1 – Constituição de um Filme Radiográfico

C.2 – Processo de Formação da Imagem Latente no Filme

Inicialmente, a radiação ionizante ao penetrar na emulsão cede sua energia aos elétrons mais externos dos íons Br^- liberando dessa forma o elétron excedente do íon. O bromo assim formado é fixado na gelatina. Por outro lado, a prata que possui a órbita externa vazia (Ag^+) recebe este elétron viajante quando este possuir energia compatível com esta órbita. Assim, estes elétrons aprisionados geram campos negativos que ao atingir um determinado valor atraem íons Ag^+ . Portanto, há formação de uma corrente devida aos elétrons e outra devida aos íons Ag^+ que se combinam formando prata metálica que se acumula de maneira descontínua.

C.3 – Curva Característica de um Filme

A melhor maneira de se apresentar dados sensitométricos é utilizando-se a curva característica (Figura C.2). Ela é um plote da resposta da densidade de prata versus logaritmo da exposição. Obtém-se essa curva, submetendo-se o material fotográfico a uma série de exposições, cada uma delas superior à anterior por um fator constante. Após, faz-se o processamento do material e leitura por meio de um densitômetro.

Define-se densidade radiográfica como o logaritmo da opacidade do depósito de prata. A densidade é deduzida como segue:

$$T = \frac{\text{Luz Transmitida}}{\text{Luz Incidente}}$$

Desde que a opacidade é baixa se a transmissão de luz for alta, e vice versa,

$$O = \text{Opacidade} = \frac{1}{T} = \frac{1}{\text{Transmissão}}$$

$$\text{Densidade} = D = \log O = \log \frac{1}{T}$$

Em sensitometria, o termo **exposição** refere-se à quantidade total de energia luminosa que age sobre o material fotográfico. É usualmente expresso em metro-candela-segundos; o logaritmo da exposição é utilizado no ploté da curva característica.

A inclinação da curva (γ) indica de quanto varia a densidade quando se varia a exposição. O valor numérico de γ é definido como a tangente do ângulo entre a região linear e o eixo x.

A curva característica é dividida em três regiões distintas:

Região de Subexposição: (para exposição menor do que A). Nesta região a densidade existente é resultante de embaçamento no suporte decorrente do próprio processo químico de revelação.

Região Linear: (A -- B). Nesta região o gradiente é constante e a densidade aumenta como uma função linear do logaritmo da exposição. Normalmente, é nessa região onde se fazem os ensaios radiográficos.

Região de Superexposição: (para exposições maiores do que C). O gradiente da curva diminui com o acréscimo na exposição. Eventualmente, a curva torna-se horizontal para exposições superiores. A densidade da parte horizontal da curva usualmente é denotada por $D_{\text{máx}}$.

C.4 – Velocidade, Contraste e Definição de Filmes

C.4.1 – Velocidade

A rapidez relativa dos filmes radiográficos é função do tamanho e densidade dos grãos de brometo de prata. Esta velocidade é aumentada quando o filme é confeccionado com emulsão dupla.

A velocidade depende, além dos fatores mencionados, dos seguintes outros fatores:

Natureza, Temperatura, Tempo de Revelação e Envelhecimento do Revelador.

C.4.2 – Contraste

É definido como a diferença de densidade entre dois pontos do filme, provocada por determi-

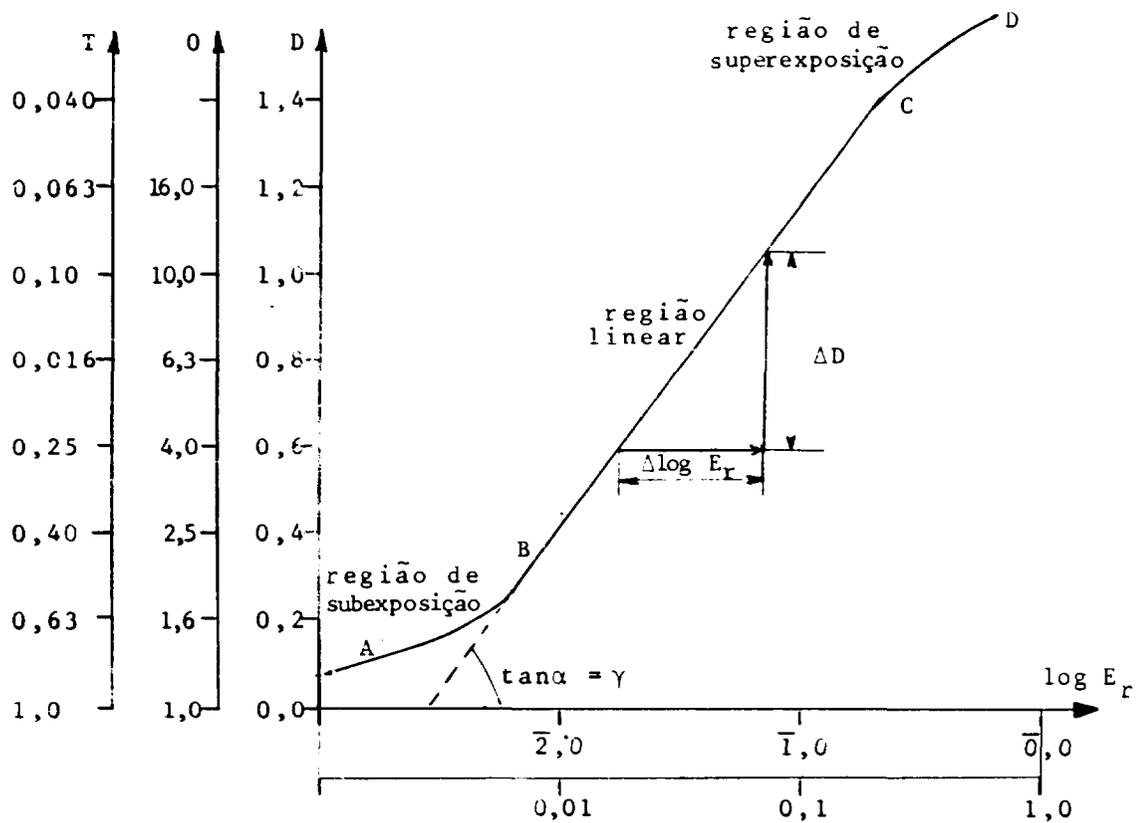


Figura C.2 – Curva Característica de um Filme Fotográfico

nada variação de exposição. Na Figura C.2, o contraste nada mais é do que a tangente do ângulo formado pela tangente à curva na região aproximadamente linear com o eixo x.

$$\gamma = \operatorname{tg}\alpha = \frac{\Delta D}{\Delta \log E_x}$$

O contraste depende dos fatores seguintes: diferença de espessura, dimensões, posicionamento, tipo de filme, natureza, temperatura do revelador e tempo de revelação.

C.4.3 – Definição

É a capacidade de um filme exposto de separar convenientemente duas seções adjacentes, com distintas densidades radiográficas.

A definição depende dos seguintes fatores geométrico (grau de colimação), tipo de filme e tempo decorrido entre a irradiação e a revelação.

C.5 – Classes de Filmes Radiográficos Industriais

A grande diversidade nos ensaios não destrutivos levaram os fabricantes de filmes a ampliar o espectro de tipos de filmes. A norma ASTM-E-62T (norte-americana) classifica os filmes industriais em quatro categorias:

C.5.1 – Classe I

Características: Granulação extra fina e alto contraste.

C.5.2 – Classe II

Características: Granulação extra fina e alto contraste. Granulação um pouco maior do que a da Classe I, porém de maior velocidade.

C.5.3 – Classe III

Características: Alta velocidade e granulação moderada.

C.5.4 – Classe IV

Características: Alta velocidade e alto contraste quando utilizado em conjunto com telas fluorescentes.
Contraste reduzido quando se utiliza tela intensificadora.

C.6 – Equivalência dos Filmes Utilizados em Várias Partes do Mundo

Das comparações feitas entre curvas características dos diversos tipos de filmes pode-se estabe-

Tabela C.1

Comparação entre Filmes de Diversos Países

Eastman Kodak (USA)	Kodak Limited (Inglaterra)	Kodak Pathé (França)	Gevaert (Bélgica)	Iford (Inglaterra)	Agfa (Alemanha)	Du Pont (USA)	Anscó (USA)
Tipo K	Industrex-D	Regulix	Structurix-D10	Industrial Type B	---	---	Superay C
No-Screen	Kodirex	Kodirex Bicouche	Ogray	Industrial Type G	Sinofilm Safety	---	No-Screen
Blue Brand	Blue Brand	Regulix-S	Curix	Red Seal	Roentgenfilm Safety	Type 508	High-Speed
Tipo F	Industrex-S	---	Structurix-S	Industrial Type A	---	Type 504	---
Tipo AA	Crystallex	Definix	Structurix-D7	Industrial Type C	Roentgenfilm Safety (Wolfen)	Type 506	Superay A
Tipo M	---	Type M experimental	---	Industrial Type F	Laue Film (Wolfen)	Type 510	Superay B

lecer entre os filmes de várias procedências, principalmente entre os norte-americanos e os europeus (Tabela C.1).

ABSTRACT

Investigations on the field of Neutron Radiography have been performed at the IEAR-1, swimming pool reactor utilizing a collimated neutron beam and the so-called photographic transfer method as a mean of detection.

The test object (sample) is placed between the neutron source (reactor core) and the gold foil.

The activity of its different points is the inverse measure of the neutrons absorbed in the test sample at the corresponding points. The activity distribution on the gold foil is determined again by exposing it to an X-ray film.

A multichannel collimator type consisting of an assemblage of stainless steel tubes inside an aluminium mantle (tube) was used as a direction beam selector.

Improvements have been introduced in respect to the reduction of angular divergence and neutron scattering.

To improve further the quality of the radiographs another collimator type has been developed using boric acid as a neutron absorber and moderator.

Flux measurements by means of gold foil activation at reactor positions of interest were necessary to eliminate errors originating of different neutron flux values.

The dependance of film darkening upon the neutron flux and other factors have been discussed.

Finally neutron- and gamma-radiographs of the same objects were evaluated in comparison.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALCOBER BOSCH, V. La neutrongrafia: presentación de un nuevo método de ensayo no destructivo. *Energia nucl.*, 18(92):403-16, 1974.
2. ALGER, D. M. & BULL, S. R. Development of a high-resolution thermal-neutron radiography facility. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 14:530, 1971.
3. ATKINS, H. L. Biological application of neutron radiography. *Mater. Eval.*, 23:453-8, 1965.
4. BARTON, J. P. Divergent beam collimator for neutron radiography. *Mater. Eval.*, 25:45A - 6A, 1967.
5. BATES, J. C. & ROY, S. Neutron radiography with very cold neutrons. *Nucl. Instrum. Meth.*, 120:369-70, 1974.
6. BECKURTS, K. H. & WIRTZ, K. Table of thermal neutron cross sections of the isotopes. In: BECKURTS, K. H. & WIRTZ, K. *Neutron physics*, New York, N. Y., Springer, 1964. p.407-16.
7. BERGER, H. Characteristics of a thermal neutron television imaging system. *Mater. Eval.*, 24:475-81. Sep. 1966.

8. BERGER, H. Evaluation of radiographic paper for thermal-neutron radiography. *Trans. Am. nucl. Soc.*, 21:148-9, 1973.
9. BERGER, H. *Neutron radiography.*, New York, N. Y., Elsevier, 1965. p.5, 6, 7, 47, 95, 104.
10. BERGER, H. The present state of neutron radiography and its potential. *Mater. Eval.*, 30:55-54, Mar. 1972.
11. BERGER, H.; TALBOY, J. H.; TYLKA, J. P. Determination of cadmium burnup in reactor control rods by neutron radiography. *Nucl. Sci. Engng.*, 18:236-41, 1964.
12. BLANKS, B. L. & MORRIS, R. A. Experiments with foil-film combinations and collimators for neutron radiography. *Mater. Eval.*, 24:76-80, Feb. 1966.
13. CARBIENER, W. A. Nondestructive examination of radioactive material using neutron radiography. *Nucl. Applic.*, 2:468-70, Dec. 1966.
14. EVANS, R. D. *The atomic nucleus.* New York, N. Y., McGraw-Hill, 1969.
15. FELD, B. T. The neutron. In: SEGRÉ, E., ed. *Experimental nuclear physics.* v.2., New York, N. Y., Wiley, 1953. p.369.
16. HARMS, A. A. & BLAKE, T. G. Densitometer-beam effects in high-resolution radiography. *Trans. Am. nucl. Soc.*, 15(2):710, 1972.
17. HASKINS, J. J. & HILL, K. R. Nondestructive testing of brazed joints using neutron radiography. *Trans. Am. nucl. Soc.*, 14:528-9, 1971.
18. HOLLAND, L. Low-intensity beams for neutron radiography. *Trans. Am. nucl. Soc.*, 21:149-50, 1973.
19. HUGHES, J. & HARVEY, J. A. *Neutron cross sections.* New York, N. Y., McGraw-Hill, 1955. p.59, 72, 96, 186, 261. (BNL-325).
20. KALLMANN, H. Neutron radiography. *Research (London)*, 1:254-60, 1948.
21. KIRK-OTHEMER encyclopedia of chemical technology. 2.ed. New York, N. Y., Interscience, 1963-64. v.1, p.929; v.3, p.612, 884.
22. KOK, K. D. Evaluation of neutron beams using geometrical optics. *Trans. Am. nucl. Soc.*, 14:526, 1971.
23. LAMARSH, J. R. *Introduction to nuclear reactor theory.* Reading, Mass., Addison-Wesley, 1966. p.20, 95, 246, 252.
24. MacMASTER, R. *Nondestructive testing handbook, v.1.* 3.ed. New York, N. Y., Ronald, 1959.
25. MATFIELD, R. S. Neutron radiography. *Atom. Lond.*, (174):84-99, Apr. 1971.
26. MATFIELD, R. S. *Neutron radiography and its uses in engineering.* Harwell, Berks., Atomic Energy Research Establishment, Research Group, Jan. 1970. [Reprinted from Nuclear Engineering].
27. NEUTRON sources: evaluation of californium-252 for industrial uses. *Californium-252 Progr.*, (14):3-52, Jan. 1973.

28. PASQUALETTO, H. *Níveis de radiação na superfície livre da piscina do reator IEA-R1*. São Paulo, 1976. [Dissertação de mestrado].
29. PLUMMER, A. M. Reactor-material inspection by neutron radiography. *Reactor Technol.*, 14(1):1-6, Spring 1971.
30. PRICE, W. J. *Nuclear radiation detection*. New York, N. Y., McGraw-Hill, 1964, p.259 e 281.
31. RAU, J. A. & PARKER, W. L. Measurements of antiscatter grid, effectiveness in thermal-neutron radiography of hydrogeneous materials. *Nucl. Technol.*, 16(3):458-61, 1972.
32. ROSENAL, J. J. *Neutron radiography*. Rio de Janeiro, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 1973. [From 3rd fabrication inspection meeting, Rio de Janeiro, 22 october 1973]. p.40. (INIS-mf-1553).
33. SANCHEZ, W. *Ensaio não destrutivo pela técnica dos raios x e raios gama*. São Paulo, Instituto de Energia Atômica, ago. 1974. p.65.83. (IEA-Inf-29).
34. TAYLOR, F. *The use of material testing reactor at the Atomic Energy Research Establishment, Harwell*. Harwell, Atomic Energy Research Establishment, Oct. 1970. (RRL-70/971).
35. THALER, L. A. Measurement of capsule heat transfer gaps using neutron radiography. *Mater. Eval.*, 32(3):57-62, 1974.
36. TOMLINSON, R. L. & NEWACHECK, R. L. Development of a neutron radiographic contrast, resolution, and scatter indicator (CRASI). *Trans. Am. nucl. Soc.*, 14:531-2, 1971.
37. WALL, T. & GILLESPIE, P. Neutron radiography at Lucas Heights. *Atom. Energy in Austr.*, 18(3):7-12, Jul. 1975.



INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal, 11049 – Pinheiros
CEP 05508
01000 – São Paulo – SP

Telefone: 211-6011
Endereço Telegráfico – IEATOMICA
Telex – 011-23592 IENA BR