UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE FÍSICA

DOSIMETRIA DE NÊUTRONS

Luciano Fratin

Tese apresentada ao Instituto de Física da
Universidade de São Paulo para obtenção do
Título de Doutor em Ciências

Orientadora:

Marília Teixeira da Cruz

Profª. Drª. Marília Teixeira da Cruz

Emílio Luiz Caldas

Comissão Examinadora:

Profª. Drª. Emico Okuno (IFUSP)

Profª. Drª. Marília Teixeira da Cruz (IFUSP)

Profª. Drª. Marília T. F. Cesar Khouri (IPEN/CNEN - SP)

Profª. Drª. Marina Koskinas (IPEN/CNEN - SP)

Prof. Dr. Silvio Bruni Herdade (IFUSP)

SBI-IFUSP

305M810T2073

São Paulo

1993

612.01448

F844d

D

ex 2

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação
do Instituto de Física da Universidade de São Paulo

Fratin, Luciano

Dosimetria de nêutrons. São Paulo, 1993.

Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo. Instituto de Física. Departamento de Física Nuclear.

Área de Concentração: Física Nuclear

Orientador: Profa. Dra. Marília Teixeira da Cruz

Unitermos: 1. Dosimetria de nêutrons; 2. CR-39;
3. Espectrômetro de Bonner; 4. Calibração de detectores de nêutrons.

USP/IF/SBI - 81/93

Dedico este trabalho

À minha mãe,
à **Mônica**
e ao meu filho **Renato**

AGRADECIMENTOS

Num trabalho como este, durante o qual passaram-se alguns anos de minha vida, são muitos os agradecimentos merecidos. Vou tentar colocá-los de acordo com as etapas que foram sendo vencidas, uma a uma.

À Marília que participou decisivamente de todas as etapas deste trabalho e é uma pessoa com a qual sempre se pode contar.

Ao pessoal das oficinas do Van Der Graaff e do Pelletron que sempre executaram com muita dedicação todos projetos a eles encaminhados. Aqui então, meus agradecimentos ao Miguel, ao Betão, ao Pedro, ao Otávio, ao Sr. Mário, ao Messias e ao Carlos Roberto.

Ao Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD-RJ) pela calibração da fonte de nêutrons de AmBe aqui utilizada.

Da mesma forma ao Mauro Dias, à Marina Koskinas e ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP) pelas medidas realizadas no Laboratório de Metrologia Nuclear que levaram à calibração do fluxo térmico.

À Marcia Torres que do FERMILAB nos enviou gentilmente o código computacional BUNKI, bem como toda a documentação do programa.

À Rita pelo preparo das soluções alcalinas.

Ao João e ao Carlos pelos desenhos realizados para os artigos e para este trabalho.

A todos os colegas do Laboratório de Dosimetria sempre dispostos a colaborar, e pelos quais tenho muito carinho e amizade.

Ao CNPq pelo apoio financeiro concedido.

Finalmente, agradeço à Mônica por sua compreensão e estímulo em todos os momentos e que levaram à finalização deste trabalho.

RESUMO

Instalações para irradiação com nêutrons foram projetadas e construídas, visando o estabelecimento de procedimentos de calibração de monitores e dosímetros de nêutrons. Uma fonte calibrada de $^{241}\text{AmBe}$ com atividade de 185 GBq, garantiu rastreabilidade às medidas realizadas, e possibilitou irradiações com taxas de dose que variaram entre 9 nSv s^{-1} e $0,5 \text{ } \mu\text{Sv s}^{-1}$. No arranjo elaborado para irradiações com nêutrons térmicos, com fluxo calibrado, a taxa de dose utilizada foi 50 nSv s^{-1} .

A calibração de um espectrômetro de esferas de Bonner permitiu o estabelecimento dos procedimentos de calibração com base em três métodos propostos por normas internacionais, mostrando serem apropriadas às dimensões da sala de irradiação projetada para essa finalidade. A deconvolução do espectro de nêutrons, a partir da determinação dos parâmetros de calibração para o detector de esferas de Bonner, permitiu determinar o espectro da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ calibrada, com valores de taxa de fluência, taxa de dose equivalente e energia média, que corresponderam satisfatoriamente aos valores calculados esperados, possibilitando o uso de tal detector na dosimetria de área.

Para a dosimetria pessoal, foi elaborado um sistema dosimétrico baseado no uso do polímero CR-39 e no ataque eletroquímico do mesmo. Para isso, foram projetadas e construídas uma câmara para o processamento do detector e uma fonte de alta tensão e alta frequência que mostraram-se adequadas às finalidades propostas. O dosímetro pessoal elaborado utiliza também material conversor (n, α) e seu princípio de detecção possibilitou determinar um fator de calibração relacionando a resposta do detector com a dose recebida para nêutrons térmicos, epitérmicos e rápidos. Os parâmetros utilizados para o ataque eletroquímico foram: solução de KOH 6N, temperatura de 59°C , campo elétrico alternado de $20 \text{ kV}_{\text{pp}} \text{ cm}^{-1}$, frequência de 2,0 kHz; para a detecção de nêutrons térmicos e epitérmicos o tempo de revelação empregado foi de 3 horas e para nêutrons rápidos 6 horas. O sistema dosimétrico desenvolvido apresentou sensibilidades a nêutrons térmicos, epitérmicos e rápidos dadas pelos valores $(1,46 \pm 0,09) 10^4 \text{ traços cm}^{-2} \text{ mSv}^{-1}$, $(9 \pm 3) 10^2 \text{ traços cm}^{-2} \text{ mSv}^{-1}$ e $(26 \pm 4) \text{ traços cm}^{-2} \text{ mSv}^{-1}$ respectivamente. As doses mínimas e máximas detectáveis foram respectivamente 0,002 mSv e 0,6 mSv para nêutrons térmicos, 0,04 mSv e 8 mSv para nêutrons epitérmicos e 1 mSv e 12 mSv para nêutrons rápidos.

Tendo em vista as implicações das recomendações do ICRP-60, pode-se concluir que o dosímetro pessoal elaborado neste trabalho apresenta a sensibilidade necessária no caso da monitoração de nêutrons térmicos e epitérmicos, mas que exigiria tempos de integração de doses superiores à mensal no caso da monitoração de nêutrons rápidos.

O procedimento proposto para se realizar a dosimetria de nêutrons é baseado no uso conjugado do dosímetro pessoal elaborado e do espectrômetro de esferas de Bonner enquanto dosímetro de área.

ABSTRACT

A neutron irradiation facility was designed and built in order to establish a procedure for calibrating neutron monitors and dosimeters. A 185 GBq $^{241}\text{AmBe}$ source of known strength is used as a reference source. The irradiation facility using this source in the air provides neutron dose rates between 9 nSv s^{-1} and $0,5 \mu\text{Sv s}^{-1}$. A calibrated 50 nSv s^{-1} thermal neutron field is obtained by using a specially designed paraffin block in conjunction with the $^{241}\text{AmBe}$ source.

A Bonner multisphere spectrometer was calibrated, using a procedure based on three methods proposed by international standards. The unfolded $^{241}\text{AmBe}$ neutron spectrum was determined from the Bonner spheres data and resulted in a good agreement with expected values for fluence rate, dose rate and mean energy.

A dosimetric system based on the electrochemical etching of CR-39 was developed for personal dosimetry. The dosimeter badge using a (n,α) converter, the etching chamber and high frequency power supply were designed and built specially for this project. The electrochemical etching (ECE) parameters used were: a 6N KOH solution, 59°C , $20 \text{ kV}_{\text{pp}} \text{ cm}^{-1}$, $2,0 \text{ kHz}$, 3 hours of ECE for thermal and intermediate neutrons and 6 hours for fast neutrons. The calibration factors for thermal, intermediate and fast neutrons were determined for this personal dosimeter. The sensitivities determined for the developed dosimetric system were $(1,46 \pm 0,09)10^4 \text{ tracks cm}^{-2} \text{ mSv}^{-1}$ for thermal neutrons, $(9 \pm 3)10^2 \text{ tracks cm}^{-2} \text{ mSv}^{-1}$ for intermediate neutrons and $(26 \pm 4) \text{ tracks cm}^{-2} \text{ mSv}^{-1}$ for fast neutrons. The lower and upper limits of detection were respectively $0,002 \text{ mSv}$ and $0,6 \text{ mSv}$ for thermal neutrons, $0,04 \text{ mSv}$ and 8 mSv for intermediate neutrons and 1 mSv and 12 mSv for fast neutrons.

In view of the 1990's ICRP recommendations, it is possible to conclude that the personal dosimeter described in this work is sufficiently sensitive to thermal and intermediate neutrons but fast neutron monitoring at radiological protection level would require an integration period of over a month.

The proposed dosimetric procedure is based on the conjugated use of the developed personal dosimeter and the Bonner multisphere spectrometer.

ÍNDICE

"DOSIMETRIA DE NÊUTRONS"

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	1
1.2. Dosimetria	2
1.3. Dosimetria de Nêutrons	6
1.4. Monitoração de Nêutrons	8
1.5. Finalidades deste Trabalho	12
2. INSTALAÇÕES E PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO	13
2.1. As Instalações Utilizadas	13
2.2. A Fonte de Nêutrons Utilizada	14
2.2.1. O Espectro de Energia dos Nêutrons	15
2.2.2. A Moderação dos Nêutrons	16
2.3. Os Procedimentos de Calibração	20
2.3.1. Método Semi-empírico	23
2.3.2. Método do Ajuste Polinomial	23
2.3.3. Método do Cone de Sombra	24
2.4. Proced. de Calib. Aplic. ao Espectrômetro de Esferas de Bonner	25
2.4.1. O Espectrômetro de Esferas de Bonner	25
2.4.2. Determinação dos Parâmetros de Calibração no campo do $^{241}\text{AmBe}$	26
2.4.3. Espectro do $^{241}\text{AmBe}$ obtido pelas Esferas de Bonner	34
2.5. Conclusões sobre os Procedimentos de Calibração	39
3. DETECÇÃO DE NÊUTRONS COM O CR-39	40
3.1. Elaboração do Dosímetro	40
3.1.1. A Opção pelo CR-39	40
3.1.2. O CR-39	41
3.1.3. A Produção de Danos no Polímero	41
3.1.4. A Formação dos Traços	43
3.1.5. O Dosímetro Elaborado	44
3.2. A Revelação Eletroquímica	47
3.2.1. A Câmara de Revelação Eletroquímica	47
3.2.2. A Fonte de Alta Tensão e Alta Frequência	49
3.2.3. O Controle de Temperatura	54
3.2.4. A Definição dos Parâmetros da Revelação Eletroquímica	56

3.2.5.	O Procedimento de Revelação	58
3.3.	O Procedimento de Leitura do CR-39	59
3.3.1.	O Sistema Leitor de Traços	59
3.3.2.	O Ruído de Fundo (BG)	59
3.3.3.	O Diâmetro do Traço	61
4.	PROPRIEDADES DO DOSÍMETRO PESSOAL ELABORADO	62
4.1.	Dependência da Sensibilidade do Dosímetro com a Fluência de Nêutrons	62
4.2.	Reprodutibilidade de Resposta do Dosímetro	66
4.3.	Verificação da Exist. de Rad. Espalhada na Calibração do CR-39	68
4.4.	Resposta do Dosímetro em Função da Fluência e da Dose Equivalente	70
4.5.	Sensibilidade em Dose Equivalente do Dosímetro	80
4.6.	Discussão e Conclusões	81
5.	RESUMO E CONCLUSÕES FINAIS	84
5.1.	Sala de Calibração	84
5.2.	Procedimentos de Calibração	84
5.3.	O Sistema de Revelação Eletroquímica e Parâmetros de Revelação	85
5.4.	Propriedades Dosimétricas do Dosímetro Pessoal Elaborado	86
5.5.	O Procedimento para a Monitoração Pessoal da Radiação Neutrônica	86
5.6.	Sugestões para Futuros Trabalhos	87
	APÊNDICE - ANÁLISE QUALITATIVA DA INTERAÇÃO DE NÊUTRONS COM A MATÉRIA	89
A.1.	Secção de Choque	89
A.2.	Classificação das Reações com Nêutrons	90
A.2.1.	Reações de Núcleo Composto	90
A.2.2.	Reações Diretas	91
A.3.	Classificação dos Nêutrons em Intervalos de Energia	91
A.3.1.	Nêutrons Lentos e Nêutrons Térmicos	91
A.3.2.	Nêutrons Intermediários	91
A.3.3.	Nêutrons Rápidos	92
A.4.	Distinção entre Núcleos Atômicos	92
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Dosimetria da Universidade de São Paulo estando inserido num amplo projeto que visa à dosimetria das radiações ionizantes, ou melhor, à proteção radiológica. Nesta linha de pesquisa, o grupo já desenvolveu preciosos trabalhos que possibilitaram o estabelecimento de um procedimento para a monitoração pessoal de trabalhadores sujeitos às radiações X e gama, envolvendo hoje a monitoração de centenas de usuários que trabalham em hospitais e centros de pesquisa de toda a universidade.

Neste contexto surge a motivação para este trabalho que visa estabelecer um procedimento para se realizar a dosimetria de nêutrons, radiação esta que, no Brasil, atinge um número restrito de usuários mas que não estão sendo adequadamente monitorados, e que no mundo persiste como um campo aberto à pesquisa na área da proteção radiológica.

Entre estes usuários estariam os pesquisadores e funcionários de reatores nucleares e de centros de pesquisa onde há manipulação de fontes de nêutrons ou onde estes sejam produzidos⁽¹⁾⁽²⁾, como é o caso dos aceleradores de partículas como o acelerador Pelletron e o acelerador linear do Instituto de Física, bem como dos hospitalares onde a dosimetria de nêutrons deve ser estendida aos pacientes.

O presente trabalho conclui um projeto que iniciou-se num trabalho anterior que foi objeto de nossa dissertação de mestrado⁽³⁾⁽⁴⁾, que visou a detecção de nêutrons térmicos por meio de dosímetros termoluminescentes. Cumpre salientar que o fenômeno da termoluminescência constitui uma das linhas de pesquisa do Laboratório de Dosimetria. Esse primeiro trabalho possibilitou a elaboração e definição dos procedimentos, dispositivos e técnicas adequadas ao projeto.

1.2. Dosimetria

Dosimetria consiste basicamente em medir a energia que as radiações de uma maneira geral depositam, ou melhor, transferem ou liberam aos constituintes do meio em que incidiram. Define-se dose absorvida, **D**, como sendo a energia média depositada pela radiação ionizante, **dε**, num elemento de volume do meio de massa **dm**, sendo dada pela relação⁽⁵⁾:

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm} \quad [1.1]$$

A unidade de dose absorvida é denominada gray (Gy), sendo que 1Gy corresponde à absorção de 1J de energia por 1kg de massa de um meio.

A dose absorvida é definida para um ponto específico do meio, mas visando-se à proteção radiológica define-se⁽⁵⁾ a dose média absorvida por um tecido ou órgão, **D_T**, que corresponde à razão entre a energia total depositada no tecido ou órgão, **ε_T**, e a massa do tecido ou órgão, **m_T**.

$$D_T = \frac{\varepsilon_T}{m_T} \quad [1.2]$$

Para a proteção radiológica o meio de interesse é o corpo humano (tecidos e/ou órgãos) e a medida da dose de radiação absorvida por um indivíduo tem por finalidade garantir um ambiente seguro de trabalho, detectando a necessidade ou não de se tomarem as providências para mantê-lo dessa forma. Sendo a relação entre a dose recebida por um indivíduo e os efeitos biológicos bem estudada, foram fixados procedimentos e normas que regulamentam as atividades nas quais trabalhadores, bem como o público em geral, estão sujeitos às radiações ionizantes.

Existem dois organismos internacionais encarregados da elaboração de normas e da definição das grandezas físicas e unidades adequadas à proteção radiológica. São eles o ICRP (International Commission on Radiological Protection) e o ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements). No Brasil tais tarefas são responsabilidades da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) que publicou as Diretrizes Básicas de Radioproteção (Resolução CNEN 301).

Quando se faz referência à dose absorvida é importante que seja especificado também o tipo de radiação envolvida, pois verifica-se que uma mesma dose absorvida de tipos distintos de radiação acarretam também danos biológicos distintos. Para tanto, foram estabelecidos⁽⁵⁾ os chamados fatores de ponderação da radiação, **w_R**, que levam em conta a energia e o tipo da radiação incidente sobre o corpo.

Fatores de ponderação da radiação encontram-se na tabela 1.1 a seguir.

Tipo de Radiação e Faixa de Energia	Fator de Ponderação da Radiação (w_R)
Fótons. Todas as Energias	1
Elétrons e Muons. Todas as Energias	1
Nêutrons. Energia < 10 keV	5
10 keV até 100 keV	10
> 100 keV até 2 MeV	20
> 2 MeV até 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Prótons (excluindo os de recuo). Energia > 2MeV	5
Partículas alfa	20
Fragmentos de Fissão	20
Núcleos Pesados	20

Tabela 1.1 - Fatores de Ponderação da Radiação⁽⁵⁾

À dose média absorvida por um tecido ou órgão, D_T , ponderada pelo fator w_R dá-se o nome de dose equivalente, H_T , tendo por unidade, no sistema internacional de unidades, o sievert, Sv ($1\text{Sv} = 1\text{ J kg}^{-1}$). A dose equivalente num tecido ou órgão devida à radiação do tipo R, $H_{T,R}$, é dada por:

$$H_{T,R} = w_R D_{T,R} \quad [1.3]$$

Quando um campo de radiação é misto, ou seja, é composto por radiações de diferentes tipos e/ou energias que variam e portanto apresentam diferentes fatores de ponderação w_R , a dose equivalente no tecido ou órgão corresponde à somatória das componentes de dose absorvida devidas a cada tipo de radiação, ponderadas pelos respectivos fatores de ponderação da radiação, w_R .

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R} \quad [1.4]$$

Os valores dos fatores de ponderação da radiação foram estabelecidos de acordo com a chamada eficiência biológica da radiação (RBE), que quantifica a eficiência de um dado tipo de radiação em induzir efeitos ditos estocásticos para os quais são estabelecidas as normas. Tais efeitos correspondem aos efeitos biológicos que ocorrem sem haver um limiar de dose determinado para que isto aconteça. Os valores de w_R vieram substituir os até então utilizados fatores de qualidade, Q , relacionados à grandeza transferência linear de energia (LET) das radiações que medem a densidade de ionização que surge ao longo do traço de uma partícula ionizante.

Uma segunda ponderação da dose equivalente está presente nas normas levando em conta o fato de os efeitos estocásticos dependerem não só da dose equivalente, mas também do tipo de tecido ou do órgão irradiado. Define-se então, uma grandeza derivada, a dose efetiva, $E^{(5)}$, como sendo a somatória das doses equivalentes em cada órgão ou tecido, H_T , ponderadas pelos chamados fatores de ponderação do tecido, w_T , que representam a contribuição relativa de cada órgão ou tecido para o detrimento total devido a uma irradiação uniforme de corpo inteiro.

A dose efetiva, E , cuja unidade também é o sievert, é assim, representada por:

$$E = \sum_T w_T H_T \quad [1.5]$$

Os valores dos fatores de ponderação do tecido, w_T , estão na tabela tabela 1.2 a seguir.

Tecido ou Órgão	Fator de Ponderação do Tecido, w_T
Gônadas	0,20
Medula Óssea	0,12
Colo do Útero	0,12
Pulmão	0,12
Estômago	0,12
Bexiga	0,05
Mamas	0,05
Fígado	0,05
Esôfago	0,05
Tireóide	0,05
Pele	0,01
Superfície do Osso	0,01
Restante	0,05

Tabela 1.2 - Fatores de Ponderação do Tecido⁽⁵⁾

A soma dos fatores de ponderação dos tecidos deve ser igual à unidade, ou seja, uma dose equivalente uniforme sobre todo o corpo deve ser numericamente igual à dose efetiva, E .

Cabe ainda colocar que as consequências seguidas a uma dose absorvida não dependem apenas do valor da dose, da energia e tipo de radiação e da sua distribuição dentro do corpo, mas também do intervalo de tempo no qual essa dose é recebida.

Os limites de dose estipulados nas últimas recomendações do ICRP 60⁽⁵⁾ estão na tabela 1.3 a seguir.

	Limites de Dose	
	Ocupacionais	p/ Público em Geral
Dose Efetiva	<p>não deve exceder 50 mSv num ano;</p> <p>média de 20 mSv por ano (100 mSv em 5 anos)</p>	1 mSv num ano
Dose Equivalente Anual		
para o cristalino	150 mSv	15 mSv
para a pele	500 mSv	50 mSv
para mãos e pés	500 mSv	

Tabela 1.3 - Limites de Dose Recomendadas⁽⁵⁾.

1.3. Dosimetria de Nêutrons

Os nêutrons por serem desprovidos de carga elétrica atingem mais facilmente os núcleos atômicos, com os quais interagem diretamente. A probabilidade de um determinado tipo de interação ocorrer depende do núcleo alvo e é função da energia dos nêutrons, sendo quantificada pela respectiva secção de choque de interação. Distinguem-se processos de espalhamento e de absorção, que resultam em recuo dos núcleos alvo, em partículas carregadas aceleradas e em raios gama. Tais processos estão mais detalhados no apêndice A.

A dependência dos processos de interação com a energia dos nêutrons faz com que os efeitos biológicos oriundos de uma exposição a nêutrons também sejam energético dependentes, tornando complexa a dosimetria desse tipo de radiação. Essa complexidade surge do fato do espectro de energia de nêutrons de interesse para a proteção radiológica abranger valores que variam de 10^{-2} eV a 10^8 eV, ou seja, dez

décadas de energia, envolvendo significativas variações no fator de ponderação da radiação, w_T , como mostram a tabela 1.1 e a figura 1.1⁽⁵⁾⁽⁶⁾.

$$w_R = 5 + 17 \exp\left(-\frac{\ln^2(2E)}{6}\right) \quad [1.6]$$

Figura 1.1 - Fatores de ponderação da radiação, w_R , em função da energia do nêutron. A curva tracejada, que deve ser considerada como aproximação em cálculos, corresponde à equação [1.6].

Os valores das doses limites recomendadas, tabela 1.3, e dos fatores de ponderação da radiação w_R , tabela 1.1 e figura 1.1, constam das recomendações mais recentes visando a proteção radiológica, e têm implicações significativas na dosimetria de uma maneira geral e em particular na dosimetria de nêutrons.

Em artigo de Portal *et al*⁽⁷⁾ são abordadas as implicações do ICRP 60⁽⁵⁾ na dosimetria de nêutrons. Devido à recomendação de que a dose anual não deva exceder 20 mSv, salienta-se o fato de que a monitoração pessoal deve ser capaz de registrar uma dose de 2 mSv anuais ou 0,17 mSv mensais. O valor de dose de 2 mSv anuais, determinado a partir da dose máxima permissível anual, é definido pelo ICRP 26⁽⁸⁾ como sendo o nível de dose a partir do qual se deve ter o cuidado de manter o registro de dose. A necessidade de se desenvolverem sistemas dosimétricos que possam registrar doses mensais tão baixas quanto 0,17 mSv, constitui um desafio para a dosimetria de nêutrons.

Outro aspecto a se salientar é que de acordo com as recomendações do ICRP 60, uma incerteza de até 50% na determinação da dose é aceitável na monitoração de campos de radiação com energia e orientação não conhecidas.

1.4. Monitoração de Nêutrons

A monitoração de nêutrons para fins dosimétricos é realizada visando uma dosimetria de área ou uma dosimetria pessoal. No primeiro caso os dispositivos de detecção podem ser divididos em quatro categorias⁽⁹⁾: monitores de nêutrons térmicos, monitores de nêutrons rápidos, detectores tipo moderador com resposta semelhante à do corpo humano e espectrômetros

São designados nêutrons térmicos aqueles com energia de 0,0253 eV, epitérmicos aqueles com energias entre os térmicos e 500 keV e rápidos aqueles com energias maiores do que 500 keV.

Na detecção de nêutrons térmicos as técnicas empregadas utilizam ativação de folhas metálicas (ouro, índio, disprósio, manganês e cobre), contadores proporcionais a gás utilizando em geral BF₃ e ³He, detectores de cintilação empregando cristais de LiI e ainda dosímetros sólidos termoluminescentes.

Os detectores de nêutrons rápidos utilizam o espalhamento desses nêutrons pelo hidrogênio em câmaras de ionização, em contadores proporcionais e cintiladores, bem como em detectores de traços.

Os detectores tipo moderador, com resposta semelhante à do corpo humano, são constituídos por detectores de nêutrons térmicos envoltos em esferas e/ou cilindros de material moderador cujas dimensões são selecionadas para que a resposta do monitor seja a mais próxima possível da resposta dada pelo corpo humano àquele tipo de radiação.

A espectrometria de nêutrons é realizada principalmente por cintiladores

e contadores proporcionais hidrogenados. É comum o uso de detectores de nêutrons térmicos envoltos em substâncias moderadoras. Nesta categoria encontra-se o chamado detector de esferas de Bonner utilizado neste trabalho para testar os procedimentos de calibração adotados.

Os processos de detecção, passíveis de utilização na dosimetria pessoal de nêutrons, envolvem efeitos de volume e de formação de traços produzidos por partículas carregadas originadas na interação dos nêutrons com o meio material.

Dentre as técnicas associadas a efeitos de volume estão os dosímetros termoluminescentes (TLD), a emissão exoeletrônica termicamente estimulada (TSEE), a rádio-fotoluminescência (RPL), e as técnicas relativas a mudanças nas propriedades elétricas do meio. Dentre estas citam-se as mudanças da resistividade do material, registro de pulsos de corrente em diodos semicondutores envoltos em materiais conversores e a detecção por "soft errors" que correspondem à alterações introduzidas numa memória MOS-RAM quando da irradiação com nêutrons.

Dentre as técnicas baseadas na formação de traços, ou produção de danos em meios sólidos encontram-se os filmes NTA, e os chamados detectores de traços em que se enquadram o CR-39, os policarbonatos e o Nitrato de Celulose.

Os dosímetros detectores de traços têm por princípio de detecção a densidade superficial de traços ou "estrelas" que aparecem após um ataque químico e/ou eletroquímico do detector em solução cáustica. Esse processo magnifica danos estruturais produzidos no material por partículas carregadas originadas nas interações dos nêutrons. Tais interações acontecem no interior do detector ou ainda em materiais externos, os chamados conversores, onde ocorrem reações tipo (nêutron, alfa), (nêutron, próton), (nêutron, fissão) ou ainda recuo de prótons e partículas pesadas.

A detecção de traços produzidos em meios fluidos tem sido feita pelos detectores de bolhas e de gotas superaquecidas que fazem parte de uma linha de pesquisas que busca novos mecanismos de detecção.

As técnicas e processos apresentados englobam as linhas de pesquisa que estão em andamento e os sistemas dosimétricos que são operacionais, e que são utilizados em rotina de dosimetria pessoal.

Dentre os sistemas já estabelecidos encontram-se os baseados no uso dos filmes NTA, particularmente em reatores nucleares, no uso de dosímetros termoluminescentes (TLD) na dosimetria de albedo, no uso de detectores de traços do tipo CR-39, e no uso, em menor escala, dos dosímetros detectores de bolhas.

Tendo em vista a necessidade de se adequar às recomendações contidas no ICRP 60, os sistemas dosimétricos já estabelecidos passam hoje por uma reavaliação que objetiva o aprimoramento das técnicas empregadas, principalmente no que se refere à dose mínima detectável.

Um resumo das características dos sistemas dosimétricos operacionais empregados atualmente na dosimetria de nêutrons, incluindo os detectores de bolhas foi feito por Griffith *et al*⁽¹⁰⁾ e Griffith⁽¹¹⁾⁽¹²⁾. Com especial atenção à dose mínima detectável, o autor salienta que esse valor de dose é dependente da resposta em energia, do processamento do detector e da definição de dose mínima detectável usada.

A tabela 1.4 a seguir refere-se a essa análise e permite comparar os diferentes sistemas dosimétricos empregados na dosimetria de nêutrons. Verifica-se que os dosímetros termoluminescentes, os detectores de bolhas e o CR-39, têm possibilidades de se adequarem às necessidades atuais da dosimetria de nêutrons. No entanto, todos eles têm deficiências que merecem atenção.

Os detectores de bolhas têm a desvantagem de apresentarem elevado custo, serem frágeis e sensíveis à temperatura. Os TLDs têm sua sensibilidade diminuída quando cobertos por cádmio, comprometendo a resposta do sistema em doses muito baixas. Os CR-39 têm seu limite de detecção na dose mínima desejada, exigindo o aprimoramento das técnicas envolvidas no processamento deste tipo de detector.

Por outro lado, é fato que a dosimetria de nêutrons se constitui num campo aberto para pesquisa, para a qual há necessidade de aprimoramento das técnicas e dos procedimentos dosimétricos já estabelecidos, de desenvolvimento de novas técnicas e procedimentos, e também de formação de recursos humanos que possibilitem levar o projeto da dosimetria de nêutrons adiante.

	Albedo (TLD)	Detectores de Bolhas	CR-39	Filme NTA
Resposta em Energia	Pobre	Muito Boa	Boa	Razoável
Dose Mínima Detectável (mSv)	0,005 - 0,2	0,005 - 0,2	0,02 - 0,3	0,3 - 0,8
Dose Máxima Detectável (mSv)	> 100	1 - 10	> 50	> 100
Sensibilidade a Fótons	Sim	Não	Não	Alguma
Custo/Detector	moderado	alto	Baixo	Baixo
Dependência da Sensibilidade com o meio	Muito Pouco	Temperatura e Choque Mecânico	Muito Pouco	Umidade e Temperatura
Facilidade de Leitura	Excelente	Boa	Razoável Boa	Tediosa
Dependência Angular	Boa	Muito Boa	Pobre	Pobre

Tabela 1.4 - Resumo das características dos dosímetros operacionais de nêutrons. Os valores das doses mínimas e máximas detectáveis são valores aproximados que indicam a faixa de dose em que os sistemas dosimétricos geralmente operam⁽¹²⁾.

1.5. Finalidades deste Trabalho

Este trabalho visa estabelecer um procedimento dosimétrico para nêutrons, sendo então intitulado "Dosimetria de Nêutrons". Um projeto desta natureza, que busca a capacitação do Laboratório de Dosimetria nesta área específica, envolve além da infraestrutura material, a elaboração e implementação de procedimentos, técnicas e processos que vão caracterizar cada etapa deste trabalho.

Essas etapas, embora muitas vezes concomitantes no que se refere à elaboração e concretização, podem ser organizadas na sequência abaixo:

- a) projeto e construção de uma sala de dimensões adequadas para se proceder a irradiações com nêutrons para fins dosimétricos;
- b) obtenção de uma fonte de nêutrons calibrada por um laboratório de padronização primário ou secundário, garantindo dessa forma rastreabilidade com o sistema metrológico internacional;
- c) projeto e construção de um irradiador que possibilite o armazenamento e o posicionamento de uma ou mais fontes de nêutrons com a precisão desejada;
- d) elaboração e adoção de um procedimento de calibração adequado aos monitores de nêutrons, pessoais ou de área, a serem utilizados;
- e) projeto e construção do dosímetro bem como do porta-dosímetro que permitirão a determinação das doses efetivas recebidas por trabalhadores com radiação;
- f) projeto e construção ou aquisição dos dispositivos "periféricos" empregados no processamento dos dosímetros;
- g) estabelecimento dos procedimentos computacionais necessários ao processamento das respostas dos detectores quando isto se fizer necessário.

É claro que o envolvimento pessoal em todas as fases deste projeto, concretizando-o num longo período de atividades leva a um amadurecimento pessoal e profissional que certamente é planejado na orientação e formação de um pesquisador.

CAPÍTULO 2

INSTALAÇÕES E PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO

Um projeto que visa a dosimetria de qualquer tipo de radiação tem por alicerce a calibração do sistema dosimétrico elaborado. Para isso, é de fundamental importância haver uma infraestrutura adequada, ou seja, dispor-se de local e dos meios necessários e suficientes para se desenvolver os procedimentos de calibração.

No caso da dosimetria de nêutrons fazem parte da infraestrutura a sala de irradiação, as fontes de nêutrons a serem utilizadas, o sistema irradiador e os dosímetros ou dispositivos medidores da radiação neutrônica propriamente dita, que devem ser calibrados.

O procedimento de calibração de monitores de nêutrons consiste na determinação de um fator de calibração entre a leitura do dispositivo e as grandezas dosimétricas do campo neutrônico livre onde discriminam-se as contribuições da radiação espalhada e da radiação de fundo (BG) na sala de irradiação.

Isso significa que tal fator de calibração deve ser independente das instalações onde as irradiações são feitas. Além disso, deve-se ressaltar que os efeitos da radiação gama, sempre presente num campo neutrônico, devem ser tratados separadamente.

Todos os procedimentos desenvolvidos neste trabalho tiveram por base as recomendações presentes na proposição "Procedures for Calibrating and Determining the Response of Neutron Measuring Devices used for Radiation Protection", ISO TC85/SC2/WG2/SG 3(B)⁽¹³⁾.

2.1. As Instalações Utilizadas

As irradiações e medições foram realizadas numa ampla sala, de dimensões 14 m x 10 m x 4 m e telhado de aço inox, especialmente projetada e construída com a finalidade de se proceder à calibração de monitores de nêutrons num local com baixo espalhamento.

O irradiador consiste num tambor giratório, com capacidade para alojar até cinco fontes radioativas, situado a 70 cm abaixo do nível do solo, ao qual é acoplado um tubo de alumínio de 1,5 mm de espessura, 38 mm de diâmetro e 4,00 metros de altura a partir do solo, pelo qual corre a fonte de nêutrons a ser utilizada.

O conjunto é complementado por um sistema mecânico, a base de fios e roldanas que tem em sua extremidade um dispositivo que se acopla à fonte de nêutrons selecionada e permite posicioná-la na altura desejada para se proceder à irradiação.

O acionamento do sistema para o posicionamento da fonte se faz junto à porta da sala de irradiação e o deslocamento da fonte é acompanhado visualmente através de uma luneta com magnificação de 30 vezes.

Junto ao irradiador existe um banco ótico para sustentação e posicionamento dos dispositivos de detecção durante as irradiações. Esse banco ótico é constituído por finas armações vazadas de ferro que sustentam um trilho, situado a 2,0 metros de altura com relação ao solo, sobre o qual correm os suportes dos monitores permitindo o posicionamento entre 0,300 e 2,530 metros de distância da fonte e em alturas entre 2,000 e 3,500 metros. O erro de posicionamento adotado para esse sistema foi de ($\pm 0,003$) metros.

Completando o sistema de irradiação há ainda uma segunda estrutura metálica situada ao final da sala, sobre a qual encontra-se um catetômetro alinhado ao banco ótico. Com isso se consegue um excelente alinhamento entre a fonte, o monitor de nêutrons e outros dispositivos a eles intercalados que serão discutidos mais adiante.

2.2. A Fonte de Nêutrons Utilizada

Neste trabalho, utilizou-se uma fonte de $^{241}\text{AmBe}$. Nesse tipo de fonte radioativa os nêutrons têm origem na reação $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$. O ^{241}Am , radioisótopo responsável pela emissão da partícula α , é disponível comercialmente na forma de óxido, $^{241}\text{AmO}_2$, sendo a fonte de nêutrons produzida pela compactação desse óxido com o material alvo, o Be⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾.

Uma fonte de $^{241}\text{AmBe}$ possui muitas das propriedades que são desejáveis a uma fonte radioativa (α, n)⁽¹⁴⁾⁽¹⁶⁾, ou seja, possui dimensões reduzidas, alta atividade específica do emissor alfa, baixa taxa de emissão de raios gama, espectro de energia dos nêutrons reprodutível de fonte para fonte, meia vida longa (458 anos) e boa estabilidade mecânica. Os raios gama produzidos na fonte são devidos ao ^{241}Am e têm como componente principal um raio gama de 60 keV.

A fonte de $^{241}\text{AmBe}$ empregada foi uma fonte selada, cilíndrica (com 19,00 mm de diâmetro e 51,15 mm de altura), encapsulada em aço inoxidável, com uma atividade de 185 GBq e um fluxo de nêutrons de $1,13 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ com 2% de incerteza, ou seja, uma taxa de fluência de $(90 \pm 2) 10^4 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ a um metro de distância da fonte.

Tal fonte foi calibrada pelo método do banho de manganês no Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD - Rio de Janeiro), que sendo um laboratório de padronização secundário, garantiu rastreabilidade às medidas realizadas neste trabalho.

O uso da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ no sistema de irradiação descrito no item anterior constituiu o arranjo de irradiação para nêutrons rápidos que será mencionado posteriormente. Nesse arranjo a fonte ficou posicionada a 3,20 metros de altura com relação ao chão e os dispositivos de medida alinhados a ela na mesma altura.

2.2.1. O Espectro de Energia dos Nêutrons

A reação $\text{Be}(\alpha, n)$ tem um rendimento da ordem de um nêutron para 10^4 partículas α ⁽¹⁵⁾. Essa reação dá origem a um espectro contínuo de nêutrons cujas energias dependem das energias das partículas alfa ocorrendo várias bandas de energias bem resolvidas.

Para a fonte $^{241}\text{AmBe}$, a energia da partícula alfa predominante é 5,48 MeV⁽¹⁴⁾ e o espectro de nêutrons típico, descrito no "International Standard" ISO 8529⁽¹⁷⁾ é o mostrado na figura 2.1 .

Figura 2.1 - Espectro do $^{241}\text{AmBe}$ ⁽¹⁷⁾.

A variação contínua do espectro pode ser explicada levando-se em conta os seguintes fatos:

1 - A existência de uma perda contínua de energia das partículas α nos grãos de $^{241}\text{Am}_2\text{O}$ e no Be, onde ocorre a reação $(\alpha, n)^{(15)}$ descrita a seguir:

2 - Para cada energia da partícula α , serem possíveis várias energias de nêutrons devido às diferentes direções de emissão possíveis.

3 - O núcleo produto, ^{12}C , poder ser deixado em um estado excitado. Isto resultaria em grande número de nêutrons com energia menor que 5,71 MeV, que é a energia cinética dos nêutrons produzidos por partículas alfa de energia cinética zero quando o ^{12}C é deixado no estado fundamental.

4 - Serem possíveis as reações⁽¹⁸⁾

que produziriam um número significativo de nêutrons de baixa energia, abaixo de 1 MeV, aproximadamente 18%⁽¹⁷⁾ com energia média de 400 keV.

2.2.2. A Moderação dos Nêutrons

Para se caracterizar a resposta dos dosímetros a nêutrons térmicos, tornou-se necessário moderar, ou termalizar os nêutrons provenientes da fonte de $^{241}\text{AmBe}$.

A moderação é consequência das colisões, elásticas ou inelásticas, entre nêutrons e núcleos do moderador. Após vários espalhamentos sucessivos, a energia cinética dos nêutrons se aproxima da energia de agitação térmica dos núcleos do meio, consistindo no que se chama de termalização dos nêutrons.

Um bom moderador é aquele que faz com que os nêutrons percam energia sem serem fortemente absorvidos. Os bons moderadores estão entre os elementos de massa atômica baixa onde o processo de moderação se dá, principalmente, pelas colisões elásticas dos nêutrons com os núcleos do moderador.

A energia perdida por um nêutron espalhado numa colisão elástica aparece como energia cinética de recuo do núcleo espalhador. No caso de uma colisão frontal entre um nêutron e um núcleo de hidrogênio, ocorre a perda total da energia do nêutron. Já quando uma colisão desse tipo se der com um núcleo de carbono, a perda fracional máxima de energia sofrida será de 28%⁽¹⁹⁾.

A energia média perdida numa colisão, ε_i , de um nêutron com energia cinética E_n e massa m , com um núcleo de um átomo de massa A_i é⁽²⁰⁾:

$$\varepsilon_i = E_n \frac{2mA_i}{(m + A_i)^2} \quad [2.1]$$

Essa equação tem valor $E_n/2$ para o hidrogênio e torna-se progressivamente menor com o aumento da massa atômica. A termalização ocorre mais rapidamente para materiais hidrogenados. Esse é o caso da parafina, C_nH_{2n} , empregada como moderador no arranjo de irradiação para nêutrons térmicos utilizado neste trabalho.

Tal arranjo foi constituído por dois blocos circulares e concêntricos de parafina cujas dimensões e geometria de irradiação são mostradas na figura 2.2 abaixo. As irradiações foram realizadas a 2,00 metros de altura, com os blocos de parafina apoiados sobre os trilhos da estrutura de suporte de detectores já descrita neste capítulo.

Figura 2.2 - Arranjo de irradiação para nêutrons térmicos. A altura dos blocos de parafina é 15 cm, e o dosímetro é centrado no arranjo e posicionado a meia altura.

O fluxo de nêutrons térmicos no arranjo descrito acima foi calibrado pelo método de ativação de folhas de ouro. As medidas foram realizadas pelo Laboratório de Metrologia Nuclear do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares de São Paulo (IPEN/CNEN-SP), que expediu o certificado de calibração número F-002/93.

As folhas de ouro foram posicionadas em meio à parafina na região onde são posicionados os dosímetros a serem aferidos. Esse posicionamento é mostrado em detalhe na figura 2.3 abaixo.

Figura 2.3 - Esquemática da disposição das folhas de ouro no bloco de parafina que constitui o arranjo de irradiação para nêutrons térmicos. As folhas 8 e 9 são envoltas em cádmio.

As posições 8 e 9 tiveram por finalidade a determinação da razão de cádmio no arranjo. Essa razão mostrou-se maior do que dez indicando um campo de nêutrons bastante termalizado. Na tabela 2.1 a seguir, encontram-se os respectivos fluxos térmicos determinados.

Posição	Densidade de Fluxo Térmico ($10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Erro (%)
1	1,57	6,8
2	0,547	15,2
3	0,976	7,9
4	1,34	7,2
5	1,38	6,9
6	1,29	7,8
7	1,32	7,2

Tabela 2.1 - Fluxo de nêutrons térmicos nas posições indicadas na figura 3.3. As posições 8 e 9 tiveram por finalidade a determinação da razão de cádmio no arranjo, não constando da tabela. O erro percentual tabelado tem um grau de confiança de 68%.

Cabe salientar que a posição número 1 correspondeu à posição do dosímetro nas irradiações efetuadas com nêutrons térmicos. Portanto, a densidade de fluxo para nêutrons térmicos considerada para o cálculo de fluência e dose equivalente foi $(1,57 \pm 0,11) 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Cumprе lembrar que arranjo similar havia sido usado para a irradiação dos dosímetros termoluminescentes do trabalho "Dosímetro Termoluminescente Sólido de Tetraborato de Sódio e Fluorita Brasileira Sensível a Nêutrons Térmicos"⁽³⁾. Naquela ocasião o Laboratório de Metrologia Nuclear do IPEN realizou também a calibração do fluxo de nêutrons térmicos nas mesmas posições atuais, obtendo na posição 1 o valor de $(1,71 \pm 0,11) 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Tal valor coincide com o atual se for levado em conta a precisão das medidas, o que mostra que o fluxo depende mais do arranjo de parafina do que da altura do solo e dos suportes utilizados durante as irradiações.

2.3. Os Procedimentos de Calibração

Como dito anteriormente, a calibração de um dosímetro de nêutrons consiste em estabelecer a relação entre a resposta do dispositivo de medida e a grandeza dosimétrica mensurada. Tal fator de calibração deve ser independente das instalações onde são feitas as irradiações. Para isso, é necessário discriminar a componente da resposta que decorre da detecção da radiação espalhada inerente ao sistema de irradiação, uma vez que cada combinação fonte de nêutrons, dosímetro, dimensões da sala de irradiação e arranjo experimental produz uma componente espalhada diversa.

A proposição da norma ISO TC85/SC2/WG2/SG 3(B)⁽¹³⁾, ainda em estudo por vários laboratórios de padronização descreve três métodos, aplicados neste trabalho, e estabelece as grandezas adequadas para se proceder à calibração de monitores de nêutrons.

Primeiramente deve-se ressaltar que para uma fonte e um detector pontuais, num local amplo e vazio, o produto da resposta do detector aos nêutrons exclusivamente da fonte, M_c , pelo quadrado da distância fonte-detector, L^2 , é uma constante e é característica daquela particular combinação fonte detector, sendo denominada constante fonte-detector, K .

No entanto, como a calibração é feita numa sala onde há paredes, chão, teto e ar que dão origem à radiação espalhada, esta contribuirá para a resposta total do monitor em calibração, M_T . Além disso, o monitor e a fonte não podem ser considerados pontuais. Assim, a distância L deve ser medida entre o centro da fonte e o centro efetivo do detector. Então, considerando-se todos esses fatores, pode-se escrever a seguinte relação para a resposta obtida pelo monitor de nêutrons como função da distância fonte-detector⁽²¹⁾.

$$M_T(L) = \frac{KF_g(L)F_s(L)}{L^2} \quad (\text{contagem s}^{-1}) \quad [2.2]$$

$$\text{onde} \quad K = M_c L^2 \quad (\text{contagem m}^2 \text{ s}^{-1}) \quad [2.3]$$

Os fatores $F_g(L)$ e $F_s(L)$ correspondem respectivamente ao fator geométrico que leva em consideração o fato de o monitor e a fonte não serem pontuais e ao fator de espalhamento que leva em consideração o espalhamento total (no ar e na sala).

Para detectores esféricos de raio r e distâncias fonte-detector, L , para as quais se verifique a condição $L/r > 2$, o fator geométrico tem a seguinte forma:

$$F_g(L) \approx 1 + \delta \left(\frac{r}{2L} \right)^2 \quad [2.4]$$

onde o valor recomendado para o fator δ é $(0,5 \pm 0,1)^{(13)}$.

Antes de se abordar o fator, $F_s(L)$, deve se estabelecer como suposições básicas, os fatos de que para uma fonte de nêutrons posicionada próxima ao centro da sala de irradiação com dimensões apropriadas, a componente devido ao espalhamento dos nêutrons na sala (paredes, chão e teto) deve ser constante nas proximidades da fonte e de que o espalhamento total no ar deve ser inversamente proporcional à distância fonte-detector⁽²¹⁾⁽²²⁾⁽²³⁾. Tendo em vista equação [2.2], o fator $F_s(L)$ pode ser escrito⁽¹³⁾ como:

$$F_s(L) = (1 + AL + SL^2) \quad [2.5]$$

Na equação acima o termo SL^2 corresponde à componente devida ao espalhamento na sala de irradiação, sendo S a contribuição fracional à distância unitária de calibração. O termo AL refere-se à componente devida ao espalhamento total no ar, onde A corresponde ao incremento percentual por metro do fator de correção; foi considerado igual 0,9% para a fonte de $^{241}\text{AmBe}$ e o detector de esferas de Bonner utilizados⁽¹³⁾.

O espalhamento total no ar leva em conta a interação dos nêutrons com o ar existente dentro e fora do ângulo sólido que é definido pelo conjunto fonte-detector. Há uma componente, devida ao ar presente em tal ângulo sólido que atenua o feixe por absorção ou por espalhamento para fora desta região, e uma segunda componente, devida ao ar externo, que leva nêutrons para dentro do ângulo sólido, provocando um acréscimo na resposta do detector. O valor de A no fator $F_s(L)$ corresponde ao saldo entre os dois efeitos.

Além da determinação da constante fonte-detector, K , uma segunda grandeza importante para os procedimentos adotados para a calibração de monitores de nêutrons é a resposta à fluência livre, R_ϕ , definida como:

$$R_\phi = \frac{M_c}{\phi} \quad (\text{contagens m}^2 \text{ neutron}^{-1}) \quad [2.6]$$

onde M_c é a leitura corrigida do detector (contagens s^{-1}) e ϕ é a taxa de fluência (nêutrons $m^{-2}.s^{-1}$). ϕ pode ser escrito como:

$$\phi = \frac{B_{\Omega}}{L^2} \quad [2.7]$$

e

$$B_{\Omega} = B \frac{F_I(\Theta)}{4\pi} \quad [2.8]$$

onde B é a intensidade da fonte, ou seja, o fluxo de nêutrons (nêutrons s^{-1}) em 4π sr, B_{Ω} é o fluxo de nêutrons por unidade de ângulo sólido e $F_I(\Theta)$ é o fator de correção para a anisotropia da fonte, que corrige a variação do fluxo de nêutrons em função do ângulo existente entre a direção de emissão considerada e o eixo de simetria da fonte.

A fonte de nêutrons aqui utilizada é cilíndrica e as irradiações foram realizadas com os detectores posicionados em direção perpendicular ao eixo do cilindro da fonte. Nessa direção a correção para a variação da emissão de nêutrons é mínima, e o valor adotado para $F_I(90^\circ)$ foi 1,04⁽²⁴⁾.

Considerando-se as equações [2.3], [2.6], [2.7] e [2.8], a constante característica fonte-detector pode ser reescrita da seguinte forma:

$$K = R_{\phi} B_{\Omega} \quad [2.9]$$

Definidos os parâmetros de interesse para os procedimentos de calibração, serão abordados a seguir os três métodos para a determinação desses parâmetros, propostos pela norma ISO TC85/SC2/WG2/SG 3(B)⁽¹³⁾ e empregados neste trabalho. Eles são denominados método semi-empírico, método de ajuste polinomial e método do cone de sombra.

2.3.1. Método Semi-empírico

Neste método considera-se pequena a componente devida ao espalhamento no ar, de forma que a equação [2.5] pode ser reescrita como segue:

$$F_s(L) = (1 + SL^2)(1 + AL) \quad [2.10]$$

Com isso, a equação [2.2] pode ser escrita da seguinte maneira:

$$M_T(L)L^2 = K(1 + SL^2)(1 + AL)F_g(L) \quad [2.11]$$

que leva juntamente com as equações [2.6] e [2.8] à expressão característica do método semi-empírico:

$$\frac{M_T(L)}{\phi F_g(L)(1 + AL)} = R_\phi (1 + SL^2) \quad [2.12]$$

Realizando-se então a determinação das respostas $M_T(L)$ de um detector a várias distâncias da fonte e traçando-se o gráfico de $M_T(L)/\phi$, corrigidos pelos fatores de espalhamento do ar e geométrico, em função do quadrado dessas distâncias, espera-se obter uma reta. Tal relação linear permite obter a resposta à fluência, R_ϕ , (coeficiente linear) e a componente de espalhamento da sala S através do coeficiente angular.

2.3.2. Método do Ajuste Polinomial

Nesse método não há suposições quanto ao fato da componente devida ao espalhamento no ar ser pequena ou não, considerando-se $F_s(L)$ como feito na equação [2.5]. As equações [2.2], [2.5], [2.6] e [2.8] permitem escrever a seguinte relação:

$$\frac{M_T(L)}{\phi F_g(L)} = R_\phi (1 + aL + bL^2) \quad [2.13]$$

Ao gráfico dos valores obtidos para $M_T(L)$ correspondente à equação

[2.13] como função da distância L é ajustado um polinômio de segundo grau, cujos parâmetros possibilitam a determinação de R_{ϕ} . Apesar da identificação formal entre a e A e entre b e S , recomenda-se considerá-los apenas como parâmetros de ajuste, não lhes dando qualquer significado físico.

2.3.3. Método do Cone de Sombra

Este terceiro método recomenda a utilização de um cone absorvedor dos nêutrons do feixe primário entre a fonte e o detector, para a determinação da componente espalhada pelo ar e pela sala de irradiação.

O cone de sombra deve ser projetado para que suas dimensões não impliquem numa sombra maior do que duas vezes o ângulo sólido definido pelo conjunto fonte-detector.

Chamando-se de $M_s(L)$ a leitura do monitor tomada utilizando-se o cone de sombra (só radiação espalhada), de $M_T(L)$ a leitura sem a utilização do mesmo, e corrigindo-se tais respostas para o efeito de atenuação do feixe primário de nêutrons pelo ar, pode-se escrever a seguinte relação:

$$[M_T(L) - M_s(L)]F_A(L) = \frac{K}{L^2} \quad [2.14]$$

onde $F_A(L)$ é o fator de atenuação dos nêutrons pelo ar, dado por:

$$F_A(L) = \exp(\Sigma L) \quad [2.15]$$

e Σ é o coeficiente de atenuação linear médio dos nêutrons pelo ar, obtido através da soma das secções de choque totais para o nitrogênio e para o oxigênio ponderadas pela distribuição espectral dos nêutrons da fonte. Para a fonte de $^{241}\text{AmBe}$ o valor recomendado para Σ é $890 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$.

Neste método torna-se difícil realizar medidas em várias distâncias, pois isso exigiria a construção de muitos cones de sombra.

Apresentados os três métodos, deve-se salientar que os parâmetros por eles determinados devem ser iguais, pois correspondem às mesmas grandezas. Assim sendo, a comparação entre os resultados obtidos indica a qualidade das medidas efetuadas e os métodos de análise empregados.

2.4. Procedimentos de Calibração Aplicados ao Espectrômetro de Esferas de Bonner

Os métodos descritos para o estabelecimento de um sistema de calibração de detectores de nêutrons foram aplicados ao espectrômetro de esferas de Bonner existente no laboratório. No campo da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ calibrada, os parâmetros de calibração de tal dispositivo possibilitaram o levantamento do espectro de nêutrons, na distância unitária de calibração, com e sem radiação espalhada.

A calibração de tal espectrômetro é de fundamental importância para se proceder à dosimetria de nêutrons como se propõe este trabalho, uma vez que terá ele a finalidade de determinar os espectros de energia dos campos neutrônicos onde será utilizado o dosímetro pessoal elaborado.

2.4.1. O Espectrômetro de Esferas de Bonner

O espectrômetro de Bonner utilizado, Ludlum modelo 42-5 fabricado pela Ludlum Measurements, é composto por um cristal de cintilação de $\text{LiI}(\text{Eu})$, sensível a nêutrons térmicos, e por seis esferas de polietileno, que atuam como moderadores de nêutrons. As esferas têm diâmetros 0,051 m, 0,076 m, 0,127 m, 0,203 m, 0,254m e 0,305 m, e são denominadas de acordo com seus diâmetros expressos em polegadas, ou seja, 2", 3", 5", 8", 10" e 12" respectivamente.

O sistema de detecção se complementa com uma fotomultiplicadora acoplada ao cristal de $\text{LiI}(\text{Eu})$ cujos pulsos de saída passam por um analisador monocanal. A geometria e dimensões do cristal de LiI (cilindro de 4mm x 4mm) acarretam uma grande relação "área-volume" possibilitando uma excelente discriminação da radiação gama nele incidente.

A determinação da tensão de operação do detector e da altura mínima do pulso a ser contado foi conseguida a partir da análise dos espectros de pulso obtidos em irradiações do detector com a esfera de 5 polegadas num campo gama de uma fonte de ^{137}Cs e no campo neutrônico do $^{241}\text{AmBe}$. Caso se utilize o sistema de detecção num campo misto onde a componente gama venha a ser relativamente expressiva, tais parâmetros devem ser novamente determinados.

Os parâmetros operacionais para o espectrômetro de esferas de Bonner foram determinados como indicado no trabalho de Bramblett *et al*⁽²⁵⁾.

2.4.2. Determinação dos Parâmetros de Calibração no campo do $^{241}\text{AmBe}$

No campo da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ calibrada, foram tomadas 16 leituras, transformadas em taxas de contagem, em função da distância fonte detector para cada combinação fonte-esfera-detector, inclusive para o detector descoberto. As distâncias variaram entre 0,300 m e 2,500 m. A esses resultados, devidamente corrigidos pelas contagens referentes ao ruído de fundo, foi possível aplicar os métodos semi-empírico e de ajuste polinomial.

As medições das taxas de contagem com e sem os cones de sombra foram realizadas somente a 2,020 m.

Foram empregados três diferentes cones de sombra projetados e construídos no laboratório, com 0,50 m de comprimento, sendo 0,20 m correspondentes a um bico de ferro e os restantes 0,30 m de parafina borada, terminando todos num disco de cádmio de 1 mm de espessura.

De acordo com as recomendações da literatura⁽²⁶⁾, os cones deveriam encobrir, no máximo, o dobro do ângulo sólido determinado pelos detectores na posição de irradiação (2,020 m). Os seguintes diâmetros frontais e finais com seus respectivos meio ângulos de abertura resultaram dessa condição:

cone 1 - 0,395 m e 0,628 m; $\theta_1/2=3,98^\circ$

cone 2 - 0,226 m e 0,286 m; $\theta_2/2=1,07^\circ$

cone 3 - 0,182 m e 0,292 m; $\theta_3/2=0,35^\circ$

A estabilidade do sistema eletrônico foi controlada pela verificação periódica das contagens de uma fonte radioativa de $^{241}\text{AmBe}$ de 1,85 GBq localizada no interior de um cilindro de parafina especialmente construído para esse fim.

As figuras 2.4, 2.5, e 2.6 mostram os dados para análise pelo método semi-empírico, e nas figuras 2.7, 2.8 e 2.9 a representação dos mesmos está de acordo com a aplicação do método do ajuste polinomial. As barras de erro associadas aos pontos experimentais correspondem aos erros estatísticos das contagens obtidas.

A tabela 2.2 mostra os resultados da análise dos dados. O método dos mínimos quadrados foi empregado para o ajuste das curvas definidas pelas equações [2.12] e [2.13]. A constante característica fonte-detector, K , e a resposta à fluência livre R_ϕ estão listadas para os três métodos. O espalhamento fracional da sala na distância unitária de calibração, S , foi determinado pela aplicação do método semi-empírico e é dado na quarta coluna da tabela.

Diâmetro da Esfera (m)	Constante Característica Fonte-Detector (cont. $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	Resposta à Fluência Livre (cont. m^2)	Espalhamento Fracional a 1m (%)
Detector descoberto	$(0,169 \pm 0,004)$ $(0,160 \pm 0,008)$ $(0,181 \pm 0,007)^*$	$(1,88 \pm 0,02) 10^{-7}$ $(1,78 \pm 0,08) 10^{-7}$ $(2,01 \pm 0,09) 10^{-7}$	(50 ± 1)
0,051 [2"]	$(0,56 \pm 0,01)$ $(0,53 \pm 0,02)$ $(0,52 \pm 0,02)$	$(6,23 \pm 0,08) 10^{-7}$ $(5,8 \pm 0,2) 10^{-7}$ $(5,77 \pm 0,02) 10^{-7}$	$(39,8 \pm 0,9)$
0,076 [3"]	$(2,58 \pm 0,06)$ $(2,5 \pm 0,1)$ $(2,49 \pm 0,04)$	$(2,87 \pm 0,03) 10^{-6}$ $(2,8 \pm 0,1) 10^{-6}$ $(2,76 \pm 0,07) 10^{-6}$	$(16,6 \pm 0,6)$
0,127 [5"]	$(10,2 \pm 0,2)$ $(10,2 \pm 0,4)$ $(9,71 \pm 0,07)$	$(1,13 \pm 0,01) 10^{-5}$ $(1,14 \pm 0,04) 10^{-5}$ $(1,08 \pm 0,02) 10^{-5}$	$(5,7 \pm 0,5)$
0,203 [8"]	$(15,5 \pm 0,3)$ $(15,7 \pm 0,6)$ $(15,3 \pm 0,5)$	$(1,73 \pm 0,02) 10^{-5}$ $(1,75 \pm 0,05) 10^{-5}$ $(1,70 \pm 0,07) 10^{-5}$	$(2,6 \pm 0,5)$
0,254 [10"]	$(14,4 \pm 0,3)$ $(14,8 \pm 0,6)$ $(14,3 \pm 0,1)$	$(1,60 \pm 0,02) 10^{-5}$ $(1,65 \pm 0,05) 10^{-5}$ $(1,59 \pm 0,03) 10^{-5}$	$(1,7 \pm 0,5)$
0,305 [12"]	$(11,9 \pm 0,3)$ $(12,1 \pm 0,4)$ $(11,80 \pm 0,05)$	$(1,32 \pm 0,01) 10^{-5}$ $(1,35 \pm 0,04) 10^{-5}$ $(1,31 \pm 0,03) 10^{-5}$	$(1,4 \pm 0,4)$

* aqui o ângulo sólido na sombra do cone foi maior do que o dobro daquele determinado pelo detector.

Tabela 2.2 - Resumo dos resultados encontrados. Para cada conjunto de dados a primeira linha se refere à análise pelo método semi-empírico, a segunda ao método do ajuste polinomial e a terceira se refere ao método do cone de sombra.

Figura 2.4. - Aplicação do método semi-empírico para o detector descoberto, sem esfera, e para o conjunto detector-esfera de 2 polegadas. As curvas correspondem às leituras, $M_T(L)$, corrigidas de acordo com o lado esquerdo da equação [2.12], em função do quadrado da distância fonte-detector.

Figura 2.5 - Aplicação do método semi-empírico para o conjunto detector-esfera de 3 polegadas. A curva corresponde às leituras, $M_T(L)$, corrigidas de acordo com o lado esquerdo da equação [2.12], em função do quadrado da distância fonte-detector.

Figura 2.6 - Aplicação do método semi-empírico para os conjuntos detector-esferas de 5, 8, 10 e 12 polegadas. As curvas correspondem às leituras, $M_T(L)$, corrigidas de acordo com o lado esquerdo da equação [2.12], em função do quadrado da distância fonte-detector.

Figura 2.7 - Aplicação do método de ajuste polinomial para o detector descoberto, sem esfera, e para o conjunto detector-esfera de 2 polegadas. As curvas correspondem às leituras, $M_T(L)$, corrigidas de acordo com o lado esquerdo da equação [2.13], em função da distância fonte-detector.

Figura 2.8 - Aplicação do método de ajuste polinomial para o conjunto detector-esfera de 3 polegadas. A curva corresponde às leituras, $M_T(L)$, corrigidas de acordo com o lado esquerdo da equação [2.13], em função da distância fonte-detector.

Figura 2.9 - Aplicação do método de ajuste polinomial para os conjuntos detector-esferas de 5, 8, 10 e 12 polegadas. As curvas correspondem às leituras, $M_T(L)$, corrigidas de acordo com o lado esquerdo da equação [2.13], em função da distância fonte-detector.

Como já mencionado, os parâmetros determinados devem ter o mesmo valor independentemente do método aplicado. Tal fato ocorreu com pequenas exceções. Observou-se que para o detector descoberto houve uma diferença na constante característica fonte detector determinada pelo método semi-empírico, que foi atribuída ao fato do cone de sombra utilizado cobrir um ângulo sólido inferior a duas vezes o determinado pelo conjunto fonte-detector. Para as esferas de 0,051 m (2") e 0,127 m (5") houve uma pequena diferença com relação ao método do cone de sombra, que poderia ser justificada por um posicionamento incorreto do cone de sombra.

2.4.3. Espectro do $^{241}\text{AmBe}$ obtido pelas Esferas de Bonner

Como já mencionado, o espectrômetro de Bonner é composto por um cintilador de ^6LiI , sensível a nêutrons térmicos, localizado no centro de esferas moderadoras de polietileno. O uso de esferas de diversos diâmetros implica numa forte dependência do sistema de detecção com o espectro de nêutrons ao qual é submetido.

De fato, a resposta de cada combinação esfera-detector corresponde à convolução do espectro dos nêutrons incidentes com a eficiência do detector que também é função da energia. No caso do detector de esferas de Bonner utilizado, há seis esferas mais o detector descoberto, constituindo sete conjuntos esfera-detector. Tais convoluções podem ser representadas por um sistema de equações integrais de Fredholm de primeira espécie com a seguinte forma:

$$C_j = \int_0^{\infty} N(E)R_j(E)dE \quad (j = 1, \dots, 7) \quad [2.16]$$

onde C_j representa a contagem obtida com o uso da j -ésima esfera, $N(E)$ o espectro de energia dos nêutrons e $R_j(E)$ a eficiência daquela combinação esfera-detector.

As funções $R_j(E)$ são de difícil determinação experimental por necessitarem de feixes de nêutrons monoenergéticos e locais adequados para a calibração, que atualmente são conseguidos apenas em laboratórios de padronização, na sua maioria primários. Recorreu-se então, a dados da avaliação dessas funções que são definidas para n grupos discretos de energia. As equações [2.16] podem ser reescritas aproximadamente como:

$$C_j = \sum_{g=1}^n N_g R_{j,g} \Delta E_g \quad (j = 1, \dots, 7) \quad [2.17]$$

onde N_g é a taxa de fluência de nêutrons no g -ésimo grupo de energia, $R_{j,g}$ é a eficiência do j -ésimo detector para o g -ésimo grupo de energia e ΔE_g é o tamanho da faixa de energia correspondente ao g -ésimo grupo.

O conjunto das respostas obtidas pelo detector de esferas de Bonner utilizado leva a sete equações por se tratarem de sete combinações esfera-detector, para as quais foram utilizadas as funções $R_j(E)$, obtidas do trabalho de Awschalom *et al*⁽²⁷⁾, devidamente normalizadas conforme descrito mais adiante. Tais funções são tabeladas para trinta e um grupos de energia.

Portanto, no presente trabalho, a equação [2.17] corresponde a um sistema de sete equações lineares com trinta e uma incógnitas N_g , cuja determinação leva a caracterização do espectro de nêutrons nos trinta e um grupos de energia tabelados, que cobrem dez décadas de energia, de 10^{-8} MeV a 10^2 MeV.

O sistema de equações [2.17] não apresenta solução única. Assim, a deconvolução do espectro de nêutrons a partir da resolução desse sistema de equações pode apresentar inclusive soluções negativas e oscilatórias. Procuram-se então soluções aproximadas, dentro de certos limites de erro, que selecionadas a partir de critérios fisicamente aceitáveis levam a soluções apropriadas.

Com o objetivo de se proceder tais deconvoluções desenvolveram-se vários códigos computacionais que são ainda alvo de pesquisa⁽²⁸⁾⁽²⁹⁾⁽³⁰⁾. Esses códigos procuram chegar ao espectro de nêutrons a partir de uma solução inicial proposta, que convoluída com as eficiências dos conjuntos esfera-detector determinam respostas que são comparadas com as obtidas experimentalmente. Um processo de minimização do desvio existente introduz alterações no espectro básico que gera novas comparações até se chegar a uma solução com diferenças dentro de limites pré-fixados.

O código BUNKI utilizado neste trabalho é um programa interativo que possibilita o uso de dois códigos, o BON31G e o SPUNIT, aos quais incorpora modificações relativas à escolha e adequação de soluções iniciais apropriadas. Ele foi escrito em FORTRAN IV e codificado para rodar num computador DEC-10⁽²⁸⁾. No entanto, pode ser adaptado para uso em computadores pessoais, garantindo espectros com qualidade necessária tendo em vista a proteção radiológica⁽¹²⁾.

No código BUNKI uma solução inicial pode ser obtida utilizando-se o algoritmo chamado MAXIET que determina esta solução a partir da superposição de espectros básicos como o maxwelliano dos nêutrons térmicos, os espectros com comportamento $1/(E)^x$ e espectros com picos de alta energia, que caracterizam os

processos de produção de nêutrons com interesse para a proteção radiológica.

Neste trabalho, procedeu-se à deconvolução do espectro de nêutrons do $^{241}\text{AmBe}$ considerando-se como respostas das combinações esfera-detector as constantes características fonte-detector, K , para o método semi-empírico (tabela 2.2), que corresponde à resposta corrigida para todos os efeitos de espalhamento na distância unitária de calibração.

A deconvolução a partir das leituras diretas dos conjuntos esfera-detector, $M_T(L)$, na mesma distância, também foi realizada com a finalidade de se obter o espectro de nêutrons na posição de irradiação, considerando-se a radiação espalhada.

Neste ponto deve-se salientar que o programa BUNKI exige um fator de normalização⁽²⁵⁾⁽²⁷⁾, f_j , para as respostas do sistema de detecção por se utilizarem funções $R_{j,g}$ tiradas da literatura. Para se calcular tal fator, considerou-se que a fonte de $^{241}\text{AmBe}$ pertencente ao Laboratório de Dosimetria de fluxo $1,13 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1}$ ($\pm 2\%$), apresentava o espectro típico das fontes de $^{241}\text{AmBe}$ publicado pelo ISO 8529⁽¹⁷⁾. A convolução de tal espectro com as respostas $R_{j,g}$, ajustadas por f_j deveriam então levar à resposta obtida pelo j -ésimo conjunto esfera-detector.

Ter-se-ia então:

$$C_j = \phi f_j \sum_{gl=1}^n N_{gl} R_{j,gl} \Delta E_{gl} \quad (j = 1, \dots, 7) \quad [2.18]$$

onde N_{gl} corresponde à taxa de fluência para o grupo gl de energia cuja somatória em gl está normalizada para 1 neutron $\text{s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$.

Portanto, o fator f_j obedece à seguinte relação:

$$f_j = \frac{C_j}{\phi \sum_{gl=1}^n N_{gl} R_{j,gl} \Delta E_{gl}} \quad (j = 1, \dots, 7) \quad [2.19]$$

O cálculo de f_j para as sete combinações esferas-detector levou a um fator de normalização médio de valor numérico igual a $(0,71 \pm 0,01)$.

Utilizado o código BUNKI, obtiveram-se os espectros deconvoluídos mostrados na figura 2.10. A tabela 2.3 registra os valores da taxa de fluência de nêutrons, da taxa de dose equivalente e da energia média dos nêutrons, calculados a partir do fluxo da fonte calibrada e do espectro da norma ISO 8529⁽¹⁷⁾, e aqueles obtidos a partir do uso do código computacional.

Figura 2.10 - Espectros de energia dos nêutrons da fonte de ²⁴¹AmBe obtidos através do uso do código BUNKI, a partir da deconvolução das respostas do espectrômetro de Bonner.

	Fonte Calibrada	Espectro Deconvolúdo	Espectro Deconvolúdo
	Valores Esperados sem espalhamento	Valores Obtidos sem espalhamento	Valores Obtidos com espalhamento
Taxa de Fluência de Nêutrons a 1m $10^4 \text{ (m}^{-2} \text{ s}^{-1}\text{)}$	90	88	95
Taxa de Dose Equivalente a 1m $10^{-8} \text{ (Sv s}^{-1}\text{)}$	5,4*	5,4	5,8
Energia Média (MeV)	4,4**	4,3***	4,1***

* calculado a partir do espéctro do $^{241}\text{AmBe}$ presente na referência (17)

** extraído da referência (24)

*** os nêutrons térmicos não foram considerados.

Tabela 2.3 - Comparação entre os valores esperados com relação à fonte de $^{241}\text{AmBe}$ calibrada e os obtidos pela deconvolução do espectro a partir dos dados experimentais.

2.5. Conclusões sobre os Procedimentos de Calibração

Os três métodos de calibração aplicados ao espectrômetro de esferas de Bonner resultaram na calibração deste sistema detector com a determinação das respostas à fluência livre, das constantes características fonte-detector e da componente devida ao espalhamento da sala.

Os resultados indicam também que são adequadas as instalações existentes para irradiação com nêutrons e que portanto, é possível se obter um fator de calibração para dispositivos detectores de nêutrons utilizando-se nesta sala os procedimentos propostos.

A obtenção do espectro do $^{241}\text{AmBe}$ deconvoluído a partir das respostas do espectrômetro de esferas de Bonner com a determinação adequada de taxas de fluência e de dose equivalente possibilitam o uso de tal sistema detector na caracterização de campos de radiação neutrônica.

Os resultados preliminares desta etapa do trabalho resultaram no trabalho "Establishment of a Procedure for Calibrating Neutron Monitors at the Physics Institute of University of São Paulo, Brazil" apresentado no Seventh Symposium on Neutron Dosimetry⁽³¹⁾.

CAPÍTULO 3

DETECÇÃO DE NÊUTRONS COM O CR-39

3.1. Elaboração do Dosímetro

3.1.1. A Opção pelo CR-39

Como já mencionado, uma das linhas básicas de pesquisa do Laboratório de Dosimetria do IFUSP é a termoluminescência. A dosimetria de nêutrons baseada no uso de dosímetros termoluminescentes é limitada essencialmente à detecção de nêutrons térmicos⁽³⁾⁽⁴⁾ e epitérmicos, sendo muito utilizada na monitoração de nêutrons de albedo.

Entretanto, outras técnicas têm sido propostas para a realização da dosimetria de nêutrons, técnicas essas que detectam o fluxo incidente, sendo mais apropriadas em alguns casos de monitoração pessoal. Procurou-se então, um sistema de detecção, já consagrado mundialmente, que apresentasse sensibilidade a nêutrons térmicos, epitérmicos e rápidos e para o qual se pudesse elaborar e custear a infraestrutura necessária.

O uso do CR-39 foi de encontro a essa busca uma vez que ele tem sido amplamente utilizado⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽³²⁾ na detecção de partículas alfa e de prótons de recuo e portanto na detecção de nêutrons abrangendo as faixas de energia de interesse para este projeto.

No Brasil vários trabalhos já foram realizados⁽³³⁾⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾ por pesquisadores afins, tornando-o uma opção adequada, inclusive de continuidade dessas pesquisas. Como no Instituto de Física já havia sido proposto um dosímetro que fazia uso do polímero CR-39 detectando nêutrons de albedo⁽³³⁾, preferiu-se neste trabalho desenvolver um monitor que detectasse o fluxo direto, ampliando dessa forma as possibilidades de monitoração pessoal do laboratório de Dosimetria.

3.1.2. O CR-39

O polímero comercialmente conhecido como Columbia Resin 39⁽³⁶⁾, CR-39, foi originalmente desenvolvido para manufatura de lentes. No entanto, tornou-se o detector de traços nucleares mais utilizado hoje em dia.

Seu amplo emprego na dosimetria de nêutrons decorre do fato de ser o CR-39 muito sensível a partículas carregadas, ser opticamente transparente e requerer uma baixa dose para ruptura da cadeia molecular do polímero.

É produzido a partir da polimerização de um monômero líquido, o di alil carbonato de dietileno glicol ($C_{12}H_{18}O_7$)⁽³⁷⁾, formando-se uma estrutura tridimensional que caracteriza o volume de uma amostra como uma única macromolécula. Tal estrutura dificulta inclusive qualquer recombinação em sua cadeia no caso de uma ruptura vir a ocorrer. Isso qualifica o CR-39 como um plástico do tipo "termoset", ou seja, que mantém a sua estrutura em temperaturas superiores às aquelas suportadas por outros polímeros.

Essa propriedade é muito importante quando se pensa em seu uso como detector de traços, pois evita o chamado "fading" (desvanecimento de imagem), que corresponde ao apagamento da informação nele armazenada na forma de danos causados pelas partículas ionizantes que nele incidiram⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾. Normalmente tal "fading", no caso de outros polímeros, é ocasionado pela restauração da estrutura molecular previamente danificada que é função da própria agitação molecular.

Durante o processo de polimerização mencionado acima, formam-se algumas vezes zonas onde ainda permanecem monômeros livres. A tais zonas correspondem inomogeneidades estruturais que afetam a resposta do polímero.

A preocupação com a qualidade do CR-39 produzido para finalidades de pesquisa, levou à adição ao polímero de dopantes em concentrações adequadas, o que permitiu se obter um material mais homogêneo e mais reprodutível.

O CR-39 é também insensível à radiação eletromagnética, não detectando a radiação gama sempre presente num campo neutrônico⁽⁴⁰⁾.

3.1.3. A Produção de Danos no Polímero

Os danos aqui considerados são devidos a rupturas na cadeia molecular da macromolécula que corresponde ao detector CR-39. Essas rupturas originam-se em forte interação elétrica entre os átomos da molécula, ligados por ligações covalentes, e partículas eletricamente carregadas e aceleradas que podem ser prótons, partículas alfa

ou mesmo os elétrons secundários (raios δ) produzidos ao longo das trajetórias de tais partículas.

Quando se está interessado na dosimetria de nêutrons térmicos, epitérmicos e rápidos, devem-se considerar os produtos das interações desses nêutrons, respeitadas as faixas de energia, com os átomos constituintes do CR-39 ou do porta dosímetro que o contém. O CR-39 é constituído basicamente por átomos de hidrogênio, carbono e oxigênio (48,6%, 32,4% e 18,9% em peso respectivamente).

Para nêutrons rápidos, a predominância é de colisões elásticas com esses núcleos, preferencialmente com o hidrogênio, dando origem a prótons de recuo que desencadearão os danos no polímero. O limiar de energia dos nêutrons para proporcionar tal deteção é o mais baixo entre os detectores de traços empregados (~ 250 keV), sendo mais uma vantagem a favor da utilização do CR-39⁽⁴¹⁾⁽⁴²⁾.

Para a deteção de nêutrons térmicos e mesmo epitérmicos, empregam-se materiais conversores constituídos normalmente por boro ou lítio cujos isótopos ^{10}B e ^6Li apresentam grande secção de choque para a reação (n,α) que produz as partículas alfa aceleradas responsáveis pela produção dos danos no polímero⁽⁴²⁾.

Deve-se salientar que sendo as partículas alfa geradas em conversores externos, os danos latentes produzidos são superficiais, uma vez que elas possuem reduzido alcance no CR-39.

Cumpra também lembrar que ocorrem danos no polímero durante a fabricação do mesmo, devido à introdução de impurezas ou mesmo inerentes ao processo de fabricação, ou ainda posteriormente por meios mecânicos decorrentes da forma de manipulação e armazenamento do plástico. Mencione-se ainda que durante o armazenamento, o polímero é submetido à radiação cósmica que certamente interagirá com o mesmo. Esses danos correspondem à fração significativa do chamado ruído de fundo ("background", BG), responsável pelos traços que não têm relação com o campo de radiação monitorado.

3.1.4. A Formação dos Traços

Os danos existentes no polímero (traços latentes) correspondem à informação registrada pelo mesmo; quando ampliados tornam-se visíveis sob baixa magnificação e constituem os chamados traços.

A formação do traço a partir de um dano tem origem num ataque químico e/ou eletroquímico denominado de processo de "revelação" do CR-39.

O ataque químico é feito por uma solução reveladora alcalina que remove porções do polímero com uma velocidade que depende da temperatura e da concentração da solução reveladora. Tal velocidade, ou seja, taxa de remoção do polímero, possui duas componentes: uma na direção perpendicular à superfície e outra que atua ao longo do traço latente.

A revelação eletroquímica, técnica adotada neste trabalho, corresponde à submissão do polímero em ataque químico a um campo elétrico alternado. Com relação ao ataque químico, a ampliação dos traços se dá num menor tempo de revelação e numa geometria especial chamada de arborescência. A densidade superficial de traços revelados e o diâmetro médio dos mesmos são função da intensidade do campo elétrico e de sua frequência de oscilação, parâmetros adicionais àqueles do ataque químico, além de depender da fluência dos nêutrons e/ou partículas alfa incidentes sobre o polímero.

A remoção de material do polímero num ataque químico ou eletroquímico é dada pela combinação dos termos $v_S \cdot t$ e $v_T \cdot t$, onde t é o tempo de revelação, e v_S e v_T correspondem às taxas de remoção superficial e ao longo do traço respectivamente, sendo medidos normalmente em $\mu\text{m h}^{-1}$. A revelação de um traço só ocorre se a velocidade de ataque ao longo do traço for superior à velocidade de ataque superficial, implicando na existência de um ângulo crítico para a direção do dano, abaixo do qual o mesmo será removido.

A figura 3.1 a seguir ilustra o processo de ataque químico ou eletroquímico ao polímero, mostrando a superfície do mesmo antes de se proceder à revelação e após um tempo t de ataque. Salienta-se também a relação entre o ângulo crítico e as taxas de remoção do material.

Figura 3.1 - Ilustração mostrando as taxas de remoção de material do polímero sob "revelação" salientando-se o ângulo crítico, para a direção de um traço latente.

3.1.5. O Dosímetro Elaborado

O dosímetro a ser elaborado e descrito neste trabalho visa a detecção de nêutrons em três grandes faixas de energia, ou seja, térmicos, epitérmicos e rápidos.

Como já mencionado o CR-39 é sensível a nêutrons rápidos que nele geram prótons de recuo e a partículas alfa, para as quais apresenta maior sensibilidade.

Um outro aspecto importante é que o tempo de revelação eletroquímica que leva à produção de traços originados por partículas alfa é menor do que o tempo mínimo necessário para a revelação de traços originados por prótons de recuo. Isto torna possível a determinação exclusiva do número de traços devidos a partículas alfa numa amostra de CR-39 que também tenha danos produzidos por prótons de recuo⁽³⁴⁾.

Tais aspirações e fatos levaram ao projeto do sistema de detecção cujo esquema pode ser visto na figura 3.2 .

Figura 3.2 - Esquema do dosímetro elaborado e utilizado neste trabalho.

O dosímetro é constituído por duas placas quadradas de CR-39 da marca Pershore Mouldings tipo PM 355, justapostas, de lados iguais a 29 mm e espessura de 510 μm . Sobre a face superior da primeira placa encontra-se uma matriz composta por pastilhas de fluoreto de lítio, LiF, enriquecido com 95,6% do isótopo ^6Li . Cada uma dessas pastilhas têm a forma de paralelepípedos de $3,15 \times 3,15 \times 0,85 \text{ mm}^3$, fazendo da matriz um quadrado de lado 19 mm. Metade da área definida pelo LiF é coberta por uma placa de cádmio de dimensões $13 \times 30 \times 2 \text{ mm}^3$. Na base de todo o sistema, separado da segunda placa de CR-39 por uma película plástica, tem-se uma placa de cádmio de dimensões $50 \times 40 \times 3,5 \text{ mm}^3$.

Todo esse conjunto é ainda colocado num invólucro plástico que finaliza o porta dosímetro, ou "badge", desenvolvido.

Como já mencionado, os nêutrons rápidos realizam basicamente espalhamento elástico com os núcleos de hidrogénio dando origem a prótons de recuo que produzem traços latentes em todo o volume do polímero. Os nêutrons térmicos e epitérmicos interagem com a matriz de fluoreto de lítio produzindo partículas alfa que produzem danos na superfície do CR-39 que atingem. Os nêutrons com energia menor que 0,5 eV são absorvidos pelo cádmio (secção de choque de 2520 barns para o cádmio natural para a reação $(n,\gamma)^{(43)}$), determinando que as partículas alfa originadas no LiF, coberto por cádmio, são produzidas exclusivamente por nêutrons epitérmicos.

Sabe-se que o LiF enriquecido isotopicamente pode ser utilizado como conversor (n,α) , uma vez que o ^6Li apresenta grande secção de choque para nêutrons térmicos, 940 barns⁽⁴³⁾. A reação de conversão é⁽⁴²⁾⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾:

Sabe-se também que a reação acima continua a ocorrer quando a energia dos nêutrons cresce, sendo que a secção de choque torna-se função do inverso da velocidade do nêutron incidente (comportamento $1/v$) apresentando ainda uma ressonância em 250 keV, já na região dos nêutrons epitérmicos. A partícula alfa resultante tem um alcance de aproximadamente 5 μm no LiF e 7 μm no plástico.

Pode-se, pois, revelar a face superior da primeira placa de CR-39 em contato com a matriz de fluoreto de lítio e utilizá-la para a detecção de nêutrons térmicos e epitérmicos, e a face inferior da segunda placa visando a detecção dos nêutrons rápidos, onde o volume total de CR-39 do sistema de detecção (primeira e segunda placas) é usado como conversor (n,p) .

A placa de cádmio que separa os CR-39 do corpo do usuário tem por objetivo cortar os nêutrons térmicos de albedo. Estes constituem a componente básica

dos nêutrons retroespalhados pelo corpo humano que atingiriam a matriz de LiF, e que poderiam produzir traços no polímero junto ao conversor (n, α).

3.2. A Revelação Eletroquímica

3.2.1. A Câmara de Revelação Eletroquímica

O ataque eletroquímico utilizado no processo de revelação do polímero CR-39 envolve o emprego de solução básica de alta concentração (KOH 6,0 N), em temperatura acima da ambiente (59°C), para a qual a solução é mais reativa, associada a um campo elétrico de alta intensidade (20 kV cm^{-1}) e de alta frequência (2,0 kHz). A câmara de revelação é o dispositivo que permite submeter um ou mais polímeros a esse processo.

A câmara projetada e construída para este trabalho é constituída de células cujas paredes são as placas de CR-39 a serem reveladas. No meio de cada célula há um eletrodo circular. Na célula justaposta à superfície do polímero em revelação é colocada a solução de KOH de alta concentração (6,0 N), enquanto que aquela colocada junto à face contrária é preenchida por uma solução de baixa concentração de KOH (0,25 N), para garantir a existência de solução eletrolítica em ambos os lados do detector.

As figuras 3.3 e 3.4 mostram o desenho, as dimensões e os materiais empregados na manufatura de cada célula e da câmara de revelação utilizada neste trabalho, que permite a revelação simultânea de cinco detectores.

As soluções eletrolíticas em contato com os dois lados do CR-39 permitem estabelecer sobre ele um campo elétrico de intensidade dada pela razão entre a tensão elétrica entre os eletrodos e a espessura do detector.

Os materiais empregados devem ser não reagentes com a solução alcalina e quando desempenharem a função de isolantes elétricos devem ser capazes de suportar os elevados campos elétricos existentes.

Foram empregados o lucite na manufatura das células, um PVC flexível como material vedador do sistema e aço inoxidável nos eletrodos. Os bornes para os eletrodos foram comuns, pois mostraram-se adequados.

O volume de solução eletrolítica contido em cada célula foi de 4 cm^3 , sendo inseridos por meio de seringa clínica comum.

Figura 3.3 - Figura mostrando o desenho, as dimensões e os materiais empregados na manufatura de uma célula constituinte da câmara para a revelação eletroquímica do polímero CR-39.

Figura 3.4 - Esquema da câmara para a revelação eletroquímica do polímero CR-39. As células descritas na figura 3.3 estão simplificadas e podem ser observadas as posições das placas de CR-39, os parafusos diretores e de aperto, os vedadores e os volumes destinados às soluções eletrolíticas (soluções 6,0 N indicadas e 0,25 N em branco). Também encontram-se indicadas as diferenças de potencial alternadas aplicadas entre as células.

3.2.2. A Fonte de Alta Tensão e Alta Frequência

A fonte de alta tensão e alta frequência também foi projetada e construída para este trabalho, procurando-se obter um dispositivo muito simples e de baixo custo. A alta tensão foi conseguida por meio de uma bobina de automóvel e o circuito oscilador que viabilizou a alta frequência e seu ajuste foi baseado no circuito integrado 555 muito utilizado em eletrônica⁽⁴⁴⁾⁽⁴⁵⁾.

O circuito integrado 555 foi utilizado na configuração de um multivibrador astável, ou seja, em sua saída obtém-se pulsos cuja largura e frequência podem ser variados pela alteração de valores de uma malha RC externa ao mesmo.

O esquema do circuito eletrônico usado está na figura 3.5 a seguir, e os respectivos componentes empregados encontram-se listados na tabela 3.1.

Figura 3.5 - Esquema do circuito eletrônico da fonte de alta tensão e alta frequência construída para se proceder à revelação eletroquímica do polímero CR-39.

Componentes do circuito da fonte de alta tensão e alta frequência

Semicondutores:

C.I. - 555
 D₁ - diodo fotoemissor vermelho (TIL 209)
 D₂ a D₅ - diodos 1N4001
 TR₁ - TIP 31C
 TR₂ - BC 238
 78xx - regulador de tensão 7805

Resistores (1/4 W, ± 20%):

R₁, R₃ e R₄ - 1,2 kΩ
 R₅ - 270 Ω 1/2 W
 R₇ - 1,0 kΩ
 R₂ - potenciômetro 100 kΩ
 R₆ - potenciômetro 1 MΩ

Capacitores:

C₁ - 0,33 μF, poliéster ("Schiko")
 C₂ - 2200 μF, eletrolítico

Diversos:

CH₁ - interruptor simples
 F₁ - fusível para 200 mA
 T₁ - bobina de ignição Bosch para VW/1300
 T₂ - transformador de alimentação: primário na tensão da rede
 e secundário em 12 V, 500 mA a 750 mA.

Tabela 3.1 - Lista dos componentes eletrônicos presentes no circuito da figura 3.5 referente à fonte de alta tensão e alta frequência construída.

O circuito é alimentado por uma tensão de $12\sqrt{2}$ V (DC) , daí o transformador T_2 , a ponte de diodos e o capacitor eletrolítico para a retificação da tensão. O regulador de tensão positiva 78xx (7805) é responsável pela determinação de tensões entre 5V e 17V para a alimentação do circuito integrado, que por sua vez, gera em sua saída ondas quadradas de frequência determinada pela seguinte relação:

$$f = \frac{1,44}{(R_1 + 2R_2).C_1} \quad [3.1]$$

O componente R_2 é um potenciômetro cuja variação de resistência permite variar a frequência entre dezenas de hertz e aproximadamente 5 kHz.

A alta tensão de saída da fonte é originada na alimentação da bobina T_1 resultante da condução de um dos transístores, dependendo do nível de sinal na saída do CI 555. Por sua vez, a altura do sinal na saída do circuito integrado depende da tensão na entrada do mesmo, que é ajustada com a variação da resistência do potenciômetro R_6 acoplado ao regulador de tensão 78xx.

As características da fonte construída foram determinadas por meio de dois osciloscópios. Um da marca National tipo VP-5230A 30 e outro, também utilizado para monitoração do experimento, da marca Trio tipo CO-1505.

Para frequências na faixa de 100 Hz a 1 kHz conseguem-se apenas pulsos de alta tensão, figura 3.6, mas em frequências mais altas são geradas outras formas de onda, que embora não senoidais, são adequadas para os fins almejados, figura 3.7 . Para altas frequências a tensão máxima produzida não ultrapassou 1,5 kV.

Figura 3.6 - Pulsos de alta tensão gerados pela fonte de alta tensão e alta frequência na frequência de 100 Hz.

Figura 3.7 - Forma de onda gerada pela fonte de alta tensão e alta frequência na frequência de 2,0 kHz, utilizada no processo de revelação eletroquímica.

Os parâmetros elétricos utilizados na revelação eletroquímica foram tensão de 1,0 kV_{pp} e frequência de 2,0 kHz, com a forma de onda da figura 3.7, conforme descrito no item 3.2.4. .

A fonte construída foi utilizada em revelações eletroquímicas durante 95,5 horas entre os testes realizados e as vinte e três revelações correspondentes à tomada de dados. Durante esse tempo não requereu manutenção significativa e mostrou-se estável e reprodutível.

Saliente-se que durante todo o período acima mencionado, somente em duas oportunidades ocorreu ruptura da rigidez dielétrica do polímero, estabelecendo-se um curto circuito entre dois eletrodos da câmara de revelação. Observou-se então que nessas circunstâncias a alta tensão caiu imediatamente, tornando a corrente de curto-circuito desprezível, e não acarretando danos ao sistema.

3.2.3. O Controle de Temperatura

Neste trabalho a revelação eletroquímica realizou-se em temperatura constante de 59 °C. Isso implicou em se fazer a revelação num ambiente controlado termicamente, exigindo-se um sistema de aquecimento junto a outro de controle de temperatura.

Visando praticidade e o emprego dos recursos disponíveis, elaborou-se uma "estufa" composta por uma caixa de isopor com tampa removível com as seguintes dimensões internas: 39,5 cm x 30,5 cm x 32,0 cm. Duas pequenas lâmpadas de 40 W de potência separadas por 16,5 cm e ligadas em paralelo foram responsáveis pelo aquecimento num processo de liga-desliga comandado por um controlador de temperatura de fornos da marca Coel (220 V, 60 Hz).

O controlador de temperatura cumpre seu papel "analisando" a derivada da curva de aquecimento do local monitorado. Essa monitoração foi feita na célula A da câmara de revelação eletroquímica, utilizando-se um termopar de ferro-constantã. Uma chave comutadora ao receber o sinal do controlador de temperatura fecha ou abre o circuito elétrico que alimenta as lâmpadas (110V), dando início ou interrompendo o aquecimento.

O gráfico superior da figura 3.8 a seguir corresponde às curvas de aquecimento das diversas células que compõe a câmara de revelação. Observam-se curvas similares, embora defasadas no tempo, implicando num mesmo tratamento térmico das células e portanto das placas de CR-39 postas em revelação.

Cumprir lembrar que durante as revelações o sistema foi pré-aquecido, bem como a solução reveladora, o que permitiu um controle mais preciso da temperatura de revelação, correspondendo ao gráfico inferior da figura 3.8 .

Além disso, e de fundamental importância, o sistema mostrou-se reprodutivo, considerando-se todas as revelações realizadas.

Figura 3.8 - O gráfico superior mostra o comportamento térmico das células constituintes da câmara de revelação, esquematizada ao centro, quando o sistema de aquecimento é acionado à temperatura ambiente. O gráfico inferior mostra o comportamento térmico da célula A durante uma revelação eletroquímica de 6 horas.

3.2.4. A Definição dos Parâmetros da Revelação Eletroquímica

A escolha dos parâmetros de revelação busca a otimização do processo de ataque eletroquímico à superfície selecionada do polímero CR-39. São cinco os parâmetros a serem definidos:

- a) a solução alcalina a ser empregada bem como sua concentração;
- b) a temperatura em que se dará o processo;
- c) a intensidade do campo elétrico ao qual será submetido o polímero;
- d) a frequência do campo elétrico;
- e) o tempo de duração da revelação.

Para realizar tal escolha deve-se levar em conta o tipo de radiação a ser monitorada, a densidade de traços que se obtém, o diâmetro médio dos mesmos, e o número de traços de fundo (background), buscando sempre maximizar a relação "sinal-ruído". É claro, procura-se o menor tempo de revelação possível para se conseguir uma boa qualidade de resultados. Observa-se entretanto, que os parâmetros são críticos para o processo de revelação, definindo a sensibilidade e a resposta do dosímetro em função da energia das partículas incidentes.

As soluções alcalinas comumente utilizadas são as de hidróxido de sódio, NaOH, e as de hidróxido de potássio, KOH (mais reativa). A velocidade de ataque vai depender da concentração da solução e da temperatura da revelação, crescendo com o aumento da temperatura. Para a solução de KOH 6N a 70°C o ataque se dá numa taxa de $3\mu\text{m h}^{-1}$ (46).

Com a finalidade de utilizar uma solução bastante reativa numa temperatura controlada com precisão, utilizou-se neste trabalho uma solução 6,0 N de KOH numa temperatura de 59°C.

Para a escolha do valor da alta tensão levou-se em conta não apenas as características da fonte de tensão disponível, mas também as informações colhidas da literatura que afirmam que campos elétricos superiores a 10 kV cm^{-1} aumentam a sensibilidade do polímero⁽⁴⁷⁾⁽⁴⁸⁾. Foi fixada a tensão de 1,0 kV pico a pico que corresponde a um campo elétrico de 20 kV cm^{-1} no interior do CR-39.

Fixado o valor do campo elétrico, verifica-se que o diâmetro do traço revelado é função da frequência de oscilação do mesmo. Neste trabalho utilizou-se uma frequência de 2,0 kHz, valor esse limitado pela fonte de alta tensão e alta frequência, mas que também tem sido usado em trabalhos correlatos no Brasil e no exterior⁽³³⁾⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾⁽⁴⁷⁾⁽⁴⁸⁾.

O tempo de revelação escolhido foi de três horas para detecção de partículas alfa (deteccção de nêutrons térmicos) e de seis horas para a detecção de nêutrons rápidos. Esses tempos diferem pelo fato das partículas alfa produzirem danos exclusivamente superficiais que dão origem a traços de diâmetros adequados num menor intervalo de tempo de revelação. Como já relatado, o aparecimento precoce desses traços permite a discriminação entre danos causados por partículas alfa e os causados por prótons de recuo.

Cabe ainda lembrar que este trabalho visou o emprego e não a pesquisa básica para determinar características do CR-39 e da técnica de revelação eletroquímica.

A tabela 3.2 abaixo resume os parâmetros escolhidos.

Solução Alcalina		KOH
Concentração da Solução $\Rightarrow$	para revelação	6,0 N
	$\Rightarrow$ para contacto eléctrico	0,25 N
Temperatura		59°C
Tensão entre os Eletrodos		1,0 kV _{pp}
Campo Eléctrico no CR-39		20 kV cm ⁻¹
Frequência		2,0 kHz
Tempo de Revelação $\Rightarrow$	nêutrons térmicos	3 horas
	$\Rightarrow$ nêutrons rápidos	6 horas

Tabela 3.2 - Parâmetros estabelecidos para o processo de revelação eletroquímica

3.2.5. O Procedimento de Revelação

O estabelecimento de um procedimento de revelação é fundamental, pois ele contribui para a boa qualidade dos dados experimentais, permitindo a identificação de grande número de parâmetros que afetam o experimento.

Tendo isso em vista, inicia-se o procedimento com a colocação das placas de CR-39 a serem reveladas na câmara de revelação. Cada célula da câmara de revelação tem sua posição fixa na montagem, recebendo denominações de A a F. Adotou-se a sistemática de se colocar a placa de radiação de fundo sempre entre as células E e F.

Posicionados os detectores procede-se ao fechamento e vedação da câmara de revelação que consiste num aperto das porcas dos parafusos diretores.

Feito isso, a câmara é colocada dentro da estufa de revelação sendo então, ligado o dispositivo de aquecimento. Ao lado da câmara são colocadas as soluções eletrolíticas, KOH 6,0 N e KOH 0,25 N, acondicionadas em potes plásticos pretos.

A monitoração da temperatura faz-se por um termopar de ferro-constantã posicionado no respiro da célula A. O sistema é deixado por uma hora em aquecimento atingindo a máxima temperatura permitida pelo controlador de temperatura antes de se estabelecer a temperatura de revelação (64°C).

Nesse momento se introduz os eletrólitos nas células. Primeiramente é colocada a solução 0,25 N nas células A, C e E e em seguida a solução 6,0 N nas células B, D e F. Para isso utiliza-se uma seringa plástica comum (5 cm³), cuja agulha é introduzida no respiro livre das células. Essa operação exige o uso de luva de borracha e leva cerca de dois minutos.

São conectados então, os fios de alta tensão e ligada a fonte de alta tensão e alta frequência. O sinal de alimentação é monitorado por um osciloscópio e após um rápido ajuste dos parâmetros elétricos, inicia-se a contagem do tempo de revelação.

Nesse início a temperatura na câmara oscila um pouco mais, como pode ser visto no gráfico inferior da figura 3.8. No entanto, mesmo durante a primeira hora a temperatura da célula monitorada não varia mais do que $\pm 4\%$.

Ao final da revelação os eletrólitos são retirados e água é injetada várias vezes dentro das células para eliminação de resíduos dos eletrólitos. Procede-se à desmontagem da câmara e a nova lavagem das placas de CR-39 em água corrente, concluindo-se assim a revelação.

3.3. O Procedimento de Leitura do CR-39

3.3.1. O Sistema Leitor de Traços

Os traços originados no processo de revelação eletroquímica tornam-se visíveis sob baixa magnificação. Para fins de contagem, os traços foram ampliados 20 ou 50 vezes dependendo da densidade de traços obtida, através de um microscópio ótico marca Zeiss Jenapol.

O microscópio permitiu a visualização da amostra ampliada pela projeção da imagem num anteparo translúcido (tela), ao qual adaptou-se uma máscara para a realização das leituras que definia uma pequena área fixa de contagem. Para a ampliação de 20 vezes essa área foi de $1,68 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ e para a ampliação de 50 vezes $2,52 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$.

Observou-se que não há uma distribuição homogênea de traços pela placa de CR-39, havendo uma maior densidade na região central da mesma. Para se proceder a leitura de uma placa de CR-39 exposta a nêutrons rápidos, foi delimitada uma área padrão de $1,44 \text{ cm}^2$ área essa que engloba a quase totalidade da área revelada. No caso de exposição a nêutrons térmicos e epitérmicos, a área padrão de leitura correspondeu a metade desse valor devido a presença do filtro de cádmio

A área padrão de leitura é varrida por posicionamento manual da placa de CR-39 com relação à objetiva do microscópio. Como resultado final da leitura considerou-se o valor médio do número de traços por centímetro quadrado de cada pequena área contada, considerando-se como erro estatístico do valor médio o desvio-padrão amostral da média.

Ressalta-se aqui, que para expressar com maior clareza a quantificação das respostas obtidas pelos detectores, optou-se pelo emprego das unidades usadas corriqueiramente e que envolvem submúltiplos de metro. Empregam-se então traços cm^{-2} para densidade de traços e nêutrons cm^{-2} (ou cm^{-2}) para fluência.

3.3.2. O Ruído de Fundo (BG)

A avaliação quantitativa e qualitativa dos resultados, decorrentes dos procedimentos conjugados de irradiação, revelação e leitura do dosímetro, vai depender da discriminação entre os traços que são originados durante a irradiação, e aqueles que têm outra origem e que são designados por ruído de fundo (BG).

Além dos traços de origem radioativa correspondente à radiação de fundo, o número de traços correspondente ao BG pode ser característico de um determinado lote do material fabricado ou mesmo dos parâmetros de revelação. Assim sendo, deve-se ficar atento às semelhanças e diferenças apresentadas por esta componente em diversas revelações a fim de se identificar as características próprias da placa.

Neste trabalho verificou-se que o BG, de fato, tem características próprias. A tabela 3.3 a seguir corresponde aos valores médios do BG e os respectivos desvios-padrão obtidos da análise de treze diferentes revelações de 6 horas e outras cinco revelações de 3 horas de duração, identificando-se as faces das placas reveladas por face 1 e face 2.

$(BG \pm \sigma_{BG})$	3 Horas de Revelação (Traços cm^{-2})	6 Horas de Revelação (Traço cm^{-2})
Face 1	(36 ± 9)	(101 ± 13)
Face 2	(98 ± 17)	(270 ± 18)

Tabela 3.3 - Valores médios de ruído de fundo (BG) acompanhados dos respectivos desvios padrão para cada face da placa de CR-39 utilizada e para cada tempo de revelação. O tempo de 3 horas está relacionado à detecção de partículas alfa (para nêutrons térmicos e epitérmicos) e o de 6 horas para a detecção de prótons de recuo (para nêutrons rápidos).

Esses dados determinam valores médios distintos de BG para cada face, indicando a necessidade de se identificar a face a ser utilizada nos procedimentos de irradiação e revelação. Essa dependência do BG com a face da placa deve ser analisada e determinada para cada lote de CR-39 utilizado.

Para todas as séries de irradiação realizadas neste trabalho, adotou-se como componente de BG, os valores médios, constantes da tabela 4.1, e os correspondentes desvios-padrão, e não valores de BG por conjunto de detectores revelados.

3.3.3. O Diâmetro do Traço

Um levantamento dos diâmetros dos traços obtidos nas revelações eletroquímicas realizadas mostra a ocorrência de diâmetros entre 13 μm e 190 μm , diâmetro médio de 81 μm para prótons de recuo (6 horas de revelação) e diâmetros entre 13 μm e 67 μm , diâmetro médio de 35 μm para partículas alfa (3 horas de revelação).

Procurou-se por meio da análise do diâmetro dos traços de prótons de recuo, obter critérios de seleção de traços a fim de se diminuir a contribuição de BG. Aventou-se tal possibilidade ao se verificar que a frequência dos traços de maior diâmetro (entre 130 μm e 190 μm) era muito semelhante nas placas de BG e nas placas irradiadas, sendo indicativo de pertencerem ao chamado de ruído de fundo. No entanto a subtração dos traços de maior diâmetro acarretou maiores incertezas e também maiores dificuldades de contagem e por esse motivo tal correção não foi efetivada.

Na leitura de cada placa de CR-39 revelada foram portanto contados todos os traços encontrados sem haver preocupação com seu diâmetro, ou mesmo com o valor do diâmetro médio.

CAPÍTULO 4

PROPRIEDADES DO DOSÍMETRO PESSOAL ELABORADO

A utilização de um detector para fins dosimétricos requer uma interpretação correta da sua resposta. No caso do CR-39 entende-se por resposta a densidade de traços (traços cm^{-2}) obtida em função da exposição do detector a um campo neutrônico. Certamente a resposta desse detector vai depender dos parâmetros utilizados na revelação eletroquímica, que foram fixados conforme descrito no capítulo anterior e que devem ser reproduzidos a cada processamento.

Uma consequência direta dos parâmetros de revelação escolhidos é o diâmetro dos traços obtidos bem como a densidade de traços de ruído de fundo (BG), que acabam por determinar a dose mínima detectável.

Várias relações entre a resposta do detector e grandezas dosimétricas devem ser estabelecidas. Entre elas encontram-se a determinação da resposta em função da fluência de nêutrons incidentes, a escolha dos fatores de conversão entre fluência, dose absorvida e dose equivalente, a verificação da linearidade de resposta com a dose incidente e o estabelecimento da sensibilidade do detector que é função da razão sinal-ruído de fundo.

4.1. Dependência da Sensibilidade do Dosímetro com a Fluência de Nêutrons

O estabelecimento das curvas de resposta do dosímetro elaborado como função da fluência de nêutrons incidentes é fundamental para os fins dosimétricos a que se propõe este trabalho. Essas curvas visam estabelecer relações quantitativas confiáveis entre a resposta do dosímetro e a dose absorvida, bem como determinar as faixas de fluência nas quais o dosímetro poderá ser utilizado.

A figura 4.1 a seguir mostra a variação da resposta do dosímetro (traços cm^{-2}) em função da fluência (nêutrons cm^{-2}) de nêutrons rápidos.

A análise de tal curva permite verificar a existência de uma saturação na resposta do dosímetro e portanto, de uma dependência da sensibilidade (traços neutron^{-1}) com a fluência de nêutrons rápidos incidentes.

Figura 4.1 - Curva relacionando a resposta do dosímetro com a fluência de nêutrons incidentes para irradiações do dosímetro elaborado no arranjo de nêutrons rápidos. Os diferentes símbolos para os pontos experimentais denotam resultados obtidos em diferentes revelações para diferentes séries de irradiação. O ponto triangular representa a média e o desvio padrão de toda uma série de dados tomados naquela fluência.

No CR-39 a saturação é caracterizada pela existência de um patamar para a densidade de traços (traços cm^{-2}) a partir de um certo valor de fluência. Deve-se ter claro que tal saturação também é função dos parâmetros escolhidos para a revelação eletroquímica.

O próprio diâmetro do traço é reduzido em fluências altas, podendo tal redução ser explicada pelo fato de danos muito próximos originarem arborescências que criam campos elétricos resultantes nulos nas regiões entre os danos, impedindo as próprias expansões e mesmo a origem de outras arborescências ainda não iniciadas. Como consequência observa-se a diminuição do diâmetro e a saturação da densidade de traços⁽³⁷⁾.

A curva da sensibilidade do CR-39 em função da fluência de nêutrons rápidos é mostrada na figura 4.2 a seguir.

A análise da curva da figura 4.2 permite estabelecer a faixa de fluências dentro da qual, o dosímetro apresenta uma mesma sensibilidade para nêutrons rápidos. No caso, a faixa determinada tem um limite superior em $2,0 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$.

Apesar de não se dispor de uma curva semelhante à da figura 4.2 para nêutrons térmicos, pode-se inferir uma queda da sensibilidade para fluências superiores a $1,7 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ a partir da análise da curva de resposta do detector como função do tempo de irradiação em nêutrons térmicos mostrada na figura 4.5 do item 4.7. .

A utilização do dosímetro em fluências para as quais haja igualdade de sensibilidade é fundamental para o levantamento da curva de calibração do dosímetro.

Figura 4.2- Curva relacionando a sensibilidade do dosímetro com a fluência de nêutrons incidentes para irradiações do dosímetro elaborado no arranjo de nêutrons rápidos. Os diferentes símbolos para os pontos experimentais denotam resultados obtidos em diferentes revelações para diferentes séries de irradiação. O ponto triangular representa a média e o desvio padrão de toda uma série de dados tomados naquela fluência.

4.2. Reprodutibilidade de Resposta do Dosímetro

A reprodutibilidade da resposta do dosímetro é de fundamental importância para se determinar o grau de confiança a se depositar no sistema dosimétrico como um todo.

A figura 4.3 a seguir corresponde a uma ampliação da curva de sensibilidade, figura 4.2, na região de fluências selecionada. Dela fazem parte as respostas de nove detectores CR-39 pertencentes a três diferentes séries de irradiações e revelações.

Além de possibilitar uma melhor definição da sensibilidade do dosímetro a figura 4.3 permite determinar a sua reprodutibilidade, uma vez que relaciona as respostas de diferentes detectores em diferentes revelações. O valor médio da sensibilidade encontrado para os nove dados é $(18,4 \pm 3,0) \times 10^{-6}$ traços neutron^{-1} indicando uma reprodutibilidade de resposta de $\pm 16\%$, se se considerar um desvio padrão.

Esse valor, 16%, tem a mesma dimensão dos valores encontrados para a maioria dos desvios associados às respostas obtidas para os detectores individualmente. Assim sendo, adotou-se como desvio para as respostas obtidas os próprios desvios que correspondem aos respectivos desvios-padrão amostrais da média.

Figura 4.3 - Dados obtidos na região de fluência selecionada para uso do dosímetro elaborado. Utilizou-se de uma quebra na escala na fluência de $1,5 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ para se poder representar os quatro dados experimentais tomados na mesma fluência. Os diferentes símbolos empregados referem-se a diferentes séries de irradiação e revelação.

4.3. Verificação da Existência de Radiação Espalhada na Calibração do CR-39

A determinação da radiação espalhada aplica-se à calibração do dosímetro no campo de nêutrons utilizado e deve anteceder o levantamento da curva de resposta do mesmo em função da dose absorvida. Para a determinação desta componente do campo de radiação neutrônica utilizou-se o método semi-empírico descrito no capítulo sobre procedimentos de calibração (capítulo 2, item 2.3.1.).

Tal método leva em consideração o fato de que ao se irradiar um detector em várias distâncias fonte-detector por um mesmo intervalo de tempo, observar-se-á uma diminuição na resposta que variará linearmente com o inverso do quadrado da distância. Portanto, o produto dessa resposta pelo quadrado da distância deve levar a um valor constante. Qualquer desvio desse comportamento, desconsiderando-se os fatores de atenuação existentes, deve corresponder à contribuição da radiação espalhada.

Não se espera obter espalhamento para o dosímetro na sala de irradiação do Instituto de Física no que se refere à detecção de nêutrons rápidos. Essa suposição decorre do fato de ser a componente espalhada constituída por nêutrons de baixa energia, que provavelmente não superam o valor limiar para que haja sensibilização do polímero.

Para a aplicação do método semi-empírico o dosímetro foi irradiado a diversas distâncias fonte-detector. Em vista de se tratar de um dosímetro pessoal, a irradiação foi realizada com o dosímetro fixado na superfície externa de um fantoma que teve por função simular o corpo humano, como recomendado pelas normas de calibração⁽¹³⁾. A distância fonte-detector considerada correspondeu à distância entre o centro da fonte (eixo da fonte cilíndrica) e a superfície do fantoma à qual o dosímetro foi fixado. O fantoma utilizado consistiu num cilindro elíptico, preenchido com água, de eixos 23,6 cm e 34,2 cm tendo 35,0 cm de altura. O dosímetro foi irradiado a 3,20 metros do chão, estando centrado no fantoma. As irradiações foram realizadas em quatro distâncias fonte-detector: 0,500 m, 0,750 m, 1,000 m e a 1,250 m, com $\pm 0,003$ m de erro de posicionamento.

O gráfico da resposta do dosímetro multiplicada pelo quadrado da distância como função do quadrado da distância fonte-detector para avaliação pelo método semi-empírico está na figura 4.4.

Dele pode-se concluir, como previsto, a inexistência de contribuição de radiação espalhada na resposta do dosímetro a nêutrons rápidos.

Figura 4.4 - Gráfico da resposta do detector (traços $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) multiplicada pela distância ao quadrado (m^2) em função do quadrado da distância fonte-detector tendo em vista a determinação da contribuição da radiação espalhada.

O fato de não ter sido observada radiação espalhada devido aos nêutrons epitérmicos poderia ser explicado pela geometria de irradiação, onde o dosímetro foi colocado na superfície de um fantoma cujo albedo é predominantemente térmico.

Como descrito no item seguinte, observa-se resposta similar, dentro das incertezas, tanto para o pedaço de placa de CR-39 coberto por cádmio quanto para a descoberta, indicando a quase ausência de nêutrons térmicos registrados pelo dosímetro. Tal fato indicaria que os nêutrons de albedo estariam sendo devidamente atenuados pela placa posterior de cádmio, que seriam muito poucos os nêutrons térmicos provenientes da fonte de $^{241}\text{AmBe}$ e que a geometria do dosímetro estaria impedindo a detecção da componente térmica proveniente dos demais centros espalhadores da sala de irradiação.

4.4. Resposta do Dosímetro em Função da Fluência e da Dose Equivalente

A curva de resposta do dosímetro como função da dose equivalente constitui etapa fundamental deste trabalho. Para calculá-la foram consideradas separadamente as componentes térmicas, epitérmicas e rápidas do espectro de nêutrons do campo de radiação ao qual o dosímetro foi exposto.

Como já mencionado no capítulo 2, foi realizada a calibração do fluxo de nêutrons em arranjos montados no Laboratório de Dosimetria, que utilizaram como fonte de nêutrons uma fonte de $^{241}\text{AmBe}$ de 185 GBq de atividade.

Iniciou-se o trabalho medindo-se a resposta aos nêutrons térmicos. As irradiações foram realizadas com uma versão simplificada do dosímetro, na qual foi retirada a segunda placa de CR-39 destinada ao registro dos nêutrons rápidos. Foram realizadas oito irradiações, sendo que em quatro delas foi retirada a placa frontal de cádmio enquanto que nas restantes o dosímetro foi totalmente envolto em cádmio, possibilitando dessa forma a separação entre as componentes térmica e epitérmica existentes.

As figuras 4.5 e 4.6 mostram as respostas dos dosímetros aos campos térmicos e epitérmicos em função do tempo de irradiação como descrito acima.

Cumprir lembrar que o baixo fluxo de nêutrons epitérmicos presentes no arranjo exigiu longos tempos de irradiação para se poder discriminar adequadamente a contribuição dessa componente para a resposta total do dosímetro.

Conhecendo-se então o fluxo de nêutrons térmicos no interior do arranjo (capítulo 2, item 2.2.2.), foi possível estabelecer a relação entre a resposta exclusiva a nêutrons térmicos dos dosímetros e a fluência, que pode ser vista na figura 4.7. Mais do que isso, no caso dos nêutrons térmicos foi possível estabelecer uma relação entre a resposta do dosímetro e a dose equivalente, figura 4.8.

Método
de
ativação
de folhas
de Au

Figura 4.5 - Resposta do dosímetro à componente térmica e epitérmica somadas, bem como resposta exclusiva à componente epitérmica em função do tempo de irradiação no arranjo elaborado para irradiações com nêutrons térmicos.

Figura 4.6 - Resposta exclusiva do dosímetro a nêutrons epitérmicos em função do tempo de irradiação no arranjo para irradiações com nêutrons térmicos.

Figura 4.7 - Curva de calibração do dosímetro relacionando a resposta do dosímetro à fluência de nêutrons térmicos

Figura 4.8 - Curva de calibração do dosímetro relacionando a resposta do dosímetro à dose equivalente devida a nêutrons térmicos, na região onde o dosímetro não mostra indícios de saturação.

Deve-se observar também que para converter a fluência de nêutrons em dose equivalente foi aplicado o fator de qualidade médio sobre uma dada dose absorvida associada a uma fluência conhecida e não o fator de ponderação da radiação sobre a dose absorvida. Esse fator de qualidade médio é calculado a dez centímetros de profundidade em uma esfera de 30 cm de diâmetro (esfera do ICRU) e consta das recomendações do ICRP-60⁽⁵⁾.

No caso de nêutrons térmicos as doses equivalentes foram calculadas a partir da relação $301 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} = 1 \text{ Sv}$ entre fluência e dose equivalente.

Calibrado para um campo de nêutrons térmicos, passou-se para a determinação do comportamento do dosímetro no campo calibrado do $^{241}\text{AmBe}$, campo esse descrito no item 2.2.1. capítulo 2. Deve-se salientar que este campo tem componentes térmica, epitérmica e rápida que juntas determinam a fluência total e a dose equivalente total, mas que não são conhecidas isoladamente e que o dosímetro responde separadamente a cada uma dessas três componentes.

Por esse motivo, foram levantadas curvas de resposta do dosímetro como função do tempo de irradiação, e não como função da dose equivalente, para cada uma das três componentes da radiação neutrônica, figura 4.9. Os dados foram tomados a um metro de distância da fonte. Nessa posição a taxa de fluência e o espectro de nêutrons foram determinados pelos métodos descritos no capítulo 2.

Analisando-se a placa de CR-39 destinada à detecção de nêutrons térmicos e epitérmicos, observou-se resposta similar, dentro das incertezas, tanto para o pedaço da placa de CR-39 coberta por cádmio quanto para a descoberta. Isto levou à conclusão de que a resposta deste detector é devida exclusivamente aos nêutrons epitérmicos o que está de acordo com o fato de ser de nêutrons predominantemente rápidos o campo produzido pela fonte de $^{241}\text{AmBe}$.

Figura 4.9 - Curva de resposta do dosímetro a nêutrons rápidos e epitérmicos em função do tempo de irradiação no campo calibrado da fonte de $^{241}\text{AmBe}$.

Para se estabelecer a curva de resposta em função da dose equivalente devida a nêutrons rápidos e epitérmicos foi necessário utilizar o espectro do $^{241}\text{AmBe}$ obtido pela deconvolução das respostas das esferas de Bonner, descrito no capítulo 2.

Como mencionado, o espectro deconvoluído fornece as fluências de nêutrons e as respectivas doses absorvidas para as 31 faixas de energia em que foram divididos os nêutrons, variando de $2,1 \times 10^{-1} \text{ eV}$ a $3,1 \times 10^2 \text{ MeV}$.

A multiplicação da dose absorvida pelo respectivo fator de ponderação da radiação para a energia do nêutron correspondente leva à determinação da dose equivalente para cada uma dessas 31 faixas de energia.

Considerando-se também o fato das respostas do CR-39 a nêutrons rápidos serem independentes das respostas a nêutrons epitérmicos, dividiu-se o espectro do $^{241}\text{AmBe}$ em duas regiões, usando o valor de 340 keV como limite entre o que foi chamado de nêutron epitérmico e rápido. Integrando-se as taxas de dose equivalente dessas duas regiões, obtiveram-se os valores $8,00 \times 10^{-7} \text{ mSv s}^{-1}$ como taxa de dose equivalente correspondente aos nêutrons epitérmicos e $5,36 \times 10^{-5} \text{ mSv s}^{-1}$ para nêutrons rápidos.

Considerando-se a seguir as taxas de dose equivalente citadas acima e os tempos de irradiação assinalados na figura 4.9, calcularam-se as curvas de resposta do dosímetro em função da dose equivalente para nêutrons rápidos e epitérmicos como mostram as figuras 4.10 e 4.11 a seguir.

Figura 4.10 - Curva de resposta do dosímetro em função da dose equivalente devida a nêutrons epitérmicos, associada à fonte de $^{241}\text{AmBe}$.

Figura 4.11 - Curva de resposta do dosímetro em função da dose equivalente devida a nêutrons rápidos, associada à fonte de ²⁴¹AmBe

4.5. Sensibilidade em Dose Equivalente do Dosímetro

A análise realizada nas seções anteriores permitiu estabelecer as características fundamentais do dosímetro elaborado neste trabalho. Determinou-se a faixa de fluências em que o dosímetro pode ser utilizado sem que ocorra a saturação na resposta do CR-39 e também as curvas de resposta do dosímetro em função da dose equivalente recebida.

Cabe ainda especificar a sensibilidade do dosímetro entendida aqui como a resposta do dosímetro por unidade de dose equivalente recebida. Para isso basta levar em consideração os parâmetros que ajustam as retas das figuras 4.8, 4.10 e 4.11.

A tabela 4.1 abaixo indica os valores de sensibilidade determinados e as respectivas doses equivalentes mínimas recomendáveis para que haja detecção confiável.

Nêutrons	Sensibilidade * (traços $\text{cm}^{-2} \text{ mSv}^{-1}$)	Dose Equivalente Mínima Detectável ** (mSv)
Térmico	$(14,56 \pm 0,86) \cdot 10^3$	0,002
Epitérmicos	$(9,3 \pm 2,8) \cdot 10^2$	0,04
Rápidos	(26 ± 4)	1

* coeficientes angulares das retas de calibração em dose equivalente

** dose relativa a um número de traços igual a duas vezes o desvio padrão dos valores médios do BG encontrado, de acordo com critério adotado por Piesh *et al*⁽⁴⁸⁾

Tabela 4.1 - Valores de sensibilidade e de dose equivalente mínima detectável para o dosímetro elaborado neste trabalho, determinados para nêutrons térmicos, epitérmicos e rápidos.

4.6. Discussão e Conclusões

O dosímetro pessoal concebido, baseado no polímero CR-39 tipo PM355 fabricado pela Pershore Mouldings, submetido à técnica de revelação eletroquímica desenvolvida neste trabalho mostrou-se eficaz quanto à discriminação das componentes de energia térmica, epitérmica e rápida de um campo neutrônico. Lembre-se o fato de ser o CR-39 insensível à radiação gama.

Observou-se que especial cuidado deve ser tomado quanto ao ruído de fundo apresentado pelos detectores, que mostrou-se dependente da face e provavelmente da placa de CR-39 utilizada.

A calibração do dosímetro foi realizada no campo de uma fonte de $^{241}\text{AmBe}$ calibrada, com doses equivalentes entre 0,20 mSv e 0,60 mSv para nêutrons térmicos, entre 0,080 mSv e 0,20 mSv para nêutrons epitérmicos e entre 3,0 mSv e 12 mSv para nêutrons rápidos. Esses valores foram calculados a partir do espectro deconvoluído do $^{241}\text{AmBe}$.

O resumo das características determinadas para o dosímetro pessoal desenvolvido neste trabalho encontram-se na tabela 4.2 .

Os valores superiores dessas faixas de dose equivalente, 0,60 mSv para nêutrons térmicos e epitérmicos e 12 mSv para nêutrons rápidos, limitam também o uso do dosímetro por corresponderem à região onde ocorre a saturação do detector.

As doses mínimas detectáveis foram estimadas a partir das curvas de calibração obtidas, correspondendo à dose relativa a um número de traços igual a duas vezes o desvio padrão dos valores médios do ruído de fundo encontrado. Esses valores de dose correspondem a 0,002 mSv para nêutrons térmicos, 0,04 mSv para nêutrons epitérmicos e 1 mSv para nêutrons rápidos.

Esse critério de avaliação da dose mínima é o adotado por Piesch *et al*⁽⁴⁸⁾ que aponta valores entre 0,04 e 0,8 mSv para dose mínima detectável. O mesmo trabalho relata valores de doses máximas de 4,5 mSv para a revelação eletroquímica e 45 mSv para a revelação química combinada com a eletroquímica, estabelecidos a partir da análise dos resultados obtidos por vários laboratórios que participaram de intercomparações internacionais.

Em recente artigo de Griffith⁽¹²⁾ é feito um levantamento das técnicas de dosimetria pessoal para nêutrons que estão sendo utilizadas. Tais técnicas apontam limites inferiores de dose detectáveis entre 0,02 e 0,3 mSv e superiores a 50 mSv quando utilizam o CR-39 como detector de nêutrons.

Energia dos Nêutrons	Térmicos	Epitérmicos	Rápidos
Sensibilidade (traços neutron^{-1}) (traços $\text{cm}^{-2} \text{ mSv}^{-1}$)	$(4,8 \pm 0,3)10^{-4}$ $(1,46 \pm 0,09)10^4$	$(2,2 \pm 0,4)10^{-4}$ $(9 \pm 3)10^2$	$(1,8 \pm 0,3)10^{-5}$ (26 ± 4)
Dose mínima detectável (mSv)	0,002	0,04	1
Fluência mínima detectável (cm^{-2})	$7,0 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^6$
Dose máxima detectável (mSv)	0,6	8*	12
Fluência máxima (cm^{-2})	$1,7 \cdot 10^7$	$4,0 \cdot 10^7^*$	$2,0 \cdot 10^7$
Densidade máxima de traços (traços cm^{-2})	$9,0 \cdot 10^3$	$9,0 \cdot 10^3$	$3,6 \cdot 10^2$
BG (traços cm^{-2}) face 1 face 2	(36 ± 9) (98 ± 17)	(36 ± 9) (98 ± 17)	(101 ± 13) (270 ± 18)
Diâmetro médio dos traços (μm)	35	35	81

* Valores estimados a partir da densidade máxima de traços, considerada igual à dos nêutrons térmicos.

Tabela 4.2 - Resumo das propriedades dosimétricas do dosímetro elaborado baseado na utilização do CR-39 tipo PM355, produzido pela Pershore Mouldings. As condições de revelação eletroquímica foram: solução 6N de KOH a 59°C: frequência de 2,0 kHz: tensão de 1,0 kV_{pp}; revelação de 3 horas para detecção de nêutrons térmicos e de 6 horas para nêutrons rápidos.

Nesses trabalhos salienta-se que a dose mínima detectável depende principalmente do número de traços correspondentes ao ruído de fundo e do respectivo desvio padrão associado que são função da qualidade de produção do plástico, das condições de armazenamento, do tempo decorrido entre a produção e o uso do CR-39 e dos parâmetros de revelação empregados.

É importante salientar que na literatura não se encontra descrição de um dosímetro semelhante ao desenvolvido neste trabalho, restringindo-se a maioria deles à detecção de nêutrons rápidos. Além disso o espectro de energia normalmente utilizado corresponde ao do ^{252}Cf e não ao do $^{241}\text{AmBe}$ empregado aqui.

No entanto, o trabalho de Padilha⁽³⁴⁾ que detectou nêutrons térmicos com o uso de conversores (n,α) junto ao CR-39, possibilita uma comparação mais adequada dos resultados obtidos. Nesse trabalho é indicado para nêutrons térmicos os valores 0,0015 mSv para a dose mínima e 1,1 mSv para a dose máxima detectáveis, enquanto que neste trabalho foram obtidos 0,002 mSv e 0,6 mSv respectivamente.

O mesmo trabalho indica, para nêutrons rápidos, 0,3 mSv e 13 mSv para as doses mínima e máxima detectáveis. Esses resultados são parecidos com os encontrados neste trabalho, havendo maior diferença quanto à dose mínima detectável.

Com relação à possibilidade de emprego do dosímetro pessoal desenvolvido neste trabalho, deve-se levar em conta os valores de doses ocupacionais permissíveis recomendadas pelo ICRP 60⁽⁵⁾, tabela 1.2. capítulo 1, que determinam uma dose máxima anual de 20 mSv o que para um serviço de monitoração pessoal implica na necessidade de registro de doses mensais acima de 0,17 mSv, como discutido no item 1.3. capítulo 1.

Se ainda se considerar que 50% da dose equivalente originada num campo neutrônico é devida à radiação gama⁽⁷⁾, os valores de dose referidos acima devem ser reduzidos à metade em se tratando da monitoração exclusiva de nêutrons.

Tendo em vista as implicações das tais recomendações do ICRP-60, pode-se concluir que o dosímetro pessoal elaborado apresenta a sensibilidade necessária no caso da monitoração pessoal de nêutrons térmicos e epitérmicos, mas que exigiria tempos de integração de doses superiores à mensal no caso da monitoração de nêutrons rápidos.

CAPÍTULO 5

RESUMO E CONCLUSÕES FINAIS

5.1. Sala de Calibração

Com o final deste trabalho, o Laboratório de Dosimetria do IFUSP passa a contar com uma sala dimensionada para irradiações com nêutrons, especialmente projetada e construída para esse fim, onde se pode proceder à calibração de monitores desse tipo de radiação.

Nesta sala encontra-se instalado um sistema de irradiação composto por um irradiador, um banco ótico para posicionamento e suporte de detectores e um sistema de alinhamento que garante um posicionamento preciso dos mesmos. Além disso o sistema permite o armazenamento adequado de até cinco fontes radioativas.

A fonte calibrada de $^{241}\text{AmBe}$ de 185 GBq permite irradiações com taxas de dose equivalente que variam entre 9 nSv s^{-1} e $0,5 \mu\text{Sv s}^{-1}$, estando dentro dos valores recomendados⁽¹³⁾ para instalações com finalidades de proteção radiológica (3 nSv s^{-1} e $10 \mu\text{Sv s}^{-1}$). No arranjo elaborado para irradiação com nêutrons térmicos, com fluxo calibrado, a taxa de dose utilizada é de 50 nSv s^{-1} .

Pretende-se, num futuro próximo, instalar mais uma ou duas fontes no sistema o que permitirá alargar a faixa de taxas de dose equivalente disponível para calibração. Este trabalho, pioneiro no gênero no país norteará as futuras calibrações do sistema de irradiação.

5.2. Procedimentos de Calibração

O uso do detector de esferas de Bonner no sistema de irradiação construído permitiu o estabelecimento de um procedimento de calibração para monitores de nêutrons⁽³¹⁾, tendo por base as recomendações propostas por normas internacionais⁽¹³⁾.

A contribuição da radiação espalhada na resposta desses detectores na distância unitária de calibração mostrou-se menor do que 40%, a não ser no caso do detector descoberto. Isto está de acordo com o recomendado⁽¹³⁾, significando que as dimensões da sala de irradiação são apropriadas para sua finalidade.

Os valores obtidos para as constantes características fonte-detector e para as respostas à fluência livre, tabela 2.2. capítulo 2, pelos três métodos empregados são equivalentes. No entanto, tendo em vista as dimensões da sala, o tipo de fonte de nêutrons empregada e os detectores utilizados, incluindo aí o uso de monitores individuais em fantasmas, é recomendado⁽¹³⁾ o uso do método semi-empírico como procedimento de calibração.

A deconvolução do espectro de nêutrons, a partir dos parâmetros de calibração obtidos para o detector de esferas de Bonner, determinou um espectro para a fonte de AmBe calibrada, com valores de taxa de fluência, taxa de dose equivalente e energia média, que correspondeu satisfatoriamente aos valores calculados esperados, vide tabela 2.3 capítulo 2.

A deconvolução do espectro de nêutrons obtida pelo uso do código computacional BUNKI possibilita a utilização do detector de esferas de Bonner como espectrômetro em campos neutrônicos com espectros contínuos desconhecidos.

Cumprir lembrar que o conhecimento do espectro de nêutrons é extremamente necessário quando se deseja realizar uma dosimetria, tanto de área como pessoal, pois a sensibilidade dos dosímetros, bem como do corpo humano é função tanto da fluência quanto da energia dos nêutrons.

5.3. O Sistema de Revelação Eletroquímica e Parâmetros de Revelação

O sistema de revelação eletroquímica é constituído por uma câmara de revelação que comporta cinco detectores CR-39, figuras 3.3 e 3.4 capítulo 3, uma fonte de alta tensão e alta frequência, figura 3.5 capítulo 3, ambas projetadas e construídas como parte deste trabalho, e um controlador de temperatura.

As células constituintes da câmara de revelação apresentam curvas de aquecimento defasadas no tempo, figura 3.8 capítulo 3. Todavia, um pré aquecimento da mesma e das soluções reveladora e condutora permitiu um tratamento térmico similar e reproduzível dos polímeros durante o processo de revelação.

As características da fonte de alta tensão e alta frequência determinaram seu uso exclusivo em altas frequências e mostraram-se confiáveis e reproduzíveis em todas as revelações realizadas.

Os parâmetros de revelação escolhidos foram os seguintes:

- a) solução de KOH 6N para a face do CR-39 revelada;
- b) solução de KOH 0,25 N para a face do CR-39 não revelada;
- c) 59 °C para a temperatura de revelação;
- d) 1,0 kV pico a pico para a tensão aplicada entre os eletrodos da câmara;
- e) frequência de 2,0 kHz;
- f) três horas de revelação para detecção de nêutrons térmicos e epitérmicos;
- g) seis horas de revelação para detecção de nêutrons rápidos.

5.4. Conclusões quanto às Propriedades Dosimétricas do Dosímetro Elaborado

O dosímetro pessoal concebido submetido à técnica de revelação eletroquímica desenvolvida neste trabalho mostrou-se eficaz quanto à discriminação das componentes de energia térmica, epitérmica e rápida de um campo neutrônico.

Observou-se que especial cuidado deve ser tomado quanto ao ruído de fundo apresentado pelos detectores, que mostrou-se dependente da face e provavelmente da placa de CR-39 utilizada.

A calibração do dosímetro foi realizada no campo de uma fonte calibrada de $^{241}\text{AmBe}$, com doses equivalentes entre 0,20 mSv e 0,60 mSv para nêutrons térmicos, entre 0,080 mSv e 0,20 mSv para nêutrons epitérmicos e entre 3,0 mSv e 12 mSv para nêutrons rápidos. Esses valores foram calculados a partir do espectro deconvoluído do $^{241}\text{AmBe}$.

A tabela 4.2 capítulo 4 apresenta todos os parâmetros obtidos que caracterizam o dosímetro elaborado quanto às grandezas físicas de interesse.

Tendo em vista as implicações das recomendações do ICRP-60, pode-se concluir que o dosímetro pessoal elaborado neste trabalho apresenta a sensibilidade necessária no caso da monitoração de nêutrons térmicos e epitérmicos, mas que exigiria tempos de integração de doses superiores à mensal no caso da monitoração de nêutrons rápidos.

5.5. O Procedimento para a Monitoração Pessoal da Radiação Neutrônica

O procedimento proposto para se realizar a dosimetria de nêutrons é baseado no uso conjugado do dosímetro pessoal elaborado com o detector de esferas de Bonner enquanto dosímetro de área.

É sabido que o CR-39 é energético dependente, podendo-se encontrar na literatura muitos trabalhos onde curvas de dependência energética foram determinadas⁽³³⁾⁽³⁹⁾⁽⁴⁷⁾⁽⁴⁸⁾⁽⁴⁹⁾⁽⁵⁰⁾⁽⁵¹⁾, curvas essas que são função dos procedimentos de revelação do polímero e dos materiais conversores empregados. Ocorre que neste trabalho não houve a determinação da curva de dependência energética do dosímetro pessoal elaborado e por isso, há a necessidade e que ele seja utilizado num campo neutrônico com espectro conhecido.

O detector de esferas de Bonner calibrado deve ser empregado na determinação do espectro e da fluência do campo de nêutrons a ser monitorado.

O dosímetro elaborado deve ser então irradiado na posição onde o espectro e a taxa de fluência foram determinados a fim de se estabelecer a relação existente entre a resposta e a dose equivalente para esse campo específico. Feito isso, o dosímetro pode ser utilizado como dosímetro pessoal ou mesmo como dosímetro de área para monitoração do local de trabalho.

Deve-se observar que a calibração do dosímetro no campo de nêutrons térmicos realizada neste trabalho é válida para qualquer campo neutrônico que possua esta componente.

No caso de serem monitorados campos neutrônicos cujos espectros sejam similares ao do $^{241}\text{AmBe}$ como são os casos de diversas fontes radioativas baseadas em reações do tipo (α, n) , a calibração realizada neste trabalho possibilita o estabelecimento da relação desejada entre a resposta do dosímetro e a dose equivalente.

5.6. Sugestões para Futuros Trabalhos

O prosseguimento natural do projeto passa pela dosimetria em campos distintos daquele do $^{241}\text{AmBe}$. Dentre eles, podem-se citar o campo do ^{252}Cf , com espectro contínuo de fissão similar ao de um reator nuclear, e o campo neutrônico existente nas salas de aceleradores de partículas hospitalares que não são ainda monitorados no Brasil.

O CR-39 tem resposta dependente do ângulo de incidência dos nêutrons⁽⁴⁹⁾⁽⁵²⁾⁽⁵³⁾. A caracterização da dependência angular da resposta do dosímetro desenvolvido neste trabalho faz parte do projeto de aprimoramento do mesmo.

A variação dos parâmetros de revelação, bem como uma possível combinação entre revelação química e eletroquímica poderão estender as faixas de aplicabilidade do dosímetro e deverão ser estudadas.

O levantamento da curva de dependência energética do dosímetro também faz parte da proposta de aprimoramento deste trabalho, o que só poderá ser feito em laboratórios de pesquisa no exterior.

O conhecimento de tal dependência certamente permitirá o cálculo dos fatores que relacionarão a calibração do dosímetro no campo de fontes radioativas ($^{241}\text{AmBe}$ e ^{252}Cf) com a que deverá ser utilizada no campo de radiação em que o trabalhador ficará exposto.

Os resultados da literatura e referidos aqui indicam que é possível aumentar a sensibilidade do dosímetro elaborado. Para isso, é necessário tomar cuidados relativos à origem, manipulação e armazenamento do CR-39 a ser utilizado.

Também os códigos computacionais que possibilitam a deconvolução do espectro de nêutrons a partir das respostas do espectrômetro de Bonner merecem atenção visando o aprimoramento dos mesmos.

Cumprindo ainda lembrar que o espectrômetro de nêutrons utilizado só permite a medida do espectro em campos contínuos de nêutrons. Interessante seria substituir o detector do mesmo por outro que pudesse ser usado em campos pulsados como é o caso dos aceleradores lineares empregados nos tratamentos radioterápicos. O dosímetro pessoal elaborado permite a medida nos dois tipos de campos neutrônicos.

Seria também interessante se se trocasse a matriz de ^6LiF por placas conversoras tradicionais que empregam ^6Li ou ^{10}B como conversores (n, α). Tal troca tornaria o dosímetro mais econômico e portanto com maiores possibilidades de aplicação na dosimetria pessoal.

APÊNDICE

ANÁLISE QUALITATIVA DA INTERAÇÃO DE NÊUTRONS COM A MATÉRIA

Dentre os processos de interação dos nêutrons com o meio material distinguem-se processos de espalhamento e de absorção que resultam em recuo dos núcleos alvo, nêutrons espalhados, partículas carregadas aceleradas e raios gama.

Tais processos são quantificados pelas respectivas secções de choque de interação que são dependentes não só da energia dos nêutrons, mas também do tipo de núcleo atingido.

A.1. Secção de Choque

Se n nêutrons por unidade de volume movem-se com velocidade v em direção a N núcleos alvo, a taxa de interação, r , será dada pela seguinte relação⁽⁵⁴⁾⁽⁵⁵⁾:

$$r = \sigma n v N \quad [A.1]$$

O produto nv é o fluxo de nêutrons e σ , denominada secção de choque, relaciona o número de interações ocorridas por unidade de tempo com o fluxo de nêutrons. A secção de choque tem unidade de área, sendo em geral medida em barns (1 barn corresponde a 10^{-24} cm^2).

Há uma secção de choque finita para cada tipo de interação nuclear possível e esta tem forte dependência com a energia dos nêutrons. Na região de alta energia o caráter de partícula predomina e pode-se imaginar uma interação com um núcleo como se este fosse uma esfera de raio definido. Para nêutrons de baixa energia o aspecto ondulatório predomina e a interação passa a ocorrer com um conjunto de núcleos dependendo inclusive do estado físico do meio⁽¹⁸⁾⁽⁵⁴⁾.

A.2. Classificação das Reações com Nêutrons

A.2.1. Reações de Núcleo Composto

Um nêutron incidente une-se ao núcleo alvo formando um núcleo composto excitado⁽¹⁸⁾⁽⁵⁴⁾⁽⁵⁶⁾⁽⁵⁷⁾, cuja energia em excesso corresponde à soma da energia cinética com a energia de ligação do nêutron capturado. A secção de choque para formação de um núcleo composto apresenta picos de ressonância, para energias coincidentes àquelas dos estados ligados dos nucleons de um núcleo composto. Se as ressonâncias são muito próximas, a secção de choque para formação de um núcleo composto pode variar continuamente.

A cada um desses estados compostos que são níveis discretos de energia, está associado uma largura em energia, Γ , relacionada com seu tempo de vida, τ , pelo princípio de incerteza de Heisenberg,

$$\Gamma \cdot \tau = \hbar \quad [A.2]$$

onde $\hbar$ é a constante de Planck, h , dividida por 2π . O inverso do tempo de vida fornece a probabilidade de transição do estado composto considerado.

O decaimento de um núcleo composto pode se dar de diversas maneiras⁽¹⁸⁾:

- 1 - Um nêutron com a mesma energia que o neutron capturado (no referencial do centro de massa⁽¹⁹⁾⁽⁵⁸⁾) é emitido. Esse processo é chamado espalhamento elástico ou espalhamento de ressonância, (n,n) .
- 2 - A energia de excitação de um núcleo composto é liberada por emissão de um ou vários raios gama. Esse fenômeno é chamado captura radioativa ou processo (n,γ) . O núcleo resultante é em geral instável, emitindo radiação β .
- 3 - Para energias de excitação suficientemente altas, o núcleo composto emite partículas carregadas ou dois nêutrons (reações (n,α) , (n,p) , (n,np) , $(n,2n)$).
- 4 - Quando um nêutron com energia cinética menor que a do neutron incidente é emitido, o processo é chamado espalhamento inelástico. O núcleo residual permanece excitado com subsequente decaimento por emissão gama.
- 5 - Ocorre a fissão de um núcleo pesado.

A.2.2. Reações Diretas

Reações nucleares podem ocorrer diretamente sem a formação de um núcleo composto⁽¹⁸⁾. Para a faixa de energia dos nêutrons considerada neste trabalho, a reação direta mais importante é o espalhamento elástico direto, sendo identificado por espalhamento potencial, isto é, o neutron é espalhado por um potencial nuclear (real⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾⁽⁵⁶⁾⁽⁵⁸⁾) que representa a média de todas as interações com os outros nucleons.

A secção de choque total de um nuclídeo tem uma componente que varia lentamente, devida ao espalhamento potencial, e uma componente devida às reações de núcleo composto apresentando máximos nas energias de ressonância.

A.3. Classificação dos Nêutrons em Intervalos de Energia

A.3.1. Nêutrons Lentos e Nêutrons Térmicos

São nêutrons com energia menor que 1 keV. De especial interesse, são os nêutrons com energias da ordem de 10^{-2} eV que correspondem aos nêutrons que estão em equilíbrio térmico com o meio em que se encontram inseridos. Tais nêutrons, chamados nêutrons térmicos obedecem à distribuição de Maxwell para velocidades e energias.

A forma mais importante de interação de nêutrons térmicos com a matéria é a captura radioativa, embora ocorram reações inelásticas muito importantes de amplo emprego na detecção de nêutrons, como as reações $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ e $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$.

A.3.2. Nêutrons Intermediários

A região de energia intermediária é aqui definida como sendo aquela que estende-se de 1 keV a 500 keV. A secção de choque para estas energias apresenta picos de ressonância e por esta razão também se emprega o termo nêutrons de ressonância. Nêutrons intermediários são obtidos por moderação de energia de nêutrons rápidos por colisões elásticas num meio moderador.

O processo de moderação determina um fluxo de nêutrons que é inversamente proporcional à energia, ou seja, apresenta um espectro dE/E ⁽⁵⁵⁾. Para nêutrons intermediários, também ocorrem captura radioativa e espalhamento inelástico.

A.3.3. Nêutrons Rápidos

Nêutrons rápidos são aqueles que têm energia superior a 500 keV. A interação predominante é o espalhamento potencial e a secção de choque varia lentamente, embora ressonâncias possam ocorrer.

Nêutrons com energia superior a 10 MeV devem ser considerados relativísticos. Suas energias excedem as energias de ligação dos núcleons e complexas reações nucleares como fragmentação tornam-se importantes. Espalhamento potencial também ocorre, sendo fortemente assimétrico no referencial do centro da massa⁽⁵⁵⁾.

A.4. Distinção entre Núcleos Atômicos

A distinção entre núcleos é feita considerando-se seus números de núcleons, ou seja, seus números de massa (A) visto que deles dependem a separação média entre as energias de ressonância. Faz-se distinção entre núcleos leves ($A < 25$), intermediários ($25 < A < 80$) e pesados ($A > 80$).

Os tipos de interação, dependentes das energias dos nêutrons e das massas atômicas dos núcleos, estão esquematizados na tabela A.1.

	Nêutrons Lentos $E < 1\text{keV}$	Nêutrons Intermediários $1\text{keV} < E < 500\text{keV}$	Nêutrons Rápidos $E > 500\text{keV}$
Núcleos Leves $A < 25$		<p>[-----] separação da ressonâncias: 0,1 - 1 MeV</p> <p>[-----] espalhamento potencial</p> <p>[-----] espalhamento de ressonância: reações (n,pn), (n,α), (n,n), e (n,2n)</p>	
Núcleos Intermediários $25 < A < 80$		<p>[-----][-----][-----] separação das ressonâncias: 1 - 100keV sobreposição de ressonâncias contínuo</p> <p>[-----] espalhamento de ressonância, captura radioativa</p> <p>[-----] espalhamento potencial</p> <p>[-----] espalhamento inelástico, reações: (n,pn), (n,α) e (n,2n)</p>	
Núcleos Pesados $A > 80$		<p>[-----][-----][-----] separação de ressonâncias 1 - 100eV sobreposição de ressonâncias contínuo</p> <p>[-----] captura radioativa</p> <p>[-----] espalhamento inelástico: reações (n ,2n)</p>	

Tabela A.1 - Representação esquemática da interação dos nêutrons como função das energias dos mesmos e do tipo de núcleo alvo, adaptado de Berkurtz e Wirtz⁽¹⁸⁾.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Harvey, J. R. - *Neutron Exposure; Sources and Radiological Significance*. Radiat. Prot. Dosim. **10**(1-4), 17-22 (1985).
- (2) Schraube, H. - *Sources of Neutrons, Characteristic Fields and Spectra*. Radiat. Prot. Dosim. **20**(1-2), 9-17 (1987).
- (3) Fratin, L. - *Dosímetro Termoluminescente Sólido de Tetraborato de Sódio e Fluorita Brasileira Sensível a Nêutrons Térmicos*. Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Física da Universidade de São Paulo (1988).
- (4) Cruz, M. T. and Fratin, L. - *Natural CaF_2 and $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ Thermoluminescence Detector Sensitive to Thermal Neutrons*. Radiat. Prot. Dosim. **33**(1-4), 295-298 (1990).
- (5) International Commission on Radiological Protection. - *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Publicação 60 (Oxford: Pergamon) (1991).
- (6) International Atomic Energy Agency. - *Basic Safety Standards: Second Draft - International Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources*. FAO/IAEA/ILO/NEA/(OECD)/PAHO/WHO (1992).
- (7) Portal, G. and Dietze, G. - *Implications of New ICRP and ICRU Recommendations for Neutron Dosimetry*. Radiat. Prot. Dosim. **44**(1-4), 165-170 (1992).
- (8) International Commission on Radiological Protection. - *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Publicação 26 (Oxford: Pergamon) (1977).
- (9) Ing, H. and Piesh, E. - *Status of Neutron Dosimetry*. Radiat. Prot. Dosim. **10**, 5-15 (1985).
- (10) Griffith, R. V.; Hankins, D. E.; Gammage, R. B. and Tommasino, L. - *Recent Developments in Personnel Neutron Dosimeters - A Review*. Health Phys. **36**, 235-260 (1979).
- (11) Griffith, R. V. - *Review of the State of the Art in Personnel Neutron Dosimetry with Solid State Detectors*. Rad. Prot. Dosim. **23**(1-4), 155-160 (1988).
- (12) Griffith, R. V. - *Individual Neutron Monitoring - Needs for the Nineties*. Radiat. Prot. Dosim. **44**(1-4), 259-266 (1992).

- (13) Draft Standard Proposal. - *Procedures for Calibrating and Determining the Response of Neutron Measuring Devices Used for Radiation Protection*. ISO TC85/SC2/WG2/SG 3(B) (1989).
- (14) Geiger, K. W. and Hargrove, C. K. - *Neutron Spectrum of an $^{241}\text{Am-Be}(\alpha, n)$ Source*. Nucl. Physics **53**, 204-208 (1964).
- (15) Lorch, E. A. - *Neutron Spectra of Am/B, Am/Be, Am/F, Cm/Be, Pu/C and Cf Isotopic Neutron Sources*. Int. J. Appl. Radiat. Isot. **24**, 585-591 (1973).
- (16) De Pangher, J. and Tochilin, E. - *Neutron Sources*. In: Radiation Dosimetry Vol III 2^a ed. edited by Attix, F. H. and Tochilin, E.; Academic Press, New York and London, p. 309-350 (1969).
- (17) International Standard ISO 8529. - *Neutron Reference Radiations for Calibrating Neutron-Measuring Devices used for Radiation Protection Purposes and for Determining their Response as a Function of Energy* (1989).
- (18) Beckurts, K. H. and Wirtz, K. - *Neutron Physics*. Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg-New York (1964).
- (19) Kaplan, L. - *Física Nuclear*. 2^a ed. Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro (1978).
- (20) Tochilin, E. and Shumway, B. W. - *Dosimetry of Neutrons and Mixed $n+\gamma$ Fields*. In: Radiation Dosimetry Vol III 2^a ed. New York and London, p. 247-308 (1969).
- (21) Hunt, J. B. - *The Calibration of Neutron Sensitive Spherical Devices*. Radiat. Prot. Dosim. **8**(4), 239-251 (1984).
- (22) Schwartz, R. B. and Eisenhauer, C. M. - *Procedures for Calibrating Neutron Personnel Dosemeters*. NBS Special Publication 633 (National Bureau of Standards, Washington, DC) (1982).
- (23) Schwartz, R. B. - *Neutron Personnel Dosimetry*. NBS Special Publication 250-12 (National Bureau of Standards, Washington, DC) (1987).
- (24) Eisenhauer, C. M.; Hunt, J. B. and Schwartz, R. B. - *Calibration Techniques for Neutron Personal Dosimetry*. Radiat. Prot. Dosim. **10**(1-4), 43-57 (1985).
- (25) Bramblett, R. L.; Ewing, R. I. and Bonner T. W. - *A New Type of Neutron Spectrometer*. Nucl. Instrum. Methods **9**, 1-12 (1960).
- (26) Hunt, J. B. - *The Calibration and Use of Long Counters for the Accurate Measurement of Neutron Flux Density*. NPL Report RS5 (1976).

- (27) Awschalom, M. and Sanna, R. S. - *Applications of Bonner Sphere Detectors in Neutron Field Dosimetry*. Radiat. Prot. Dosim. **10**(1-4), 89-101 (1985).
- (28) Lowry, K. A. and Johnson, I. L. - *Modifications to Iterative Recursion Unfolding Algorithms and Computer Codes to Find More Appropriate Neutron Spectra*. NRL Memorandum Report 5340 (Naval Research Laboratory, Washington, DC) (1984).
- (29) Matzke, M. - *Estimation of Dose Equivalent from Reactions Rates of Bonner Spheres without using a Priori Fluence Information*. Radiat. Prot. Dosim. **23**(1-4), 297-300 (1988).
- (30) Alevra, A. V.; Siebert, B. R. L.; Aroua, A.; Buxerolle, M.; Grecescu, M.; Matzke, M.; Mourgues, M.; Perks, C. A.; Schraube, H.; Thomas, D. J. and Zaborowski, H. L. - *Unfolding Bonner-Sphere Data: A European Intercomparison of Computer Codes*. Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB-7.22-90-1 (1990).
- (31) Cruz, M. T. and Fratin, L. - *Establishment of a Procedure for Calibrating Neutron Monitors at the Physics Institute of University of São Paulo, Brazil*. Radiat. Prot. Dosim. **44**(1-4), 143-146 (1992).
- (32) Cross, W. G. - *Characteristics of Track Detectors for Personnel Neutron Dosimetry*. Nucl. Tracks **12**(1-6), 533-542 (1986).
- (33) Oliveira, W. A. - *Dosimetria de Nêutrons Rápidos Utilizando o Detector de Traços CR-39*. Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Física da Universidade de São Paulo (1991).
- (34) Padilha, M. C. - *Detecção de Nêutrons Utilizando CR-39*. Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo (1992).
- (35) Vilela, E. C. - *Detecção de Nêutrons Rápidos Utilizando Detectores Sólidos de Traços Nucleares*. Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo (1990).
- (36) Cartwright, B. G.; Shirk, E. K. and Price, P. B. - *A Nuclear-Track-Recording Polymer of Unique Sensitivity for Fast Neutron Dosimetry*. Nucl. Instr. Meth. **161**, 91-95 (1978).
- (37) Stejny, J. - *The Polymer Physics of CR-39 - The State of Understanding*. Radiat. Prot. Dosim. **20**(1-2), 31-36 (1987).
- (38) Al-Najjar, S. A. R.; Bull, R. K.; Durrani, S. A. - *Electrochemical Etching of CR-39 Plastic: Applications to Radiation Dosimetry*. Nucl. Tracks **3**, 169-183 (1979).
- (39) Bartlett, D. T. - *Ageing of and Environmental Effects on PADC (CR-39)*. Radiat. Prot. Dosim. **20**(1-2), 71-75 (1987).

- (40) Luszik-Bhadra, M.; Alberts, W. G. and Piesh, E. - *Neutron Energy Response and Background of Electrochemically Etched Nuclear Track Detectors: Study of Various Cr-39 Materials*. Radiat. Prot. Dosim. **32**(2), 99-103 (1990).
- (41) Tommasino, L. and Harrison, K. G. - *Damage Track Detectors for Neutron Dosimetry: I. Registration and Counting Methods*. Radiat. Prot. Dosim. **10**(1-4), 207-217 (1985).
- (42) Tommasino, L. and Harrison, K. G. - *Damage Track Detectors for Neutron Dosimetry: II Characteristics of Different Detection Systems*. Radiat. Prot. Dosim. **10**(1-4), 219-235 (1985).
- (43) Bödy, Z. - *Standard Monitor Reactions for Neutrons*. In: Handbook on nuclear Activation Data. IAEA Technical Reports series No. 273, (1987).
- (44) Texas Instruments Bulletin NO. DL-S 7312053, (1973).
- (45) Linear Data Book - 9.37. National Semiconductor (1982).
- (46) Sohrabi, M. and Shirazi, K. M. - *Optimization of Etchants for Electrochemical Etching of Tracks in Polycarbonate Neutron Personnel Dosimeters*. Nucl. Tracks **8**(1-4), 117-120 (1984).
- (47) Al Najjar, S. A. R.; Ninomiya, Y. and Piesh, E. - *Properties of Electrochemically Etched CR-39 Plastic for Fast Neutron Dosimetry*. Radiat. Prot. Dosim. **23**(1-4), 165-169 (1988).
- (48) Piesh, E.; Al-Najjar, S. A. R. and Ninomiya, K. - *Neutron Dosimetry with CR-39 Track Detectors using Electrochemical Etching: Recent Improvements, Dosimetric Characteristics and Aspects of Routine Application*. Radiat. Prot. Dosim. **27**, 215-230 (1989).
- (49) Cross, W. G.; Arneja, A. and Kim, J. L. - *The Neutron Energy and Angular Response of Electrochemically Etched CR-39 Dosimeters*. Radiat. Prot. Dosim. **20**(1-2) 49-55 (1987).
- (50) Al-Najjar, S. A. R. and Piesh, E. - *Further Investigations on Neutron Energy Response of CR-39 Detectors*. Radiat. Prot. Dosim. **20**(1-2), 57-61 (1987).
- (51) Oda, K.; Ito, M.; Yoneda, H.; Miyake, H.; Yamamoto J. and Tsuruta, T. - *Dose-equivalent Response CR-39 Track Detector for Personnel Neutron Dosimetry*. Nucl. Instrum. Methods. **B61**, 302-308 (1991).
- (52) Luszik-Bhadra, M.; Alberts, W. G.; Guldbakke S. and Kluge, H. - *Influence of the Configuration on the Angle Response of Track Etched Neutron Dosimeters*. Radiat. Prot. Dosim. **38**, 271-277 (1991).

- (53) Pitt, E.; Scharmann and Simmer, R. - *Angle and Energy Response to Fast Neutrons of CR-39 Covered with a Radiator*. Radiat. Prot. Dosim. **44**(1-4), 333-335 (1992).
- (54) Hughes, D. J. - *Neutros Cross Sections*. Pergamon Press, London (1957).
- (55) NBS Handbook 63 - *Protection Against Neutron Radiation up to 30 Million Electron Volts*. National Bureau of Standards, Washington (1957).
- (56) Hughes, D. J. - *Pile Neutron Research*. Addison-Wesley Publishing Co., Inc., Cambridge (1953).
- (57) Curis, L. F. - *Introduction to Neutron Physics*. D. Van Nostrand Co., Inc., (1959).
- (58) Evans, R. D. - *The Atomic Nucleus*. MacGraw-Hill Book Co., Inc., New York (1955).