

Cálculo dos Coeficientes de Auto-blindagem, Depressão de Fluxo e do Fator de Cádmiu para Medida do Fluxo Neutrônico Térmico do Reator IPEN/MB-01

André Luis Ferreira Marques*, Daniel Kao Sun Ting ** e Arlindo Gilson Mendonça**

*Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo
Av. Professor Lineu Prestes, 2242
Cidade Universitária, São Paulo, SP, Brasil - 05508-900

**Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, CNEN
Caixa Postal 11049 (Pinheiros)
05422-970, São Paulo, Brasil



COLEÇÃO PTC
DEVOLVER AO BALCÃO DE EMPRESTIMO

RESUMO

Dentro do programa experimental do Reator IPEN/MB-01, para qualificação de modelagens aplicáveis ao projeto neutrônico da Instalação Nuclear de Água Pressurizada (INAP) da Marinha do Brasil (MB), foi implementada a técnica de mapeamento de fluxo térmico com fios de ativação, sendo o ¹⁹⁷Au empregado junto com a técnica da Razão de Cádmiu. Os fatores de correção de Auto-Blindagem, Depressão de Fluxo e o Fator de Cádmiu necessitaram ser calculados com o programa ANISN, uma vez que não foram encontradas referências bibliográficas aplicáveis. Para a verificação de consistência, foram simulados casos que possuíam similaridade (benchmarks), podendo-se avaliar inclusive a energia de corte do Cádmiu.

INTRODUÇÃO

As medidas de fluxo e espectro de energia dos nêutrons por ativação são feitas através da contagem da radioatividade induzida em detectores de ativação, por meio da espectrometria da radiação ou da partícula por eles emitida (gama, beta etc.).

Nas técnicas de medidas e mapeamentos de fluxos de nêutrons, usando-se detectores de ativação (folhas, fios, discos etc.), leva-se em consideração a perturbação introduzida no campo a ser medido. Desta forma, deve-se considerar a relação entre a população de nêutrons existentes antes e depois da presença dos detectores, dependendo das características de cada um. Quanto menor for o detector, menor será esta perturbação.

Quando se deseja obter medidas absolutas do fluxo neutrônico, é importante conhecer os Fatores de Correção de fluxo. Em nosso trabalho, consideramos o Fator de Depressão de Fluxo e o Fator de Auto-Blindagem [1].

FATOR DE DEPRESSÃO DE FLUXO

O efeito de depressão de fluxo se deve ao fato do detector de ativação tomar um espaço anteriormente ocupado pelo meio moderador. Com isso, além do detector não permitir (no local) a mesma taxa de espalhamento, e a mesma moderação por decorrência, há a absorção de nêutrons, provocando uma depressão de fluxo neutrônico.

Desta forma, o detector pode ser considerado como

uma fonte negativa de nêutrons cuja intensidade é determinada pelo número total de nêutrons absorvidos por unidade de volume por segundo.

$$\text{Fator de Correção de Depressão de Fluxo} = \frac{\text{Fluxo Incid. na superf.mais ext.do fio}}{\text{Fluxo na região sem o fio}}$$

FATOR DE AUTO-BLINDAGEM

O efeito de auto-blindagem (self-shielding) se deve à atenuação do fluxo neutrônico das camadas mais externas do fio para as internas, provocando uma distribuição radial não homogênea do fluxo neutrônico no interior do detector. Isto causa uma diminuição na ativação do detector pela diminuição de fluxo [2].

$$\text{Fator de Correção de Autoblindagem} = \frac{\text{Fluxo Médio no Interior do Fio}}{\text{Fluxo Incid. na superf.mais ext. do fio}}$$

FATOR DE CÁDMIO

A ativação resultante da irradiação dos detectores é provocada simultaneamente pelos fluxos térmico, epitérmico e rápido.

Caso o fluxo a medir seja térmico, devemos adotar um procedimento complementar para que possamos

descontar a influência dos fluxos de nêutrons epitérmicos e rápidos.

O procedimento é chamado "cadmium-difference method" - método da diferença ou razão de Cádmiu. São feitas duas irradiações, cuja primeira consiste em se irradiar o detector (fio ou folha) coberto por Cádmiu, em espessura da ordem de 1.0 mm - 0.040 pol, e medir a atividade ali existente.

Em seguida, subtraímos a atividade obtida daquela existente no detector sem a cobertura de Cd (segunda irradiação). O Cádmiu é um absorvedor eficaz de nêutrons abaixo de uma determinada energia, convencionalmente aqui de E_c , deixando passar os nêutrons que tenham energia superior àquele valor (filtro "seletivo") [3].

O valor de E_c é conhecido como "effective cadmium cut-off energy" e depende da espessura das dimensões, dos formatos do material e de outros fatores. Para exemplificar, o valor de E_c é igual a 0.5 eV, caso tenhamos uma cobertura de Cd de 1mm de espessura e um fluxo isotrópico.

É importante salientar que o Cádmiu não é um filtro ideal de nêutrons térmicos. Alguma fração dos nêutrons epitérmicos é absorvida pelo próprio Cádmiu. Desta forma, a atividade de saturação epitérmica está menor do que deveria. Daí decorre a necessidade de considerar um fator que compense essa absorção.

Fator de Cádmiu -

Ativ. Epitérm. do Detector / Ativ. com Cobertura do Detector

METODOLOGIA DE CÁLCULO

Uma vez que as referências bibliográficas disponíveis não cobriam fielmente as nossas condições de contorno da campanha de medidas, ou seja: fluxo térmico, materiais envolvidos, temperatura do moderador etc., e que o levantamento experimental dos valores dos fatores de correção seria um processo demorado e oneroso, foi necessário estimar os referidos fatores por meio de cálculos.

Neste caso específico, partimos para a solução da Equação de Transporte de Nêutrons (ETN) por se tratar da forma mais precisa de resolvermos o nosso conjunto de problemas (estimativa do Fator de Cádmiu, dos Fatores de Correção de Autoblindagem e de Depressão de Fluxo), ao invés de utilizarmos a Teoria da Difusão de Nêutrons.

No que diz respeito ao aspecto espacial (x,y,z), no cálculo dos Fatores de Correção admitimos que seja suficiente a modelagem que utilize apenas a dimensão radial (unidimensional), em uma cota (z) significativa de nosso experimento, como por exemplo a posição mediana do comprimento ativo da vareta combustível.

Em nosso trabalho, a estratégia de emprego do programa ANISN para a estimativa dos coeficientes de perturbação de fluxo e do Fator de Cádmiu está sintetizada no seguinte conjunto de atividades:

A) Aplicar o programa para situações em que conheçamos valores dos Fatores de Correção e Fator de Cádmiu. Através da comparação entre resultados aqui obtidos e aqueles previamente divulgados (referências bibliográficas), poderemos avaliar se a modelagem e o emprego do ANISN estão validados;

B) Uma vez validada a modelagem, aplicar o programa para a configuração do núcleo *sem a introdução do detector*, considerando o moderador e as varetas combustíveis, que devem ser interpretadas como fontes de fissão. Com isto, estaremos obtendo o valor do fluxo do reator sem qualquer perturbação externa introduzida, servindo este valor de fluxo como referência;

C) Aplicar o programa para o caso da *introdução de fio como detector*, um para o diâmetro de 0.125 mm e outro para 0.25 mm. Estes valores servem para avaliar a perturbação introduzida pelos dois tipos de fios. Nesta condição, temos o fluxo *sem cobertura de Cádmiu*, como foi mencionado no desenvolvimento do método da Razão de Cádmiu, recebendo o detector o fluxo de todas as energias especificadas.

D) Aplicar o programa para a condição em que temos a cobertura de Cádmiu (0.0508 cm de espessura), tanto para o fio de 0.125 mm como para o de 0.25 mm, decorrendo disto o fluxo (atividade) **com cobertura de Cádmiu**. O detector recebe assim o fluxo com energia acima da energia de corte do Cd. Aplicar o programa, variando-se a espessura da cobertura de Cádmiu, de forma a termos a influência da cobertura de Cd sobre as medidas do fio, auxiliando a determinação do Fator de Cádmiu.

Para a montagem da célula computacional representativa, tomamos a região central do reator (coordenadas MN-1415) onde se posiciona o detector e a região circundante com quatro varetas combustíveis (com revestimento de aço e pastilhas de UO_2) e o moderador que ali se encontra.

Aplicamos a configuração bidimensional cilíndrica no ANISN, a qual é a que mais se aproxima das formas geométricas existentes em nosso problema. No caso do detector, da cobertura de Cádmiu e do moderador naquela região interna, estes podem ser representados em círculos concêntricos, que possuem raios geométricos retirados do desenho em escala real.

No entanto, é preciso estimarmos a quantidade de materiais que estarão posicionados nos setores circulares, concêntricos com o fio, e que, no entanto, estão posicionados distantes do detector, como é o caso das varetas combustíveis. É necessário distribuir os materiais em áreas especiais a começar pelo revestimento de aço.

O método aplicado para a determinação dos raios geométricos dos setores circulares foi o de ponderação pela área geométrica em relação a soma das áreas de todos os materiais presentes, cujo valor é de 5,50 cm². A área total do UO_2 é de 2.21 cm²; a do aço é de 0.80 cm² e a do moderador é de 2.49 cm². No caso específico do encamisamento, os dois setores circulares foram dimensionados com a metade da área ponderada respectivamente.

A célula básica é descrita como abaixo:

- de 0.0 cm a 6.25E-3 cm - **Ouro** (círculo com este raio para o fio de 0.125 mm; e 1.250E-3 cm para o fio de 0.250 mm). Foram selecionados 10 meshes.
- de 6.25E-3 a 5.705E-2 cm - **Cádmio** (setor circular com a mesma área da cobertura de Cádmio, que poderá variar conforme o estudo da influência da cobertura do Cd, pelo aumento de sua espessura). Foram selecionados 10 meshes.
- de 5.705E-2 a 5.70 E-1 cm - **Água** (setor circular com área igual à região entre as varetas combustíveis e a cobertura de Cádmio). Foram selecionados 10 meshes.
- de 5.70E-1 a 5.786 E-1 cm - **Aço**. Foram selecionados 10 meshes, para a área ponderada.
- de 5.786E-1 a 6.430E-1 cm - **UO₂**. Foram selecionados 5 meshes, para a área ponderada.
- de 6.430E-1 a 6.51E-1 cm - **Aço**. Foram selecionados 10 meshes, para a área ponderada.
- de 6.51E-1 a 1.24 cm - **Água** (setor circular que envolve a parte externa do conjunto, tendo sido colocado para garantir coerência de fluxo no interior da vareta combustível). Foram selecionados 10 meshes.

A figura 1 apresenta a distribuição espacial.

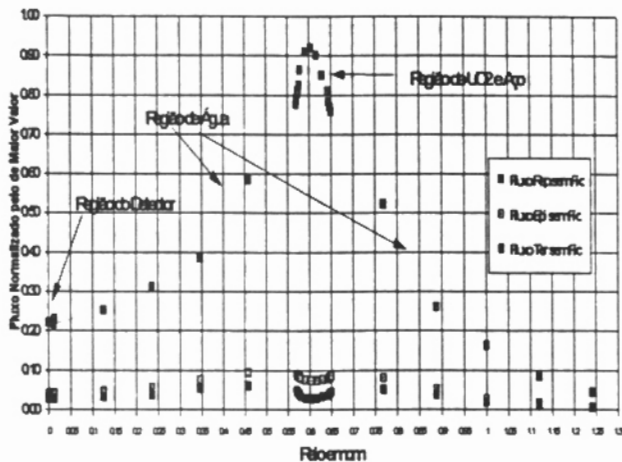


Figura 1 - Célula Computacional

A abcissa representa a posição radial em nossa célula, estando centrada no interior do fio. A ordenada é o fluxo relativo em relação ao valor de referência de fluxo atribuído nos dados de entrada do programa, que em nosso caso foi de 1 nêutron/cm².s. O valor máximo encontrado corresponde ao fluxo no interior da região correspondente às pastilhas de UO₂.

VALIDAÇÃO DA MODELAGEM

A primeira validação procedida foi com a energia de corte do Cádmio, tendo-se chegado à figura 2:

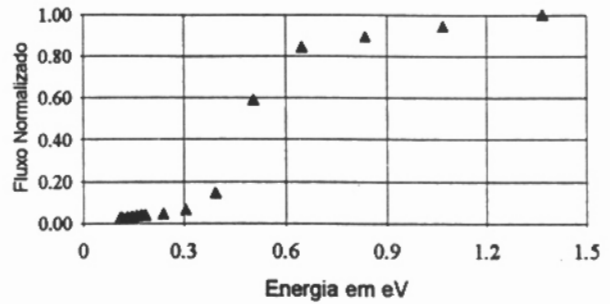


Figura 2 - Energia de Neutrons x Fluxo Normalizado

A conclusão que chegamos é que a Energia de Corte do Cádmio situa-se em uma faixa entre 0.45 e 0.7 eV, apreciando-se a figura 3.I, o que está de acordo com a referência bibliográfica [4].

A segunda validação foi feita com um fio de 0.125mm de diâmetro, para o caso monoenergético, tendo-se chegado à Figura 3:

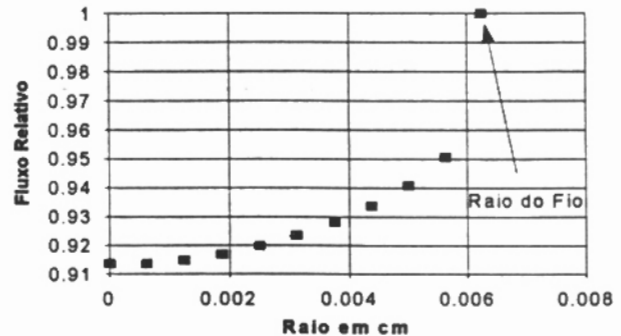


Figura 3 - Fio Nu 0.125 mm x Fluxo Relativo

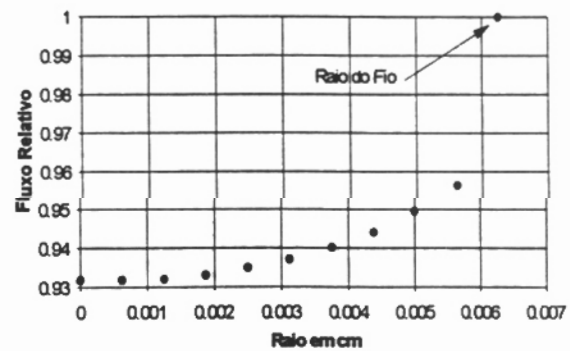


Figura 4 - Fio 0.125mm e Cd x Fluxo Relativo

Em ambos os casos, a auto-blindagem foi da ordem de grandeza de 7%, o que está coerente com a referência bibliográfica [1]. Com isso, concluímos que a presença da cobertura não influi no cálculo do fator de autoblindagem.

CÁLCULOS DOS FATORES

Aplicando-se a metodologia de cálculo validada a nossa situação, obtivemos as seguintes figuras:

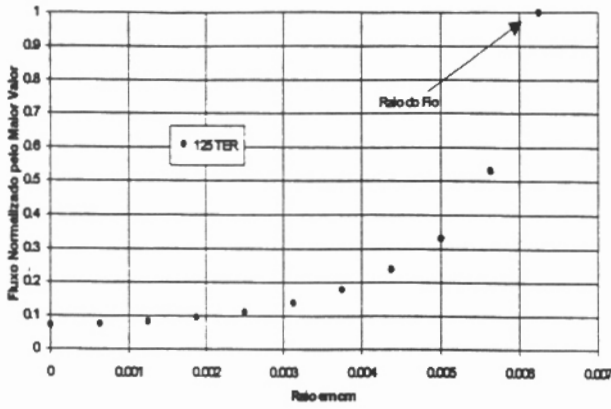


Figura 5 - Fluxo Térmico x Fio 0.125 mm

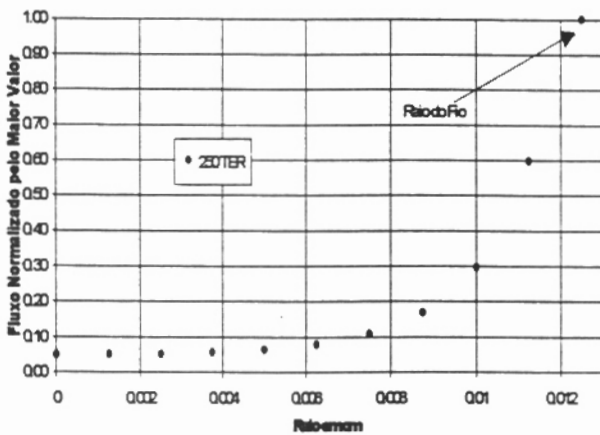


Figura 6 - Fluxo Térmico x Fio 0.250 mm

Para obtermos o Fator de Cádmiu, aplicaremos o procedimento abaixo, conforme descrito em [5]:

- Obtemos uma curva que possua nas abcissas valores decrescentes de espessura de cobertura de Cádmiu; e nas ordenadas o valor da atividade total (ou o fluxo total) obtido no centro do detector para cada uma das espessuras existentes nas abcissas;

- Extrapolamos o trecho da curva que apresenta inclinação quase constante até a origem. Este trecho quase constante equivale à situação onde qualquer aumento na espessura da cobertura de Cádmiu não provoca contribuição significativa no fluxo incidente no detector (retenção completa dos nêutrons epitérmicos na cobertura de Cádmiu). O ponto na origem corresponde à atividade total (ou fluxo) devida aos nêutrons epitérmicos em um detector sem cobertura.;

- Selecionamos a espessura de nosso interesse, que é de 0.0508 cm, obtendo-se o respectivo valor de atividade total (ou fluxo total), o que corresponde à atividade (fluxo) devida aos nêutrons epitérmicos que não foram retidos na cobertura de Cádmiu;

- Fazemos a razão entre o primeiro e o segundo valor, obtendo-se o Fator de Cádmiu.

Para o fio com 0.125 mm de diâmetro, obtivemos o Fcd como 1.32 e para o fio com 0.250 mm diâmetro o Fcd é de 1.33.

As figuras 7 e 8 apresentam o perfil da diminuição do fluxo no interior do fio, quando se promove o aumento da espessura da cobertura de Cádmiu.

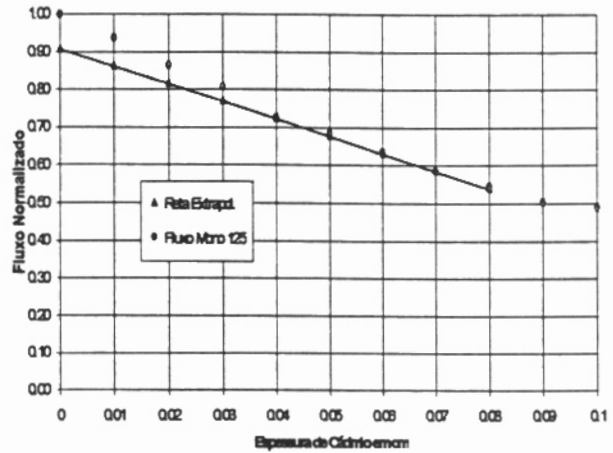


Figura 7 - Fator de Cádmiu Fio 0.125mm

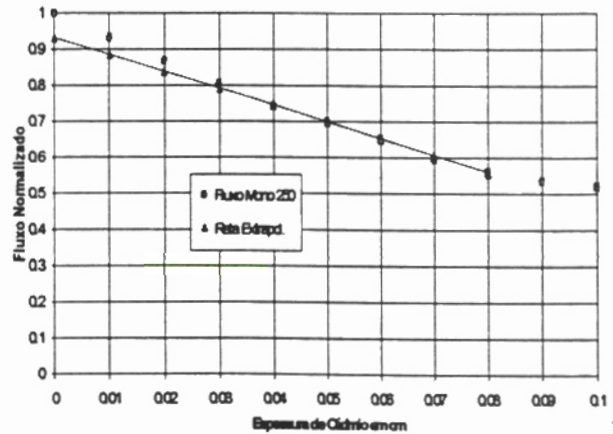


Figura 8 - Fator de Cádmiu Fio 0.250mm

CONCLUSÕES

Comparando-se os resultados obtidos para o caso monoenergético com as referências bibliográficas [1,2] obtivemos a seguinte tabela:

Tabela 1 - Fatores de Correção (Monoenergéticos)

Diam.	Ref. Biblio.		ANISN	
	Depr.Flux.	Autoblind	Depr.Flux.	Autoblind
0.125	0.975	0.980	0.954	0.930
0.250	—	0.950	0.896	0.876

A conclusão que podemos chegar é que a sistemática de utilização do ANISN produz resultados

coerentes com as referências bibliográficas. Apresenta-se uma diferença entre os valores que é da ordem de 7%, o que é aceitável face às diferenças existentes entre as condições em que foram obtidos cada um daqueles dados.

Tabela 2 - Fatores de Correção Calculados (Térmicos)

Diam.	ANISN	(térmico)
	Depr.Flux.	Autoblind
0.125	0.685	0.377
0.250	0.326	0.229

Para o Fator de Cádmiu, obtemos a seguinte situação:

Tabela 4 - Comparação Fator de Cádmiu

Diâmetro	Ref Bibliog [3]	ANISN
0.125 mm	1.230	1.32
0.250 mm	1.280	1.33

A conclusão que se chega é a de que o Fator de Cádmiu deve ser considerado como 1.32 e 1.33 (para 0.125 e 0.250 mm), porque levam em consideração as nossas condições específicas de experimentação.

REFERÊNCIAS

- [1] CHARBONNEL, A. *Problèmes posés par l'utilisation des détecteurs par activation*. Viena: IAEA, 1963 Proceedings Series - Neutron Dosimetry - Vol. 1 - pág. 73.
- [2] FLEMING, R.F. *Neutron Self-Shielding Factors for Simple Geometries*. Int. J. Appl. Radiat. Isot. - v. 33 - p. 1263-1268 - 1982.
- [3] MUECK, K.; BENSCH, F. *Cadmium Correction Factors of Several Thermal Neutron Foil Detectors*. - J. Nuc. Energy, v. 27, p. 677-688, 1973.
- [4] STROUGHTON, R.W ; HALPERIN, J. *Effective Cutoff Energies for Boron, Cadmium, Gadolinium and Samarium Filters*. Nucl. Sci. Eng., v 15, p. 314-324, 1963.
- [5] MARTIN, D.H. *Correction Factors for Cd-Covered-Foil Measurements*. Nucleonics, v 13, n. 3, 1955.

ABSTRACT

A calculational methodology of Flux Depression, Self-Shielding and Cadmium Factors is presented, using the ANISN code, for experiments conducted at the IPEN/MB-01 Research Reactor. The correction factors were determined considering thermal neutron flux and 0.125 e 0.250 mm diameter of ^{197}Au wires.