

PROBLEMA PADRÃO EXPERIMENTAL PARA AVALIAÇÃO DE CÁLCULOS  
DE BLINDAGEM

PAULO ROGÉRIO PINTO COELHO, JOSÉ RUBENS MAIORINO

Divisão de Física de Reatores  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares  
Comissão Nacional de Energia Nuclear  
São Paulo - SP

Resumo

A distribuição espacial e os espectros de energia dos nêutrons emergentes de uma blindagem laminada (aço, polietileno e chumbo) foram medidas com um espectrômetro de nêutrons rápidos e, alguns resultados experimentais foram comparados com os calculados por uma rede de códigos. A fonte de nêutrons, incidentes na blindagem, foram nêutrons de 14 MeV produzidos na reação  $H-3(d,n)He-4$ , utilizando um acelerador Van de Graaff.

Foi verificada experimentalmente uma boa simetria radial dos espectros de energia de nêutrons e que é detectável o efeito de moderação de nêutrons para afastamentos radiais do espectrômetro indicando que o arranjo experimental pode ser bem modelado computacionalmente em geometria R-Z (simetria cilíndrica). Um espectro de energia de nêutrons calculado com o código DOT 3.5 foi comparado com o medido, apresentando boa concordância na forma do espectro e no valor integral deste (dentro de aproximadamente 12% para o espectro de energia dos nêutrons integrado entre 2 e 16 MeV).

Abstract

The spatial-energy neutron distribution emerging from a laminated shielding (stainless; polyethylene and lead) were measured by a fast neutron spectrometer and some experimental results were compared with those calculated by a network of codes. The source neutrons incident in the shielding were 14 MeV neutrons from a  $H-3(d,n)He-4$  reaction coming from a Van de Graaff accelerator.

Experimentally was verified a good radial symmetry of neutron energy-spectrum, and also a moderation and attenuation effect for points located out of the central axis of symmetry. These results indicate that the experiment can be well modeled by R-Z geometry. A neutron-energy spectra calculated by DOT 3.5 was compared with the measured spectra, showing a good agreement in the shape and value of the spectra (12% for an integrated spectrum from 2 to 16 MeV).

## 1. Introdução

Normalmente, medidas experimentais são difíceis de serem modeladas computacionalmente devido às geometrias multidirecionais envolvidas e às características das fontes de nêutrons e detectores usados. Por outro lado, medidas integrais são importantes para avaliar a adequação das bibliotecas de seções de choque e a metodologia de cálculo de transporte utilizada. Cálculos para os quais não há medidas, fornecem pouca informação sobre a adequação dos dados e métodos utilizados, embora muitas vezes indiquem a sensibilidade dos resultados para variações nesses dados e métodos. Com a finalidade de contornar essas dificuldades, têm sido desenvolvidos e publicados muitos padrões experimentais e cálculos padrões, que são conhecidos como problemas-padrões ("benchmark problems"), os quais passam a ser usados como padrão de referência para novos cálculos.

Muitos trabalhos têm sido publicados nos últimos anos nesta linha de pesquisa, sendo que muitas instalações experimentais têm sido construídas com esse objetivo, as quais utilizam como fonte de nêutrons, reatores nucleares /1/ ou aceleradores de partículas induzindo reações nucleares nas quais são liberados nêutrons /2/.

Dentro desse panorama de pesquisas desenvolvidas em vários países, insere-se o presente trabalho, o qual consiste na montagem de um arranjo experimental que é composto de uma blindagem laminada de chumbo, polietileno e aço carbono, apoiada em uma estrutura (tanque com água), sendo que essa blindagem foi irradiada por nêutrons de 14 MeV, produzidos num acelerador Van de Graaff, através da reação D-T. O trabalho consistiu em medir o espectro de energia de nêutrons emergentes da blindagem, em vários pontos (R,  $\theta$ , Z) e compará-los com os obtidos em cálculos com uma simulação desse experimento, utilizando um conjunto de códigos computacionais disponíveis no IPEN-CNEN/SP. O objetivo desse trabalho foi estabelecer um padrão experimental para cálculos de blindagens.

## 2. Instalação Experimental

Um arranjo experimental, modelável com grande precisão em termos computacionais, foi construído para a realização de experimentos padrões ("benchmark") na área de blindagem, o qual é apresentado esquematicamente na figura 1. Um acelerador tipo Van de Graaff foi utilizado para acelerar dêuterons à energia de 170 keV e produzir nêutrons de 14 MeV em alvo espesso de titânio-trítio a través da reação  $H-3(d,n)He-4$ , os quais incidem em uma blindagem laminada composta de placas de aço inox de  $60 \times 60 \times 2,2$  cm (2 placas externas às seguintes), placas de polietileno perfazendo  $60 \times 60 \times 15$  cm e de chumbo perfazendo  $60 \times 60 \times 10$  cm. O alvo do acelerador é colocado no interior de um tanque de água utilizado para obter um modelo bem definido em termos computacionais. Junto à face externa do tanque é localizada a seção de teste ( $60 \times 60 \times 60$  cm), na qual a blindagem em estudo é colocada.

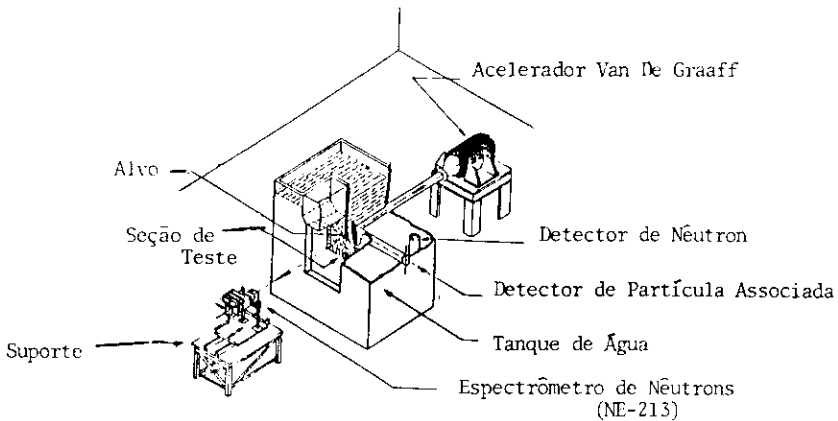


Figura 1. Visão Esquemática do Arranjo Experimental.

A distribuição espacial e energética dos nêutrons emergentes da blindagem foi medida com um espectrômetro de nêutrons rápidos, sendo que alguns resultados experimentais foram comparados com os calculados por códigos computacionais, com o objetivo de avaliar os métodos de cálculo.

A medida da produção de nêutrons no alvo do acelerador foi feita utilizando o método de contagem de partícula associada. Os nêutrons produzidos na reação D-T são emitidos isotropicamente no sistema centro de massa, quando os dêuterons incidentes no alvo de trítio são de energias ( $E_d$ ) inferiores a 300 keV /3/ (utilizamos  $E_d = 170$  keV). A partícula alfa, produzida nessa reação, é emitida num ângulo de  $180^\circ$  em relação aos nêutrons; assim sendo, contando-se essas partículas em um ângulo sólido bem definido, o número de nêutrons conjugados é conhecido e, a partir da cinemática da reação pode-se conhecer a intensidade total da fonte de nêutrons /8/ (produção de nêutrons no alvo do acelerador).

Utilizou-se um ângulo de  $90^\circ$  entre os 2 tubos, para minimizar os efeitos de anisotropia no sistema laboratório, os efeitos de multiespalhamento de dêuterons no alvo e o efeito de não uniformidade na concentração de trítio no alvo.

O detector de partículas alfa utilizado foi um detector semiconductor tipo barreira de superfície, marca Ortec, modelo BA-020-450-300. Os equipamentos eletrônicos associados a esse detector foram calibrados utilizando uma fonte Am-241 de partículas alfa de 6,059 MBq.

Devido ao detector de barreira de superfície sofrer danos quando sujeito a radiação, usa-se um outro monitor da produção de nêutrons no alvo do acelerador, quando utiliza-se alta produção de nêutrons da reação D-T. O monitor utilizado é um detector proporcional tipo  $BF_3$ , o qual apresenta ótima característica de discriminação nêutron-gama.

As características inerentes ao detector NE-213 possibilitam obter o espectro de energia de nêutrons na presença de radiação gama, porque o tempo de formação de pulso devido a raios gama (10ns) é menor de que o devido a nêutrons (80ns) /4/ ; assim sendo, utilizando-se equipamentos eletrônicos apropriados, é possível fazer a distinção entre os dois tipos de eventos. O método por nós utilizado é o de discriminação por análise de forma de pulso para rejeitar as contagens devidas a raios gama. Os equipamentos utilizados, bem como o modo de interligá-los estão apresentados na figura 2.

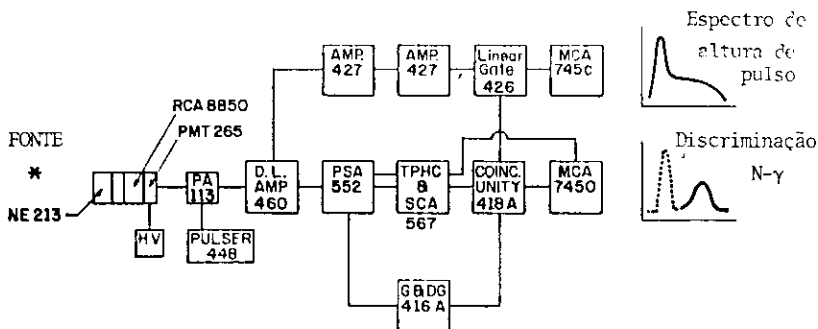


Figura 2. Espectrômetro de Nêutrons Rápidos com eletrônica associada.

Utilizamos um cintilador NE-213 de 5,08 cm de altura por 3,81 cm de diâmetro, com encapsulamento de vidro e reservatório de oxigênio livre de nitrogênio, tipo VHL pintado com tinta branca de MgO que é um refletor difuso de alta eficiência. O cintilador é acoplado ópticamente com a fotomultiplicadora RCA 8850 por meio de um guia de luz (lucite) de 2,5 cm de altura por 5,08 cm de diâmetro, pintado externamente com tinta refletora numa faixa de 1 cm de largura, com a finalidade de obter maior uniformidade na coleta de luz, aumentando assim a resolução do sistema.

O espectro medido de altura de pulso de prótons de recuo foi desdobrado usando o código FANTI /5/, o qual aplica o método de inversão de matriz para obter o espectro de energia de nêutrons. A verificação da linearidade e a calibração em energia do espectrômetro de nêutrons foram realizadas usando fontes padrões de raios gama, e o desempenho do espectrômetro foi avaliado medindo o espectro de fontes de nêutrons padrões de Cf-252, AmBe e da reação D-T //, obtendo-se excelente concordância com os espectros usualmente publicados na literatura. O espectrômetro mede o espectro de nêutrons no intervalo de 2 a 16 MeV, com 6% de eficiência intrínseca e uma resolução entre 11 e 4% /6/.

### 3. Método de Cálculo

A distribuição energética-angular dos nêutrons da reação D-T (alvo do acelerador), necessária como termo fonte no método de cálculo, foi obtida com o programa computacional CALCDT /8/. Esse programa baseia-se na cinemática da reação D-T e, os cálculos são realizados em função das faixas de ângulos de emissão e de energias de nêutrons que se deseja e da energia máxima dos dêuterons incidentes no alvo.

Os cálculos /9/ foram baseados na teoria de transporte da radiação a duas dimensões. O arranjo experimental foi modelado em geometria R-Z com simetria cilíndrica em torno do eixo do feixe de dêuterons, conforme apresentado na figura 3. A geração de seções de choque multigrupo em 44 grupos de energia foi realizada com o sistema AMPX-II, usando a biblioteca de dados nucleares VITAMIN-C, com dados básicos da ENDF-B-IV. As seções de choque macroscópicas das misturas, por zona de material, foram usadas como entrada para o código DOT 3.5, de transporte da radiação em duas dimensões pelo método de ordenadas discretas. O cálculo de transporte foi realizado utilizando 99 intervalos axiais, 64 intervalos radiais, quadratura angular S-12 e expansão P-3 de Legendre para as seções de choque.

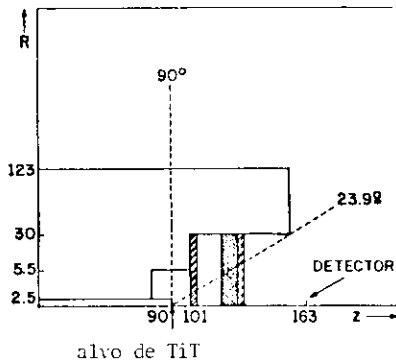


Figura 3 - Modelo de Cálculo.

#### 4. Resultados e Conclusões

Uma grande sequência de medidas foi realizada no arranjo experimental, para várias posições do detector (R,  $\theta$ , Z) e os resultados aqui publicados são parte desse conjunto.

Os espectros diferenciais de energia dos nêutrons, calculados e medidos para o detector na posição (0,0°,163 cm) foram comparados e estão apresentados na figura 4. Apesar de termos alguma flutuação estatística nos resultados experimentais, devido principalmente à baixa produção de nêutrons no alvo do acelerador ( $\sim 10^7$  n/s), nossos resultados podem ser considerados bons, tendo obtido uma diferença de -12% entre o espectro integrado de energia de nêutrons medido e calculado entre 3 e 16 MeV; o que é compatível com as diferenças encontradas por outros autores para outros problemas-padrões [1,2].

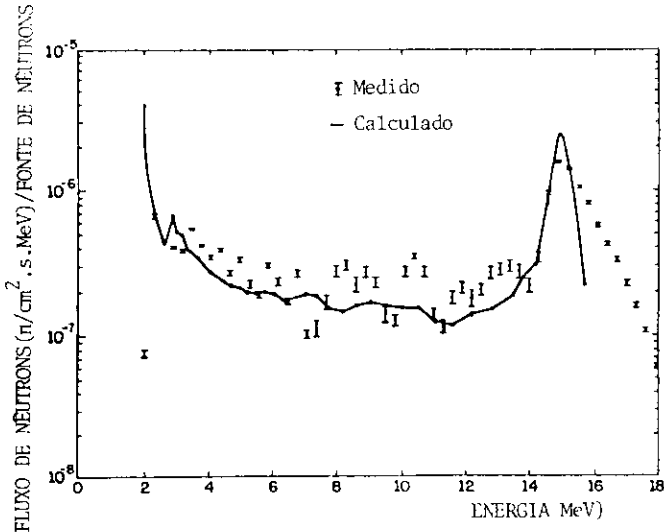


Figura 4. Espectro de Energia de Nêutrons Medido e Calculado.

Os espectros de energia de nêutrons foram medidos com o detector NE-213 posicionado nas posições (19cm, 0°, 163 cm), (19cm, 90°, 163 cm) e (19cm, 180°, 163 cm). Os resultados mostram uma

boa simetria cilíndrica, em torno do eixo do feixe de dêuterons (conforme foi modelado computacionalmente o experimento).

O efeito de moderação e atenuação do fluxo neutrônico pode ser observado para as medidas com o detector NE-213 nas posições ( $R, 0^{\circ}$ , 163 cm), com R igual a 0 cm, 10cm, 19cm e 26cm.

Conclui-se, portanto, que os nossos resultados mostram que a metodologia de cálculo de blindagem utilizada é apropriada e que o arranjo experimental montado é um bom experimento para avaliação de cálculos de blindagem.

#### Agradecimentos

Agradecemos ao Aucyone A. Silva pelo apoio prestado durante a realização desse trabalho e ao grupo de operação do REIPEN/CNEN-SP por terem ajudado na obtenção dos dados para este trabalho.

#### Referências

- /1/ Y. Oka; S. An; S. Miyasaka; K. Koyama; S. Kasai; R. Yoshii; H. Hashikura; M. Akiyama; T. Hyodo, Two-Dimensional Shielding Benchmarks for Iron at Yayoi, UTNL-R-0032, Univeristy of Tokyo, Japan (1976).
- /2/ R.T.Santoro, R.C.Alsmiller, J.M.Barnes, G.T.Chapman, Calculation of Neutron and Gamma-Ray Energy Spectra for Fusion Reactor Shield Design: Comparison with Experiment, Nucl. Sci. Eng., 78, 259-272 (1981).
- /3/ J.Benveniste, A.C.Mitchell, J.H.Schrader e J.H.Zenger, The Problem of Measuring The Absolute Yield of 14 MeV Neutrons by Means of an Alpha Counter 7, 306 (1960).
- /4/ A.Tsechanski e G.Shani, System Preparation and Fast Neutron Spectra Measurement in a Graphite Stack, Nucl. Tech. 62,227-237 (1983).

- /5/ L.J. Antunes, G. Borker, H. Klein, G. Bulski, Unfolding of NE 213 Scintillation Spectra Compared with Neutron Time-of-Flight Measurements, International Conference on "Nuclear Data and Applied Science", Santa Fe, USA, 13-17 May (1985).
- /6/ P.R.P. Coelho e J.R. Maiorino, Espectrometria de Nêutrons Rápidos com Cintilador NE-213, II Congresso Geral de Energia Nuclear, Rio de Janeiro (1988).
- /7/ P.R.P. Coelho, A.A. Silva, Neutron Energy Spectrum Measurements of Neutron Sources with NE-213 Spectrometer, 4<sup>th</sup> International Symposium in Radiation Physics, São Paulo (1988).
- /8/ P.R.P. Coelho, Cálculo da Distribuição Energética e Angular de Nêutrons Produzidos na Reação D-T para uso em Medida de Parâmetros Nucleares, V Encontro Nacional de Física de Reatores, Rio de Janeiro (1985).
- /9/ P.R.P. Coelho, J.R. Maiorino, A.G. Mendonça, A.A. Silva, Measurement of Neutron Energy Spectra Emerging from a Laminated Shield due D-T Source and Comparison with Calculation, VII International Conference in Radiation Shielding, Bournemouth, England (1988).