

GERAÇÃO DE SEÇÕES DE CHOQUE NA REGIÃO DE
RESSONÂNCIAS PARA COMBUSTÍVEL ENVENENADO
COM GADOLÍNIO.

Luiz Roberto Sannazzaro
Divisão de Física de Reatores
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
São Paulo - SP

SUMÁRIO

As seções de choque na região epitérmica são comumente geradas pelo código GGC-IV. Esse código, devido as aproximações do método, mostra-se impotente quando as ressonâncias de diversos núcleos se sobrepõem, como é o caso do combustível de reatores PWR envenenado com Gadolínio. Para um tratamento adequado das ressonâncias é utilizado o programa RESAB-II, possibilitando inclusive a consideração dos efeitos de heterogeneidade na geração das seções de choque. Pela comparação dos resultados obtidos com os dois métodos verifica-se que as seções de choque fornecidas pelo código GGC-IV em geral são subestimadas.

1. Introdução

As seções de choque apresentam normalmente diferentes dependências energéticas nas três regiões de energia - a térmica, a epitérmica e a rápida. Diferentes métodos e teorias são utilizados para a geração de seções de choque em cada uma dessas regiões.

Na região epitérmica as seções de choque apresentam uma dependência com a energia bastante irregular constituindo as chamadas ressonâncias resolvidas. Para a geração das seções de choque nessa região bem como na região rápida, tem sido normalmente utilizado o método de Nordheim, como no programa GGC-IV /1/. Esse programa resolve a equação de Boltzman sem dependência temporal em aproximação B1 para o fluxo de neutrons $\psi(E)$, com o qual os dados da biblioteca ENDF/B-IV são condensados em 99 grupos (estrutura GAM). A equação de Boltzman é resolvida para um absorvedor homogêneo, circundado por uma zona infinita de moderação, na qual é admitido um espectro de neutrons com comportamento $1/E$.

Como outra aproximação o programa GGC-IV trata cada ressonância de um nuclídeo independentemente das ressonâncias vizinhas bem como das ressonâncias de outros nuclídeos.

O programa GGC-IV mostra-se portanto impotente quando as ressonâncias de vários nuclídeos se sobrepõem, como é o caso de combustível de PWR envenenado com gadolínio /2/. Nesses reatores, o gadolínio (na forma de Gd_2O_3) apresenta-se uniformemente misturado com o combustível (UO_2) e para se levar em conta o efeito de acoplamento das ressonâncias bem como o efeito de heterogeneidade na geração das seções de choque é necessário recorrer a métodos mais eficazes, como o método da probabilidade de colisão. O código RESAB-II /3/ resolve a equação de moderação utilizando-se esse método. A equação de moderação é resolvida para o fluxo $\phi(\mu)$ em cada zona da célula considerada.

Para mostrar os efeitos de heterogeneidade bem como do acoplamento das ressonâncias na geração das seções de choque na região epitérmica foram feitos cálculos com RESAB-II e com GGC-IV e seus resultados comparados.

Os dados necessários para o programa RESAB-II foram retirados da biblioteca ENDF/B-IV em 2240 pontos equidistantes de letargia ($\Delta\mu = 1,56250 E-3$) entre $\mu=11,5$ e $15,0$, correspondendo à região de energia com-

preendida entre 101,3 e 3,059 eV.

A célula de combustível envenenado com Gadolínio utilizada nos cálculos com RESAB-II é mostrada na figura 1 e constitui-se de 4 regiões divididas em zonas conforme a tabela 1.

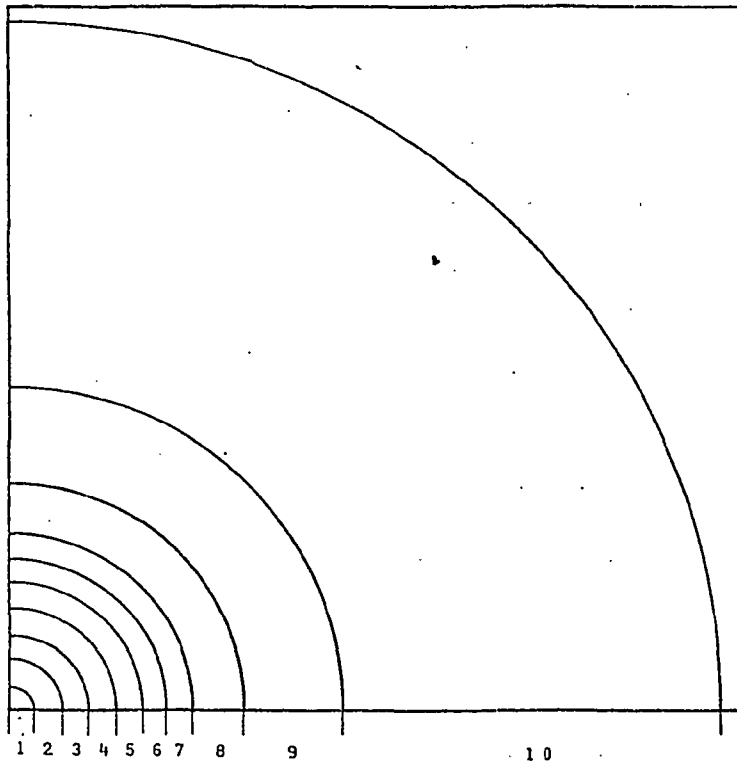


Figura 1 - Célula de veneno queimável.

Região	Zonas
1 - $\text{UO}_2 + \text{Gd}_2\text{O}_3$	1 - 5
2 - Encamisamento	6
3 - Moderador	7 e 8
4 - Combustível homogeneizado	9 e 10

Tabela 1 - Divisão das zonas na célula de combustível envenenado.

2. Resultados

O perfil das seções de choque macroscópicas de absorção dos principais nuclídeos do combustível envenenado é mostrado na figura 2 entre 3,059 e 101,3 eV. Na figura as ressonâncias do ^{238}U e do ^{156}Gd estão cortadas em $1,0 \text{ cm}^{-1}$.

Os espectros de neutrons foram calculados com o RESAB-II para as 10 zonas de célula considerada. A figura 3 mostra esses espectros para a zona 1 (zona mais interna do combustível envenenado) e para a zona 10 (zona do combustível homogeneizado não envenenado mais afastada). Na comparação entre esses 2 espectros pode-se verificar as influências dos diferentes isótopos de Gadolínio.

Próximo à maior e mais significativa ressonância do ^{238}U (cerca de 6,6 eV) pode-se reconhecer 2 ressonâncias do ^{155}Gd (ver na figura 2). Essas ressonâncias se acoplam e como consequência a depressão do fluxo nesse lugar é alterado (conforme indicado na figura 3). O mesmo acontece com a segunda ressonância do ^{238}U por volta de 21 eV, onde a alteração do fluxo é causada pelos isótopos ^{154}Gd , ^{155}Gd , ^{156}Gd e ^{158}Gd . Outras ressonâncias dos isótopos de Gadolínio marcam sensivelmente o espectro, como por exemplo a ressonância do ^{156}Gd por volta de 35 eV, contudo grande parte delas não chegam a se sobrepor às ressonâncias do ^{238}U .

Para os resultados do programa RESAB-II poderem ser comparados com os do código GGC-IV, os dados pontuais em 2240 pontos de leitura são condensados com o fluxo $\phi(\mu)$ em 14 grupos coincidentes com os da estrutura GAM entre 3,059 e 101,3 eV. segundo,

$$\sigma_G = \frac{\sum_{g \in G} \sigma_{\mu g} \phi(\mu g)}{\sum_{g \in G} \phi(\mu g)} \quad (1)$$

onde g indica o grupo de energia entre E_g e E_{g-1} , tal que,

$$-\frac{\Delta E_g}{E_g} = \frac{E_g - E_{g-1}}{E_g} = \Delta\mu = \text{constante} \quad (2)$$

e G indica o macrogrupo condensado.

Condensando-se portanto as seções de choque pontuais em

14 grupos com os fluxos $\phi(\mu)$ de cada zona da região do combustível (zonas de 1 a 5) obtêm-se seções de choque heterogêneas. Na tabela 2 são apresentadas essas seções de choque (de absorção) para o ^{238}U para 12 grupos coincidentes com os grupos de 79 a 90 da estrutura GAM. (tabela 3).

Zona	Grupo	79	80	81	82	83	84
1		2.6736	0.1427	2.1416	5.6004	0.6967	9.3574
2		2.7225	0.1427	2.1662	5.7006	0.6970	9.5280
3		2.8520	0.1426	2.2225	5.9624	0.6977	9.9685
4		3.2325	0.1426	2.3314	6.7456	0.6990	11.222
5		6.3676	0.1425	2.5747	14.229	0.7011	24.900
		85	86	87	88	89	90
1		0.4466	0.2992	0.9044	11.931	8.0065	1.1394
2		0.4467	0.2992	0.9045	12.194	8.1342	1.1395
3		0.4470	0.2992	0.9048	12.897	8.4187	1.1398
4		0.4476	0.2991	0.9052	14.921	8.9396	1.1402
5		0.4485	0.2991	0.9059	42.342	9.9769	1.1409

Tabela 2 - Seções de choque microscópicas de absorção do ^{238}U dependentes das zonas.

Grupo	79	80	81	82	83	84
$E_{\text{máx}}$	7.889+1	6.144+1	4.785+1	3.727+1	2.902+1	2.260+1
$E_{\text{mín}}$	6.144+1	4.785+1	3.727+1	2.902+1	2.260+1	1.760+1
Grupo	85	86	87	88	89	90
$E_{\text{máx}}$	1.760+1	1.371+1	1.068+1	8.315	6.476	5.644
$E_{\text{mín}}$	1.371+1	1.668+1	8.315	6.476	5.644	3.723

Tabela 3 - Grupos de energia da estrutura GAM.

As principais ressonâncias do ^{238}U encontram-se nos grupos 88, 84, 82 e 79 respectivamente. Nesses grupos aparecem as maiores diferenças entre as seções de choque nas diversas zonas. Na zona 5, a mais periférica do combustível envenenado, são encontradas as maiores seções de choque evidenciando a forte blindagem espacial do fluxo de neutrons.

O efeito de um melhor tratamento das ressonâncias pelo RESAB - II pode ser observado comparando-se seus resultados com os fornecidos pelo programa GGC-IV. A tabela 4 apresenta as seções de choque microscópicas de absorção do ^{238}U homogeneizadas em todo combustível envenenado (zonas de 1 a 5) calculadas com o RESAB-II (indicadas com R) e as calculadas com GGC-IV (indicadas com G) para os grupos de 79 a 90. A terceira linha de tabela mostra a diferença relativa r_{RG} entre essas seções de choque em cada grupo de energia calculada conforme,

$$r_{RG} = 100 \cdot \frac{|\sigma_R - \sigma_G|}{\sigma_R} \%$$

As seções de choque calculadas pelos 2 métodos mostram diferenças significativas. No grupo 88, onde ocorre a maior ressonância do ^{238}U , essa diferença r_{RG} chega a 6,4%. Com o método GGC-IV a seção de choque é subestimada. Ela é também subestimada pelo GGC-IV nos grupos 84 e 82, onde encontram-se 2 outras importantes ressonâncias

Grupo	79	80	81	82	83	84
R	4.505	0.1426	2.412	8.867	0.6996	17.03
G	4.633	0.0895	1.961	9.055	0.2283	15.54
r_{RG}	2,8%	37,2%	18,7%	8,2%	18,4%	8,7%
Grupo	85	86	87	88	89	90
R	0.4479	0.2991	0.9054	26.63	9.277	1.146
G	0.4093	0.1911	1.112	24.93	8.544	1.010
r_{RG}	8.6%	36,1%	22,3%	6,4%	7,4%	11,4%

Tabela 4 - Comparação entre as seções de choque microscópicas de absorção do ^{238}U calculadas com RESAB-II e GGC-IV.

do ^{238}U , com uma diferença de 8,7% e 8,2% respectivamente. A diferença σ_{RG} nos outros grupos é também bastante significativa com as seções de choque calculadas pelo método GGC-IV mostrando-se em geral menores que as fornecidas pelo RESAB-II.

3. Conclusões

Na região epitérmica o acoplamento das ressonâncias de diversos isótopos pode alterar significativamente o comportamento do fluxo de neutrons, como é o caso do combustível envenenado com Gadolínio ($\text{UO}_2 + \text{Gd}_2\text{O}_3$), acentuando a autoblindagem tanto energética como espacial. Nesse caso programas como o GGC-IV mostram-se impotentes para os cálculos de seções de choque e outros métodos mais eficientes devem ser empregados, como por exemplo o programa RESAB-II. Com esse programa, além de se obter seções de choque heterogêneas, é possível um melhor tratamento das ressonâncias na geração das mesmas. Pela comparação entre as seções de choque calculadas com RESAB-II e com GGC-IV verificou-se que esse último programa em geral subestima as seções de choque. Para a mais importante ressonância do ^{238}U , por exemplo, a diferença relativa entre essas seções de choque é de 6,4%.

4. Referências Bibliográficas

- /1/ Adir, J., Lathop K.D. Theory of methods used in the GGC-IV multigroup cross section code. GA-9021 (1968).
- /2/ Sannazzaro, Luiz R. Um modelo para cálculos de queima de Gadolínio em P.W.R. IV Encontro Nacional de Física de Reatores (1983).
- /3/ Riik, B., Rühle, R. RESAB-II, ein Programm zur Berechnung von Gruppenkonstanten im Resonanzbereich nach der Stosswahrscheinlichkeitsmethode, stuttgart, IKE - 3.3-6.1209 (1972).