

CÁLCULO DE TAXAS DE REAÇÃO EM FOLHAS DE ATIVAÇÃO NO INTERIOR
DO "BEAM HOLE" NÚMERO 8 DO REATOR IEA-R1 UTILIZANDO
O CODIGO DE TRANSPORTE DE RADIAÇÃO DOT-3.5
(IX-ENFIR)

Margaret de Almeida Damy, Ulysses d'Utra Bitelli,
Arlindo Gilson Mendonça e Adimir dos Santos
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IPEN-CNEN/SP -Travessa R número 400 CEP 05508-900

RESUMO

Neste trabalho são apresentadas comparações entre valores de taxas de reação medidas através da técnica de Ativação por Folhas e calculadas utilizando o código DOT-3.5, ao longo do eixo de simetria do canal de irradiação 8 do reator IEA-R1. Avaliou-se a utilidade da metodologia adotada para o cálculo do transporte da radiação em problemas de penetração em dutos vazios.

As concentrações dos elementos utilizadas para as várias regiões que compõem a configuração geométrica esquematizada para o problema, são apresentadas na tabela 3.

As taxas de reação foram calculadas com o código DOT-3.5 em uma estrutura de 22 grupos de energia de nêutrons desde a energia de $1,0 \times 10^{-5}$ ev até o limite de 17,3 Mev em geometria cilíndrica R-Z. Apenas 1 grupo de energia de gamas foi empregado no problema, onde a fonte foi zerada. Os limites de energia dos grupos são apresentados na tabela 4.

As seções de choque microscópicas foram calculadas para as 7 regiões definidas na figura 1, (núcleo, água logo após o núcleo, grafita, água sob o concreto, aço carbono, concreto barita e ar), com o código XSDRNP(4) e as seções de choque para as folhinhas de ativação também foram geradas para o problema através do sistema AMPXII(4), com excessão da folha de índio, a qual não há resultados para comparação. Para o cálculo das seções de choque macroscópicas, tanto dos materiais que constituem o núcleo e o canal de irradiação número 8 do IEA-R1, bem como das folhas de ativação, foi utilizado o código AXMIX(5).

A biblioteca de seções de choque utilizada para todos os materiais constituintes do problema, provieram do arquivo VITAMIN-C(7); Para as folhas de ativação (especificamente as de ouro), foi utilizada a ENDFB-V, enquanto que para as demais folhas a ENDFB-VI. Nestes últimos casos, a transformação em parâmetros de multigrupo foi efetuada pelo NJOY(8).

Para o termo fonte, considerou-se a presença de 3 elementos combustíveis em frente ao canal de irradiação ou "beam hole" número 8 do reator IEA-R1.

O espectro de nêutrons de fissão é apresentado na tabela 4, juntamente com os limites de energia por grupo de nêutron. As densidades isotópicas das folhinhas de ativação foram consideradas mínimas para a convergência do problema.

A configuração geométrica utilizada no cálculo das taxas de reação nas folhas de ativação no interior do canal de irradiação para o DOT-3.5 encontra-se na figura 1. Onde especificou-se um total de 165 "meshes" espaciais na região axial do cilindro

INTRODUÇÃO

É objeto de interesse do grupo de Blindagem do IPEN, validar os métodos de cálculo utilizados para o cálculo do transporte da radiação em problemas de penetração profunda, com o objetivo de conhecer-se o comportamento da incerteza associada aos cálculos de blindagem, com relação à medidas experimentais.

Com esta finalidade, foram realizadas medidas da distribuição espacial de taxas de reação (1) a nêutrons térmicos e medidas de taxas de reação a nêutrons rápidos ao longo da direção axial do canal de irradiação número 8 do Reator IEA-R1 (BH-8), através da técnica de Ativação de Folhas.

O objetivo deste trabalho foi o de calcular as taxas de reação em folhas de ativação inseridas no interior do BH-8 do reator IEA-R1, com o código DOT-3.5(2) e compará-las àquelas obtidas experimentalmente

METODOLOGIA EXPERIMENTAL E DE CÁLCULO

A descrição completa e detalhada do experimento é apresentada em referências citadas neste trabalho(1,3). Basicamente, foram realizadas 10 operações de irradiação à potência de 100kW no reator IEA-R1. Para tal, monitorou-se a Câmara de Ionização Compensada (CIC) do canal linear ao nível de corrente de 3,0 μ A, além de reproduzir em cada operação o mesmo posicionamento de barras de controle do reator. Com isso, procurou-se garantir uma mesma intensidade neutrônica ao longo do canal de irradiação número 8 do reator.

Assim, em cada operação de 1 hora, foram irradiados ao longo do eixo de simetria do citado canal, os seguintes isótopos presentes nas folhas de ativação: Au-197, Ni-58, Mg-24, Ti-46, Ti-48, Fe-54, Fe-56 e In-115. As folhas de ouro foram irradiadas com e sem cobertura de Cádmiio, enquanto as demais folhas de ativação foram irradiadas cobertas por Cádmiio.

As espessuras das folhas, as massas de cada uma delas, a posição de irradiação, bem como as reações nucleares induzidas nos isótopos, são apresentadas nas tabelas 1 e 2.

TABELA 1 - DADOS RELATIVOS às FOLHAS de OURO

MATERIAL da FOLHA	POSIÇÃO (FIG.1)	MASSA (g)	ESPESSURA [cm]	REAÇÃO de OCORRÊNCIA na FOLHA
Au	A	0,01850	0,00125	Au ¹⁹⁷ (n,γ) Au ¹⁹⁸
Au	B	0,02080	0,00125	Au ¹⁹⁷ (n,γ) Au ¹⁹⁸
Au	C	0,02221	0,00125	Au ¹⁹⁷ (n,γ) Au ¹⁹⁸
Au	D	0,02390	0,00125	Au ¹⁹⁷ (n,γ) Au ¹⁹⁸
Au	E	0,02181	0,00125	Au ¹⁹⁷ (n,γ) Au ¹⁹⁸
Au	F	0,02015	0,00125	Au ¹⁹⁷ (n,γ) Au ¹⁹⁸
Au	G	0,02250	0,00125	Au ¹⁹⁷ (n,γ) Au ¹⁹⁸
Au(Cd)	B	0,02115	0,00125	Au ¹⁹⁷ (n,γ) Au ¹⁹⁸
Au(Cd)	C	0,02150	0,00125	Au ¹⁹⁷ (n,γ) Au ¹⁹⁸
Au(Cd)	D	0,01980	0,00125	Au ¹⁹⁷ (n,γ) Au ¹⁹⁸
Au(Cd)	E	0,02095	0,00125	Au ¹⁹⁷ (n,γ) Au ¹⁹⁸
Au(Cd)	F	0,02348	0,00125	Au ¹⁹⁷ (n,γ) Au ¹⁹⁸
Au(Cd)	G	0,02400	0,00125	Au ¹⁹⁷ (n,γ) Au ¹⁹⁸

TABELA 2 - DADOS RELATIVOS às OUTRAS FOLHAS

MATERIAL da FOLHA	POSIÇÃO (FIG.1)	MASSA (g)	ESPESSURA [cm]	REAÇÃO de OCORRÊNCIA
Ni	B	0,28510	0,0254	Ni ⁵⁸ (n,p) Co ⁵⁸
Ni	E	0,28652	0,0254	Ni ⁵⁸ (n,p) Co ⁵⁸
Mg	B	0,02976	0,0127	Mg ²⁴ (n,p) Na ²⁴
Mg	E	0,02958	0,0127	Mg ²⁴ (n,p) Na ²⁴
Ti	B	0,14090	0,0254	Ti ⁴⁶ (n,p) Sc ⁴⁶
Ti	E	0,14154	0,0254	Ti ⁴⁶ (n,p) Sc ⁴⁶
Ti	B	0,14090	0,0254	Ti ⁴⁸ (n,p) Sc ⁴⁸
Fe	B	0,13728	0,0127	Fe ⁵⁴ (n,p) Mn ⁵⁴
Fe	B	0,13728	0,0127	Fe ⁵⁶ (n,p) Mn ⁵⁶
Fe	E	0,56522	0,0500	Fe ⁵⁶ (n,p) Mn ⁵⁶
In	B	0,12190	0,0127	In ¹¹⁵ (n,n') In ^{115m}
In	E	0,12190	0,0127	In ¹¹⁵ (n,n') In ^{115m}

Tabela 3 - Concentração dos Materiais (DOT-3.5)

REGIÃO (# no DOT)	Nuclídeo	CONCENTRAÇÃO [# de átomos/barn]
Núcleo (1)	U-235	8.394E-05
	U-236	4.780E-06
	U-238	1.876E-04
	Pu-240	5.533E-08
	Pu-239	5.237E-07
	Pu-241	1.145E-08
	Pu-242	6.949E-10
	O-16	1.895E-02
	H-1	3.681E-02
Al-27	1.517E-02	
Grafita (2)	C-12	8.023E-02
Água (3,4)	O-16	3.343E-02
	H-1	6.686E-02
Aço Carbono (5)	C-12	2.882E-02
	Si	3.001E-04
	Fe	5.805E-02
	Nb-93	1.426E-04
	Mn-55	4.505E-05
Concreto Barita (6)	O-16	4.726E-02
	H-1	1.827E-02
	Al-27	4.900E-04
	Na	1.037E-04
	Mg	1.962E-04
	Si	1.358E-03
	Fe	3.997E-04
	Mn-55	3.945E-06
	Ba-134	1.594E-04
	Ba-135	4.309E-04
	Ba-136	5.069E-04
	Ba-137	7.293E-04
	Ba-140	4.583E-03
Ar (7)	O-16	8.986E-06
	N-14	3.380E-05

representado pelo problema e 55 "meshes" na direção radial.

Para este problema utilizou-se um conjunto de quadratura "biased" onde são escolhidos diferentes números de direções positivas e negativas para os ângulos η . Foram tomadas 65 direções positivas e apenas 35 direções negativas, totalizando 100 ângulos "up" que caracteriza o problema, pois há uma região de grande vazio ou "streaming" de nêutrons, que é o próprio interior do "beam hole".

Calculou-se as taxas de reação apenas para as folhas de ouro, não cobertas por cádmio, por não se ter tido tempo de gerar as seções de choque para o cádmio. Também para as demais folhas não se utilizou o cádmio como cobertura, pois nestas, este elemento não é importante nos cálculos, haja visto que o DOT calcula as taxas de reação no ponto onde deseja-se obter os resultados e

- 1 Núcleo
- 2 Água após o Núcleo
- 3 Grafita
- 4 Água sob o Concreto
- 5 Aço Carbono
- 6 Concreto Barita
- 7 Ar
- 8 Folha de Ativação

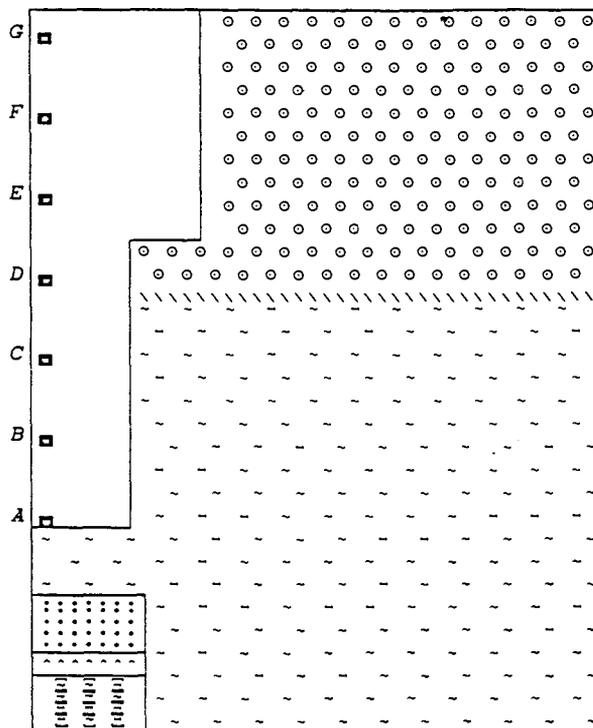


Figura 1-Esquema Representativo da Geometria do Canal de Irradiação n. 8 do Reator IEA-R1 Utilizado no DOT-3.5.

devido apenas à reação de interesse, no caso, a reação (n,p).

RESULTADOS

As taxas de reação foram medidas através da Técnica de Ativação de folhas de ouro (nuas e cobertas com cádmio) em 7 pontos ao longo do "beam hole" número 8 no eixo central do mesmo, a partir do início do canal de irradiação.

Os pontos onde foram medidas as taxas de reação são:

- Posição A - Entrada do canal de irradiação;
- Posição B - axial, a 44,0 cm da entrada do canal de irradiação;
- Posição C - axial, a 88,0 cm da entrada do canal;
- Posição D - axial, a 132,0 cm da entrada do canal;
- Posição E - axial, a 176,0 cm da entrada do canal;
- Posição F - axial, a 220,0 cm da entrada do canal;
- Posição G - axial, a 264,0 cm da entrada do canal;

Tabela 4 - Estrutura dos Grupos de Energia de Nêutrons e Espectro de Fissão

Grupo	Limite Superior [Mev]	Espectro de Fissão
1	17,3333	1,6998E-04
2	12,214	8,8542E-04
3	10,000	3,4477E-03
4	8,1873	1,3837E-02
5	6,3763	3,4194E-02
6	4,9659	4,7735E-02
7	4,0657	1,0630E-01
8	3,0119	8,8161E-02
9	2,4660	2,3321E-02
10	2,3457	1,1891E-01
11	1,8268	2,1610E-01
12	1,1080	1,6504E-01
13	6,3928E-01	1,6572E-01
14	1,1109E-01	1,6100E-02
15	3,3546E-03	8,2193E-05
16	5,8295E-04	5,9611E-06
17	1,0130E-04	4,1655E-07
18	2,2603E-05	3,3144E-08
19	1,0677E-05	1,3490E-08
20	3,0590E-06	1,8982E-09
21	1,1254E-06	2,8771E-10
22	6,8256E-07	2,5755E-10
	* (1,0E-11)	

* - Limite Inferior do Grupo 22.

Para as folhas de ouro, têm-se valores experimentais para as sete posições de irradiação definidas acima, sendo que o cálculo foi feito para até a posição F (distante 2,2 m do início do "beam hole"), pois para um detalhamento dos intervalos espaciais no interior do canal de irradiação, não foi possível atingir-se o ponto G localizado na saída do canal.

Nas folhas de Ni-58, Mg-24, Ti-46 e Fe-56, temos disponível as medidas experimentais em duas posições dentro do canal de irradiação. Enquanto que para as folhas de Ti-48 e Fe-54 temos apenas uma medida no interior do B.H. (posição B).

As taxas de reação foram calculadas em 6 posições (de A a F) ao longo do canal de irradiação, para as folhas de ativação de ouro. Para as folhinhas de magnésio, níquel, titânio e ferro, as taxas de reação foram calculadas para duas posições ao longo do "beam hole" número 8 do IEA-R1, mesmo para as folhinhas onde não dispúnhamos de resultado experimental.

A tabela 5 apresenta os valores das taxas de reação medidas e calculadas para as várias folhas de ativação colocadas no interior do "Beam Hole" número 8 do reator IEA-R1, nas posições descritas acima. Na mesma tabela apresenta-se os valores de C/E, ou seja, valor calculado dividido pelo valor medido.

Um outro valor importante é a atenuação dos nêutrons ao longo do canal de irradiação,

ou seja, a razão das taxas de reação normalizadas em relação às taxas de reação de entrada no "Beam Hole". Os valores das taxas de reação normalizadas encontram-se na tabela 6, sendo que na última coluna desta, compara-se os valores entre si, ou seja, os valores normalizados calculados divididos pelos valores normalizados experimentais (C/E).

COMENTARIOS FINAIS

Neste trabalho, foram comparadas as medidas e cálculos de taxas de reação em várias folhas de ativação dispostas ao longo do eixo de simetria do canal de irradiação número 8 do Reator IEA-R1. Faz parte de um esforço conjunto dos grupos teórico e experimental do Departamento de Tecnologia de Reatores do IPEN em avaliar a metodologia de cálculo empregada nos trabalhos efetuados pelo grupo de Blindagem nos cálculos de fuga de radiação em dutos vazios ("streaming").

Esta é a primeira iniciativa feita no reator do Instituto, para analisar o comportamento espacial das taxas de reação relativas aos nêutrons rápidos dentro de um dos canais de irradiação do IEA-R1. Comparações com a distribuição espacial das taxas de reação a nêutrons térmicos também vêm sendo efetuadas através de medidas com detectores de ativação apresentadas aqui nas folhas de ouro.

Cabe salientar que estudos semelhantes, também estão sendo realizados, utilizando o método de Monte Carlo, porém até a presente data não temos conhecimento dos resultados encontrados. Estes, serão de grande importância como orientação em nossos estudos.

Observa-se da tabela 5, onde são comparados os valores absolutos das taxas de reação medidas e calculadas, que os valores são coerentes no tocante à magnitude do campo neutrônico no interior do BH-8.

Verifica-se que os valores medidos e calculados para os isótopos Au-197 (posições A, B, C e D), Ni-58 (posição A), Ti-46 (posição E), Ti-48 (posição B) e Fe-54, apresentam uma razão cálculo/experimento (C/E) < 2, o que pode ser considerado para o propósito do trabalho, como um bom resultado.

Todavia encontraram-se algumas discrepâncias; o Ti-46 apresentou um excelente resultado na posição E enquanto constatou-se um desvio muito grande entre os valores medidos e calculados na posição B do BH-8.

Valores pouco satisfatórios, foram encontrados nos isótopos Au-197 (posições E e F), Ni-58 (posição F), Fe-56 (posição E), e Mg-24 (posição E) que apresentaram valores de C/E situados entre 2,0 e 3,6. Tal fato pode estar indicando o afastamento, já constatado para nêutrons térmicos (6), dos valores calculados em relação aos experimentais, a medida que afasta-se do núcleo do reator. O que reflete a dificuldade encontrada de avaliar-se o transporte e espalhamento dos nêutrons rápidos em problemas de penetração profunda, haja visto a diversidade de elementos químicos que compõem o concreto barita que circunda o BH-8 (com início próximo ao ponto D).

Vê-se, da tabela 6, que a atenuação dos nêutrons ao longo do BH-8, para nêutrons rápidos (de B para E) nos resultados calculados para os vários isótopos estudados, apresentam o mesmo comportamento, o que é esperado, visto que o material entre as duas

Tabela 5 - Taxas de Reação Calculadas e Medidas dentro do
 "Beam Hole" número 8 do Reator IEA-R1
 C/E - Valor Calculado/ Valor Medido

FOLHA	POSIÇÃO	TAXA de REAÇÃO Calculada	TAXA de REAÇÃO Experimental	C/E
Au-197	A	1,0495E+10	(2,7961 ± 0,039) E+10	0,375
	B	1,5111E+09	(2,7679 ± 0,031) E+09	0,546
	C	3,4422E+08	(5,5183 ± 0,080) E+08	0,624
	D	1,3117E+08	(9,9011 ± 0,014) E+07	1,325
	E	6,2171E+07	(2,9142 ± 0,042) E+07	2,133
	F	3,0534E+07	(1,2324 ± 0,018) E+07	2,478
	G	-	(6,4619 ± 0,093) E+06	-
Ni-58	A	1,0915E+07	(1,0877 ± 0,061) E+07	1,004
	B	1,7538E+06	-	-
	E	1,9401E+05	(5,4292 ± 0,041) E+04	3,573
Fe-56	B	2,2711E+04	(5,7285 ± 0,006) E+03	3,945
	E	2,5931E+03	(9,0785 ± 0,002) E+02	2,856
Ti-46	B	2,6703E+05	(1,7710 ± 0,037) E+04	15,07
	E	3,0158E+04	(2,4277 ± 0,008) E+03	1,24
Mg-24	B	7,4856E+04	(5,7084 ± 0,013) E+04	1,311
	E	8,5690E+03	-	-
	F	5,6021E+03	(1,5976 ± 0,007) E+03	3,510
Ti-48	B	7,1322E+03	(1,6721 ± 0,008) E+03	1,527
	E	8,1671E+02	-	-
FE-54	B	1,4207E+06	(2,2420 ± 0,020) E+06	0,632
	E	1,5764E+05	-	-
In-115m	B	-	(1,1371 ± 0,022) E+06	-
	E	-	(4,2142 ± 0,014) E+04	-

Tabela 6 - Atenuação das Taxas de Reação
 Medidas e Calculadas ao longo do Canal
 de Irradiação Número 8 do IEA-R1.

FOLHA	RAZÃO	R_M / R_I medido	R_C / R_I calculado	C/E
Au-197	B / A	9,90E-02	1,44E-01	1,45
	C / A	1,97E-02	3,28E-02	1,66
	D / A	3,54E-03	1,25E-02	3,62
Ni-58	B / A	-	1,61E-01	-
	E / A	4,99E-03	1,78E-02	3,56
Fe-56	E / B	1,58E-01	1,14E-01	0,72
Ti-46	E / B	1,37E-01	1,13E-01	0,82
Mg-24	E / B	-	1,14E-01	-
	F / B	2,80E-02	7,48E-02	2,67
Ti-48	E / B	-	1,15E-01	-
FE-54	E / B	-	1,11E-01	-

Onde:

R_M = Taxa de Reação Medida

R_C = Taxa de Reação Calculada

R_I = As Taxas de Reação são normalizadas em
 relação ao ponto mais próximo do início
 do núcleo (medido ou calculado)

posições para as diversas folhas é o mesmo,
 ou seja, ar. Este resultado também é
 observado nas medidas experimentais (Fe-56 e
 Ti-46), embora pode-se constatar que tem-se
 poucas medidas da Razão E/B.

Também da tabela 6, observando-se os
 resultados relativos (normalizados em relação
 aos pontos mais próximos do núcleo - ponto
 B), pode estar indicando que deve existir uma
 diferença entre o termo fonte utilizado no
 cálculo e o termo fonte experimental. (Razão
 E/B calculada e medida variando de 0,82 a
 0,72).

Sugere-se a aquisição de mais medidas experimentais para obter-se uma maior estatística dos valores de taxas de reação nos pontos considerados e em mais pontos no interior do BH-8, com a finalidade de gerar mais dados, diminuindo a incerteza nos resultados medidos a nível de confiabilidade estatística.

Além disso, como proposta para continuidade deste estudo, sugere-se realizar o cálculo das seções de choque para a reação do espalhamento inelástico ocorrida na folha de Índio In^{115} do tipo (n,n') , produzindo o isótopo In^{115} metaestável. Este cálculo é particularmente importante, devido ao fato do limiar desta reação ocorrer para nêutrons no início da faixa rápida de energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]- Bitelli, Ulysses d'Utra, Alves, Márcia A. Pichi. Medidas de Taxa de Reação no B.H. - 8 - Fase 1, relatório técnico interno da Divisão de Física de Reatores do IPEN. Junho 1992. (RP230040S092-414).
- [2]- Rhoades, W.A.; Mynatt, F.R. DOT-3.5 - Two Dimensional Discrete Ordinates Radiation Transport Code, CCC-276, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA.
- [3]- Alves, Márcia P.; Bitelli, Ulysses; Coelho, Paulo R.P. Rotina Experimental para Mapeamento de Fluxo de Nêutrons Térmicos no BH 8 do Reator IEA-R1 - documento interno da Divisão de Física de Reatores do IPEN. 1992. (RP23-IP3-CH17-4RE-304).
- [4]- Greene, N.M., Ford III, W.E. et alli. AMPX-II: A Modular Code System for Generating Coupled Multigroup Neutron-Gamma Libraries from Data in ENDF Format, PSR-63, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA.
- [5]- Haynes, G.C. The AXMIX Program for Cross Section Mixing and Library Arrangement, PSR-75, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA.
- [6]- Damy, Margaret de A. Reavaliação do Espectro de Nêutrons no BH8, documento interno da Divisão de Física de Reatores do IPEN. Abril 1991. (RP230040024-413).
- [7]- R. W. Roussin et alli. VITAMIN-C - 171 NEUTRON, 36 Gamma-Ray Group Cross Sections on AMPX and CCCC Interface Formats for Fusion and LMFBR Neutronics - DCL-41. ORNL, July 1980.
- [8]- Macfarlane, R. E. et alli. The NJOY Nuclear Data Processing System, Vol-I: User's Manual, LA-9393-M, Vol(ENDF-324), 1982.

ABSTRACT In this work there are shown compararisons between calculations and experimental values for the several foil reactions rates. The DOT-3.5 is used to make the transport calculation and to calculate the reaction rates of the activation foils. The results are compared with an experiment that was made at the IEA-R1 reactor in Sao Paulo - Brazil, were the foils were placed on the axis of beam hole number 8. The objective of this task, is to study the problem of penetration in voids. In the general sense, good agreement has been found even though for some cases the results were in discrepancy.