

CNEN/SP

ipen Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares

ESTUDO DA VALIDAÇÃO DO PROGRAMA HAMMER-TECHNION
PARA BARRA DE CONTROLE DO REATOR TIPO PWR

Nanami Kosaka

PUBLICAÇÃO IPEN 85

OUTUBRO/1985

SÃO PAULO

ISSN 0101-3084

PUBLICAÇÃO IPEN 85

OUTUBRO/1985

**ESTUDO DA VALIDAÇÃO DO PROGRAMA HAMMER-TECHNION PARA
BARRA DE CONTROLE DO REATOR TIPO PWR**

Nanami Kosaka

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DE REATORES

**CNEN/SP
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
SÃO PAULO – BRASIL**

Série PUBLICAÇÃO IPEN

INIS Categories and Descriptors

F51.00

COMPUTER CODES
CONTROL ROD WORTHS
PWR TYPE REACTORS
RELIABILITY

ESTUDO DA VALIDAÇÃO DO PROGRAMA HAMMER-TECHNION PARA BARRA DE CONTROLE DO REATOR TIPO PWR

Nanami Kosaka

RESUMO

Utilizando o método de ajuste de seção de choque macroscópica foi feito um estudo de validação do programa HAMMER-TECHNION para barras de controle do reator tipo PWR.

Reatividades das barras de controle calculadas foram comparadas com resultados experimentais das críticas encontrados na literatura. Os resultados obtidos mostraram-se satisfatórios e nos 13 casos analisados nesse trabalho o máximo desvio encontrado para reatividade foi da ordem de $\pm 6\%$.

STUDY OF RELIABILITY OF HAMMER-TECHNION CODE TO CALCULATE CONTROL ROD WORTH IN PWR'S

ABSTRACT

In this paper the reliability of HAMMER-TECHNION Code to calculate control rod worth in PWR's has been verified by comparing the calculated results with the experimental data available in the literature.

The results were found to be satisfactory and for 13 cases investigated the maximum deviation to experimental data was $\pm 6\%$ on the reactivity worth.

INTRODUÇÃO

O grupo de neutrônica da Divisão de Física de Reatores desse Instituto (IPEN - CNEN/SP) no seu esforço contínuo de melhorar e atualizar a sua biblioteca de programas de computação para cálculos neutrônicos adquiriu uma nova versão do programa HAMMER⁽⁹⁾, o HAMMER-TECHNION⁽⁵⁾ trazido da Universidade de Michigan.

O programa HAMMER vem sendo utilizado desde 1974 pelo grupo de neutrônica para cálculos de reator tipo PWR uma vez que esse programa já foi exaustivamente testado nessa instituição^(7,8) para críticas moderadas a água leve. Entretanto, a sua biblioteca de seções de choque microscópicas foi originada do ENDF/B-III e não contém alguns dados fundamentais, principalmente parâmetros de ressonância dos elementos absorvedores como Ag, In, Cd, resultando assim em desvio relativamente grande para valor da reatividade das barras de controle quando comparado com resultado experimental.

O programa HAMMER-TECHNION por sua vez apresenta vantagens em relação ao HAMMER tais como:

- biblioteca de seções de choque mais atualizada originada no ENDF/R-IV e V.
- homogeneização parcial, isto é, gera seções de choque macroscópicas homogeneizadas para diferentes regiões da célula. Essa opção é muito importante nos cálculos das células de controle e de veneno queimável.

O objetivo desse trabalho é estudar a validade do programa HAMMER-TECHNION para gerar seções de choque das barras de controle contendo material altamente absorvedor como Ag, In, Cd ou Boro. Tendo em vista esse fato procurou-se na literatura críticas perturbadas com barras de controle que possuíssem bastante dados experimentais para efeito de comparação com os valores calculados.

Para eliminar possíveis influências de incertezas de geometria limitou-se o estudo de críticas que apresentam geometria simples e simétrica como as da Westinghouse (4).

O programa HAMMER-TECHNION foi implantado no computador IBM 370/155^(*) do IPEN - CNEN/SP em janeiro de 1984 por Horácio Nakata.

2 - PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

O procedimento de cálculo usado nesse trabalho segue o esquema da Figura 2.1. As seções de choque do combustível e do controle são geradas com programa HAMMER-TECHNION e o cálculo do fator de multiplicação efetivo do sistema é efetuado com programa CITATION em duas dimensões na geometria X - Y.

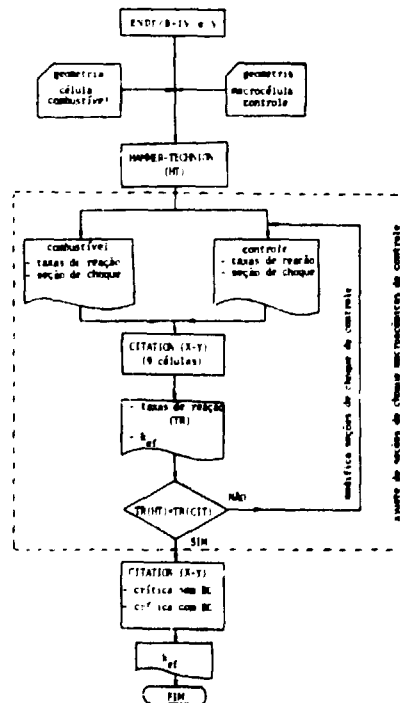


Figura 2.1 - Fluxograma de Cálculo

(*) O computador atual do IPEN - CNEN/SP é IBM4341, Mod G12.

As barras de controle devem ter um tratamento diferente das barras de combustível porque são constituídas de material fortemente absorvedor de nêutrons e por essa razão a teoria de difusão não é aplicável dentro e nas vizinhanças da mesma. Uma vez que o cálculo do fator de multiplicação de um reator através da teoria de transporte é praticamente inviável adota-se a teoria de difusão e nesse caso as constantes macroscópicas das barras de controle geradas com HAMMER-TECHNION (transporte) não podem ser usadas diretamente no CITATION (difusão), elas devem ser antes ajustadas corrigindo em parte os erros devido à teoria de difusão.

Há várias metodologias para calcular seções de choque das barras de controle e conforme o trabalho do Nakata⁽⁶⁾ o método de Nordheim - Scaletter é recomendado uma vez que a técnica é bastante simples e rápida e fornece resultados razoavelmente satisfatórios.

2.1 - Geração de Constantes Macroscópicas da Barra de Controle

As constantes macroscópicas das barras de controle foram geradas com o programa HAMMER-TECHNION onde a barra de controle foi simulada por uma macrocélula cilindrizada. Nessa macrocélula leva em consideração a influência das 8 células de combustível que circundam a barra de controle como se vê na Figura 2.2. Na Tabela 2.1 é apresentada a composição de cada região da macrocélula de controle.

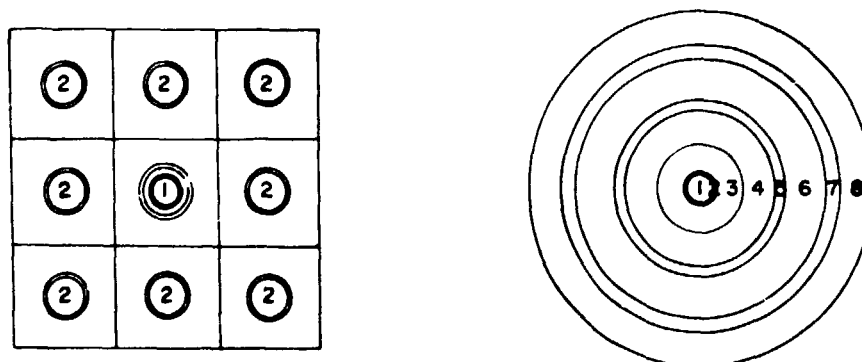


Figura 2.2 - Macrocélula de Controle

Tabela 2.1

Descrição das Regiões da Macrocélula de Controle

REGIÃO	ESPECIFICAÇÃO	MATERIAL
1	absorvedor	Ag-In-Cd ou B ₄ C
2	revestimento	SS 304
3	moderador	H ₂ O
4	moderador	H ₂ O
5	revestimento	SS 304 ou Zircaloy
6	combustível	UO ₂
7	revestimento	SS 304 ou Zircaloy
8	moderador	H ₂ O

As regiões 1, 2 e 3 correspondem à célula de controle e as demais regiões representam as 8 células de combustível.

2.2 – Ajuste das Constantes Macroscópicas

O fluxo neutrônico e as taxas de reação calculadas na macrocélula (HAMMER-TECHNION) são tomados como pontos de partida e o método consiste em se proceder iterativamente os valores das constantes macroscópicas utilizando programa de difusão (CITATION) tal que as taxas de reação sejam idênticas às calculadas por programa de transporte.

As constantes macroscópicas ajustadas são coeficiente de difusão, seção de choque de absorção (combustível e controle) e de remoção para cada grupo de energia. O cálculo da macrocélula através do programa de difusão CITATION foi efetuado em geometria bi-dimensional (X-Y), onde a geometria da célula e a malhagem espacial são iguais às utilizadas no cálculo da crítica com barras de controle.

2.3 – Cálculo da Reatividade da Barra de Controle

O cálculo da reatividade da barra de controle é feito usando a relação definida na referência 4 como mostra a expressão abaixo.

$$\frac{\Delta k}{k} = \frac{k(\text{sem barra de controle}) - k(\text{com barra de controle})}{k(\text{com barra de controle})}$$

O fator de multiplicação efetivo (k) é calculado com o programa CITATION em dois grupos de energia, duas dimensões, geometria (X-Y), pino a pino com duas malhas espaciais por célula.

Para o sistema com as barras de controle inseridas utilizou-se as constantes macroscópicas ajustadas para a região de controle e considerou-se que as posições das barras de controle são ocupadas pelas barras de combustível quando são retiradas.

2.4 – Cálculo do "buckling"

O "buckling" axial ($B^2 z$) é calculado para cada caso de acordo com a altura crítica experimental da água quando as barras de controle estão inseridas usando a seguinte expressão.

$$B^2 z = \left(\frac{\pi}{H_c + \delta + d} \right)^2$$

onde

H_c : altura crítica da água

δ : economia do refletor na direção z

d : distância extrapolada = $\frac{2}{3}$

Para economia de refletor foi adotado valor de 13 cm conforme a referência 2.

3 – EXPERIMENTOS CONSIDERADOS

Para avaliar o desempenho e a confiabilidade do programa HAMMER-TECHNION comparou-se os resultados obtidos nos cálculos com dados experimentais encontrados na literatura. Para esse fim foram escolhidos 3 críticas de geometria simples para eliminar as incertezas devido a modelagem.

Os experimentos considerados foram efetuados pela Westinghouse⁽⁴⁾ para investigar o comportamento das barras de Ag-In-Cd e B₄C em forma da aranha. Os experimentos tomados como comparação utilizam combustível cerâmico na forma de UO₂ com enriquecimento em torno de 2,7% e moderado a água. Escolheu-se 13 experimentos (casos) variando a distribuição das barras de controle e as características das barras de combustível e de controle.

Na Tabela 3.3 são apresentados resumidamente os 13 casos analisados e nas Tabelas 3.1 e 3.2 são fornecidas características das barras de controle e de combustível. A Figura 3.1 mostra configuração da crítica especificando a localização das barras de controle para cada caso.

Tabela 3.1

Características das Barras de Combustível⁽⁴⁾

	A	C
combustível	UO ₂	UO ₂
enriquecimento (%)	2,70	2,72
diâmetro da pastilha (cm)	0,768	1,016
diâmetro do revestimento (cm)	0,859	1,235
revestimento	SS304	Zircaloy
espessura do revestimento (cm)	0,041	0,103
temperatura da água (°C)	20	20

Tabela 3.2

Características das Barras de Controle⁽⁴⁾

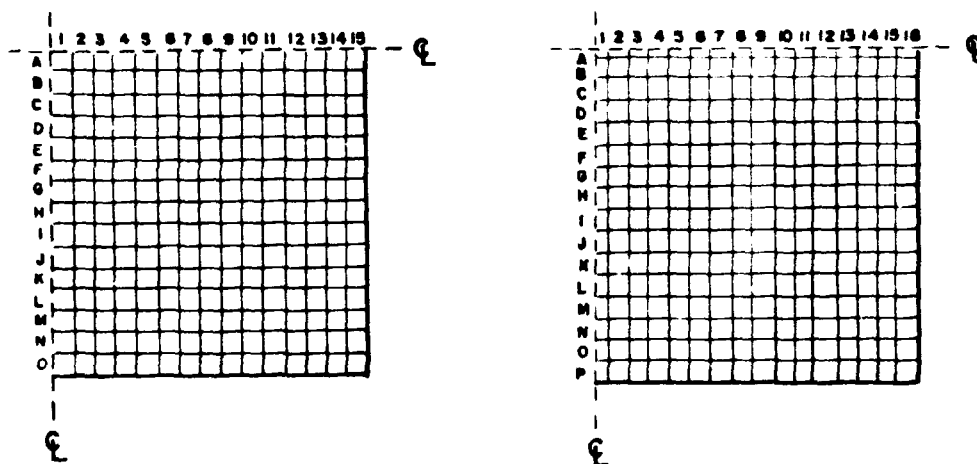
TIPOS DE BC	I	II	III	IV	V	VI
materia absorvedor	B	B	Ag-In-Cd	Ag-In-Cd	Ag-In-Cd	Ag-In-Cd
densidade (g/cm ³)	1,25	1,35	10,2	10,2	10,2	10,2
diâmetro do absorvedor (cm)	0,589	1,003	0,660	0,838	1,024	0,838
diâmetro externo da barra de controle (cm)	0,724	1,105	0,724	1,054	1,067	1,054
revestimento	SS304	SS304	SS304	SS304	-	-
espessura do revestimento (cm)	0,068	0,051	0,025	0,102	-	-

Tabela 3.3

Casos Analisados – Especificação⁽⁴⁾

5

Caso	Tipo de Rede	"pitch" (cm)	Arranjos das Células	Tipo de Combustível	Tipo de Controle	Nº de Barras Controle	Altura Crítica da Água (cm)
1	quadrada	1.524	31 x 31	C	I-B ₄ C	16	64,07
2.1	quadrada	1.524	31 x 31	C	I-B ₄ C	16	62,70
2.2	quadrada	1.524	31 x 31	C	I-B ₄ C	16	86,07
3.1	quadrada	1.524	30 x 30	C	I-B ₄ C	16	76,82
3.2	quadrada	1.524	30 x 30	C	VI-Ag/In/Cd	16	87,70
3.3	quadrada	1.524	30 x 30	C	IV-Ag/In/Cd	16	91,86
4.1	quadrada	1.524	30 x 30	C	I-B ₄ C	12	62,04
4.2	quadrada	1.524	30 x 30	C	II-B ₄ C	12	100,01
5.1	quadrada	1.524	31 x 31	C	I-B ₄ C	25	61,58
5.2	quadrada	1.524	31 x 31	C	IV-Ag/In/Cd	25	70,53
5.3	quadrada	1.524	31 x 31	C	V-Ag/In/Cd	25	92,15
6	quadrada	1.105	61 x 61	A	III-Ag/In/Cd	24	77,46
7	quadrada	1.524	31 x 31	C	V-Ag/In/Cd	16	89,75



Caso	Posição das Barras de Controle
3.1	B5, C3, E2, E5
3.2	
3.3	
4.1	B5, E2, E5
4.2	

Caso	Posição das Barras de Controle
1	C3, C7, G3, G7
2.1	B2, B4, D2, D4
2.2	
5.1	A1, A7, A13
5.2	G1, G7, G13
5.3	D1, D7, D13
7	C6, D4, F3, F6

Figura 3.1 – Configurações dos Núcleos das Críticas da Westinghouse

4 – RESULTADOS

Os treze casos analisados nessa tarefa são combinações de sete diferentes arranjos de barras de controle, dois tipos de combustível e seis tipos de barras de controle (veja Tabela 3.3 e Figura 3.1).

Combinando seis tipos de barras de controle e dois de combustível definiu-se seis macrocélulas de controle e para cada macrocélula foram ajustadas as seções de choque macroscópicas usando a técnica descrita no item 2.2. No processo de ajuste de seções de choque observou-se um desvio máximo da ordem de 1,5% na taxa de reação.

Na Tabela 4.1 são mostrados os valores do fator de multiplicação efetivo calculados para a crítica com e sem barras de controle inseridas, na Tabela 4.2 são comparados os valores das reatividades das barras calculados e experimentais. Os valores listados na Tabela 4.1 e 4.2 foram obtidos para cada caso adotando as seguintes opções de cálculo.

Tabela 4.1

Fator de Multiplicação Efetivo Calculado

Casos	Material Absorvedor	B^2z (cm^{-2}) $\times 10^{-4}$	k (sem barra de Controle)	k (com barra de Controle)
1	B	16,365	1,032975	0,968533
2.1	B	16,958	1,030875	0,969135
2.2	B	9,937	0,955182	0,965660
3.1	B	12,074	1,038830	0,970008
3.2	Ag-In-Cd	9,620	1,047296	0,965633
3.3	Ag-In-Cd	8,876	1,649879	0,966329
4.1	B	17,255	1,021348	0,968784
4.2	B	7,648	1,054195	0,969501
5.1	B	17,467	1,029222	0,966674
5.2	Ag-In-Cd	13,948	1,041207	0,961517
5.3	Ag-In-Cd	8,827	1,059112	0,962106
6	Ag-In-Cd	11,923	1,016252	0,973735
7	Ag-In-Cd	9,242	1,057657	0,964831

Tabela 4.2

Resultados Obtidos para Valor de Reatividade das Barras de Controle

Caso	Material Absorvedor	$\frac{\Delta k}{k}$ (%) Calculado	$\frac{\Delta k}{k}$ (%) Experimental ⁽⁴⁾	Δ (%) (desvio)
1	B	6,65	6,96	- 4,45
2.1	B	6,37	6,76	- 5,77
2.2	B	9,27	9,12	+ 1,64
3.1	B	7,09	7,43	- 4,58
3.2	Ag-In-Cd	8,46	8,58	- 1,40
3.3	Ag-In-Cd	8,65	8,70	- 0,57
4.1	B	5,43	5,70	- 4,74
4.2	B	8,74	8,92	- 2,02
5.1	B	6,47	6,54	- 1,07
5.2	Ag-In-Cd	8,29	7,86	+ 5,47
5.3	Ag-In-Cd	10,52	9,52	+ 5,88
6	Ag-In-Cd	4,37	4,44	- 1,58
7	Ag-In-Cd	9,62	9,49	+ 1,37

- dois grupos de energia,
- duas dimensões, geometria (X-Y),
- duas malhas espaciais por célula,
- "buc'ling" axial (B^2_2) calculado de acordo com a altura crítica de água quando as barras de controle estão inseridas,
- as posições das barras de controle são ocupadas pelas barras de combustível quando são retirados,
- valor da reatividade das barras de controle calculado segundo a relação:

$$\frac{\Delta k}{k} = \frac{k(\text{sem barra}) - k(\text{com barra})}{k(\text{com barra})}$$

- desvio calculado segundo a expressão:

$$\Delta\% = \frac{\frac{\Delta k}{k} \text{ calculado} - \frac{\Delta k}{k} \text{ experimental}}{\frac{\Delta k}{k} \text{ experimental}} \times 100$$

- refletor de H_2O com espessura de 20 cm.
- na geração de seções de choque com HAMMER-TECHNION as opções escolhidas para o tratamento de moderação no HAMLET foram:
 - tratamento P1 para moderação por Hidrogênio.
 - tratamento de segunda ordem para outros isótopos.

No apêndice estão exemplos de dados de entrada para programa HAMMER-TECHNION (cálculo célula) e para CITATION (ajuste de seções de choque).

5 - CONCLUSÃO

Na literatura⁽⁴⁾ consta que é aceitável desvio até da ordem de $\pm 10\%$ no valor de reatividade das barras de controle nos cálculos de projeto. Baseado nesse dado pode-se dizer que o programa HAMMER-TECHNION produz bons resultados uma vez que o máximo desvio obtido nos 13 casos analisados foi da ordem de $\pm 6\%$.

O programa HAMMER-TECHNION mostrou-se ser mais versátil e mais poderoso do que o HAMMER principalmente nos cálculos que envolvem materiais como Ag, In e Cd que apresentam ressonâncias acentuadas. Além disso HAMMER-TECHNION possui na sua biblioteca dados dos isótopos Ag-109 e Ag-107 diferenciados permitindo um cálculo mais exato da ressonância desses isótopos.

Utilizando a mesma metodologia de ajuste de seções de choque macroscópicas para barras de controle o programa HAMMER produziu desvio da ordem de 13% para barra de Ag-In-Cd (caso 6)⁽¹⁾.

APÊNDICE

A - Dados de Entrada do HAMMER-TECHNION Macro célula de Controle

11	21	21 111	21 111			
	1 1 1	1	CASO 3.1 - CRITICA DA WESTINGHOUSE			
		1	HAMMERTEC-BARRA DE B4C			
1			12.07			
2	3 8	0 1				
3	1 1	2 60	0.2318898	20.0		
4			8010.	1030.		0.0137632
5			8011.	1030.		0.0558885
6			8012.	1030.		0.0174129
7	2 2	3 10	0.2850394	20.0		
8			24000.	1030.		0.0157806
9			26000.	1030.		0.0663953
10			28000.	1030.		0.0093630
11	3 3	2 31	0.6770275	20.0		
12			1001.	1030.		0.0669444
13			8016.	1030.		0.0334722
14	4 4	2 21	1.0602990	20.0		
15			1001.	1030.		0.0669444
16			8016.	1030.		0.0334722
17	5 5	1 10	1.1633851	20.0		
18			302.	1030.		0.0409554
19	6 6	3 40	1.6227954	20.0		
20			82235.	0.		0.0006383
21			92238.	0.		0.0225762
22			8016.	1030.		0.0464290
23	7 7	1 10	1.7365243	20.0		
24			302.	1030.		0.0409554
25	8 8	2 21	2.0310825	20.0		
26			1001.	1030.		0.0669444
27			8016.	1030.		0.0334722
		25 10	25			
	02238.	02238.				
LAT	1 2 3					
MDL	4 5 6 7 8					

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BATISTA, J. L. Comunicação pessoal.
2. CLAPS, M. & RAMA, P. G. Evaluation model of absorbing rod reactivity worth and comparison with experiments for B₄C absorbers. *Energ. Nucl. (Madrid)*, 18(4):211-6, 1971.
3. FOWLER, T. B.; VONDY, D. R.; CUNNINGHAM, G. M. *CITATION: nuclear reactor core analysis code*. Oak Ridge, Tn., Oak Ridge National Laboratory, 1971. (ORNL-TN-2496, Rev. 2).
4. GAAFER, M. A.; MANGO, L.; ORESTANO, F. V.; PISTELLA, F. Assessment of the reliability of the CNEN'S calculational methods for the neutronic design of PWRs. *Nucl. Technol.*, 27:87-206, 1975.
5. The HAMMER code system. Palo Alto, CA, Electric Power Research Inst., 1978. (EPRI-NP-565).
6. NAKATA, H. *Um estudo sobre os métodos de cálculo de reatividade de barras de controle em unidades críticas moderadas por grafita*. São Paulo, 1976. (Dissertação de Mestrado, Instituto de Energia Atômica).
7. ONUSIC JR. J. *Possibilidade teóricas de cálculo do programa de computação HAMMER*. São Paulo, 1976. (Dissertação de Mestrado, Instituto de Energia Atômica).
8. SABUNDJIAN, G. & NAKATA, H. *Cálculo neutrônico com programas de transporte e de difusão em críticas moderadas a água leve com combustível de UO₂ enriquecido a 4,75%*. São Paulo, Comissão Nacional de Energia Nuclear, 1983. (IPEN-Inf-13).
9. SUICH, J. E. & HONECK, H. C. *The HAMMER system: heterogeneous analysis by multigroup methods of exponential and reactors*. Aiken, S. C. Savannah River Lab., Du Pont de Nemours, 1978. (DP-1064).