

EXPERIMENTO DO VAZIO LOCAL NO REATOR IPEN/MB-01

Alfredo Abe , Elcio Angioletto, Hertz Pasqualetto, Rinaldo Fuga e Rogério Jerez*

Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, CTMSP
Divisão de Física de Reatores
Caixa Postal 68 550
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 - Cidade Universitária
21945-970, São Paulo, Brasil
e-mail: ayabe@net.ipen.br

*Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN/CNEN-SP
Supervisão de Operação de Reatores
Caixa Postal 11049
Av. Lineu Prestes 2.242 – Cidade Universitária
05508-000 São Paulo, SP, Brasil

RESUMO

O reator IPEN/MB-01 atingiu a sua primeira criticalidade nuclear em Novembro de 1988 e desde então vêm sendo executados inúmeros experimentos dentro do programa de validação e qualificação de metodologias de cálculo de Física de Reatores. Neste sentido, realizou-se recentemente o experimento visando obter o coeficiente de reatividade de vazio. Experimento anterior do coeficiente de vazio foi efetuado inserindo-se pequenos tubos de alumínio no canal do moderador, este experimento apresentava dificuldade em termos de comparação com cálculos devido ao tamanho reduzido dos tubos. A fim de solucionar a dificuldade foi executado um experimento denominado de vazio local com a finalidade de obter um coeficiente de reatividade de vazio comparável diretamente com o valor calculado.

Keywords : reactivity, void, experiment, MCNP, TORT, CITATION.

I. INTRODUÇÃO

Os coeficientes de reatividade desempenham um papel fundamental na segurança do reator. No projeto do núcleo de reator estes parâmetros devem ser sempre considerados a fim de garantir a operação segura do reator. O coeficiente de reatividade do núcleo é um parâmetro que depende de variáveis como pressão, temperatura e vazios que afetam diretamente a reatividade e, consequentemente influenciam diretamente o controle do reator [1]. Neste sentido, o coeficiente de reatividade de vazio é um parâmetro que expressa a mudança de reatividade devido à formação de vazios no núcleo. Os vazios podem ser a formação de bolhas no moderador, o que diminui a densidade efetiva do mesmo, reduzindo a moderação e, consequentemente, aumenta a absorção dos nêutrons na região de ressonâncias, reduzindo a quantidade de fissões. O aumento de absorções de nêutrons e a redução de fissões garantem uma segurança inerente ao sistema.

O parâmetro coeficiente de reatividade de vazio pode ser avaliado experimentalmente em instalações como a unidade crítica IPEN/MB-01, inserindo-se vazios dentro do núcleo. Os vazios são normalmente representados através de inserção de objetos ou materiais que deslocam uma

determinada quantidade de moderador (água). Os objetos ou materiais devem ser “transparentes” neutronicamente, isto é, devem possuir baixas seções de choque de absorção de nêutrons e efetivamente apenas deslocar o moderador. No reator IPEN/MB-01, o coeficiente de reatividade de vazio é verificado através da diferença entre as reatividades do núcleo referência (sem o vazio) e o núcleo com a presença do vazio. A variação da reatividade entre os dois sistemas é observada pela variação da posição das barras de controle.

II. EXPERIMENTO DE COEFICIENTE DE VAZIO

O primeiro experimento do coeficiente de reatividade de vazio [2] no reator IPEN/MB-01 consistiu em inserir pequenos tubos de alumínio em posições experimentais existentes na placa matriz do núcleo. As posições de inserção dos tubos se localizam no meio do canal, assim a presença do tubo não interfere diretamente na vareta combustível; apenas uma certa quantidade de moderador é deslocado da região.

A presença dos tubos de alumínio no canal proporciona vazios no moderador e, consequentemente,

afeta a reatividade total do núcleo. Os tubos de alumínio são inseridos e distribuídos de forma homogênea no núcleo a fim de evitar perturbações localizadas. No experimento executado foram inseridos 43 tubos de alumínio distribuídos homogeneamente no núcleo com as seguintes dimensões : diâmetro interno de 3,2 mm e diâmetro externo de 4,6 mm, com o comprimento aproximado de 1600 mm. Adicionalmente, neste experimento verificou-se a influência da distribuição dos tubos de alumínio no resultado do coeficiente de vazio. Observou-se que para uma distribuição homogênea os coeficientes não alteram significativamente.

O valor experimental não é possível ser comparado diretamente com o valor calculado pois, estes pequenos tubos ocios de alumínio representam uma grande dificuldade em termos de modelagem geométrica para um cálculo com o código de difusão. Normalmente, em um cálculo detalhado (pino a pino), o tamanho do intervalo espacial é igual à distância centro a centro entre varetas (ordem de centímetros), no entanto para representar explicitamente os vazios (tubos ocios), a discretização a ser adotada deve ser da ordem de milímetros. A utilização de pequenos intervalos de discretização juntamente com intervalos maiores acarreta em problemas de convergência e instabilidade da solução da equação de difusão de nêutrons. Por outro lado, a utilização somente de pequenos intervalos (ordem de milímetros) espaciais na modelagem eleva significativamente a quantidade de memória computacional requerida na solução numérica da equação de difusão de nêutrons. Além da dificuldade da modelagem do sistema no código de difusão, existe a dificuldade na geração de uma seção de choque efetiva através de um cálculo celular. A Fig. 1., ilustra esquematicamente a região de vazio no canal do moderador.

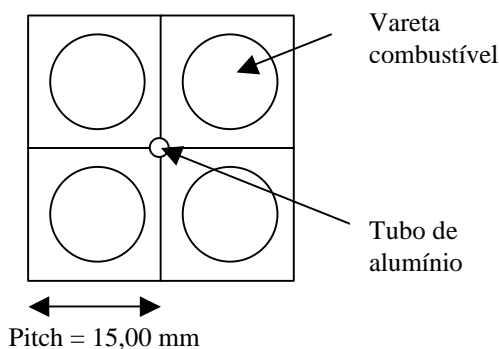


Figura 1. Representação Esquemática de Um Canal com a Presença do Pequeno Tubo de Alumínio.

Do ponto de vista de cálculo, as dificuldades não permitem uma comparação direta entre os resultados medidos e calculados, assim a dificuldade foi contornada adotando-se uma metodologia de cálculo onde a densidade do moderador na célula foi alterada de forma equivalente, isto é, a densidade do moderador é modificada nos cálculos

de forma a representar a fração volumétrica ocupada pelos tubos ocios de alumínio.

Os vazios inseridos pelos tubos ocios de alumínio são representados no cálculo celular para geração da seção de choque através de uma densidade do moderador ponderada e, não é considerado no cálculo de difusão, a modelagem geométrica dos pequenos tubos de alumínio.

III. EXPERIMENTO DE COEFICIENTE DE VAZIO LOCAL

A presença dos pequenos tubos ocios de alumínio representa o vazio no experimento do coeficiente de vazio no reator IPEN/MB-01, no entanto o tamanho reduzido das amostras impossibilitava representar estas amostras de forma explícita no cálculo, seja na geração de seção de choque ou na modelagem geométrica. A fim de solucionar estas dificuldades foi idealizado um experimento no qual o vazio a ser simulado teria um volume significativo.

O experimento do vazio local consiste em inserir na região central do núcleo um bloco de alumínio num formato cúbico (aresta $L= 9,00$ cm), vazado com 36 furos (diâmetro $d=1,0$ cm) para permitir a passagem das varetas combustíveis.

A Fig. 2 ilustra o bloco de alumínio com as dimensões. O bloco foi posicionado radialmente no centro do núcleo, e axialmente a metade da altura do bloco coincidente com a metade da altura ativa do núcleo, para tal o bloco foi colocado sobre uma estrutura de apoio de lucite.

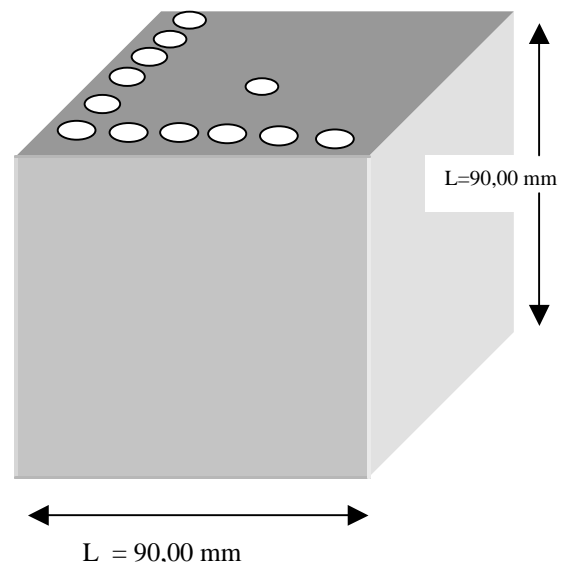


Figura 2. Ilustração do Bloco de Alumínio Utilizado para Simular o Vazio Local.

IV. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento do vazio local foi executado em quatro etapas. A primeira etapa objetivou determinar as posições críticas das barras de controle na situação referência, caracterizada pela ausência do bloco de alumínio. A segunda etapa objetivou a verificação da reatividade inserida pelo bloco de alumínio; para tanto efetuou-se a remoção do conjunto de 36 varetas combustíveis do centro do núcleo para a inserção do bloco de alumínio com os furos passantes e, posteriormente a recolocação das varetas retiradas. As duas etapas finais objetivaram verificar e comparar a distribuição das taxas de reação em uma das varetas combustíveis na ausência e na presença do bloco.

A vareta utilizada para a verificação da taxa de reação penetrava através de um dos furos passantes do bloco de alumínio. Desta forma, parte do comprimento ativo da vareta combustível foi envolvida pelo bloco de alumínio ao invés do moderador.

A Tabela 1 apresenta as posições críticas do banco das barras de controle na duas situações (referência e com o bloco).

TABELA 1. Posição crítica das barras de controle BC#1 e BC#2

Configuração do núcleo	Percentual de retirada da barra de controle BC#1	Percentual de retirada da barra de controle BC#2
Referência (28x26)	58.80	58.80
Bloco de Alumínio	66.58	66.70

A Fig. 3 ilustra a configuração do núcleo com o bloco de alumínio inserido na região central.

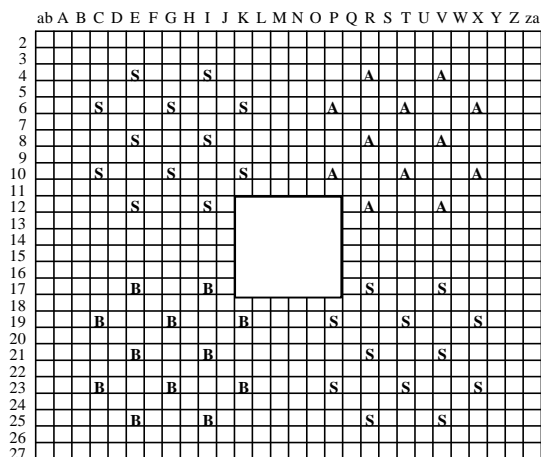


Figura 3. Configuração do Núcleo do Reator IPEN/MB-01 com a Presença do Bloco de Alumínio na Região Central

A reatividade inserida pelo bloco de alumínio é determinada através das curvas de calibração das barras de controle. As figs. 4 e 5 ilustram a curva de calibração das barras de controle executadas na condição de referência e na condição com a presença do bloco de alumínio.

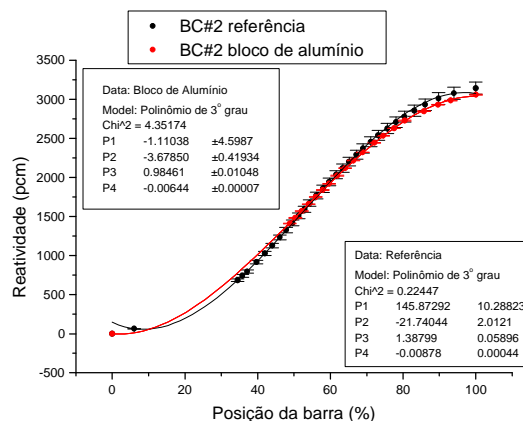


Figura 4. Curvas de Reatividade Integral da Barra BC#2: Referência e com Vazios Devidos a Presença do Bloco de Alumínio.

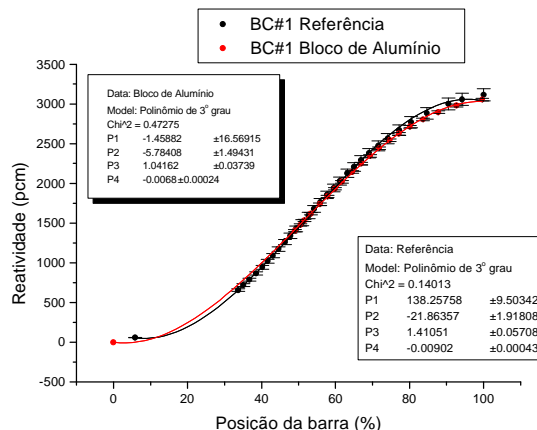


Figura 5. Curvas de Reatividade Integral da Barra BC#1: Referência e com Vazios Devidos a Presença do Bloco de Alumínio.

Efetuando-se o ajuste das curvas de calibração das barras de controle BC#1 e BC#2, pode-se inferir a reatividade inserida nos vários casos de inserção de vazios.

Inicialmente, tomando-se as posições críticas das barras de controle BC#1 e BC#2 (Tabela 1) determinou-se a reatividade do sistema, substituindo-se na função de ajuste o valor da posição de uma determinada barra de controle. A função de ajuste da curva integral de reatividade da barra de controle forneceu o valor de reatividade para a posição de criticidade.

A reatividade obtida devido a presença somente do bloco de alumínio na região central do núcleo foi de $-669,64 \pm 27,6$ pcm

O bloco de alumínio inserido na região central do núcleo possibilitou também a verificação da distribuição da taxa de reação axial numa vareta experimental. A verificação da taxa de reação procedeu-se inserindo uma vareta experimental na posição central do núcleo (M-14). Esta vareta foi irradiada em duas situações : com a presença do bloco de alumínio e sem a presença do bloco de alumínio. Na situação representada pela presença do bloco de alumínio, a vareta experimental inserida no núcleo atravessa o bloco de alumínio vazado pois, o bloco de alumínio encontra-se posicionado na região central do núcleo. Desta forma, parte da região central da vareta experimental é circundada pelo bloco alumínio. A presença do bloco de alumínio ao redor da vareta experimental reduz a moderação dos nêutrons e consequentemente a taxa de fissão nesta região. A Fig. 6 ilustra esquematicamente a vareta experimental e o bloco de alumínio vazado.

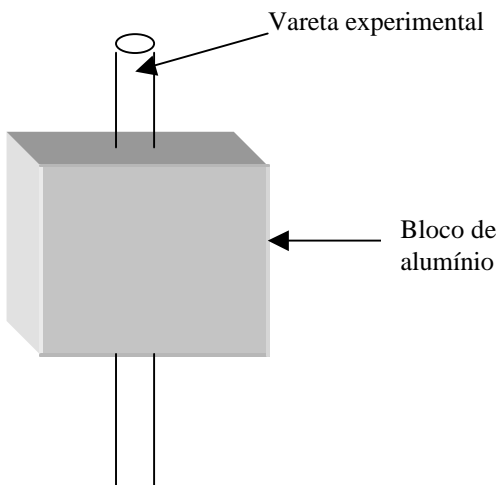


Figura 6. Ilustração Esquemática da Irradiação da Vareta Experimental.

Após a irradiação da vareta experimental, efetuou-se uma varredura gama utilizando um detector de NaI.

A Fig. 7 ilustra a distribuição da taxa de reação (contagens líquida e total) ao longo do comprimento axial da vareta experimental irradiada na presença de alumínio e sem a presença de alumínio. Observa-se, na figura, a presença de uma depressão na região central da vareta na curva relativa à irradiação com a presença do bloco de alumínio, demonstrando a redução da moderação nesta região e, consequentemente, a redução das fissões.

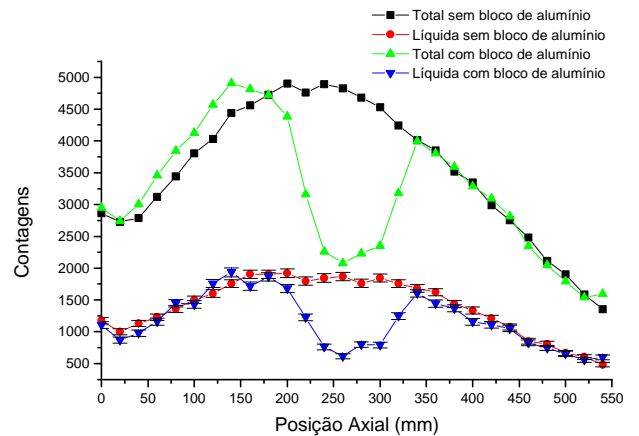


Figura 7. Distribuição da Taxa de Reação da Vareta Experimental.

V. ANÁLISE DO EXPERIMENTO

A análise do experimento foi efetuada utilizando dois códigos distintos : MCNP-4B [3] e CITATION [4], o primeiro utiliza o método de Monte Carlo e o segundo a baseia-se na equação de difusão de nêutrons. Inicialmente, o núcleo do reator foi modelado de forma explícita para o código MCNP-4B nas duas condições : sem o bloco de alumínio e com o bloco de alumínio, com a vareta combustível especial de irradiação modelada considerando cada pastilha combustível individualmente. O código MCNP-4B permite modelar explicitamente e de forma detalhada todas as partes integrantes do núcleo do reator, e a representação dos materiais constituintes do núcleo é feita com uma biblioteca de seções de choque na forma pontual.

No código CITATION, a modelagem utilizada para o núcleo considera as varetas combustíveis na forma “pino a pino” nas duas situações : núcleo com bloco de alumínio e sem o bloco de alumínio. É importante salientar que na modelagem geométrica do núcleo para o código CITATION, o bloco de alumínio foi representado explicitamente, uma vez que, as dimensões do bloco ($9 \times 9 \times 9 \div 1,5 = 6$) radialmente representam apenas 6 células ou pinos ($9 \div 1,5 = 6$). Adicionalmente, considerou-se uma modelagem padrão para a verificação da metodologia de cálculo do coeficiente de vazio com simulação da presença do vazio através da mudança da densidade do moderador. Diferentemente do código MCNP-4B, o código CITATION utiliza um conjunto de seções de choque com poucos grupos de energia gerado pelo código de cálculo celular, HAMMER-TECHNION [5].

Os códigos com as modelagens juntamente com os valores experimentais permitem verificar e avaliar a metodologia empregada para a obtenção do coeficiente de reatividade de vazio. Adicionalmente, permite comparar e verificar a grandeza local como a taxa de reação da vareta colocada no centro do núcleo.

No código MCNP-4B, modelou-se o núcleo nas duas situações, núcleo de referência sem o bloco de alumínio e o núcleo com o alumínio com as posições das barras de controle na posição crítica experimental de cada situação. O código foi executado no modo de cálculo de criticalidade (KCODE), considerando um total de 12 milhões de histórias em cada execução. Para quantificar a taxa de reação utilizou-se o estimador de taxa de reação de fissão para cada pastilha individual da vareta especial utilizada no experimento. A Tabela 2 apresenta os resultados do valor do fator de multiplicação efetiva obtidos para as duas situações, com alumínio e sem alumínio.

TABELA 2. Fator de Multiplicação Obtido com Código MCNP-4B

Situação	Fator de Multiplicação Efetiva
Núcleo referência (sem o bloco de alumínio)	1.00518 ± 0.00022
Núcleo com vazio (com o bloco de alumínio)	1.00540 ± 0.00022

A partir da Tabela 2, observa-se que para as situações do núcleo sem o bloco e com o bloco, os valores dos fatores de multiplicação são os mesmos considerando o desvio padrão associado a cada um dos valores. O desvio ou “bias” de aproximadamente 500 pcm se mantém para ambos os casos, demonstrando que o cálculo superestima o valor experimental. No entanto para as duas situações esse desvio é o mesmo indicando que o cálculo reproduz o experimento. A superestimativa no resultado do fator de multiplicação efetiva de nêutrons provêm basicamente do conjunto de seções de choque utilizado no código MCNP-4B. Ainda em relação ao resultado, constata-se que a modelagem do sistema foi feita adequadamente em ambos os casos.

Para a obtenção do valor do coeficiente de reatividade de vazio devido à presença do bloco de alumínio, o sistema com o vazio (com o bloco de alumínio) foi modelado adotando-se a posição crítica das barras de controle da situação referência, isto é, o núcleo sem o bloco de alumínio. A quantidade de barras de controle inserida no núcleo para o caso referência é maior do que no caso com a presença do bloco de alumínio. A diferença de inserção das barras de controle deve-se a presença do vazio, que desloca um determinado volume de moderador de uma parte do núcleo ativo, conseqüentemente, reduz a quantidade de fissões, e tornado o sistema menos reativo quando comparado com a situação sem o vazio. Assim a quantidade de barra de controle inserida é menor na presença de vazio do que no caso referência.

O valor do fator de multiplicação efetiva de nêutrons do núcleo com o bloco de alumínio e com as barras na posição crítica do núcleo de referência representa a reatividade devido a presença do bloco de alumínio. Desta forma, a reatividade inserida devido ao bloco é igual a $-751,5$ pcm

Igualmente para o código CITATION, modelou-se o núcleo nas duas situações, núcleo de referência sem o bloco de alumínio e núcleo com o alumínio e as barras de controle na posição crítica experimental de cada situação. Convém ressaltar que o bloco de alumínio foi modelado na forma explícita, pois as dimensões do bloco representam seis células na modelagem “pino a pino” adotada normalmente em uma modelagem explícita do código CITATION.

As seções de choque em poucos grupos de energia foram geradas com o código de cálculo celular HAMMER-TECHNION.

A Tabela 3 apresenta os resultados do valor do fator de multiplicação efetiva obtidos para as duas situações, caso com alumínio e sem alumínio.

TABELA 3. Fator de Multiplicação Efetiva Obtido com Código CITATION

Situação	Fator de Multiplicação Efetiva
Núcleo referência (sem o bloco de alumínio)	1.000326
Núcleo com vazio (com o bloco de alumínio)	1.000700

O resultado da Tabela 3 mostra uma boa concordância do autovalor para a posição crítica em ambas as situações : núcleo sem o bloco e com o bloco. Tanto a modelagem quanto as seções de choque representam adequadamente o núcleo. No entanto, não é possível definir claramente o valor do “bias” do autovalor, diferentemente do código MCNP-4B onde este valor é quase uma constante.

Procedendo-se de forma análoga ao código MCNP-4B para os cálculos da inserção da reatividade devido ao bloco no código CITATION, têm-se : $-730,0$ pcm

A Tabela 6. apresenta o resumo dos resultados, bem como os desvios entre o valor experimental e o calculado.

TABELA 4. Reatividade devido ao Bloco de Alumínio Representando um Vazio Local

Caso	Reatividade (pcm)	Desvio (C/E)
Experimental	-669,64	-----
MCNP4B	-751,5	1,12
CITATION	-730,00	1,09

O experimento objetivou além da verificação do coeficiente de vazio, quantificar a taxa de reação em uma vareta experimental colocada no centro do núcleo na presença do bloco de alumínio. De forma que a parte da vareta experimental fosse circundada pelo bloco de alumínio. No segmento da vareta circundada pelo bloco de alumínio ocorre uma redução na quantidade de fissões

devido a ausência do elemento moderador em torno da vareta.

Do ponto de vista experimental, a vareta em questão é irradiada em duas situações distintas, com a presença do bloco de alumínio e na ausência do bloco de alumínio. Após a irradiação, procedeu-se a varredura axial para contagens da atividade gama provenientes de cada segmento da vareta. O dispositivo de contagem e varredura gama permite a contagem de um segmento de 1,00 cm definida pela abertura do colimador no dispositivo de contagem. Assim, experimentalmente, obteve-se as atividades correspondentes de segmentos de 1,00 cm ao longo do comprimento ativo da vareta combustível.

A análise deste caso foi efetuada com os códigos MCNP-4B e CITATION. No código MCNP-4B, a vareta especial utilizada na irradiação foi modelada com cada pastilha individualmente. Esta situação foi executada no modo de criticalidade utilizando-se 20 milhões de histórias e a taxa de fissão foi obtida com o estimador de “track length”, a fim de atingir desvios estatísticos menores que 4 % para cada segmento. A Fig. 8 ilustra as taxas de reação normalizada obtidas com os códigos MCNP-4B, CITATION e os valores experimentais para a situação na ausência do bloco de alumínio. A Fig. 9 ilustra o perfil da distribuição da taxa de reação de fissão normalizado para a vareta experimental na situação do núcleo com o bloco de alumínio. Observa-se a depressão na taxa de reação no trecho em que a vareta encontra-se envolvida pelo bloco de alumínio, evidenciando claramente a redução na quantidade de fissões neste segmento devido a ausência do elemento moderador.

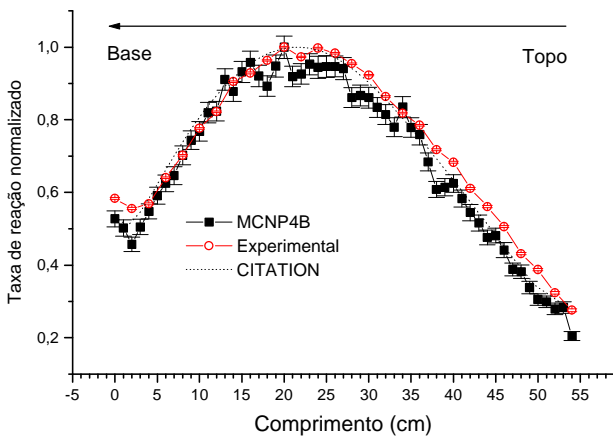


Figura 8. Taxa de Reação Normalizada da Vareta Especial na Ausência do Bloco de Alumínio.

Comparando-se os resultados calculados entre si, observa-se claramente que o código CITATION não reproduz adequadamente o perfil da taxa de reação na região com o bloco de alumínio. Enquanto os resultados do código MCNP-4B aproximam-se dos resultados experimentais. O perfil da taxa de reação obtido com o código CITATION ilustra a deficiência da aproximação da teoria de difusão utilizada no código. As heterogeneidades de regiões

materiais não são adequadamente tratadas pelos códigos baseados na teoria da difusão de nêutrons.

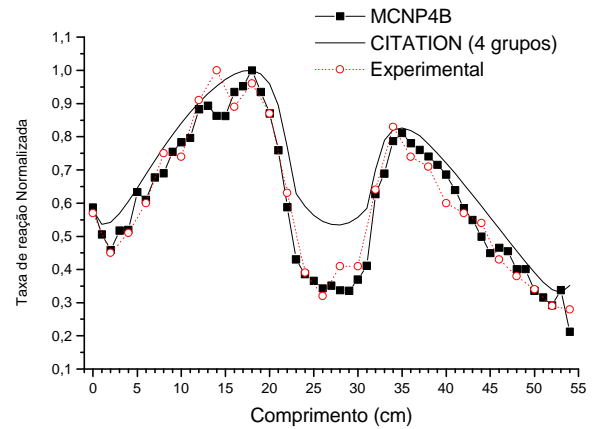


Figura 9. Distribuição da Taxa de Fissão na Vareta Experimental com a Presença do Bloco de Alumínio.

O código MCNP-4B, baseado no método de Monte Carlo reproduz adequadamente o perfil da taxa de reação. No entanto, o resultado é função do número de histórias utilizadas na simulação, uma vez que o desvio padrão é dependente da quantidade de partículas utilizadas na simulação. O comportamento estocástico da simulação pode ser observado na forma do perfil da taxa de reação.

VI. CONCLUSÕES

O experimento de vazio local executado no reator IPEN/MB-01, objetivou inicialmente contornar a dificuldade existente na comparação entre cálculo e experimento. O primeiro experimento executado para a obtenção do coeficiente de reatividade de vazio consistia na inserção de tubos de alumínio homogeneamente no núcleo. No entanto, devido ao tamanho reduzido dos tubos, estes não eram representados e modelados explicitamente nos cálculos. A consideração destes vazios eram efetuados por meio de uma densidade equivalente. O experimento de vazio local possibilitou estabelecer uma comparação direta de resultados pois, o vazio inserido pode ser representado explicitamente nos cálculos. A análise do experimento foi conduzida com dois códigos, MCNP e CITATION. Os resultados obtidos ilustram desvios da ordem de 12% e 9% em relação ao valor experimental, para o código MCNP-4B e CITATION respectivamente. Adicionalmente, foi comparada a distribuição da taxa de reação em uma vareta combustível na presença do bloco de alumínio e sem o bloco. Os resultados ilustram e confirmam a deficiência do método de difusão em tratar situações envolvendo grande heterogeneidade.

REFERÊNCIAS

[1] Duderstat, J. J. and Hamilton, L. J., **Nuclear Reactor Analysis**, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1976.

[2]. Ferreira, P. S. B., **Medida de Coeficiente de Reatividade de Vazio do Reator IPEN/MB-01**, Relatório Técnico : RP2300410071414-00-00 (Documento Interno), Julho de 1991.

[3] Briesmeister, J. F., **A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, MCNP**, Los Alamos National Laboratory, ORNL-13221, Oak Ridge, TN, USA.

[4] Fowler, T. B., et alli, **Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION**, ORNL-TM-2496, 1972.

[5] Suich, J. E and Honeck, H. C., **The HAMMER Ssystem Heterogeneous Analysis of Multigroup Methods of Exponential and Reactor**, Savannah River Lab., DP-1064, 1967.

ABSTRACT

As part of methodology validation of INAP program conduct at CTMSP, a variety of experiments are being conducted at IPEN/MB-01 zero power reactor. This paper describes motivation for, and the features of local void experiment.

The reactivity coefficient has to be evaluate during the reactor design and assured to be negative under the reactor operation condition. The reactivity coefficient is a parameter dependent of reactor operation condition such as pressure, temperature and voids. The voids in reactor comes out from bubbles created in the moderador and the associated parameter is the void reactivity coefficient.

The first experiment conducted at IPEN/MB-01 to determine the void reactivity coefficient was perfomed with small aluminum tubes inserted in the core. Some difficults issues comes out into cthe alculational analysis of the experiment due to the small size of aluminum tubes. The main problems are related to the modelling and effective cross section generation. In order to allow direct results comparison , another void experiment was proposed. The experiment employed a new approach by placing a aluminum cube of 9x9x9 cm at the center. The experiment allows to compare directly the reactivity due to the presence of void. All the calculational analysis was conducted using Monte Carlo code, MCNP and the diffusion code, CITATION. Additionally, the reaction rate profile at central region of fuel rod was measured and compared with calculations.