



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO

**MEDIDAS DE PARÂMETROS NEUTRÔNICOS DE VENENO
QUEIMÁVEL DE $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$ PARA REATORES PWR**

NELSON CUSTÓDIO FÉR

Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Reatores Nucleares de Potência e
Tecnologia do Combustível Nuclear.

Orientador:
Dr. João Manoel Losada Moreira

**São Paulo
2001**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**MEDIDAS DE PARÂMETROS NEUTRÔNICOS
DE VENENO QUEIMÁVEL DE $Al_2O_3-B_4C$
PARA REATORES PWR**

NELSON CUSTÓDIO FÉR



Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciências na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear.

Orientador

Dr. João Manoel Losada Moreira

São Paulo

2001

*Especialmente à minha esposa Eunice
e filhas, Ester, Noemi e Priscila.
A meu pais, Edson e Elmoza.*

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. João Manoel Losada Moreira, pela amizade, dedicada orientação, disponibilidade e contagiante capacidade de trabalho.

Aos amigos da Divisão de Montagem do Centro Experimental ARAMAR pela compreensão, apoio e incentivo.

Ao amigo Ricardo Gomide e amigos do LABMAT pela fabricação das pastilhas e várias informações.

Ao amigo Alfredo Abe pelo decisivo apoio nos programas de computação e na realização dos experimentos.

Ao amigos Ulisses, Rogério, Leda, Élcio, Fuga e Hertz, pelo apoio decisivo na realização dos experimentos e pela camaradagem das muitas horas passadas juntos.

Ao Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP), pelo apoio que recebi na realização deste trabalho.

MEDIDAS DE PARÂMETROS NEUTRÔNICOS DE VENENO QUEIMÁVEL DE $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$ PARA REATORES PWR

Nelson Custódio Fér

RESUMO

Varetas de veneno queimável contendo pastilhas de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$, com concentração de $5,01 \text{ mg/cm}^3$ de ^{10}B , foram fabricadas para qualificar as metodologias de projeto do CTMSP através de experimentos realizados no reator IPEN/MB-01. Foi medido o impacto da presença do veneno queimável sobre vários parâmetros neutrônicos do núcleo. Os principais resultados obtidos para o caso de varetas de veneno queimável próximas às varetas absorvedoras de uma barra de controle foram que o sombreamento da barra de controle é cerca de 30 %, o coeficiente de reatividade de vazio local diminui cerca de 39 %, o coeficiente de reatividade isotérmico diminui cerca de 5,0 % e a diminuição do fluxo de nêutrons térmicos é de aproximadamente 10 %. Os resultados calculados com o sistema HAMMER/CITATION disponível no IPEN/CTMSP reproduzem muito bem os resultados experimentais.

MEASUREMENT OF $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$ BURNABLE POISON CORE PARAMETERS FOR PWRs

Nelson Custódio Fér

ABSTRACT

Burnable poison rods, made of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$ pellets with 5.01 mg/cm^3 ^{10}B concentration, have been manufactured for a set of experiments in the IPEN/MB-01 zero-power reactor. Several core parameters which are affected by the burnable poisons rods have been measured. The principal results, for the situation in which the burnable poison rods are located near the absorber rods of a control rod, are that they cause a 30 % rod worth shadowing, a reduction of 39 % in the local void coefficient of reactivity, a reduction of 5,0 % in the isothermal temperature coefficient of reactivity, and a reduction of 10 % in the thermal neutron flux in the region where the burnable poison rods are located. The calculated results obtained with the HAMMER/CITATION codes available in the IPEN/CTMSP produced very good comparisons with experimental results.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	Página
	<i>Referências bibliográficas</i>	5
2	VENENO QUEIMÁVEL EM REATORES NUCLEARES	
	2.1 <i>Considerações gerais sobre veneno queimável</i>	7
	2.2 <i>Efeito de auto-blindagem na seção de choque do veneno queimável</i>	11
	2.3 <i>Formas mais comuns de uso de veneno queimável em reatores</i>	13
	2.4 <i>Parâmetros experimentais importantes para a verificação de uma metodologia de cálculo de veneno queimável</i>	15
	<i>Referências bibliográficas</i>	16
3	EXPERIMENTOS DE VENENO QUEIMÁVEL	
	3.1 <i>Descrição geral dos experimentos de veneno queimável</i>	17
	3.2 <i>Procedimentos e dispositivos para medidas de distribuição de fluxo de nêutrons</i>	31
	3.3 <i>Procedimentos e dispositivos para medidas envolvendo reatividade</i>	35
	<i>Referências bibliográficas</i>	36
4	MEDIDAS DE DEPRESSÃO DE FLUXO DE NÊUTRONS E DE REATIVIDADE DO NÚCLEO COM E SEM VENENO QUEIMÁVEL	
	4.1 <i>Medida de depressão de fluxo devido ao veneno queimável</i>	37
	4.2 <i>Calibração de barras de controle</i>	41
	4.3 <i>Medida da reatividade absorvida pelo veneno queimável</i>	48
	4.4 <i>Medida de coeficiente de reatividade isotérmico com veneno queimável</i>	52
	4.5 <i>Medida de coeficiente de reatividade de vazio com veneno queimável</i>	55
	4.6 <i>Medida de sombreamento de barras devido ao veneno queimável</i>	58
5	COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MEDIDOS E VALORES CALCULADOS	
	5.1 <i>Modelagem com o CITATION</i>	61
	5.2 <i>Comparação entre cálculo de fluxo térmico e medida de distribuição de taxa de reação no Au</i>	62
	5.3 <i>Comparação entre cálculo e medida de depressão de fluxo</i>	66
	5.4 <i>Comparação entre cálculo e medida de reatividade de veneno queimável</i>	67
	5.5 <i>Comparação entre cálculo e medida de sombreamento de barra</i>	70
	<i>Referências bibliográficas</i>	73
6	CONCLUSÕES	74
	APÊNDICES	
	A. <i>Especificações adotadas no desenvolvimento e fabricação das pastilhas de veneno queimável</i>	76
	B. <i>Núcleo do reator IPEN/MB-01</i>	81

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Venenos queimáveis são materiais absorvedores de nêutrons que são incorporados ao combustível de modo a permitir um controle de reatividade mais eficiente que leva a uma melhor utilização do combustível.

O veneno queimável é uma das variáveis que deve ser considerada ao se projetar um núcleo novo ou uma recarga para um reator nuclear [1, 7]. O veneno queimável pode ser utilizado para controlar o excesso de reatividade de núcleos inicialmente muito reativos, para estender a vida das etapas do ciclo, para tornar mais plana a distribuição de densidade de potência, ou para atender estes vários objetivos, concomitantemente.

Entre o final da década de 80 até metade da década de 90, vários estudos foram realizados para se estabelecer as possíveis formas de utilização do veneno queimável de Gd dentro do núcleo e qualificar métodos de cálculos apropriados. A precisão dos métodos de cálculo utilizados no projeto permite operar o reator em níveis de potência mais elevados, atender melhor aos requisitos colocados pelo operador do reator e produzir maior quantidade de energia com o mesmo custo operacional. Esta precisão é conseguida por meio da qualificação de métodos de cálculo feita a partir da comparação entre resultados calculados e experimentais [7, 8].

Os materiais normalmente usados como veneno queimável são compostos químicos de boro (B_4C), gadolínio (Gd_2O_3) e, em menor extensão, érbio (Er_2O_3); recentemente o disprósio tem sido usado em reatores CANDU. Os fabricantes de reatores têm, ao longo dos últimos anos, projetado vários tipos de veneno queimável, buscando uma melhoria contínua na performance desses elementos. Destacam-se os seguintes tipos [11]:

Pirex: é um vidro borossilicato encapsulado em tubo de aço inoxidável, desenvolvido pela Westinghouse. O elemento absorvedor de nêutron é o ^{10}B . Uma redução adicional na reatividade é também obtida através da absorção do nêutron pelo aço inoxidável. Varetas individuais de veneno queimável são inseridas em tubos

guias previamente selecionados nas barras de controle e removidas após um ciclo do combustível. A facilidade de fabricação deste tipo de vareta e a distribuição uniforme do boro no vidro são algumas das vantagens do tipo Pyrex. A maior desvantagem é uma reatividade residual relativamente grande no fim do ciclo.

WABA - Wet Annular Burnable Absorber : desenvolvido também pela Westinghouse como uma melhoria do Pyrex. É chamado “molhado” e “anular” porque o fluxo do fluido refrigerante do reator passa através de uma passagem anular. O material absorvedor de nêutrons é um sistema cerâmico de boro e óxido de alumínio ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$). O material absorvedor é encapsulado num tubo anular de zircaloy com água fluindo através do centro e ao redor. A melhoria decorre do fato de que a pastilha contendo boro é mais fina e o efeito de moderação da água fluindo através do centro da pastilha otimiza a queima do boro, resultando numa redução significativa da reatividade residual no fim do ciclo. A vareta do tipo WABA é instalada da mesma maneira que o Pyrex e removido após um ciclo de operação.

IFBA – Integral Fuel Burnable Absorber – Também desenvolvido pela Westinghouse e o material absorvedor de nêutron é o diboro de zircônio (ZrB_2) que é aplicado como uma fina superfície em pastilhas individuais. Tanto pode ser aplicado na superfície de pastilhas com um determinado grau de enriquecimento ou, ao longo da mesma vareta de combustível, sobre alguns trechos, para controle específico do pico de potência. O tipo IFBA tem uma melhor performance em relação ao veneno queimável constituído de pastilhas maciças pela seguinte razão. Neste tipo de vareta ocorre um deslocamento de água, reduzindo, desta maneira, a termalização dos nêutrons. Por outro lado, o tipo IFBA, aplicado diretamente na pastilha, não afeta o volume de água no núcleo, resultando na maior eficiência de uso do nêutron.

Urânio-Gadolínio – Este tipo de absorvedor tem sido desenvolvido para diferentes projetos, pela Combustion Engineering (CE) para seus reatores PWR's, pela Westinghouse para os clientes de reatores BWR's e pela General Electric (GE) para seus reatores BWR's. O material absorvedor é o $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{-UO}_2$ encapsulado em varetas de combustível previamente selecionadas. No projeto da Combustion Engineering, a vareta de veneno queimável contém pastilhas de urânio natural nas duas extremidades da vareta e, entre elas, pastilhas de urânio natural e pastilhas de gadolínio. O gadolínio é uma alternativa atrativa para constituir o veneno queimável pois pode ser misturado diretamente com o UO_2 . O gadolínio natural possui dois

isótopos: ^{155}Gd e ^{157}Gd , com abundância 14,7 % e 15,7 % respectivamente, e seções de choque de absorção ao nêutron térmico 58.0000 b e $2,4 \times 10^5$ b. A fim de melhorar a performance desse material faz-se o enriquecimento isotópico do ^{157}Gd .

Outros estudos sobre veneno queimável na literatura avaliam a melhor forma de utilização no reator e o impacto nos vários parâmetros neutrônicos do núcleo [2, 4, 5, 8]. Vários trabalhos estudam a colocação de veneno queimável de Gd avaliando os efeitos neutrônicos devido ao número de varetas e à posição nos elementos combustíveis, o impacto no “burn-up” final, etc, [1, 3, 6, 7].

Há trabalhos que avaliam a substituição de veneno queimável de ^{10}B e boro solúvel no refrigerante por veneno queimável de Gd [1, 2, 3]. Outros problemas estudados devido ao uso intensivo de veneno queimável em PWR são os efeitos em parâmetros como o coeficiente de reatividade isotérmico e de vazio [2, 4, 5]. Durante o resfriamento do reator, do estado de potência nominal para o estado de potência-zero e frio, deve ser conhecido o impacto do veneno queimável nos defeitos de potência e de temperatura [2], principalmente na ausência ou diminuição de disponibilidade de boro solúvel como meio de controle de reatividade.

Uma série de experimentos foi realizada na Unidade Crítica KUKA da Universidade de Kyoto [4] para medir o coeficiente de reatividade de temperatura do moderador com a presença de veneno queimável de boro. Os núcleos cilíndricos estudados eram moderados por água leve e água pesada e carregados com urânio com enriquecimento médio e alto. O efeito do veneno queimável no coeficiente de reatividade de temperatura do moderador foi avaliado para os vários núcleos [4].

A Framatome obteve resultados sobre o comportamento do veneno queimável para seus reatores PWR na Unidade Crítica Eole e nos Reatores de Pesquisa Minerve e Mellusine [6,7]. Os principais objetivos dos estudos foram definir a distribuição de Gd nas pastilhas, tamanho das partículas de Gd, forma da pastilha anular ou inteira, percentagem de Gd na pastilha, enriquecimento do combustível no elemento com veneno, possibilidades de uso de veneno com distribuição axial variável, número de varetas de Gd e localização no elemento combustível, número de elementos combustíveis com veneno no reator e a forma das recargas de novos núcleos com veneno queimável.

A qualificação experimental do combustível com veneno queimável foi feita visando estabelecer as características físico-químicas da pastilha de U-Gd, as características termomecânicas, as características neutrônicas e a qualificação dos

processos de fabricação [6]. Em relação às características neutrônicas, medidas foram feitas na Unidade Crítica Eole e nos reatores Minerve e Mellusine. Na Unidade Crítica Eole, na parte central que simula o núcleo de um reator PWR, foram colocadas varetas de veneno queimável $UO_2-Gd_2O_3$ em várias posições e concentrações. Foram realizadas medidas de reatividade e de distribuição de densidade de potência nas imediações do veneno queimável. Nos reatores Minerve e Mellusine foram medidos valores precisos de reatividade do veneno queimável e o consumo do veneno queimável com a irradiação do combustível [7].

O sistema CASMO-4 [8], para cálculo de seção de choque utilizando teoria de transporte bidimensional para representar um elemento combustível, foi qualificado via comparação com experimentos envolvendo fortes heterogeneidades como buracos de água, veneno queimável de Gd e combustível de óxidos de urânio ou óxidos mistos de urânio e plutônio. As medidas de reatividade e de distribuição de potência foram realizadas na Unidade Crítica Venus da Bélgica [8].

Como pode ser observado, o estudo neutrônico de veneno queimável abrange principalmente os seguintes parâmetros: reatividade do veneno queimável no elemento combustível, impacto nos coeficientes de reatividade de temperatura e vazio e defeitos de temperatura e potência, impacto na distribuição de densidade de potência, interação entre heterogeneidades e o veneno queimável e avaliação de métodos de cálculo. Este trabalho pretende apresentar os resultados iniciais de experimentos realizados no reator IPEN/MB-01 sobre o veneno queimável de carbetô de boro em alumina ($Al_2O_3 -B_4C$), a ser utilizado na Instalação a Água Pressurizada - INAP, do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo. Estes experimentos visam obter parâmetros experimentais para qualificar os métodos de cálculo baseados no sistema HAMMER/CITATION [9, 10] desenvolvidos no IPEN e CTMSP e fazem parte do programa experimental do reator IPEN/MB-01 relativo a veneno queimável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GOLDSTEIN, L.; STRASSER, A. A comparison of gadolinia and boron for burnable poison applications in PWR. **Nucl. Tech.**, 60, 352, 1983.
2. GALPERIN, A., SEGEV, M.; RADKOWSKY, A.. The effect of boron and gadolinium burnable poison on the hot-to-cold reactivity swing of a PWR assembly, **Nucl. Tech.**, 75, 123, 1986.
3. GALPERIN, A.; SEGEV, M.; RADKOWSKY, A.. Substitution for the soluble boron reactivity control system of a PWR by Gd burnable poisons, **Nucl. Tech.**, 75, 127, 1986.
4. SHIROYA, S.; HAYASHI, M.; KOBAYASHI, K. ; KANDA, K.; MORI, M.; MISAWA, T. Experimental study on temperature coefficient of reactivity in light-water-moderated and heavy-water-reflected cylindrical core loaded with highly-enriched-uranium or medium-enriched-uranium fuel. **Journal of Nuclear Science and Technology**, 32, 1081 1995.
5. HARI, P. G.; CHOI, H.; RHEE, B. W.; PARK, H.. Burnable poison option for reducing void reactivity of a DUPIC fuel bundle. **Transactions of the American Nuclear Society**, 74, 330, 1996.
6. FRANCILLON, G.; OBADIA, F.; BRUET, M.; DAUDIN, L. Design and experience of French PWR Gd cores and fuel assemblies. ENC'86, Geneva, Suíça, **Transactions**, 4, Topics VI e VII, 81, 1986.
7. KOLMAYER, V.; VALLEE, A. ; MONDOT, J. Incore fuel management: new challenges, Chicago, USA, **Trans. Am. Nucl. Soc.**, 66, 456, 1992.
8. SAJI, B. CASMO-4 benchmarking against BWR MOX critical experiments, Chicago, USA, **Trans. Am. Nucl. Soc.**, 66, 480, 1992.
9. SUICH, J. E.; HONECK, H. C.. The HAMMER system: heterogeneous analysis by multigroup methods of exponential and reactor, **Savannah River Lab.**, DP-1064, 1967.
10. FOWLER, T. B.; VONDY, D. R.; CUNNINGHAM, G. N.. Nuclear reactor core analysis code: CITATION, **ORNL-TM-2496**, rev. 2, 1971.
11. COCHRAN, ROBERT G.; TSOUFANIDIS, NICHOLAS. The Nuclear Fuel Cycle: Analysis and Management. **American Nuclear Society**, 82, 2 ed., 1990.

CAPÍTULO 2

VENENO QUEIMÁVEL EM REATORES NUCLEARES

Venenos queimáveis são usados misturados uniformemente com o combustível, denominados venenos homogêneos, ou são colocados no reator em varetas separadas, denominados venenos heterogêneos, e arranjos de tal modo que queimam ou são consumidos ao longo de um ciclo de combustível [1].

Radkowski [2] formulou o princípio do veneno queimável tendo como idéia básica introduzir no reator um absorvedor cuja seção de choque é maior que a do combustível, de modo que o consumo do combustível e acumulação de venenos como produtos de fissão fossem compensados pelo consumo do veneno queimável. Desta maneira, o uso de venenos queimáveis permitiria aumentar grandemente a vida do reator ao permitir um maior carregamento inicial de combustível do núcleo ou aumento do enriquecimento do combustível. O excesso de reatividade inicial deste núcleo com mais material fissil seria compensado pelo veneno queimável de tal modo a manter o excesso de reatividade do núcleo com veneno queimável em um patamar bem mais baixo ao longo do ciclo. Deste modo, reduz-se a necessidade de movimentação das barras de controle em grandes excursões, o que proporciona uma vida maior das barras e conseqüentemente redução do lixo radioativo. Também ficam minimizados problemas de segurança pessoal e física relacionados à ejeção de barras de controle. [6]

Neste capítulo são feitas considerações sobre o uso do veneno queimável em reatores nucleares. Inicialmente discute-se como é a interação do veneno queimável com o sistema de controle de reatividade do reator. Em seguida, discute-se o problema da autoblindagem na geração de seções de choque adequadas para representar o veneno queimável ao longo de um ciclo de combustível e discutem-se as formas mais comuns de uso de veneno queimável e de distribuição nos elementos combustíveis. Finalmente são resumidos os parâmetros que necessitam de resultados experimentais para a validação de uma metodologia de cálculo.

2.1. Considerações gerais sobre veneno queimável

Para mostrar como o veneno queimável pode ser utilizado em um reator nuclear, considere que, em qualquer tempo t , o reator deve estar crítico. O fator efetivo de multiplicação do reator em um dado instante t , $k(t)$ pode ser expresso como [1]:

$$k(t) = \frac{F(t)}{A(t) + V(t) + C(t)} \quad (2.1)$$

onde $F(t)$ é a taxa de produção de nêutrons devido à fissão, $A(t)$ é a taxa de consumo de nêutrons devido à absorção em combustível, moderador, material estrutural e fuga de nêutrons do núcleo, $V(t)$ é a taxa de absorção de nêutrons devido ao veneno queimável e $C(t)$ é a taxa de absorção de nêutrons devido ao sistema de controle de reatividade do reator (em um PWR seriam as barras de controle e o boro solúvel no refrigerante).

O tempo de duração de um ciclo de combustível está limitado pelo valor de $k(t)$. Ao longo da queima de combustível este é consumido, baixando constantemente o termo $F(t)$. Para compensar este consumo de combustível e manter o reator crítico, o operador atua no sistema de controle de reatividade retirando as barras de controle ou diluindo a concentração de boro solúvel no refrigerante do reator, diminuindo numa mesma proporção o termo $C(t)$. Quando o fator efetivo de multiplicação encontra-se abaixo de um valor limiar, um pouco acima de 1, o reator já não pode ser controlado e termina o ciclo. Neste momento, as barras de controle estão quase totalmente retiradas e o boro dissolvido no refrigerante encontra-se numa concentração muito baixa.

Para se aumentar a duração de um ciclo seria necessário aumentar o termo $F(t)$ no seu início. Isto é feito aumentando o enriquecimento inicial da carga de combustível. Em contrapartida, o sistema de controle de reatividade deve ser capaz de absorver a reatividade positiva inserida pelo aumento do enriquecimento de combustível. O aumento de $C(t)$ na proporção adequada nem sempre é possível pois significa aumentar o número de barras de controle do reator ou aumentar a

concentração de boro solúvel no refrigerante. Para um reator já em operação não é possível aumentar o número de barras de controle. O aumento da concentração de boro solúvel também tem sua limitação; sua presença no refrigerante torna menos negativo o coeficiente de reatividade isotérmico do reator, um aumento muito grande da concentração de boro no refrigerante torna este coeficiente de reatividade positivo o que não é permitido, normalmente, por questões de segurança.

Para esta situação, a utilização do veneno queimável $V(t)$ torna-se uma opção significativa. Sua função passa ser de absorver o excesso de reatividade introduzido pelo aumento de enriquecimento e, se ao final do ciclo ele tiver sido consumido, não causará nenhum impacto no tamanho do ciclo do combustível [2].

Com o uso de combustíveis nucleares enriquecidos em maior grau tem sido feita também a adição de veneno queimável no combustível do reator, isto é, elementos passivos de captura de nêutrons, em quantidades controladas. O princípio básico envolvido é que, durante o curso de operação do reator estes elementos passivos de captura de nêutrons tornam-se em materiais com pequena seção de choque de captura, através da captura do nêutron. Este efeito tende a compensar as perdas de reatividade devido ao consumo do combustível e formação de produtos estáveis de fissão. Algumas das vantagens que podem ser obtidas através do uso de venenos queimáveis são:

- a) aumento da vida útil do carregamento do núcleo;
- b) melhoria do desempenho do núcleo através da otimização dos fatores de pico;
- c) redução do controle mecânico e melhoria do coeficiente de reatividade de temperatura, em alguns casos.

Deve-se ter em mente que vantagens concebidas do ponto de vista de física de reatores podem não ser interessantes do ponto de vista metalúrgico ou devido a outras limitações de engenharia. A maior parte do uso de venenos queimáveis tem sido em conexão com reatores térmicos e epitérmicos. A utilização de venenos queimáveis em reatores rápidos envolveria provavelmente a necessidade de material moderador e veneno em posições especificadas no núcleo, o que complicaria o projeto.

O efeito causado pelo veneno queimável em um ciclo de combustível depende da sua taxa de queima e da sua reatividade. Considerando parâmetros

médios para todo o núcleo do reator, as taxas de produção de nêutrons, $F(t)$, e de consumo de nêutrons por veneno queimável, $V(t)$, são dadas por

$$F(t) = N_f(t) \nu \sigma_f \phi(t) \quad (2.2)$$

$$V(t) = N_{vq}(t) \sigma_{vq} \phi(t)$$

onde $N_f(t)$ é o número médio de átomos físeis no núcleo, $\nu \sigma_f$ é a seção de choque microscópica média de produção de nêutrons por fissão, $\phi(t)$ é o fluxo neutrônico médio no núcleo, $N_{vq}(t)$ é o número médio de átomos de veneno queimável no núcleo e σ_{vq} é a seção de choque de captura microscópica média do veneno queimável. Para um reator com veneno queimável como o ^{10}B que, diferentemente do Gd, é estável e não é produzido por decaimento de outros isótopos, as equações que governam o comportamento temporal de $N_f(t)$ e $N_{vq}(t)$ são :

$$\begin{aligned} \frac{dN_f(t)}{dt} &= -\sigma_{a_f} \phi(t) N_f(t) \\ \frac{dN_{vq}(t)}{dt} &= -\sigma_{vq} \phi(t) N_{vq}(t) \end{aligned} \quad (2.3)$$

A solução destas equações fornece para $N_f(t)$ e $N_{vq}(t)$ um comportamento exponencial. Substituindo o resultado nas Eqs. 2.2 e 2.1, considerando-se o fluxo de nêutrons constante, $\phi(t) = \phi$, obtém-se para o fator efetivo de multiplicação após alguma manipulação [1]

$$k(t) = \frac{k^s(t)}{1 + k^s(t) \frac{V(0)}{F(0)}} \exp \left[-(\sigma_{vq} + \sigma_{a_f}) \phi \cdot t \right] \quad (2.4)$$

onde $k^s(t)$ é o fator efetivo do núcleo sem veneno queimável, isto é

$$k^s(t) = \frac{F(t)}{A(t) + C(t)} \quad (2.5)$$

A Eq. 2.4 mostra o comportamento típico do fator efetivo de multiplicação ou do fator efetivo de multiplicação infinito, $k - \text{inf}$, em um núcleo com veneno

queimável. Nota-se que, se a seção de choque de captura microscópica média do veneno queimável for bastante elevada, o termo exponencial no denominador tenderá para zero para t muito grande (final do ciclo) e $k(t)$ tenderá para $k^s(t)$.

A Figura 2.1 mostra o comportamento do $k - \text{inf}$ para venenos queimáveis de diferentes seções de choque de captura [1, 2] para reatores do tipo PWR.

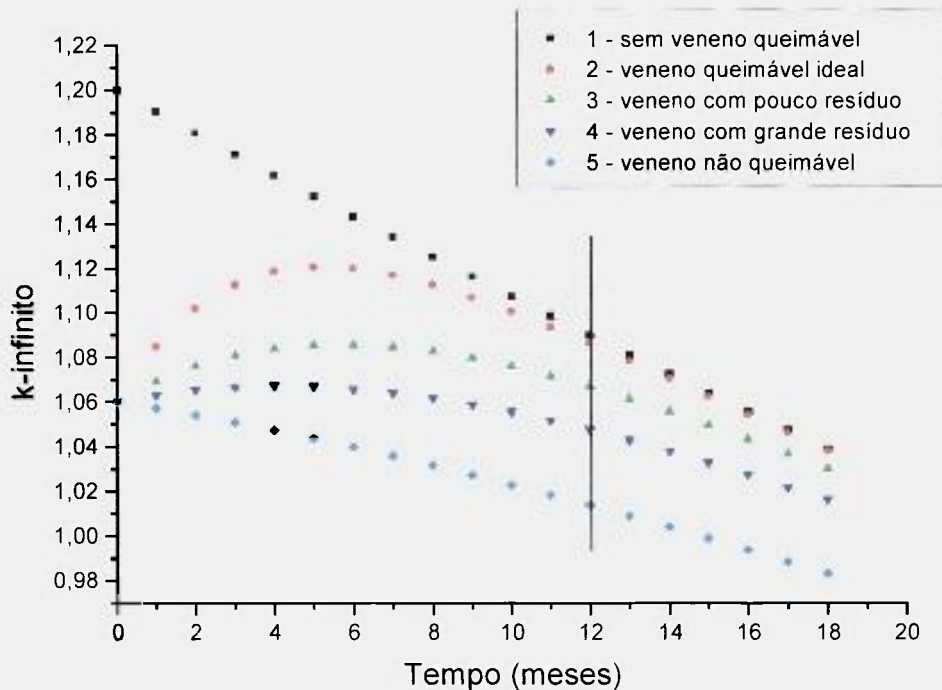


Figura 2.1 – Comportamento típico do $k - \text{inf}$ em função do tempo para um núcleo contendo veneno queimável com seções de choque microscópicas médias de captura diferentes.

A curva 1 mostra o comportamento do $k - \text{inf}$ para o núcleo sem veneno queimável. O $k - \text{inf}$ decresce continuamente devido o consumo de combustível e aumento de absorções parasitas de produtos de fissão.

A curva 2 mostra um veneno queimável com seção de choque de captura microscópica média muito elevada que é completamente consumido durante a operação, não deixando nenhuma absorção residual ao final de 12 meses. Este se constitui em um veneno queimável ideal.

A curva 3 mostra o comportamento do $k - \text{inf}$ para um núcleo com um veneno queimável com uma seção de choque de captura microscópica média

elevada mas deixando um pequeno resíduo de absorção de nêutrons durante a operação e a curva 4, um veneno que deixa um grande resíduo ao final da operação.

A curva 5 mostra um veneno cuja seção de choque de captura é pequena e comparável com a seção de choque microscópica média de fissão, que não é consumido durante a operação do reator de maneira sensível e que, assim, se constitui um veneno não queimável. Este seria o comportamento de impurezas no combustível que tenham uma seção de choque microscópica média não tão elevada [1, 2].

O ^{10}B tem o comportamento da curva 4, os isótopos ímpares do Gd tem o comportamento da curva 2 e os isótopos pares o comportamento da curva 5, de forma que a composição de todos os seus efeitos se aproxima do comportamento da curva 3. Devido a este fato, há estudos de utilização de Gd enriquecido nos isótopos ímpares para se obter um comportamento bem próximo do ideal.

A queda inicial no $k - \text{inf}$ de 1,2 para 1,06 é, neste exemplo, devido à concentração de veneno queimável no início do ciclo. A concentração e a seção de choque microscópica média produzem a queda do valor do $k - \text{inf}$ inicial, já a seção de choque microscópica média de captura sozinha define o comportamento do consumo ou queima do veneno queimável. Como os venenos queimáveis são absorvedores muito fortes, há efeitos de autoblindagem espacial e energética, dependendo da concentração do veneno.

A determinação da seção de choque microscópica média efetiva, levando em conta a autoblindagem, é um problema complexo. A determinação correta desta seção de choque microscópica média efetiva é que permitirá se calcular corretamente a absorção de reatividade inicial pelo veneno queimável e também o seu consumo ao longo do tempo. Devido a isto, experimentos de medida de reatividade de veneno queimável são importantes por fornecerem resultados experimentais que podem ser usados para verificar a precisão de metodologias de cálculo de núcleos com veneno queimável [3,4].

2.2. Efeito de autoblindagem na seção de choque do veneno queimável

O Gd no reator é normalmente consumido mais rapidamente que o B devido sua seção de choque muito mais elevada. Se não se considerar o efeito de autoblindagem a seção de choque do Gd é 65 vezes maior que a do B para nêutrons com 2200 m/s. Esta alta seção de choque microscópica do Gd praticamente elimina a

possibilidade de penetração de nêutrons térmicos dentro da vareta de veneno queimável (o material age como um absorvedor “negro” superficial mesmo em baixas concentrações de Gd). O B, por sua vez, permite alguma penetração de nêutrons térmicos na vareta de veneno queimável no início (absorvedor “cinza”) e se torna gradativamente um absorvedor “branco” ao longo da queima [3].

O Gd com alta concentração fornece uma absorção superficial de nêutrons térmicos. Este fato faz com que a seção de choque efetiva de captura de nêutrons não seja muito elevada, pois a captura ocorre apenas na superfície da vareta ou placa do veneno queimável. O consumo do material na superfície do veneno leva a próxima camada interior a agir como absorvedor praticamente não reduzindo o valor da seção de choque de captura efetiva. Assim, pode-se dizer que para o caso de um absorvedor “negro”, inicialmente a seção de choque efetiva quase não varia. O termo $N_{vq}\sigma_{vq} = \Sigma_{vq}$ é praticamente constante. Substituindo Σ_{vq} na Eq. 2.3, obtém-se um comportamento linear para a concentração de veneno queimável.

O boro, por sua vez, constitui-se um absorvedor “cinza” e o comportamento da concentração de boro com o tempo segue mais proximamente o resultado da Eq. 2.3, a absorção ocorre em termos volumétricos abrangendo toda a pastilha de veneno queimável. A Figura 2.2. mostra o comportamento típico das concentrações de veneno queimável para o caso de absorção “negra” ou superficial e “branca” ou volumétrica [1, 4].

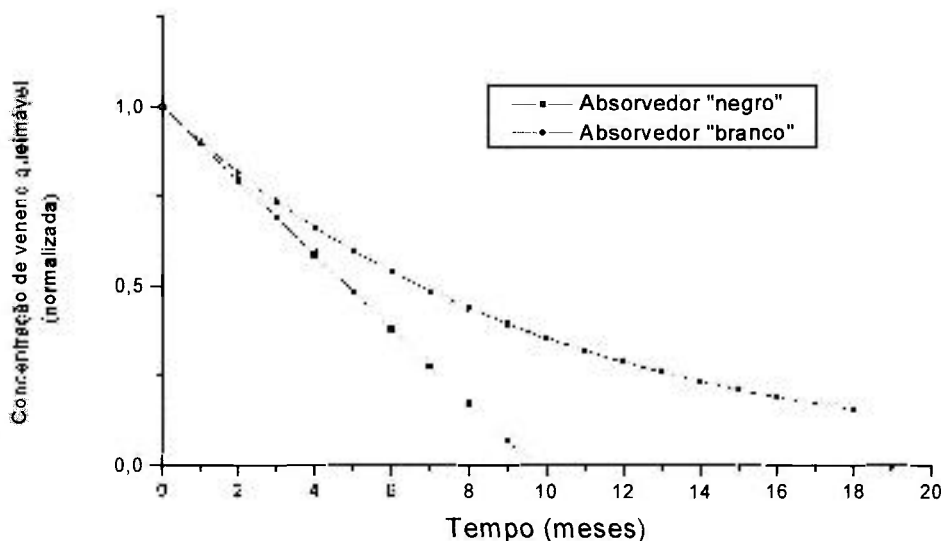


Figura 2.2 – Comportamento típico da concentração de veneno queimável com grande (absorvedor negro) e média (absorvedor branco) seção de choque de captura efetiva.

A autoblindagem no início do ciclo é muito forte tendendo a diminuir à medida que houver um consumo maior do veneno ao longo do tempo. A Figura 2.3 mostra o comportamento da seção de choque macroscópica de absorção para uma vareta de veneno queimável de Gd em um PWR. Nota-se que o valor da seção de choque aumenta quase uma ordem de grandeza ao longo do ciclo à medida que o consumo do veneno queimável ocorre. Conseqüentemente, a reatividade inserida pelo veneno queimável altera substancialmente durante a queima e tem forte impacto no comportamento do núcleo. Uma boa metodologia de cálculo de veneno queimável deve ser capaz de determinar estes efeitos corretamente. Medidas de reatividade inserida pelo veneno queimável em função de sua concentração são uma maneira bastante efetiva de se avaliar a precisão de metodologias de cálculo. O capítulo 3 apresenta este tipo de avaliação.

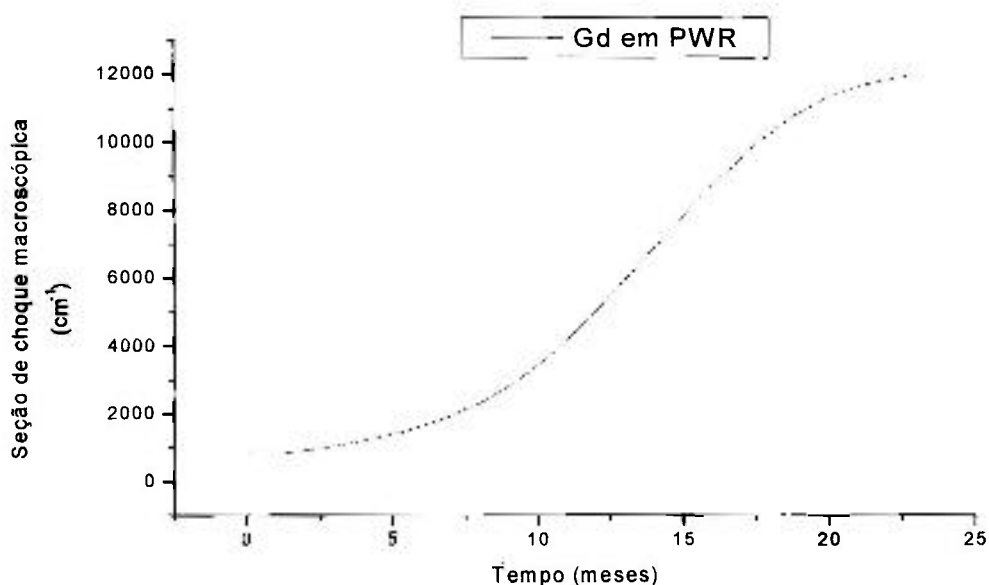


Figura 2.3 – Seção de choque macroscópica do veneno queimável de Gd em um elemento combustível de PWR em função do tempo. A autoblindagem diminui substancialmente a seção de choque no início do ciclo de combustível [4].

2.3. Formas mais comuns de uso de veneno queimável em reatores

O veneno queimável em reatores PWR é utilizado na forma de varetas heterogêneas ou homogêneas distribuídas nos elementos combustíveis. A Figura 2.4. mostra algumas disposições apresentadas na literatura. Como pode ser visto, a vareta de veneno queimável pode estar cercada por varetas de combustível ou estar próxima a uma vareta de um elemento de controle de forma que a queima das varetas pode ser muito diferente dependendo de sua localização [5].

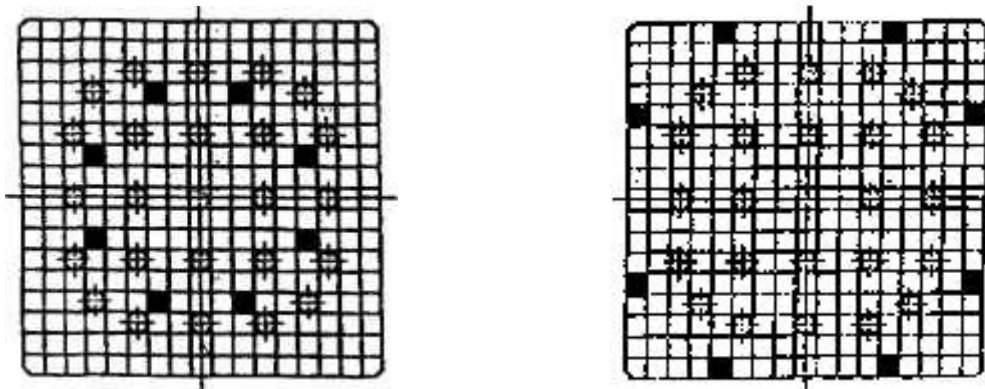


Figura 2.4 - Possibilidades de distribuição de varetas de veneno queimável em reatores PWR.

Os efeitos da queima não-uniforme podem ser de grande importância em núcleos de longa vida com relação à reatividade e distribuição de potência. A queima é grandemente influenciada pelo método de administração de combustível dentro do núcleo. Considere dois núcleos com iguais carregamentos de combustível, um tendo veneno queimável e o outro não, e que não se possa utilizar boro solúvel como é o caso de reatores navais. O núcleo sem veneno terá uma maior não-uniformidade de queima de combustível uma vez que as barras de controle estarão inseridas no núcleo durante a maior parte de sua vida e introduzirão maiores distorções de fluxo.

O veneno queimável no outro núcleo, por sua vez, pode ser colocado em determinadas regiões tais para diminuir o fator de pico local, absorver parte do excesso de reatividade do núcleo e permitir manter as barras de controle mais retiradas.

Um caso especial de combinação de venenos queimáveis e impurezas ocorre quando da presença de impurezas de grande seção de choque no combustível. Contudo que nenhum veneno queimável esteja presente ou a razão de combustível para o veneno queimável seja tal que a reatividade decresça inicialmente com a queima, não há nenhuma desvantagem especial em permitir a presença de impurezas com grande seção de choque no combustível. As impurezas queimarão rapidamente e uma pequena quantidade de combustível será gasta. A situação é bem diferente quando se usa veneno queimável para estender a vida ao máximo, isto é, para obter otimização da utilização do combustível. O k -inf no mais baixo valor permissível no início da vida não poderia ser atingido devido à presença de impurezas de seção

de choque pequena. Uma quantidade significativa de impurezas no combustível poderia acarretar inicialmente um desempenho insatisfatório do reator.

Estas interações entre varetas de veneno queimável, de combustível e de controle são complexas de serem modeladas devido à heterogeneidade introduzida no elemento combustível. Nestas configurações tornam-se necessárias medidas de reatividade do veneno queimável para a validação de metodologias de cálculo. Particularmente, medidas de reatividade e de distribuição de fluxo de nêutrons nestas configurações são importantes para se verificar o impacto na distribuição de densidade de potência local do reator e na efetividade das barras de controle.

2.4. Parâmetros experimentais importantes para a verificação de uma metodologia de cálculo de veneno queimável

Como foi visto neste capítulo, o comportamento do veneno queimável e seu impacto sobre o ciclo de combustível dependem muito do valor da seção de choque microscópica efetiva. Seu valor pode variar bastante devido o absorvedor ser muito forte e haver um grande efeito de autoblindagem. Uma forma de se avaliar uma metodologia de cálculo de veneno queimável é se fazer experimentos de medida de distribuição de fluxo de nêutrons e de reatividade para servirem de base de comparação. Os efeitos de autoblindagem estão presentes nestes dois parâmetros. Levando-se em consideração os comentários feitos nos Capítulos 1 e 2, pode-se resumir os principais parâmetros que devem ser medidos para se estabelecer um processo de verificação de uma metodologia de cálculo de veneno queimável em:

- a) Reatividade do veneno queimável no início do ciclo – grande concentração de veneno;
- b) Reatividade do veneno queimável ao longo do ciclo – concentrações distintas de veneno;
- c) Impacto do veneno queimável na distribuição de densidade de potencial local;
- d) Interação entre veneno queimável, vareta de combustível e vareta de controle;
- e) Impacto no coeficiente de reatividade de vazio;
- f) Impacto no coeficiente de reatividade isotérmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MOREIRA, J. M. L. Venenos queimáveis. Notas de aula do curso TNR-719, **Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares**, São Paulo, SP, 1999.
2. RADKOWSKI, A., Theory and applications of burnable poisons , Paper P/1900, Second U.N. **International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy**, Geneva, 1958.
3. ABE, A. Y., Informação pessoal, 2001.
4. GOLDSTEIN, L., STRASSER, A. A comparison of gadolinia and boron for burnable poison applications in PWR, **Nucl. Tech.**, 60, 352, 1983.
5. FRANCILLON, G., OBADIA, F., BRUET, M., L. DAUDIN. Design and experience of French PWR Gd cores and fuel assemblies. ENC'86, Geneva, Suíça, **Transactions**, 4, Topics VI e VII, 81, 1986.
6. SANTOS, A. dos, FERREIRA. Informação pessoal, 2001.

CAPÍTULO 3

EXPERIMENTOS DE VENENO QUEIMÁVEL

Os parâmetros neutrônicos influenciados pelo veneno queimável e que foram medidos visando à qualificação de metodologia de projeto, são: a reatividade introduzida pelo veneno queimável no núcleo, a distribuição de fluxo de nêutrons na região do veneno queimável, o sombreamento causado pelo veneno queimável sobre a barra de controle e os coeficientes de reatividade de vazio e de temperatura.

O veneno queimável utilizado nos experimentos constitui-se de varetas contendo pastilhas de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$. Foram fabricadas pastilhas com várias concentrações de ^{10}B para se verificar o seu impacto na reatividade e distribuição de fluxo de nêutrons, para simular a situação de veneno queimável não-uniforme e, também, para simular o consumo de veneno queimável correlacionando-o com a diminuição da concentração de ^{10}B . No programa de estudo de veneno queimável para a Instalação Nuclear a Água Pressurizada da Marinha do Brasil, as varetas de veneno queimável podem conter pastilhas de uma mesma concentração ou combinações de concentrações diferentes para atender aos objetivos citados acima. As pastilhas de veneno queimável, com concentrações de 11,2; 10,30; 7,40; 5,01 e 2,54 mg/cm^3 , foram fabricadas no Laboratório de Materiais, LABMAT– ver Apêndice A; as varetas de veneno queimável foram fabricadas e montadas no Laboratório de Instrumentação e Combustível Nuclear, LADICON, ambos pertencentes ao CTMSP

Este trabalho apresenta os resultados experimentais obtidos para o núcleo com varetas de veneno queimável contendo pastilhas de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$ na concentração de 5,01 mg/cm^3 .

3.1. Descrição geral dos experimentos de veneno queimável

A vareta de veneno queimável é constituída de uma coluna de pastilhas de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$ da altura do núcleo ativo do reator IPEN/MB-01, isto é, 54,6 cm. A Figura 3.1 mostra dois tipos de pastilhas de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$, pastilhas “verdes”, isto é,

não sinterizadas e pastilhas sinterizadas que foram colocadas na vareta de veneno queimável. Espaçadores plásticos foram utilizados para o posicionamento e fixação da coluna de pastilhas dentro da vareta de aço inoxidável. As varetas de veneno queimável têm as mesmas dimensões das varetas de combustível do reator.



Figura 3.1 – 30 pastilhas de alumina-B₄C “verdes” e sinterizadas em que se nota a densificação provocada pela sinterização.

Conjuntos de varetas de veneno queimável foram colocadas no núcleo do reator IPEN/MB-01 – ver Apêndice B . A Figura 3.2 mostra um vista lateral da estrutura suporte e do tanque de moderador que contém o núcleo. O núcleo do reator fica localizado dentro de um tanque cilíndrico (tanque do moderador), no centro da parte inferior da figura. As Figuras 3.3 a 3.6 mostram o interior do tanque do moderador onde podem ser vistas a placa espaçadora, as varetas de combustível, as quatro barras de controle e os tubulões de instrumentação do reator. As varetas de veneno queimável são as varetas escuras vistas nas figuras; cinco varetas de veneno queimável no centro do núcleo na Figura 3.3 e nove varetas de veneno queimável nas Figuras 3.4 a 3.6. Várias configurações do reator IPEN/MB-01 foram montadas com veneno queimável e sem veneno queimável (caso de referência) para avaliar o seu impacto no comportamento do reator. As várias configurações do reator são apresentadas na Tabela 3.1. Foram realizadas 32 operações para concluir as diversas medidas, conforme mostrado na Tabela 3.2.



Figura 3.2 – Vista lateral do tanque de moderador do reator IPEN/MB-01.

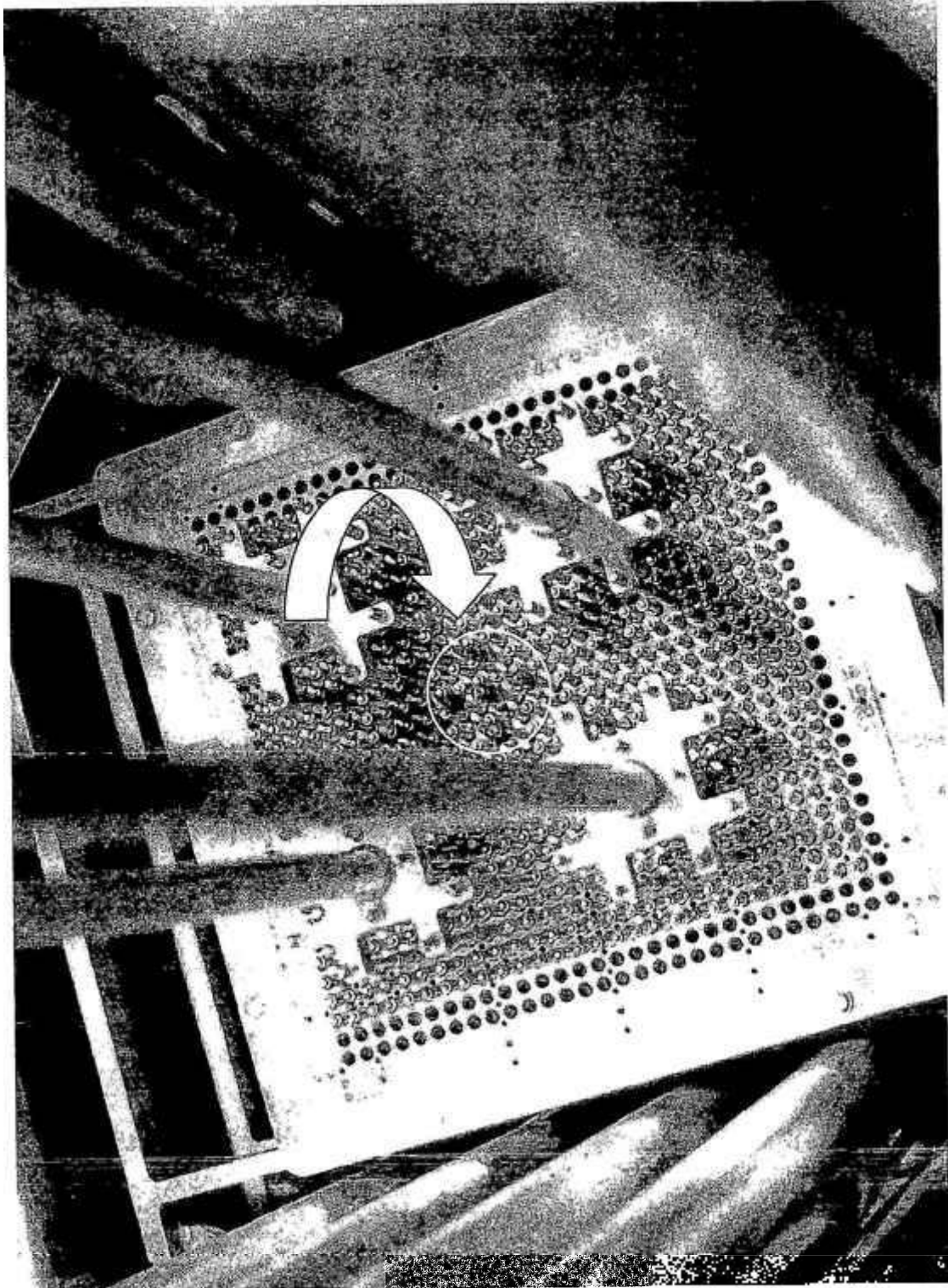


Figura 3.3 – Vista superior do núcleo do reator IPEN/MB-01 mostrando a face norte virada para o topo da página e 5 varetas de veneno queimável (varetas escuras) posicionadas no centro do núcleo formando uma cruz.

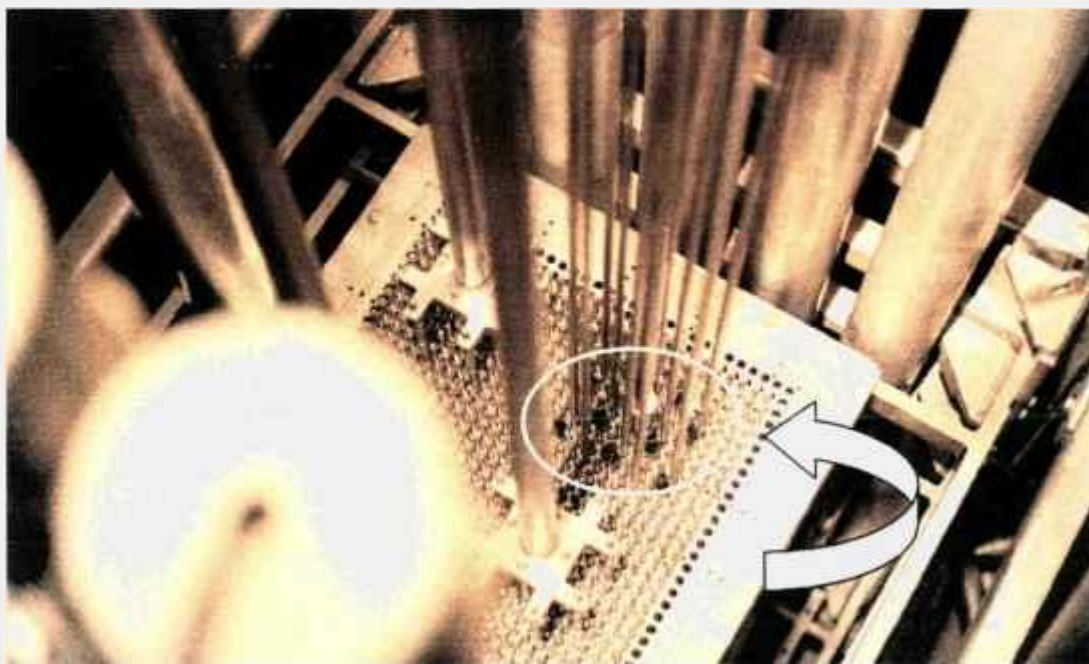


Figura 3.4 – Vista superior do núcleo do reator IPEN/MB-01 mostrando à direita (vértice da placa matriz) os tubos guia da barra de controle BC2 e as 9 varetas de veneno queimável (regiões pretas entre os tubos guia). Os grandes tubulões ao redor do núcleo contêm os detectores da instrumentação do reator.

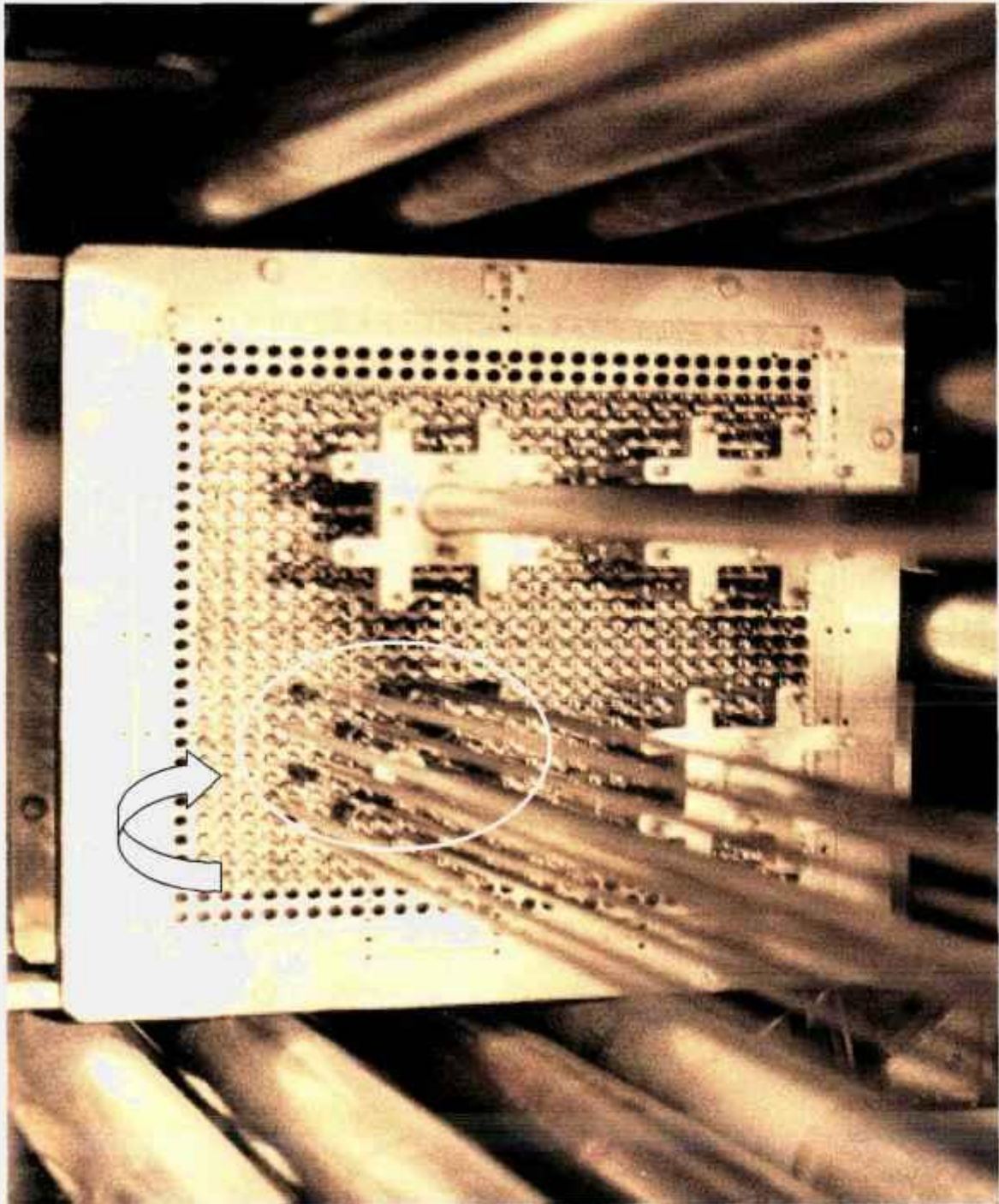


Figura 3.5 – Vista superior do núcleo do reator IPEN/MB-01 mostrando na face oeste os tubos guia da barra de controle BC2 e as 9 varetas de veneno queimável (regiões pretas entre os tubos guia). Na parte superior da placa matriz, ao centro, vê-se a identificação da face norte com a letra N.

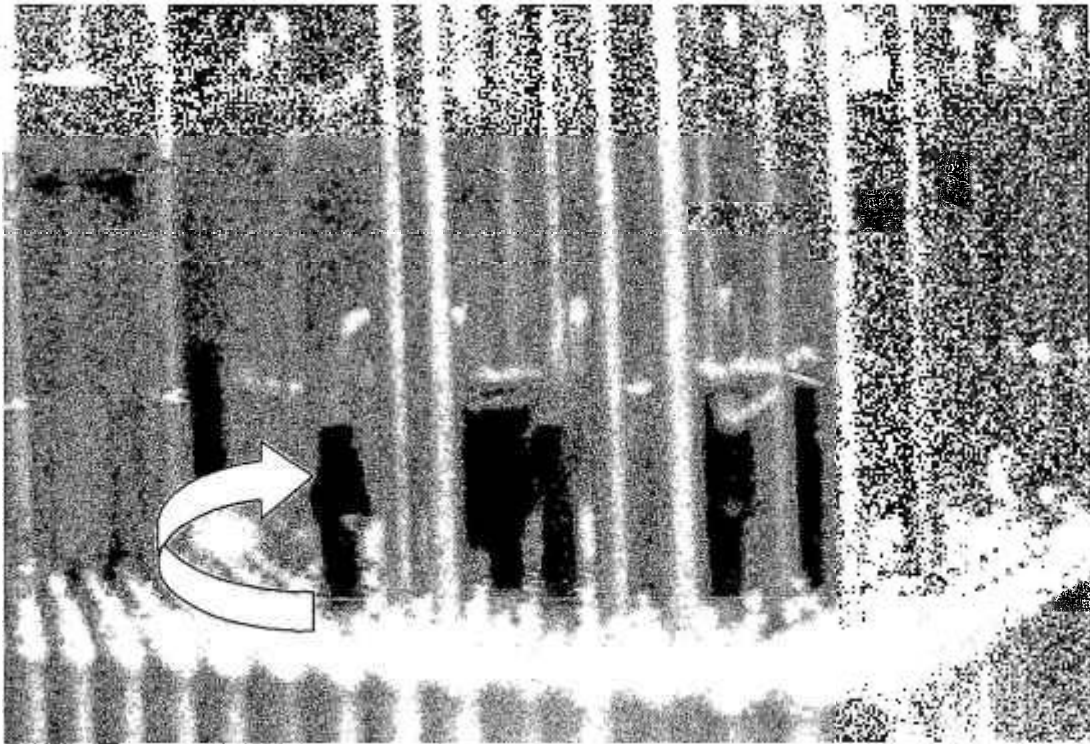


Figura 3.6 – Vista lateral do núcleo do reator IPEN/MB-01 mostrando as varetas de combustível (conjunto de varetas na parte de baixo), tubos guia das varetas das barras de controle e varetas de veneno queimável com fitas de selagem preta e ganchos para inserção e içamento.

A configuração C1, Figura 3.7, refere-se ao núcleo do reator sem veneno queimável e é utilizada para a determinação dos valores de referência para as medidas de reatividade relacionadas a sombreamento da barra de controle, reatividade das varetas de veneno queimável e coeficientes de reatividade de temperatura isotérmico e de vazio. As configurações C2, Figura 3.8, e C3, Figura 3.9, contêm varetas de veneno queimável no centro do núcleo (cinco varetas verdes no centro do núcleo) e junto à barra de controle (nove varetas verdes, embaixo, à esquerda), respectivamente.

As configurações C4, C5 e C6, mostradas nas Figuras 3.10, 3.11 e 3.12, referem-se à determinação do impacto do veneno queimável no coeficiente de reatividade de vazio. Mediu-se o coeficiente de vazio para o núcleo sem e com veneno queimável e este longe e próximo a uma barra de controle. A configuração C4 é semelhante à C2, apenas foram adicionados vazios no centro do núcleo (longe da barra de controle) para o núcleo com veneno queimável. A configuração C5 é semelhante à C1 com vazios próximos à barra de controle BC2 para o núcleo sem veneno queimável. A configuração C6 é semelhante à C3 contendo vazios próximos à barra de controle BC2 para o núcleo com veneno queimável.

As configurações C7 e C8 referem-se às medidas do impacto do veneno queimável na distribuição de fluxo de nêutrons. Nestas configurações mediu-se a taxa de reação de nêutrons com fios de Au para os casos sem veneno queimável. A configuração C1 não foi tomada como referência porque, ao se movimentar as barras de controle BC1 e BC2 para se manter a criticalidade, alterava-se também a distribuição de fluxo de nêutrons, o que impedia de se precisar tão somente o efeito das varetas de veneno queimável. Então, optou-se por se estabelecer os estados de referência para as medidas de distribuição de fluxo neutrônico conforme as configurações C7 e C8 com posicionamento das barras de controle próximas às das configurações C2 e C3, respectivamente. Para se manter a criticalidade, retiraram-se varetas de combustível na periferia do núcleo, conforme indicado na Tabela 3.1. As varetas foram retiradas com base em experimentos anteriores realizados no reator IPEN/MB-01 pela equipe de operação da UCRI.

Tabela 3.1 – Configurações do reator IPEN/MB-01 para as medidas com veneno queimável.

Configuração	Descrição
C1	Núcleo 28x26 com apenas varetas de combustível presentes no núcleo.
C2	Núcleo da Conf. C1 com a substituição de 5 varetas de combustível do centro do núcleo por igual número de varetas de veneno queimável (posições K-14, M-12, M-14, M-16 e O-14).
C3	Núcleo da Conf. C1 com a substituição de 9 varetas de combustível junto à barra BC2 por igual número de varetas de veneno queimável (posições C-17, C-21, E-19, E-23, G-17, I-19, I-23, K-17 e K-21).
C4	Núcleo da Conf. C2 com a inserção de 13 varetas de alumínio no centro do núcleo, para simular vazios, nas posições K-L {12-13/14-15/16-17}, M-N {10-11/12-13/14-15/16-17/18-19}, O-P {12-13/14-15/16-17}, I-J {14-15}, Q-R {14-15}.
C5	Núcleo da Conf. C1 com a inserção de 25 varetas de alumínio próximo à barra BC2, para simular vazios no núcleo, nas seguintes posições aa-ab {19-20}, ab-A {17-18; 21-22; 23-34; 26-27}, A-B {14-15}, B-C {19-20; 25-26}, D-E {26-27}, E-F {14-15; 17-18; 19-20; 22-23}, G-H {25-26; 28-29}, H-I {22-23}, I-J {14-15; 18-19}, J-K {24-25; 26-27}, K-L {16-17}, M-N, {14-15; 18-19; 22-23; 26-27}.
C6	Núcleo da Conf. C3 com a inserção de 25 varetas de alumínio próximo à barra de controle BC2, para simular vazios no núcleo, nas seguintes posições aa-ab {19-20}, ab-A {17-18; 21-22; 23-34; 26-27}, A-B {14-15}, B-C {19-20; 25-26}, D-E {26-27}, E-F {14-15; 17-18; 19-20; 22-23}, G-H {25-26; 28-29}, H-I {22-23}, I-J {14-15; 18-19}, J-K {24-25; 26-27}, K-L {16-17}, M-N, {14-15; 18-19; 22-23; 26-27}.
C7	Núcleo da Conf. C1 e retiradas 64 varetas de combustível das fileiras 2 e 27 e das posições L-3, M-3, N-3, O-3, L-26, M-26, N-26 e O-26; posição das barras de controle semelhantes a configuração C2.
C8	Núcleo da Conf. C1 e retiradas 58 varetas de combustível das fileiras 2 e 27 e das posições N-03 e M-26; posição das barras de controle semelhantes a configuração C3.

Tabela 3.2 – Operações realizadas no reator IPEN/MB-01 para determinação de parâmetros neutrônicos do VQ (veneno queimável) de $Al_2O_3-B_4C$ de $5,01 \text{ mg/cm}^3$.

Oper.	Figura	Config.	descrição
993	3.7	C1	Operação teste-mapeamento de fluxo (fio de ouro nu/posição central/entre 14 e 15)
999	3.7	C1	Operação teste-mapeamento de fluxo (fio de ouro c/cádmio/ 13 cm do topo da parte ativa do núcleo/entre 23 e 24)
1001	3.7	C1	Calibração de BC1 e BC2
1002	3.7	C1	Coefficiente isotérmico
1003	3.11	C5	Coefficiente de vazio – com 25 varetas de Al
1004	-	-	Operação teste para determinação reatividade negativa do VQ (9 varetas posição central) Obs.: não foi possível tornar crítico o reator.
1005	3.8	C2	Operação teste para determinação reatividade negativa do VQ (5 varetas posição central)
1014	3.8	C2	Operação referência: posições de barras em criticalidade
1015	3.8	C2	Medida de fluxo (fio de ouro nu/posição central/entre 14 e 15)
1016	3.8	C2	Medida de fluxo (fio de ouro c/cádmio/posição central/entre 14 e 15)
1017	3.8	C2	Coefficiente isotérmico
1019	3.8	C2	Calibração da BC1 e BC2
1018	3.10	C4	Coefficiente de vazio com 13 varetas de Al no centro do núcleo
1006	3.9	C3	Operação teste para determinação reatividade negativa do VQ (9 varetas sob BC2)
1007	3.9	C3	Mapeamento de fluxo (fio de ouro nu/posição superior/entre 19 e 20)
1008	3.9	C3	Calibração de BC1 e BC2
1009	3.9	C3	Medida de fluxo (fio de ouro nu/posição inferior/entre 19 e 20)
1010	3.9	C3	Medida de fluxo (fio de ouro c/ cádmio/posição inferior/entre 19 e 20)
1012	3.9	C3	Medida de fluxo (fio de ouro c/ cádmio/posição superior/entre 19 e 20)
1013	3.9	C3	Coefficiente isotérmico
1011	3.12	C6	Coefficiente de vazio com 25 varetas de Al junto a BC2
1027	3.13	C7	Calibração de BC1 e BC2
1028	3.13	C7	Operação referência p/ definir nova configuração do núcleo (retirada de varetas combustível)
1029	3.13	C7	Medida de fluxo (fio de ouro nu/posição central ^(a) /entre 14 e 15)
1030	3.13	C7	Medida de fluxo (fio de ouro c/ cádmio/posição central/entre 14 e 15)
1020	3.14	C8	Operação teste p/ definir nova configuração do núcleo (retirada de varetas combustível)
1021	3.14	C8	Operação teste p/ definir nova configuração do núcleo (retirada de varetas combustível)
1022	3.14	C8	Operação referência + calibração de BC1 e BC2
1023	3.14	C8	Medida de fluxo (fio de ouro nu/posição superior ^(b) /entre 19 e 20)
1024	3.14	C8	Medida de fluxo (fio de ouro c/cádmio/posição superior/entre 19 e 20)
1025	3.14	C8	Mapeamento de fluxo (fio de ouro nu/posição inferior ^(c) /entre 19 e 20)
1026	3.14	C8	Medida de fluxo (fio de ouro c/cádmio/posição inferior/entre 19 e 20)

^a posição central: metade da parte ativa do núcleo no sentido axial;

^b posição superior: a 15 cm abaixo do topo da parte ativa do núcleo;

^c posição inferior: a 32 cm abaixo do topo da parte ativa do núcleo.

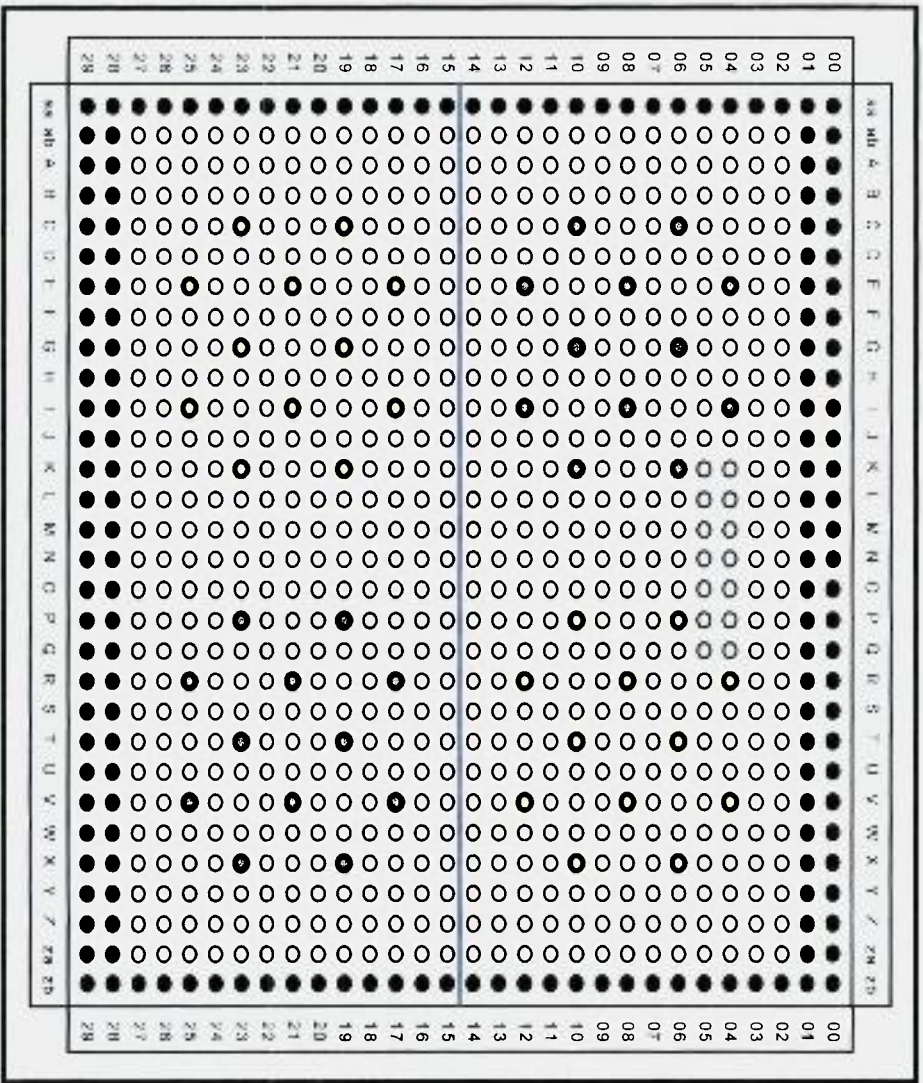


Figura 3.7 - Configuração C1 - Diagrama esquemático do núcleo com a configuração retangular (28 x 26 varreias).

Figura 3.9 - Configuração C3 - Diagrama esquemático do núcleo com a configuração retangular (28 x 26 varetas); inserção de 9 (nove) varetas de veneno queimável junto da barra de controle BC2

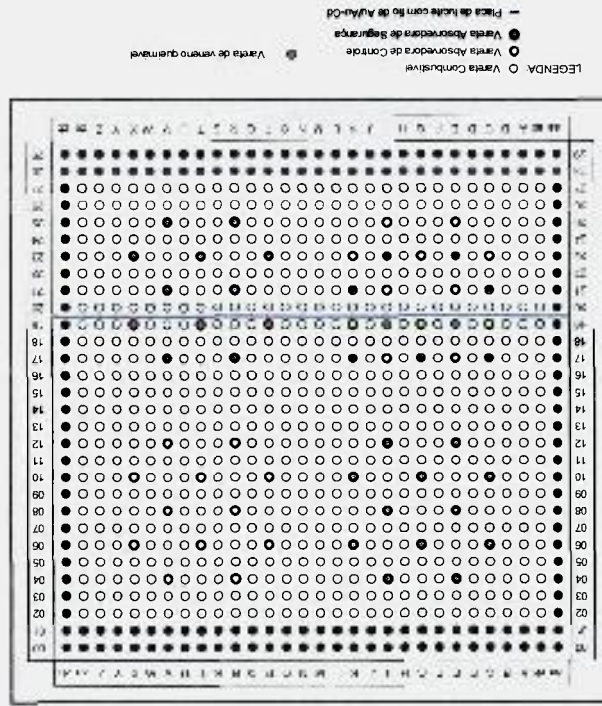


Figura 3.8 - Configuração C2 - Diagrama esquemático do núcleo com a configuração retangular (28 x 26 varetas); inserção de 5 (cinco) varetas de veneno queimável no centro do núcleo

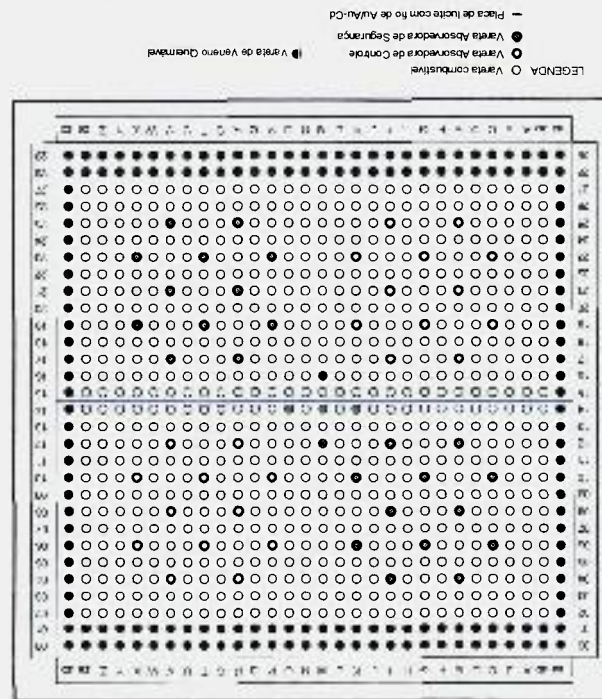


Figura 3.11 - Configuração C5 - Diagrama esquemático do núcleo com a configuração retangular (28 x 26 varetas); inserção de 25 (vinte e cinco) varetas de alumínio junto da barra de controle BC2.

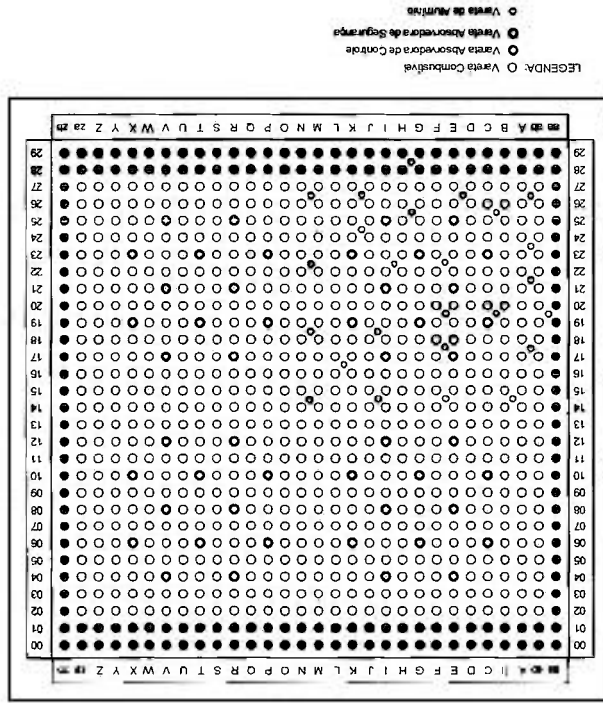


Figura 3.10 - Configuração C4 - Diagrama esquemático do núcleo com a configuração retangular (28 x 26 varetas); inserção de 5 (cinco) varetas de veneno queimável e 13 (treze) varetas de alumínio no centro do núcleo.

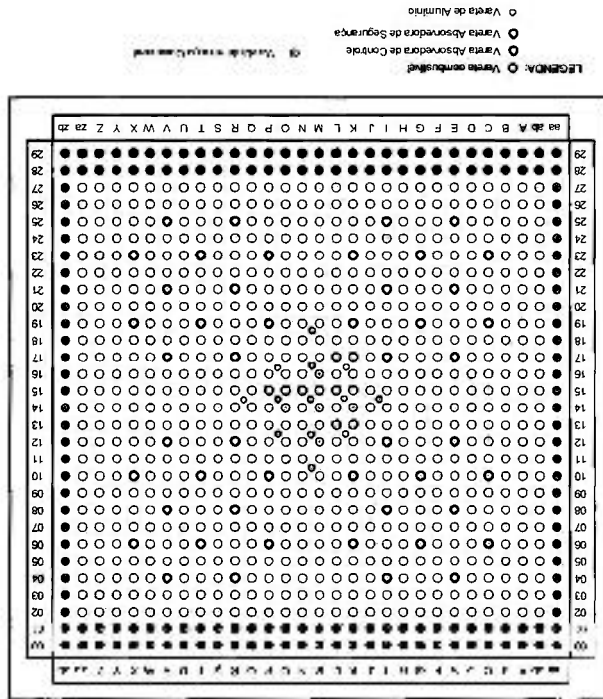


Figura 3.13 - Configuração C7 - Diagrama esquemático do núcleo com a configuração retangular (28 x 24 varetas); retiradas 64 (sessenta e quatro) varetas de combustível.

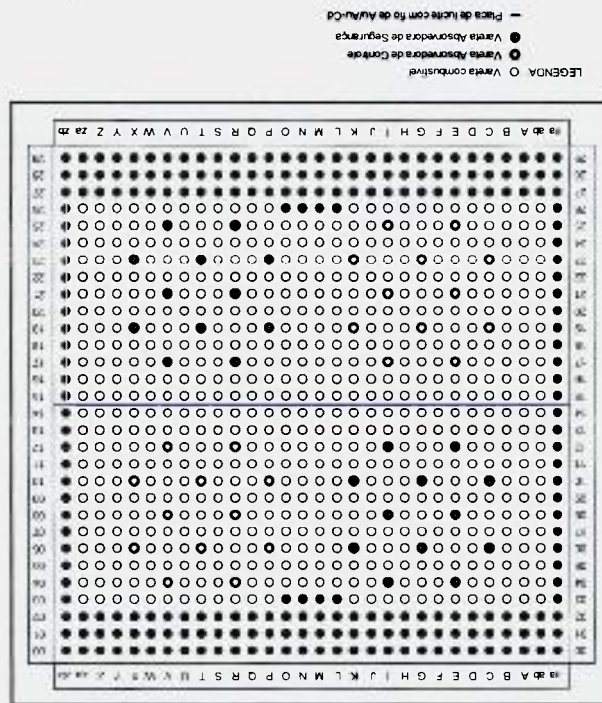
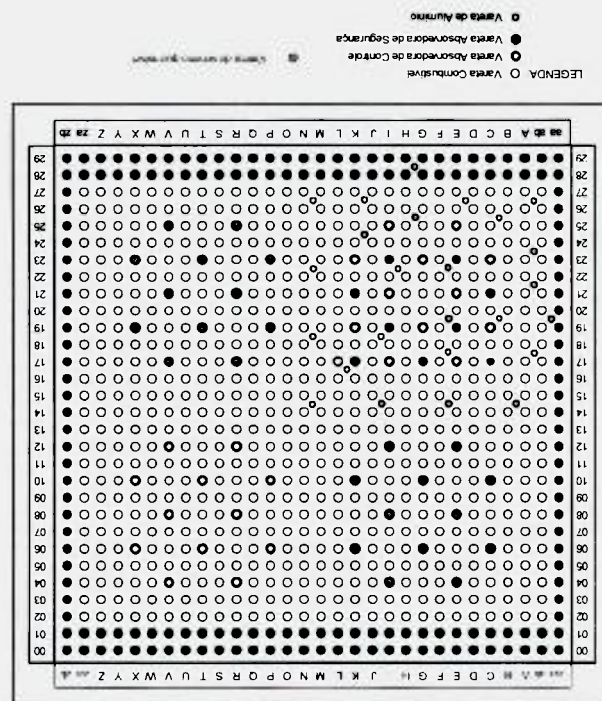


Figura 3.12 - Configuração C6 - Diagrama esquemático do núcleo com a configuração retangular (28 x 26 varetas); inserção de 9 (nove) varetas de veneno e 25 (vinte e cinco) varetas de alumínio junto de BC2.



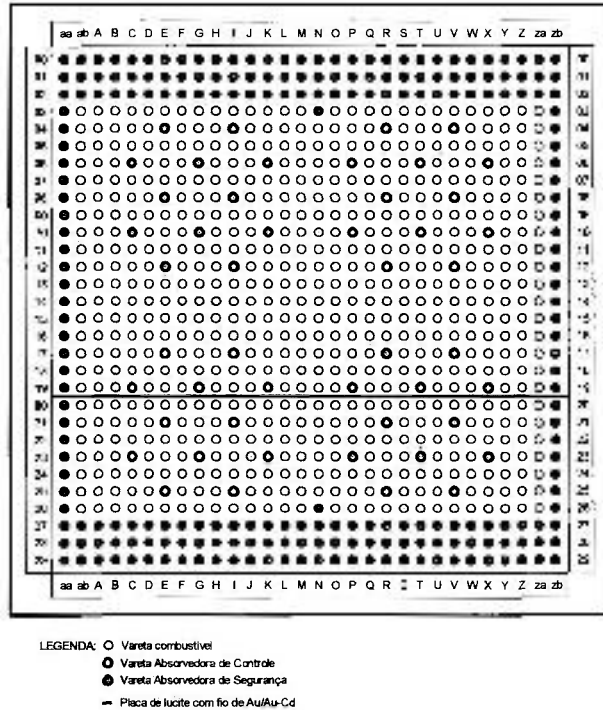


Figura 3.14 - Configuração C8 - diagrama esquemático do núcleo com a configuração retangular (28 x 24 varetas); retiradas 58 (cinquenta e oito) varetas de combustível

3.2. Procedimentos e dispositivos para medidas de distribuição de fluxo de nêutrons

A técnica de ativação e contagem de detectores de fios de ouro (^{197}Au , pureza 99,99 %, diâmetro 0,25 mm) foi utilizada para mapeamento da distribuição espacial do fluxo térmico de nêutrons [1,2,3].

As medidas de fluxo e espectro de energia dos nêutrons por ativação foram feitas através da contagem da radioatividade induzida nos detectores de ativação, por meio da espectrometria da radiação ou da partícula emitida. No caso do ^{197}Au , a reação que ocorre na ativação é do tipo : $^{197}\text{Au} (n,\gamma) ^{198}\text{Au}$, sendo a meia-vida do ^{198}Au igual a 2,696 dias.

Os fios de ouro possuem a vantagem de serem delgados, possibilitando a colocação entre os elementos combustíveis, necessitando de um suporte também de dimensões reduzidas. Além disso, permitem uma medida contínua obtendo-se um resultado experimental mais preciso em relação ao sentido de medida, radial ou axial,

do próprio núcleo. O ^{197}Au possui uma seção de choque térmica de $98,8 \pm 0,3$ barns com comportamento $1/v$ na região térmica, portanto, um valor alto quando comparado com os valores das seções de choque de outros materiais nessa mesma região.

As medidas foram tomadas com o fio de ouro posicionado no sentido “radial”, na direção horizontal Oeste-Leste, entre as posições 14 e 15, para medidas com veneno queimável no centro do núcleo, e entre as posições 19 e 20, para medidas com veneno queimável próximo à barra de controle BC2. As medidas foram feitas em três alturas distintas, na região ativa do núcleo, que tem 54,6 cm. Os fios foram posicionados da seguinte maneira em relação ao topo do núcleo: a 15 cm (parte superior do núcleo), a 27,3 cm (centro do núcleo) e a 32 cm (parte inferior do núcleo), conforme mostrado na Figura 3.15

Como o fluxo de nêutrons de maior interesse no reator é o térmico, deve-se adotar um procedimento complementar àquele utilizado na irradiação do detector de ouro nu, para que possamos descontar a influência dos fluxos de nêutrons epitérmicos e rápidos. Foram necessárias, portanto, duas irradiações em cada posição para determinação do fluxo térmico.

O procedimento conhecido como método da diferença ou razão de cádmio, consiste em se irradiar o fio de ouro coberto por um tubinho de cádmio, de 0.09” de diâmetro externo, 0.05” de diâmetro interno, espessura de 0.508 mm, pureza 99.999%, e medir a atividade existente no fio de ouro assim ativado. Em seguida, subtrai-se a atividade assim obtida daquela existente no detector sem a cobertura de cádmio. O cádmio, desta maneira, atua como um filtro “seletivo” e o fluxo térmico que nos interessa pode ser obtido através da medida do fluxo total e do fluxo não-térmico (rápido e epitérmico) pela expressão:

$$\phi_{\text{TÉRMICO}} = \phi_{\text{TOTAL}} - \phi_{\text{NÃO-TÉRMICO}} \quad (3.1)$$

O dispositivo de contagem de fios [1] utilizado é composto pelos seguintes componentes visto nas fotos das Figuras 3.16 a 3.18.

- Mesa suporte;
- Sistema de movimentação, com motor de passo, hastes de apoio, rosca sem-fim, régua de fixação do fio a ser medido;
- Capela de blindagem, com colimador, paredes de chumbo e suporte para o detector NaI;

- Multicanal; e
- Microcomputador e impressora.

As contagens foram feitas no Laboratório do reator IPEN/MB-01 e o espaçamento entre as medidas foi de 0,5 cm. Esse espaçamento foi escolhido para se manter sempre a mesma distância relativa da vareta de combustível durante a varredura, pois a distância entre varetas, no reator IPEN/MB-01 é 1,5 cm. O comprimento do fio de ouro exposto ao colimador é 10,0 mm para todas as medidas.

As contagens do detetor vão para o sistema de tratamento de sinais que fornece a atividade existente naquele trecho específico do fio e que corresponde a uma determinada posição horizontal no interior do núcleo.

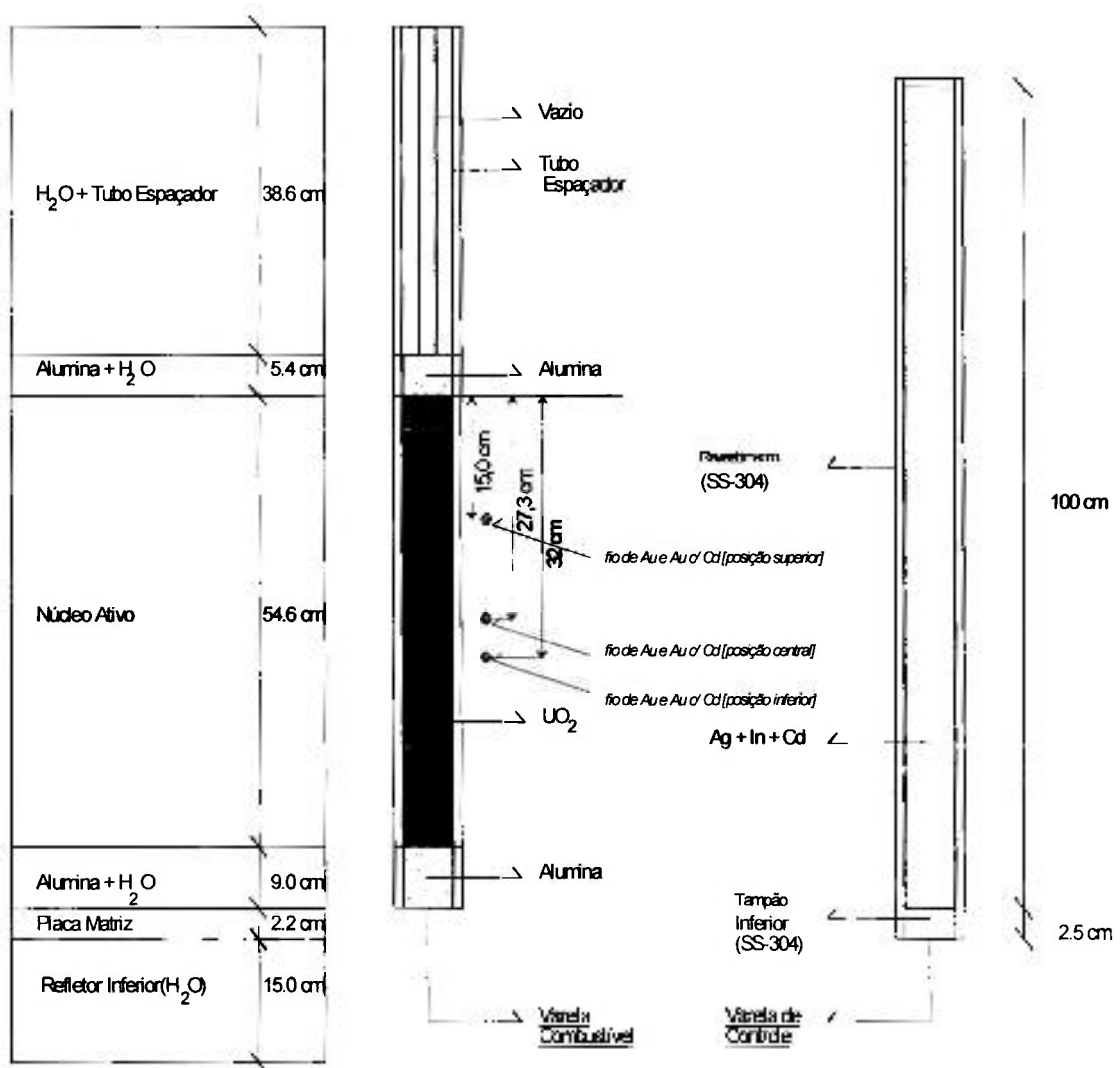


Figura 3.15 - Diagrama esquemático do núcleo do reator IPEN/MB-01 mostrando o posicionamento axial dos fios de Au utilizados para mapeamento de fluxo de nêutrons.

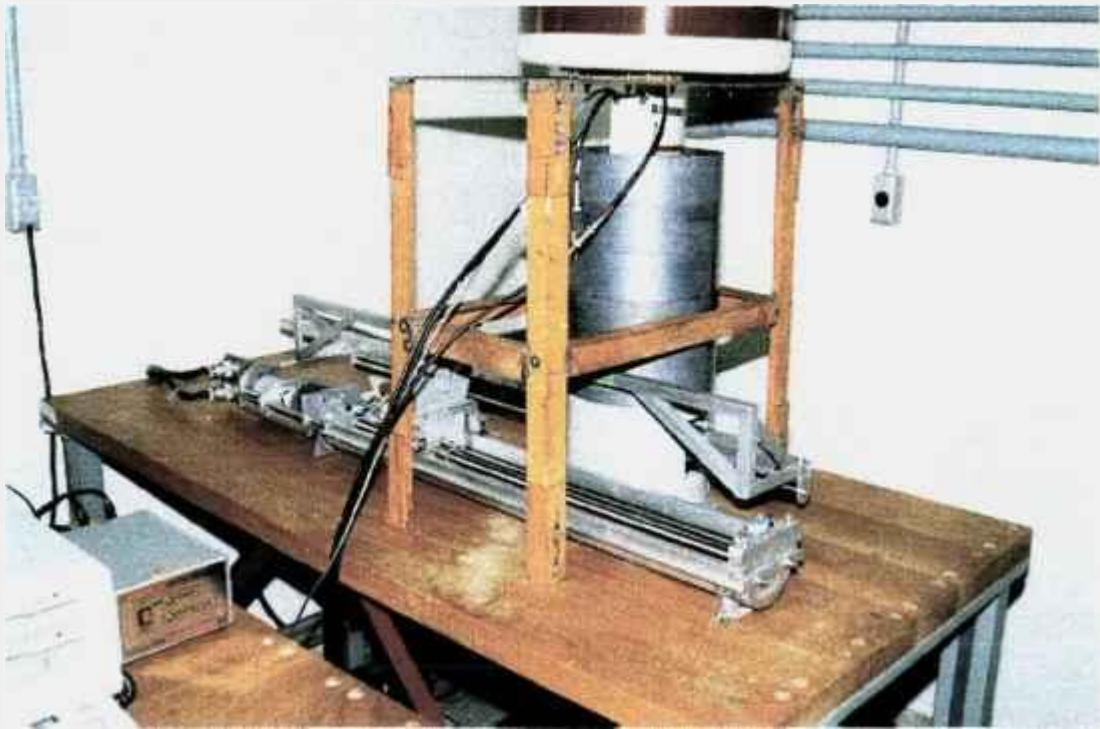


Figura 3.16 – Vista do dispositivo de medida de fluxo de nêutrons com fio de Au.



Figura 3.17 – Detalhe do dispositivo de medida de fluxo de nêutrons com fio de Au mostrando o motor de passo.

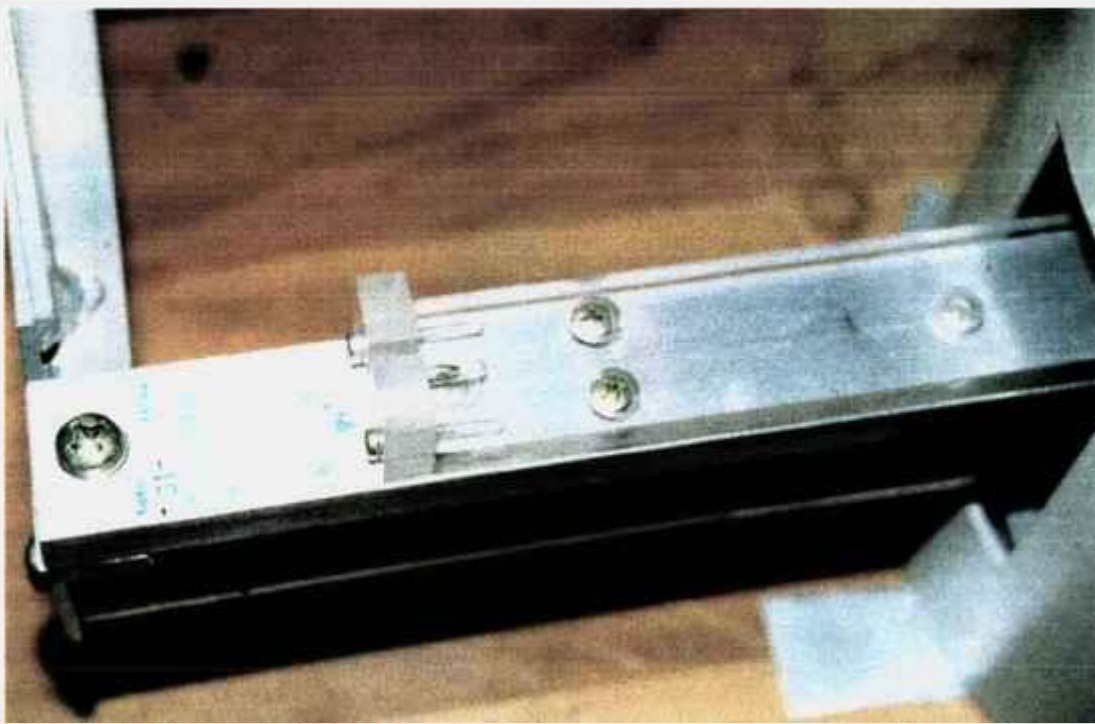


Figura 3.18 – Detalhe do dispositivo de medida de fluxo de nêutrons com fio de Au mostrando as marcações de referência de posicionamento do fio no núcleo do reator.

3.3. Procedimentos e dispositivos para medidas envolvendo reatividade

As medidas envolvendo reatividade, tais como a reatividade inserida pelo veneno queimável, impacto nos coeficientes de reatividade isotérmico e de vazio e impacto sobre a reatividade das barras de controle (sombreamento), foram feitas indiretamente, utilizando compensações das barras de controle calibradas previamente. Por exemplo, a reatividade inserida pelo veneno queimável no núcleo foi obtida a partir de dois estados críticos do reator: o primeiro, com o núcleo sem veneno queimável e o segundo com o núcleo com veneno queimável. Para se obter criticalidade nos dois estados, movimenta-se uma das barras de controle. A diferença de posição das barras de controle fornece, assim, a reatividade inserida pelo veneno queimável.

Neste procedimento, torna-se necessário ter as barras de controle calibradas nos vários estados do reator ou obter suas curvas de reatividade diferencial ou integral nestes estados.

As curvas de reatividade diferencial e integral dos bancos de controle, obtidas para o arranjo retangular do núcleo do reator IPEN/MB-01, foram determinadas experimentalmente, utilizando-se a técnica da cinética inversa incorporada num reatímetro [4, 5, 6].

O procedimento experimental para se determinar as reatividades integral e diferencial das barras de controle consiste em: a) conectar e calibrar os equipamentos necessários: câmara de ionização compensada (CIC) e eletrônica associada e micro-computador; b) tornar crítico o reator em um dado nível de potência, com um dos bancos de controle BC1 e BC2 inserido ao máximo no núcleo, e o outro retirado ao máximo; c) movimentar a barra de controle mais inserida para criar uma inserção de reatividade positiva; d) durante e após a movimentação das barras, acompanhar, no reatímetro, a reatividade inserida no núcleo do reator; e) retornar o reator à criticalidade inserindo a outra barra no núcleo. Os procedimentos “c”, “d” e “e” são repetidos várias vezes, deslocando-se os bancos de controle Δz (cm), ou seja, enquanto um banco é retirado, o outro banco é inserido para compensar a reatividade inserida e retornar o reator para a condição de criticalidade. Procedendo-se desta forma, a inserção de reatividade do banco de controle em questão é determinada para cada deslocamento Δz . Conseqüentemente, a reatividade integral para uma retirada do banco de controle até a posição z é a soma das reatividades obtidas em todos os passos Δz percorridos até z . [6]

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MARQUES, ANDRÉ LUÍS FERREIRA - Medida do fluxo de nêutrons térmico do reator IPEN/MB-01 com detectores de ativação de fios de ^{197}Au . São Paulo: 1995. Dissertação (Mestrado) - **Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares**.
2. KOSKINAS, M.F. - Medida do Fluxo Térmico, Epitérmico e Rápido no Reator IEA-R1 pelo Método de Ativação de Folhas. São Paulo: 1979. Dissertação (Mestrado) - **Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares**.
3. BITELLI, U. D'UTRA - Medida e Cálculo da Distribuição Espacial e Energética de Nêutrons no Núcleo do Reator IEA-R1. São Paulo: 1998. Dissertação (Mestrado) - **Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares**.
4. FERREIRA, P. S. B.; Manual do Reatímetro Digital do IPEN – versão 2.0. Relatório Técnico R41401850004-414, IPEN/CNEN-SP (23/11/1992).
5. FERREIRA, P. S. B.; Técnicas Experimentais em Física de Reatores: Reatividade. Publicação Interna do Laboratório de Neutrônica (LABNEU), COPESP (1992).
6. MOREIRA, J. M. L.; Notas de Aula do Curso TNR-725 – Medidas de Parâmetros de Reator Nuclear. IPEN/USP, 1995.

CAPÍTULO 4

MEDIDAS DE DEPRESSÃO DE FLUXO DE NÊUTRONS E DE REATIVIDADE DO NÚCLEO COM E SEM VENENO QUEIMÁVEL

Neste capítulo são apresentados os resultados medidos durante os experimentos. Primeiramente, na Seção 4.1 são apresentados os resultados de depressão de fluxo de nêutrons nas imediações do veneno queimável. As medidas envolvendo reatividade exigem que se tenham previamente as curvas de calibração das barras de controle do reator, que são apresentadas na Seção 4.2. Nas seções seguintes encontram-se os resultados de interesse referentes ao veneno queimável propriamente dito, que são a reatividade inserida no núcleo, o sombreamento causado sobre as barras de controle e o impacto sobre os coeficientes de reatividade isotérmico e de vazio.

4.1. Medida de depressão de fluxo devido ao veneno queimável

Para se medir a influência do veneno queimável na distribuição de fluxo de nêutrons foram feitas medidas com fios de ativação de Au nas configurações C2, C3, C7 e C8. Como a seção de choque do ouro é predominantemente térmica, a taxa de reação no fio de Au é proporcional ao fluxo de nêutrons térmicos. As contagens foram feitas com sistema de NaI no Laboratório do reator IPEN/MB-01 e o espaçamento entre as medidas foi de 0,5 cm. Esta resolução permite identificar claramente, nas distribuições de taxa de reação, as varetas de combustível, as varetas das barras de controle, as de veneno queimável e os tubos guia das barras de segurança, devido ser o passo do reator de 1,5 cm. As posições medidas podem ser vistas nas linhas mostradas nas Figuras 3.7 a 3.14 entre as posições 14 e 15, para medidas com veneno queimável no centro do núcleo, e entre as posições 19 e 20, para as medidas com veneno queimável próximo à barra de controle BC2. Foram feitas medidas em três alturas distintas: a 15 cm, a 27,3 cm e a 32 cm do topo do núcleo que tem 54,6 cm. Assim, a primeira altura encontra-se na parte superior do núcleo, a segunda no centro e a terceira na parte inferior do núcleo. As distribuições

de taxa de reação levantadas foram normalizadas de forma que a média seja igual a unidade.

A Figura 4.1 mostra a distribuição de taxa de reação no Au para os casos sem veneno queimável (configuração C7) e com veneno queimável no centro do núcleo (configuração C2). O erro médio nas contagens das seções de fios de ouro, ou taxa de reação relativa, é inferior a 1 %. Vê-se, na figura, a depressão local na taxa de reação, devido à presença das varetas de veneno queimável, e um achatamento geral de cerca de 4 % na região central, devido ao efeito combinado de todas as varetas na região. As diferenças entre os dois casos entre as posições 0 e 12 cm podem ser creditadas à retirada das varetas de combustível na configuração C7, entretanto, isto não pode ser confirmado apenas com medidas. No Capítulo 5 é visto que esta diferença também ocorre nos cálculos.

A Figura 4.2 mostra a distribuição de taxa de reação tomada a 15 cm abaixo do topo da parte ativa do núcleo para os casos sem veneno queimável (configuração C8) e com veneno queimável próximo à barra de controle BC2 (configuração C3). Esta figura mostra o efeito de três componentes distintos do núcleo na distribuição de taxa de reação no Au. Da esquerda para a direita, as três grandes depressões locais na taxa de reação são devidas às varetas absorvedoras de nêutrons da barra de controle BC2 (ver Figuras 3.9 e 3.14). Entre as varetas da barra BC2 notam-se duas pequenas depressões devidas à presença das duas varetas de veneno queimável nesta linha de medida. Continuando para direita, os três picos são devidos à água existente dentro dos tubos guia para as varetas absorvedoras da barra de segurança que ficam retiradas do núcleo. Esta água produz, localmente, uma termalização maior dos nêutrons e, conseqüentemente, um pico no fluxo de nêutrons térmicos.

A Figura 4.3 mostra a distribuição de taxa de reação, tomada para os casos sem veneno queimável (configuração C8) e com veneno queimável próximo à barra de controle BC2 (configuração C3), numa altura abaixo da ponta das barras de controle. Portanto, não há a presença das barras de controle e em seus lugares os tubos guia são preenchidos com água. Da esquerda para a direita, os três grandes picos locais na taxa de reação são devidos à água presente nos tubos guia. Entre os tubos guia da barra BC2 notam-se duas pequenas depressões devidas à presença das duas varetas de veneno queimável nesta linha de medida. Continuando para direita, os três picos são devidos à água existente dentro dos tubos guia para as varetas absorvedoras da barra de segurança que ficam retiradas do núcleo.

A depressão no fluxo neutrônico devido a presença do veneno queimável é obtida da razão entre as taxas de reação nos núcleos com e sem veneno queimável nas imediações das varetas de veneno queimável

$$\text{Depressão no Fluxo Neutrônico Térmico} = \frac{\text{Taxa de Reação no Au com VQ}}{\text{Taxa de Reação no Au sem VQ}} \quad (4.1)$$

A Tabela 4.1 apresenta os resultados das taxas de reação médias nas regiões com veneno queimável e as razões que indicam a depressão do fluxo neutrônico. Para o veneno queimável na região central tomou-se a média entre as distâncias 14 e 26 cm e para embaixo da barra de controle BC2, tomou-se a média entre as distâncias 12 e 15 cm e 6,5 e 9,5 cm.

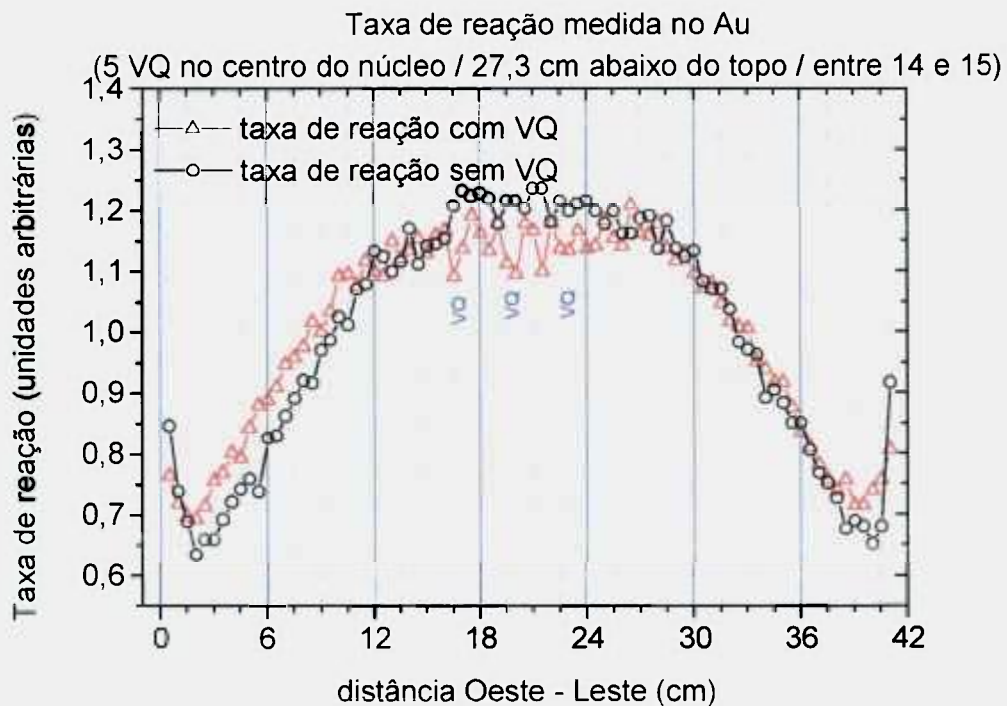


Figura 4.1 - Comparação entre taxa de reação de nêutrons total medida no Au, a 27,3 cm do topo do núcleo, sem VQs e com VQs no centro do núcleo.

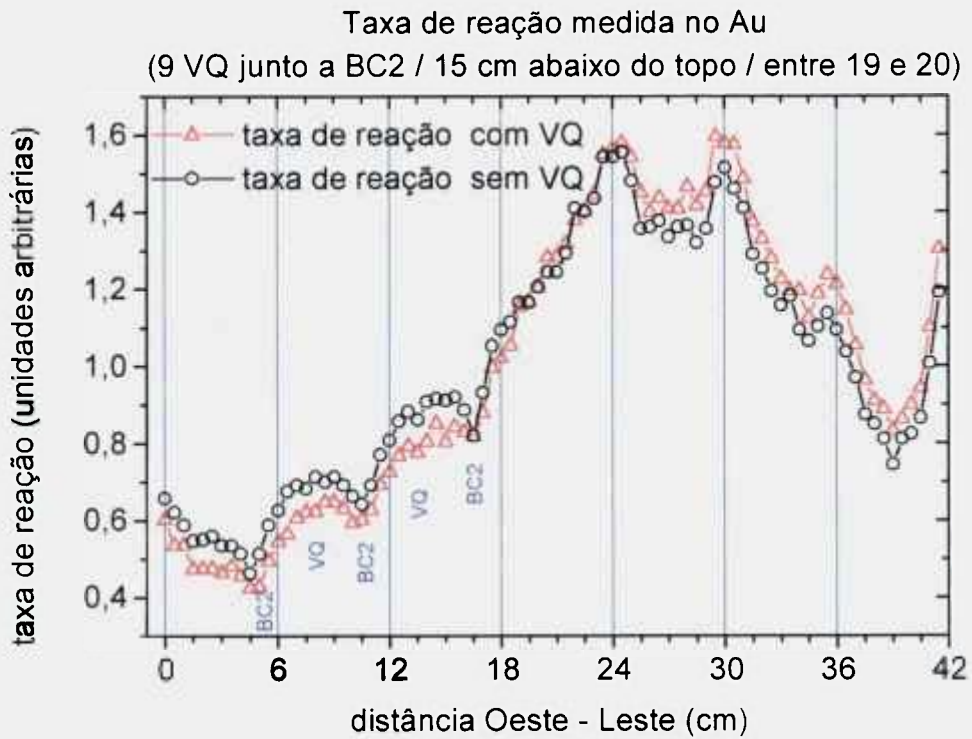


Figura 4.2 – Comparação entre taxa de reação de nêutrons total medida no Au, a 15 cm do topo do núcleo, sem VQs e com VQs junto da barra BC2.



Figura 4.3 – Comparação entre taxa de reação de nêutrons total medida no Au, a 32 cm do topo do núcleo, sem VQs e com VQs junto da barra BC2.

Tabela 4.1 – Taxas de reação média nos fios de Au nas imediações das varetas de veneno queimável e a estimativa da depressão da taxa de reação.

Região	Taxa de reação média (sem VQ)	Taxa de reação média (com VQ)	Depressão estimada na taxa de reação
Centro (entre 14 e 26 cm)	1,20	1,15	0,96
Barra BC2 (entre 12 e 15 cm e altura de 15 cm)	0,88	0,79	0,89
Barra BC2 (entre 6,5 e 9,5 cm e altura de 15 cm)	0,70	0,62	0,89
Barra BC2 (entre 12 e 15 cm e altura de 32 cm)	1,09	0,97	0,89
Barra BC2 (entre 6,5 e 9,5 cm e altura de 32 cm)	0,89	0,74	0,83

Observando a Tabela 4.1 nota-se que a depressão da taxa de reação na região central é menos acentuada do que na região da barra BC2.

4.2. Calibração de barras de controle

Como foi mencionado anteriormente, as medidas de reatividade são feitas indiretamente, a partir da movimentação das barras de controle, para se atingir os estados críticos. Nesta seção, são apresentadas as curvas de reatividade integral e diferencial para as barras BC1 e BC2, para as configurações C1, C2 e C3. O erro estimado em cada medida de reatividade com o reatímetro é da ordem de 2 % do valor medido, portanto muito pequeno.

As Figuras 4.4 a 4.7 mostram os resultados de reatividade integral e diferencial para as barras BC1 e BC2, para a configuração C1 realizadas na operação 1001. As Figuras 4.8 a 4.11 mostram os resultados de reatividade integral e diferencial para as barras BC1 e BC2, para a configuração C2 realizadas na operação 1019. As Figuras 4.12 a 4.15 mostram os resultados de reatividade integral e diferencial para as barras BC1 e BC2, para a configuração C3 realizadas na operação 1008. As barras foram calibradas parcialmente visando apenas fornecer meios de medida dos parâmetros de reatividade. As equações apresentadas nas figuras representam um ajuste polinomial aos pontos experimentais

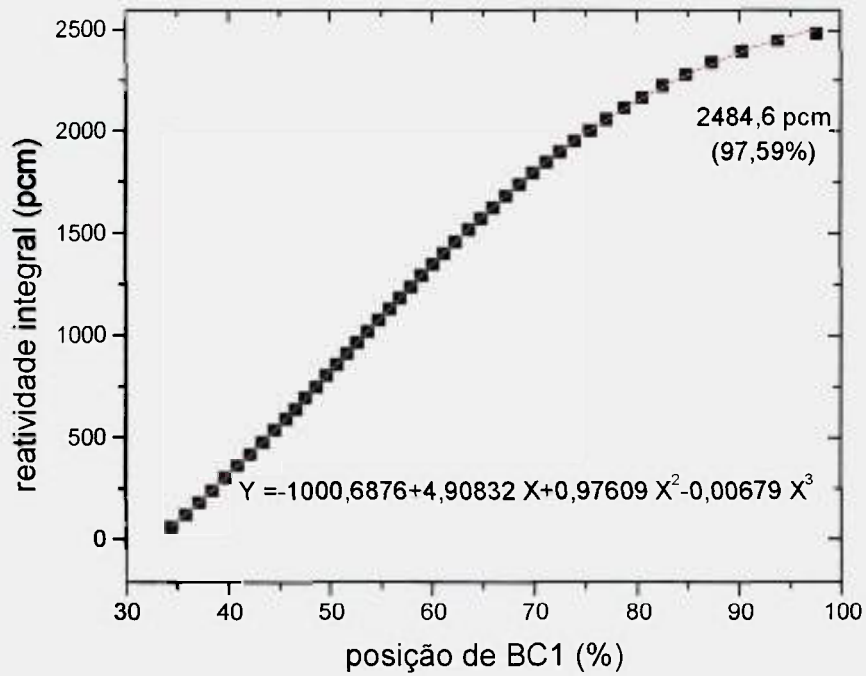


Figura 4.4 – Reatividade integral de BC1 entre 34,35 e 97,59 % para a configuração C1 (Operação 1001).

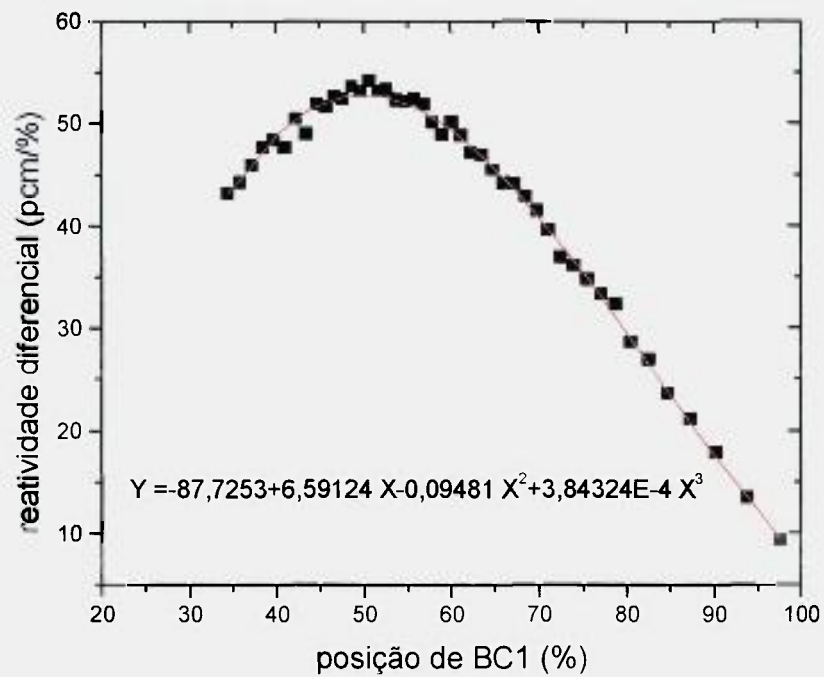


Figura 4.5 – Reatividade diferencial de BC1 entre 34,35 e 97,59 % para a configuração C1 (Operação 1001).

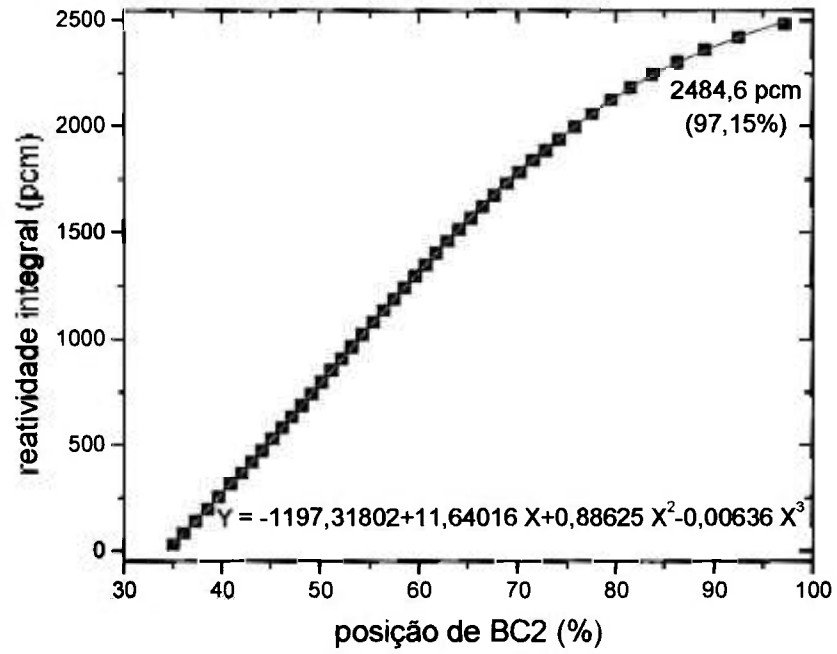


Figura 4.6 – Reatividade integral de BC2 entre 34,97 e 97,15 % para a configuração C1 (Operação 1001).

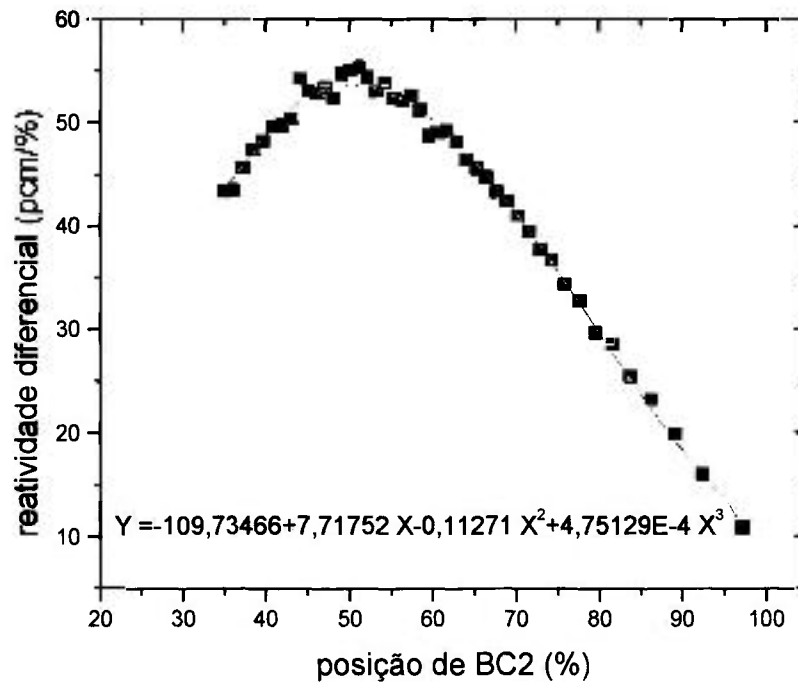


Figura 4.7 – Reatividade diferencial de BC2 entre 34,97 e 97,15 % para a configuração C1 (Operação 1001).

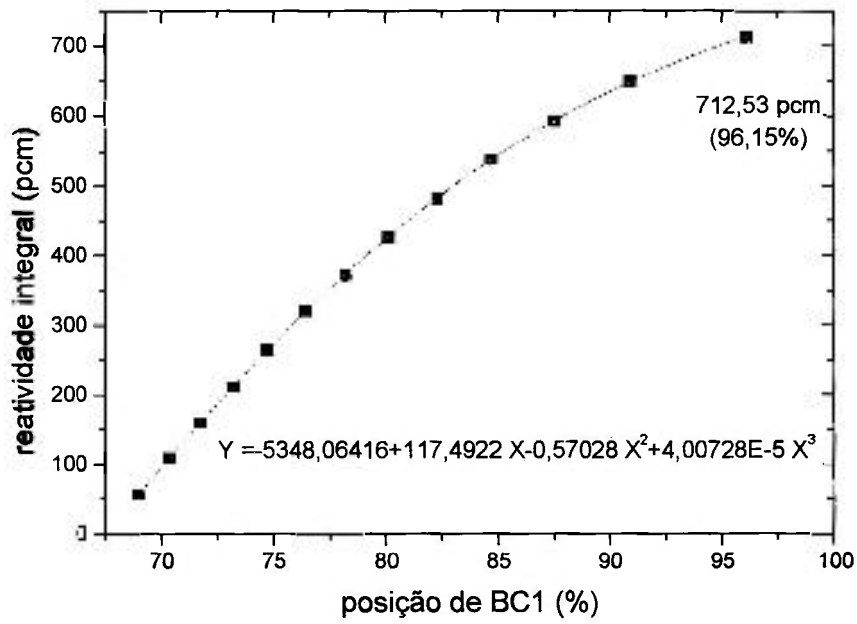


Figura 4.8 - Reatividade integral de BC1 entre 68,95 e 96,15 % para a configuração C2 (Operação 1019).

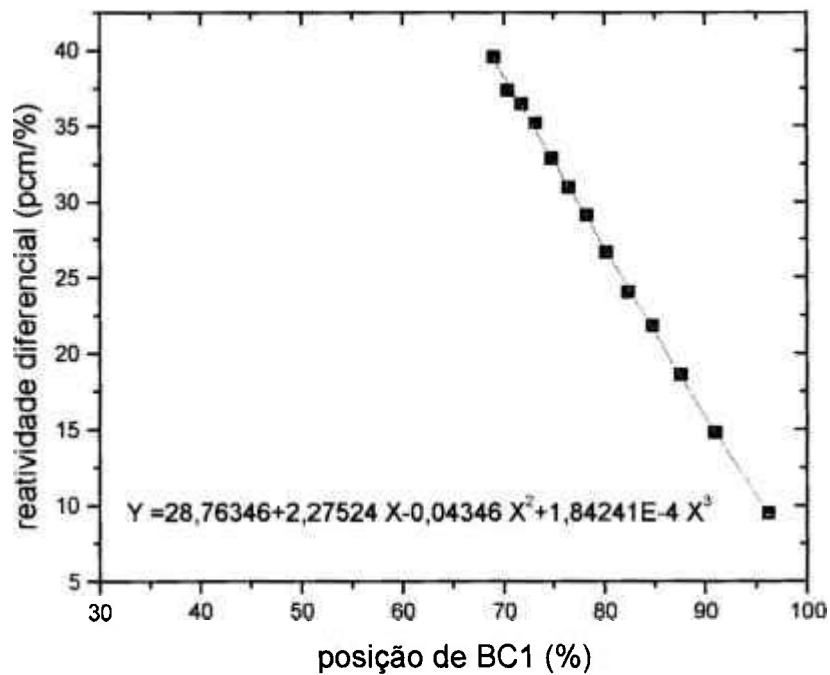


Figura 4.9 - Reatividade diferencial de BC1 entre 68,95 e 96,15 % para a configuração C2 (Operação 1019).

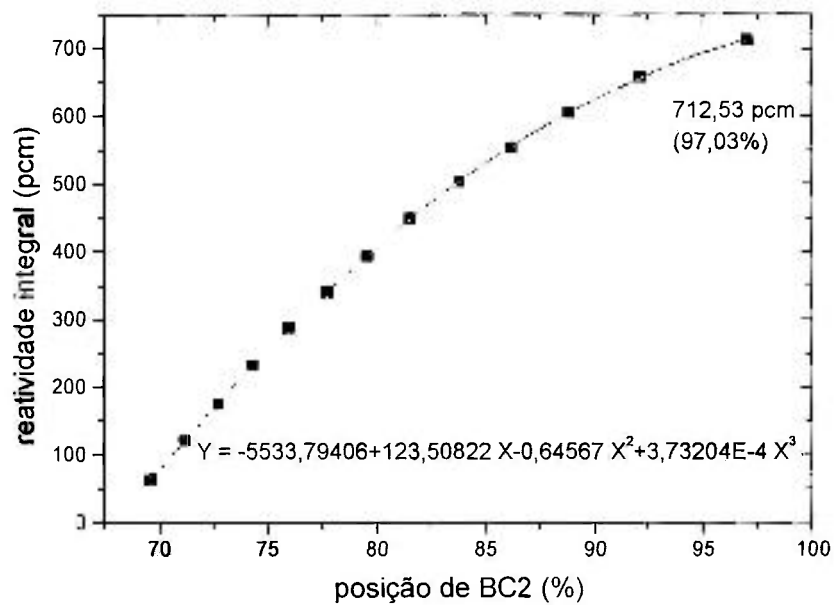


Figura 4.10 – Reatividade integral de BC2 entre 69,61 e 97,03 % para a configuração C2 (Operação 1019).

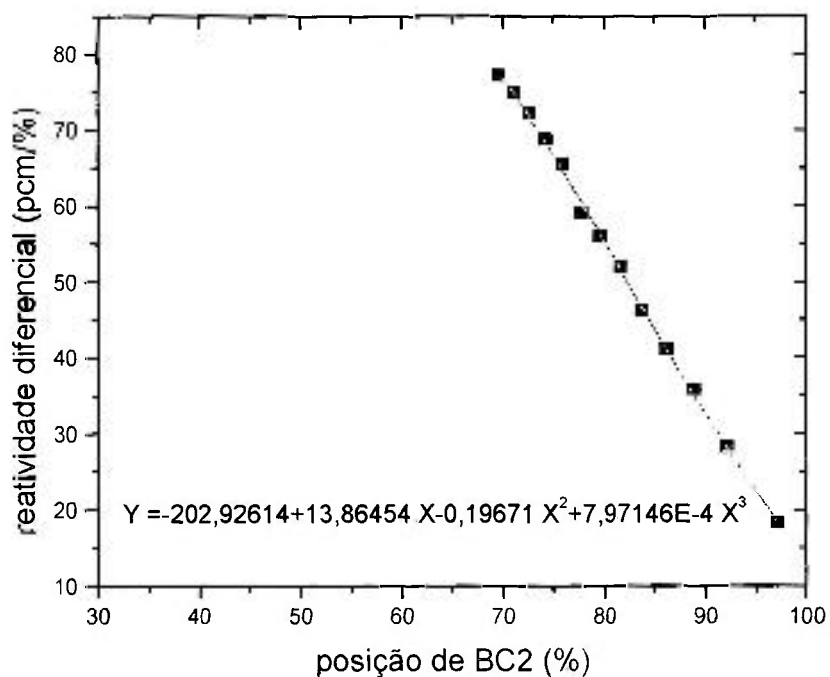


Figura 4.11 – Reatividade diferencial de BC2 entre 69,61 e 97,03 % para a configuração C2 (Operação 1019).

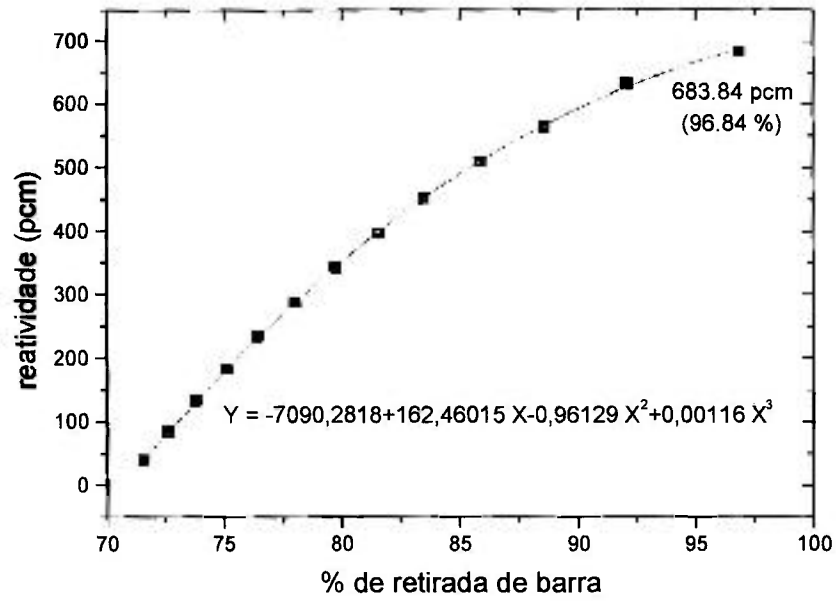


Figura 4.12 – Reatividade integral de BC1 entre 71,56 e 96,84 % para a configuração C3 (Operação 1008).

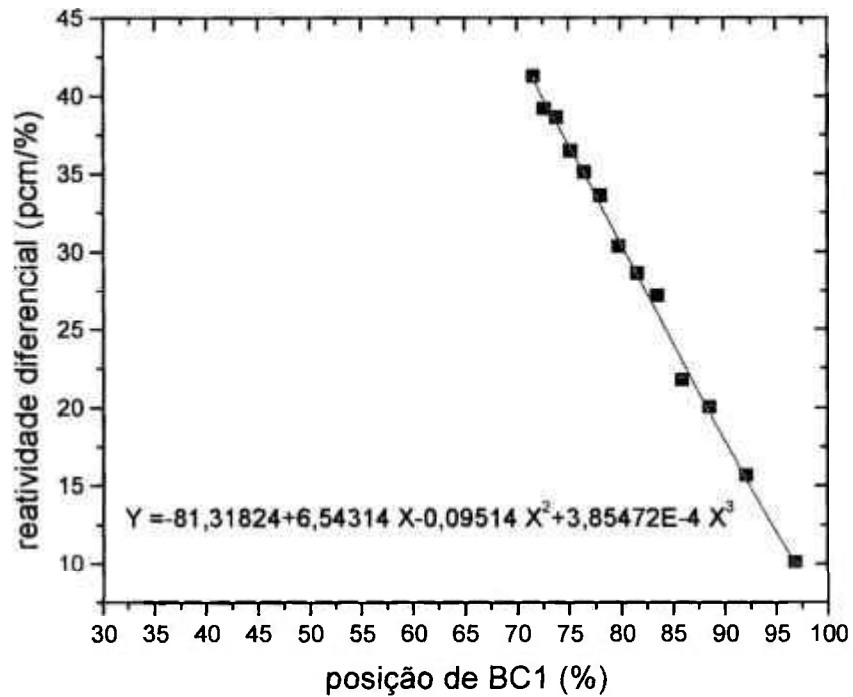


Figura 4.13 – Reatividade diferencial de BC1 entre 71,56 e 96,84 % para a configuração C3 (Operação 1008).

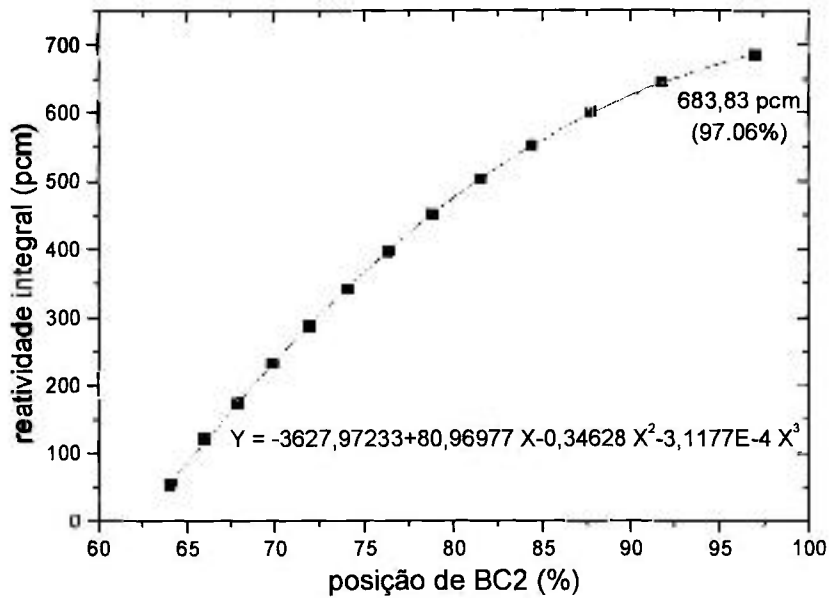


Figura 4.14 – Reatividade integral de BC2 entre 64,03 e 97,06 % para a configuração C3 (Operação 1008).

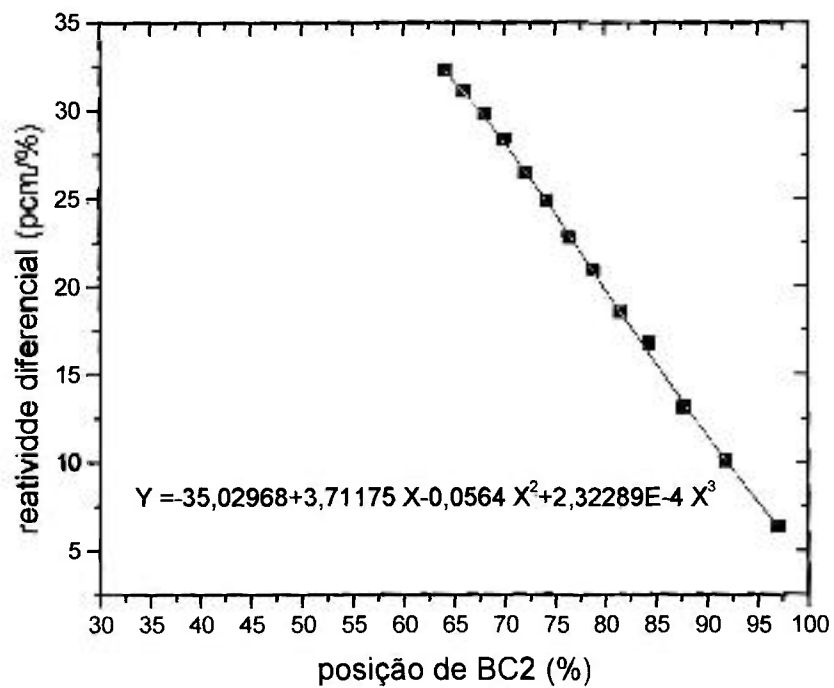


Figura 4.15 – Reatividade diferencial de BC2 entre 64,03 e 97,06 % para a configuração C3 (Operação 1008).

4.3. Medida da Reatividade Absorvida pelo Veneno Queimável

A reatividade inserida pelo veneno queimável é inferida considerando-se o deslocamento das posições críticas das barras de controle entre as configurações C2 e C1, para o caso de varetas de veneno queimável localizadas no centro do reator, e entre as configurações C3 e C1, para o caso de varetas de veneno queimável localizadas entre as varetas absorvedoras da barra de controle BC2.

As Tabelas 4.2 e 4.3 mostram vários estados críticos de posição de barras diferentes para as configurações C1 e C2 (veneno queimável no centro). A diferença de posição das barras BC1 e BC2 entre os estados fornece a reatividade devido ao veneno queimável. Os dados de reatividade para as posições foram tomados na curva de reatividade integral das barras de controle para a configuração C1. A Tabela 4.4 fornece o resultado da reatividade inserida pelo veneno queimável no centro do núcleo para cada estado crítico e o valor médio obtido.

A Tabela 4.5 mostra vários estados críticos de posição de barras diferentes para a configuração C3 (veneno queimável embaixo da BC2). A diferença de posição das barras BC1 e BC2, entre os estados apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.5, fornece a reatividade devido ao veneno queimável. A Tabela 4.6 fornece o resultado da reatividade inserida pelo veneno queimável embaixo da barra BC2 para cada estado crítico e o valor médio obtido. A Tabela 4.7 resume os resultados de reatividade inseridos pelas varetas de veneno queimável.

Um comentário deve ser feito a respeito destes resultados. Como a calibração de uma barra de controle depende da configuração do núcleo, se fossem utilizadas as curvas de calibração das barras BC1 e BC2 das configurações C2 e C3, os resultados seriam um pouco diferentes. Não há uma medida única de reatividade para o veneno queimável.

Assim, não se pode falar em um valor absoluto de reatividade inserida pelo veneno queimável e, sim, em relação a uma configuração do reator. A comparação destes resultados com cálculo deve levar isto em consideração. A reatividade de uma vareta de veneno queimável localizada longe da barra de controle (centro do reator) é 1,9 vezes maior que quando localizada próximo à barra. A razão desta diferença é devido ao menor fluxo de nêutrons na região da barra de controle, ao sombreamento que ocorre devido à vareta de BC2 e, também, devido ao fato de ser a região da barra de controle de menor importância neutrônica.

Tabela 4.2 - Conjunto de diferentes estados críticos com as posições de barras e as respectivas reatividades integrais para a configuração C1.

Posição crítica BC1 (% retirada)	Reatividade integral da BC1 (pcm)	Posição crítica BC2 (% retirada)	Reatividade integral da BC2 (pcm)
71,72	1877,42	47,56	676,74
73,12	1932,62	46,54	622,89
74,58	1983,80	45,59	572,73
76,17	2024,61	44,55	517,85
77,78	2079,81	43,56	465,68
79,45	2123,30	42,49	409,42
81,33	2178,50	41,41	352,81
83,50	2235,36	40,23	291,21
85,90	2277,18	39,05	229,25
88,60	2360,81	37,84	167,54
94,76	2472,88	36,60	104,07
95,72	2472,88	35,37	41,70
99,46	2536,44	34,56	0,96

Tabela 4.3 - Conjunto de diferentes estados críticos com as posições de barras e as respectivas reatividades integrais para a configuração C2.

Posição crítica BC1 (% retirada)	Reatividade integral da BC1 (pcm)	Posição crítica BC2 (% retirada)	Reatividade integral da BC2 (pcm)
69,66	1782,51	93,95	2444,76
71,05	1840,09	90,27	2396,90
72,45	1896,24	87,42	2344,18
73,90	1952,33	84,94	2287,94
75,54	2013,08	82,61	2226,86
77,32	2075,59	80,49	2164,77
79,12	2134,94	78,62	2105,13
81,13	2196,33	76,81	2043,33
83,42	2259,90	75,13	1982,55
86,05	2322,87	73,46	1919,08
89,00	2381,02	71,94	1858,81
92,86	2434,94	70,42	1796,29
99,44	2462,71	68,80	1727,33

Tabela 4.4 - Resultado de reatividade de veneno queimável para os diferentes estados críticos para o veneno queimável com 5 varetas no centro do reator.

Diferença de reatividade de BC1 (pcm)	Diferença de reatividade de BC2 (pcm)	Reatividade do veneno queimável (pcm)
-94,91	1768,02	1673,11
-92,53	1774,01	1681,48
-87,56	1771,45	1683,89
-72,28	1770,09	1697,81
-66,73	1761,18	1694,45
-47,71	1755,35	1707,64
-43,56	1752,32	1708,76
-39,03	1752,12	1713,09
-17,28	1753,30	1736,02
-37,94	1751,54	1713,60
-91,86	1754,74	1662,88
-37,94	1754,59	1716,65
-73,73	1726,37	1652,64
Valor médio de reatividade das 5 varetas de VQ		1696 ± 23 pcm
Reatividade de uma vareta		339 ± 5 pcm

Tabela 4.5 – Conjunto de diferentes estados críticos com as posições de barras e as respectivas reatividades integrais para a configuração C3

Posição crítica BC1 (% retirada)	Reatividade integral de BC1 (pcm)	Posição crítica BC2 (% retirada)	Reatividade integral de BC2 (pcm)
72,03	1890,8	94,01	2454,04
73,16	1925,93	89,61	2379,76
74,44	1967,75	85,84	2279,16
75,79	2017,92	82,90	2217,26
77,22	2066,43	80,10	2142,97
78,81	2114,94	77,54	2031,54
80,64	2165,11	75,10	1969,64
82,50	2235,36	72,96	1869,04
84,52	2277,18	70,89	1794,76
87,22	2332,38	68,82	1745,23
89,90	2387,22	67,02	1658,57
94,23	2459,32	64,84	1584,28
99,44	2527,21	63,21	1482,54

Tabela 4.6 - Resultado de reatividade de veneno queimável para os diferentes estados críticos para o veneno queimável com 9 varetas junto à barra de controle BC2.

Diferença de reatividade de BC1 (pcm)	Diferença de reatividade de BC2 (pcm)	Reatividade do veneno queimável (pcm)
-13,38	1777,30	1763,92
-6,69	1756,87	1750,18
-16,05	1706,43	1690,80
-6,69	1699,41	1692,72
-13,38	1677,29	1663,91
-8,36	1622,12	1613,76
-13,39	1616,83	1603,44
0,00	1577,83	1577,83
0,00	1565,51	1565,51
-28,43	1577,69	1549,26
-85,66	1554,50	1468,84
-13,56	1542,58	1529,02
-9,23	1481,58	1472,35
Valor médio de reatividade das 9 varetas de VQ		1610 ± 92 pcm
Reatividade de uma vareta		179 ± 11 pcm

Tabela 4.7 – Reatividade do veneno queimável para as situações longe e próximo da barra de controle BC2.

Caso	Número de varetas de VQ	Reatividade (pcm)	Reatividade por vareta de VQ (pcm)
Longe da barra de controle BC2 – no centro do reator	5	1696 ± 23	339 ± 5
Próximo à barra de controle BC2	9	1610 ± 92	179 ± 10

4.4. Medida do coeficiente de reatividade isotérmico com veneno queimável

O coeficiente de reatividade de temperatura foi medido para as configurações C1, sem veneno queimável e C2 e C3, com veneno queimável. A temperatura do moderador do reator IPEN/MB-01 foi variada entre 20 e 50 °C e monitorada por 3 termopares distribuídos conforme a Figura 4.16. As medidas das temperaturas dos termopares são realizadas de forma contínua através do FLUKE, que se encontra conectado a um microcomputador que grava os resultados num arquivo externo, permitindo uma análise do comportamento da temperatura do núcleo ativo ao longo de todo o experimento. Este procedimento foi repetido até a temperatura do moderador atingir um valor em torno de 50 °C.

A posição das barras de controle é monitorada pela mesa de controle do reator e transmitida para outro computador.

Como o objetivo deste experimento é o de obter dados comparativos entre os coeficientes isotérmicos medidos para o núcleo com e sem veneno queimável, apenas um conjunto de 3 termopares foi utilizado. O conjunto de três termopares foi calibrado para a faixa de temperatura normalmente utilizada no experimento de coeficiente isotérmico. As seguintes curvas de calibração foram obtidas para os termopares:

$$\text{Termopar [1]} \rightarrow T = -198,2535 + 99,76026 * X$$

$$\text{Termopar [2]} \rightarrow T = -199,25426 + 99,90187 * X$$

$$\text{Termopar [3]} \rightarrow T = -198,54942 + 99,87708 * X$$

onde T é a temperatura obtida em °C e X é a medida da corrente em mA obtida no sistema de aquisição de dados Fluke 2625A com 25 canais.

A Figura 4.16 também apresenta uma ilustração esquemática da montagem da instrumentação utilizada e do procedimento para obtenção dos resultados experimentais. A cada etapa de aquecimento esperava-se um tempo suficiente para que a temperatura se estabilizasse e homogeneizasse no tanque de moderador. A cada elevação de temperatura, o reator era mantido crítico por meio da movimentação da barra de controle que compensava a inserção negativa de reatividade devida ao aquecimento.

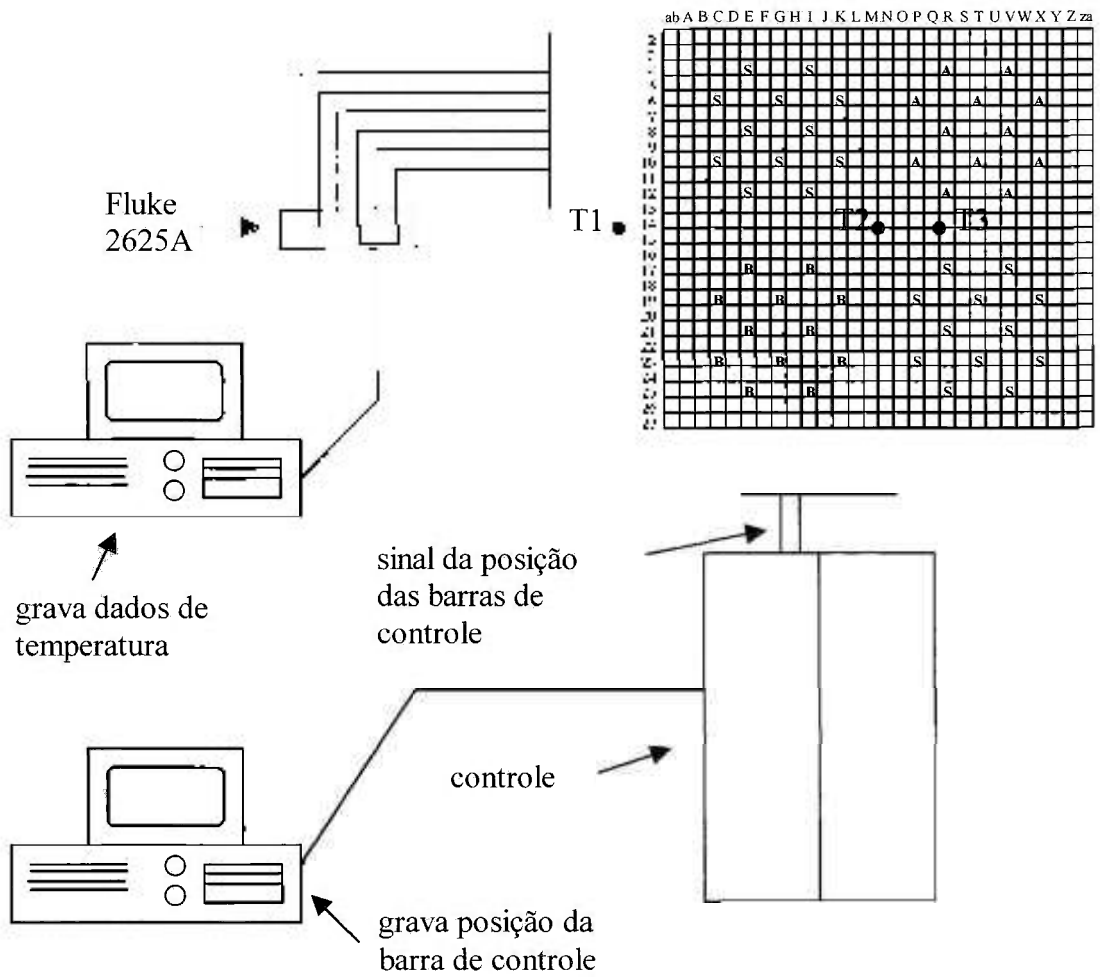


Figura 4.16 – Ilustração esquemática da instrumentação utilizada no experimento de coeficiente isotérmico.

A reatividade associada à movimentação das barras de controle foi obtida da curva de reatividade integral de barra para cada uma das configurações a 20°C, cujos resultados foram apresentados na Seção 4.2.

No início do experimento, os termopares T1, T2 e T3 indicavam as seguintes temperaturas do moderador: T1 = 24,4 °C, T2 = 24,52 °C e T3 = 23,07 °C. Um termopar de referência posicionado no tanque moderador indicava uma temperatura de 22 °C. Os 3 termopares foram inseridos na região do núcleo ativo, abaixo da placa matriz superior, conforme mostra a Figura 4.16, e mantendo as seguintes distâncias em relação à placa:

Termopar [1] = 960,0 mm,

Termopar [2] = 680,0 mm e

Termopar [3] = 410,0 mm.

A placa matriz do núcleo do reator IPEN/MB-01 possui 28 x 26 posições destinadas às varetas combustíveis, varetas de segurança e controle e outras posições entre os canais destinadas à inserção de tubos de alumínio (simulação de vazios), mini-camaras de fissão (mapeamento de fluxo), termopares, fios de ativação, etc. Os termopares foram montados e inseridos dentro de pequenos tubos de alumínio, utilizados normalmente no experimento para obtenção do coeficiente de vazio, e posteriormente inseridos no núcleo do reator.

Utilizando a mesma instrumentação do mapeamento de temperatura, tornou-se crítico o reator na potência de 1 W. A manutenção da criticalidade do reator foi realizada unicamente através da movimentação da barra de controle BC1 em controle automático, fixando-se a barra de controle BC2. A barra de controle BC1 é retirada de modo a compensar a diminuição de reatividade devido ao aquecimento da água do moderador, enquanto que a BC2 permanece fixa. A tomada de dados foi realizada através do seguinte procedimento:

- Banco de resistências ligado a 100 % da potência nominal durante 10 minutos;
- Espera para homogeneização da temperatura no núcleo ativo;
- Registro do posicionamento da barra de controle BC1;
- Início de um novo ciclo de aquecimento.

A Figura 4.17 mostra o comportamento do coeficiente de reatividade isotérmico em função da temperatura para as configurações C1, sem veneno queimável, C2 com 5 varetas de veneno queimável no centro do núcleo, e C3 com 9 varetas de veneno queimável próximas à barra BC2.

Os resultados mostram que o veneno queimável diminui o valor do coeficiente de reatividade isotérmico; e que a região onde o veneno está presente afeta o coeficiente, sendo este mais reduzido onde o veneno queimável é mais efetivo. A diminuição no coeficiente de reatividade isotérmico para o núcleo com veneno queimável no centro é de aproximadamente 18,2 %; para o núcleo com o veneno queimável próximo à barra BC2, local menos importante neutronicamente, a diminuição no coeficiente é de cerca de 5,7 %.

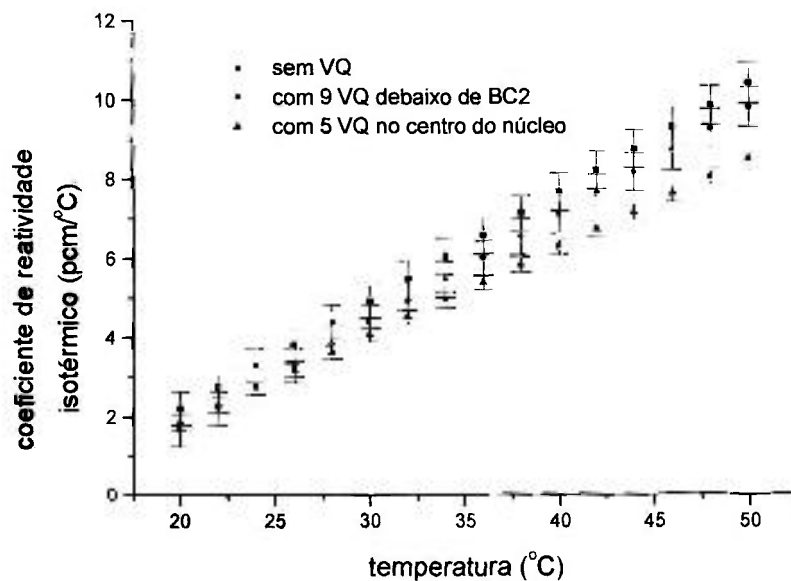


Figura 4.17 – Variação do coeficiente de temperatura isotérmico em função da temperatura para as configurações com e sem veneno queimável.

4.5. Medida do coeficiente de reatividade de vazio com veneno queimável

Em reatores de pesquisa como a unidade crítica IPEN/MB-01 a determinação do parâmetro coeficiente de reatividade de vazio, α_v , é realizada normalmente através da inserção de materiais que deslocam uma determinada quantidade de

moderador e que possuam baixa seção de choque de absorção para nêutrons térmicos. A condição do material possuir baixa seção de choque de absorção é importante, pois o material inserido deve influir somente na distribuição espacial de fluxo de nêutrons em consequência do deslocamento do meio moderador, isto é, os objetos ou materiais inseridos devem ser “transparentes” neutronicamente. Os materiais normalmente utilizados para a simulação de vazios são o alumínio e o polietileno de varias densidades.

O coeficiente de reatividade de vazio, α_v , é definido como a razão entre a variação de reatividade do núcleo, $\Delta\rho$, e a percentagem de volume vazio, ΔV_v , ou volume de vazio introduzido no núcleo do reator em relação ao volume total do núcleo.

O alumínio foi escolhido como material para representar o vazio por ter uma seção de choque de absorção de nêutrons térmicos pequena. Assim, a presença de varetas de alumínio acarreta variações de reatividade no núcleo somente em consequência do deslocamento da água moderadora, pois a seção de choque total do alumínio é desprezível.

Especificamente neste trabalho, para se determinar o coeficiente de reatividade de vazio introduziram-se no reator IPEN/MB-01 varetas de alumínio ocas, de diâmetro interno de 0,32 cm e diâmetro externo de 0,46 cm, com mostra a Figura 4.18.

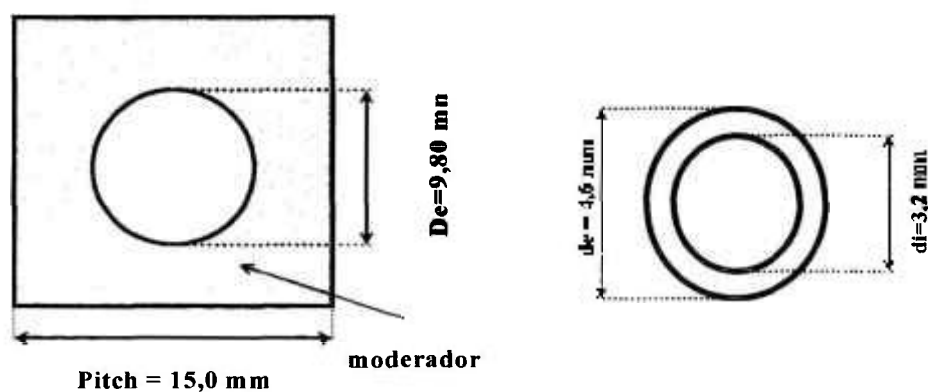


Figura 4.18 – Dimensões da célula unitária do reator IPEN/MB-01 e da vareta de alumínio, que define o volume de vazio introduzido no núcleo.

O reator IPEN/MB-01 possui pequenos furos na sua placa espaçadora que permitem a colocação destas varetas dentro do núcleo. Sendo as varetas de alumínio ocas e não tamponadas, ao serem colocadas dentro do núcleo, a parte interior de cada uma delas é preenchida por água. O volume deslocado por uma vareta de alumínio é aquele devido à sua espessura e à altura ativa do núcleo.

O volume de moderador deslocado por uma destas varetas de alumínio é de 4,683 cm³ e o volume do núcleo do reator IPEN/MB-01 é 82555,2 cm³.

As varetas de alumínio foram colocadas no centro do núcleo e próximas à barra de controle, conforme as configurações C4, C5 e C6 mostradas na Tabela 3.1. Como as varetas de vazios são posicionadas somente em uma região do núcleo, os resultados de coeficiente de reatividade de vazios são locais e não globais do reator. A Tabela 4.8 mostra os resultados de coeficiente de reatividade de vazios obtidos comparando as diferenças de posição crítica de barras de controle entre as configurações C4 e C2, C5 e C1 e C6 e C3. O coeficiente de reatividade de vazios, com vazios localizados próximos à barra de controle, diminuiu de 378 para 232 pcm / % vazios com a presença das varetas de veneno queimável, uma redução de 39 %. O coeficiente de reatividade de vazios no centro do reator é muito mais elevado devido ao maior valor do fluxo de nêutrons e da importância neutrônica desta região.

Tabela 4.8 – Coeficientes de reatividade de vazios localizado para três situações distintas

Configuração	Coeficiente de reatividade de vazios* (pcm / % vazios)
C5 x C1 - Vazios junto a BC2 sem VQ	378 ± 11
C6 x C3 - Vazios junto a BC2 com VQ	232 ± 7
C4 x C2 - Vazios no centro com VQ	578 ± 17

* Medido em relação ao volume do núcleo do reator

4.6. Medida de sombreamento de barras devido ao veneno queimável

As barras de controle têm a sua reatividade alterada devido à presença das varetas de veneno queimável nas proximidades. Conforme pode ser visto na Figura 3.8, na configuração C2 as varetas de veneno queimável estão localizadas no centro do núcleo e distantes das barras BC1 e BC2; na configuração C3, conforme mostra a Figura 3.9, as varetas de veneno queimável encontram-se entre as varetas absorvedoras da barra de controle BC2. Em C3, a presença de uma vareta de veneno queimável tende a baixar o fluxo de nêutrons ainda mais e diminuir a efetividade da barra de controle.

As alterações na curva diferencial de reatividade entre os casos sem veneno queimável, configuração C1, e com veneno queimável, configurações C2 e C3, permitem quantificar o sombreamento do veneno queimável sobre as barras de controle. O erro nas medidas de reatividade diferencial é de 2,5 %. A Figura 4.19 mostra a reatividade diferencial da barra BC1 para os núcleos com e sem veneno queimável.

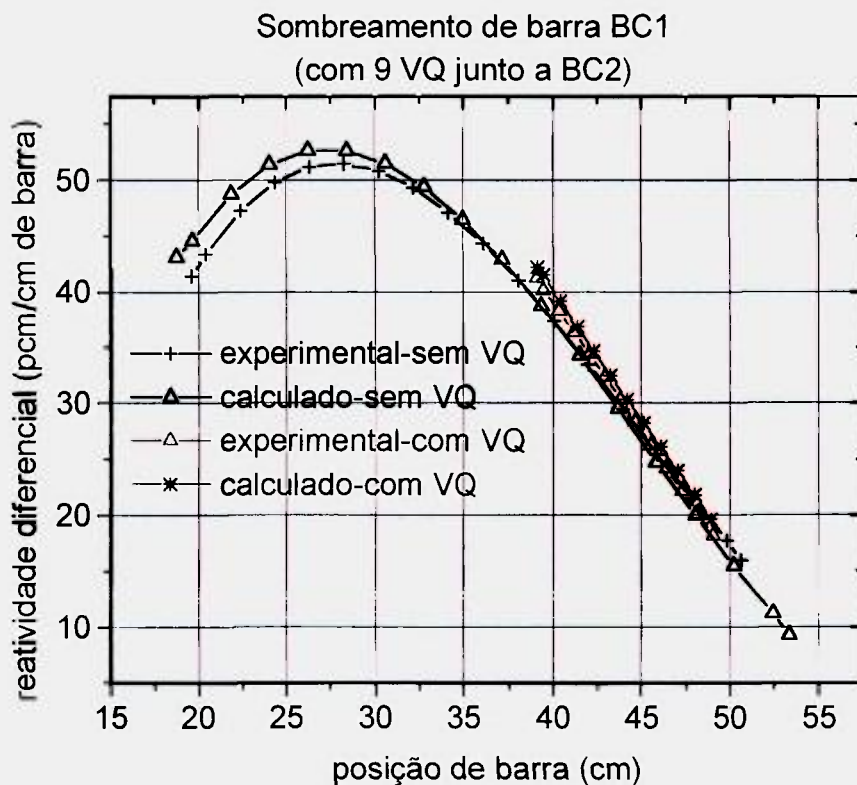


Figura 4.19 – Sombreamento na barra BC1 devido à presença de 9 varetas de veneno queimável sob a barra BC2.

A alteração que ocorre nas curvas é o sombreamento na barra BC1 devido à presença de 9 varetas de veneno queimável sob a barra BC2. A Figura 4.20 mostra os mesmos resultados para a barra BC2. Como esta está próxima ao veneno queimável, o sombreamento deste é bastante visível.

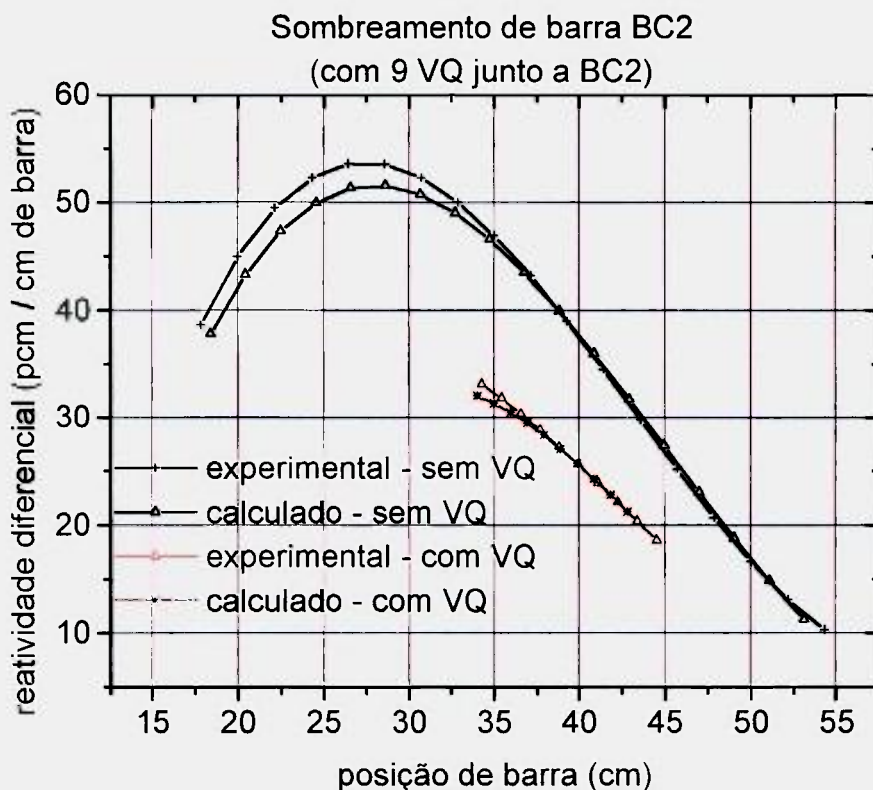


Figura 4.20 – Sombreamento na barra BC2 devido à presença de 9 varetas de veneno queimável sob a barra BC2.

As Figuras 4.21 e 4.22 mostram a reatividade diferencial das barras BC1 e BC2 para os casos sem e com veneno queimável no centro do núcleo. O sombreamento nestes casos é semelhante e menor que no caso mostrada na Figura 4.20.

Na Figura 4.19, nota-se que a reatividade diferencial da barra de controle BC1 é aproximadamente 1 % superior quando há a presença do veneno queimável. Estes resultados mostram que devido às varetas de veneno queimável estarem longe da barra BC1 ela é pouco influenciada. Na Figura 4.20, nota-se uma forte diminuição na reatividade diferencial da barra de controle BC2 devido à proximidade das nove varetas de veneno queimável. Para a posição 35 cm a diminuição é de cerca de 29 % enquanto que para a posição 50 cm a diminuição é de cerca de 37 %. Nas Figuras 4.21 e 4.22 vê-se que o sombreamento diminui a efetividade das barras de controle BC1 e BC2 de maneira semelhante e em torno de 11 %.

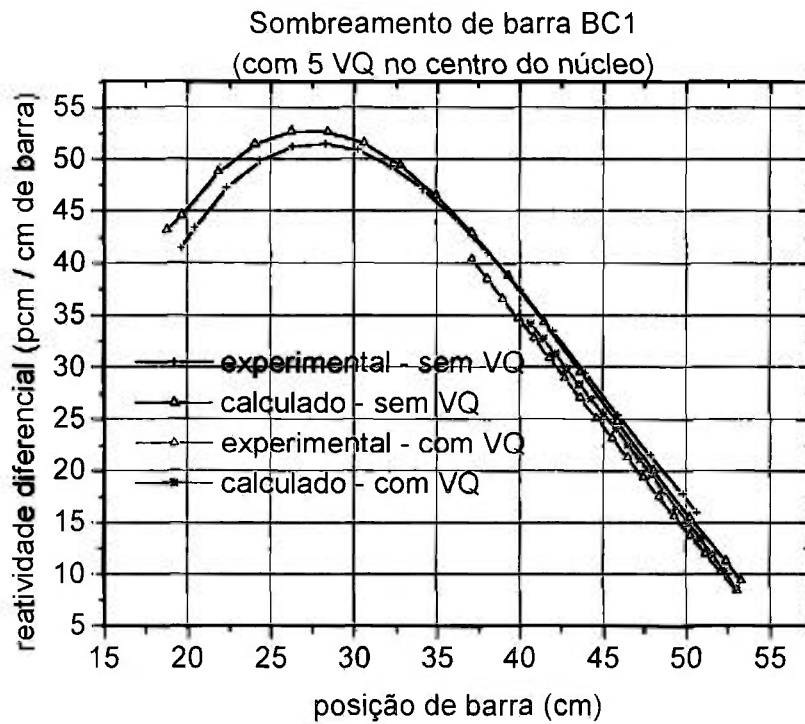


Figura 4.21 – Sombreamento na barra BC1 devido à presença de 5 varetas de veneno queimável no centro do núcleo.

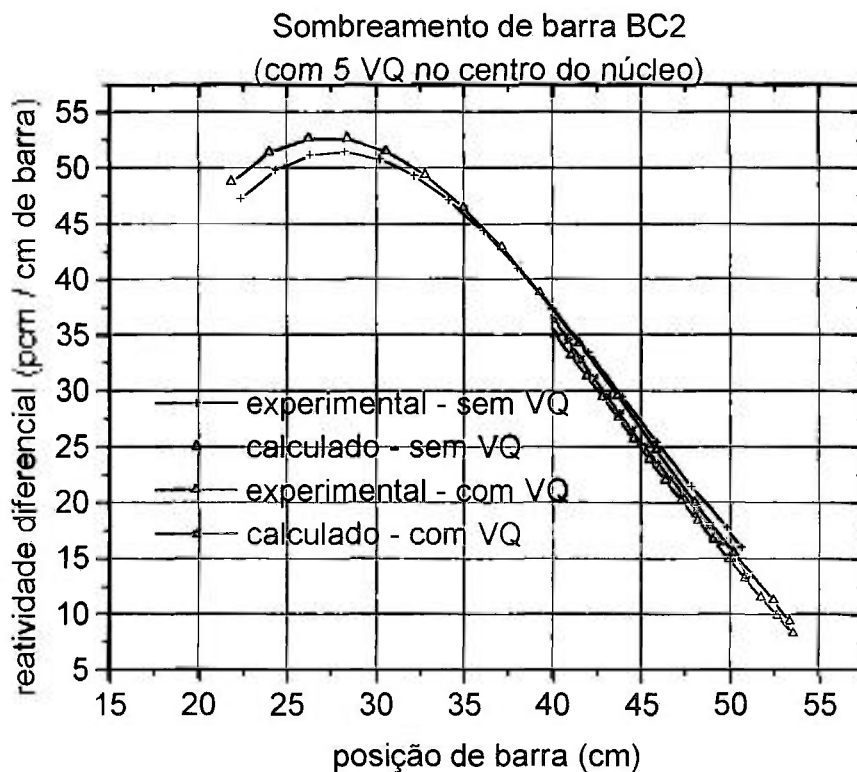


Figura 4.22 – Sombreamento na barra BC1 devido à presença de 5 varetas de veneno queimável no centro do núcleo.

Os resultados mostram que o sombreamento do veneno queimável localizado sob a barra de controle BC2 sobre a BC2 é substancial e varia entre 30 e 40 %. Para a barra de controle BC1, o pequeno aumento na efetividade da barra deve-se ao pequeno deslocamento do fluxo de nêutrons para este quadrante. Quando o veneno queimável se encontra no centro do núcleo, a alguns centímetros das barras de controle, o sombreamento é pequeno.

CAPÍTULO 5

COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MEDIDOS E CALCULADOS

O objetivo deste trabalho é obter parâmetros experimentais sobre veneno queimável de $B_4C-Al_2O_3$ para fins de projeto e para a qualificação da metodologia de cálculo de reatores baseada nos programas HAMMER/CITATION disponíveis no CTMSP e no IPEN. Este capítulo apresenta os resultados de comparações entre valores medidos e calculados com estes programas. Inicialmente, na Seção 5.1, é apresentada a modelagem utilizada com o programa CITATION, na Seção 5.2 são apresentados resultados de comparações entre a distribuição de taxa de reação no Au e de fluxo de nêutrons térmicos fornecido pelo programa CITATION para várias configurações do núcleo. Nas Seções 5.3, 5.4, e 5.5 são apresentados os resultados de interesse deste trabalho propriamente dito, isto é, a comparação de resultados de depressão de fluxo de nêutrons térmicos, reatividade e sombreamento devido à inserção de veneno queimável no núcleo. Não serão feitas, neste trabalho, comparações entre os coeficientes de reatividade calculados e medidos.

5.1. Modelagem com o CITATION

O código CITATION foi utilizado para simulação e obtenção de parâmetros tais como, valor das barras de controle, reatividade inserida pelo veneno queimável, reatividade do núcleo e cálculo do fluxo térmico. O código CITATION baseia-se no método numérico de diferenças finitas para solucionar a equação de difusão de nêutrons em geometria tri-dimensional. Na modelagem geométrica do reator as células combustíveis foram representadas pino a pino, com intervalos de “meshs” iguais à distância centro a centro entre as varetas (“pitch” = 1,5 cm). O tamanho do refletor lateral foi de 30 cm, com subdivisões de 12 intervalos (“meshs”).

Na região axial, foram consideradas as seguintes regiões:

- 1 - Refletor Axial Superior de 25 cm com 10 intervalos espaciais (“meshs”) fixos para todas as simulações;
- 2 - Refletor Axial Inferior de 20 cm com 8 intervalos espaciais (“meshs”) fixos para todas as simulações;

- 3 - Alumina do Extremo Superior de 5,4 cm, com 3 intervalos espaciais (“meshs”) fixos para todas as simulações;
- 4 - Alumina do Extremo Inferior de 9 cm com 4 intervalos espaciais (“meshs”) fixos para todas as simulações;
- 5 - Tampão da Barra de Controle de 2,5 cm com 2 intervalos espaciais (“meshs”) fixos para todas as simulações;
- 6 - Regiões com intervalos variáveis para Vareta de Controle, Combustível e Veneno Queimável, conforme a posição destes elementos na simulação, com intervalos espaciais (“meshs”) aproximados da ordem de 1,3 cm.

Todos os cálculos foram realizados utilizando seções de choque em 4 grupos de energia geradas com o programa HAMMER a partir da Ref. 1.

5.2. Comparação entre o cálculo de fluxo térmico e a medida de distribuição de taxa de reação no Au.

As Figuras 5.1 a 5.6 comparam as distribuições de fluxo de nêutrons térmicos calculadas com os programas HAMMER/CITATION e as distribuições de taxas de reação de nêutrons total no fio de Au sem cobertura de Cd. As comparações são feitas na linha que passa embaixo da barra de controle BC2 em duas alturas diferentes para as configurações C3 e C8. Na primeira altura, 15 cm, há a presença da barra de controle BC2 e na segunda altura, 32 cm, há a presença dos tubos guia da barra de controle. As medidas feitas na altura de 27,3 cm para as configurações C2 e C7 foram na linha que passa no centro do núcleo e corresponde à meia altura do núcleo ativo.

A Tabela 5.1 mostra os desvios médios relativos obtidos para as comparações mostradas nas Figuras 5.1 a 5.6. Os melhores resultados são para os casos longe da presença das varetas absorvedoras da barra de controle BC2, Figuras 5.5 e 5.6. A primeira razão dessas diferenças pode ser explicada pela comparação do fluxo de nêutrons térmicos com a taxa de reação total nos fios de Au. Nas partes do reator onde há absorvedores térmicos como varetas de Ag-In-Cd e buracos de água devido aos tubos guia, o fluxo de nêutrons térmicos deve ter maior queda e aumento, respectivamente, que o fluxo de nêutrons total (térmico + rápido). A melhor comparação neste caso entre taxa de reação total calculada e medida.

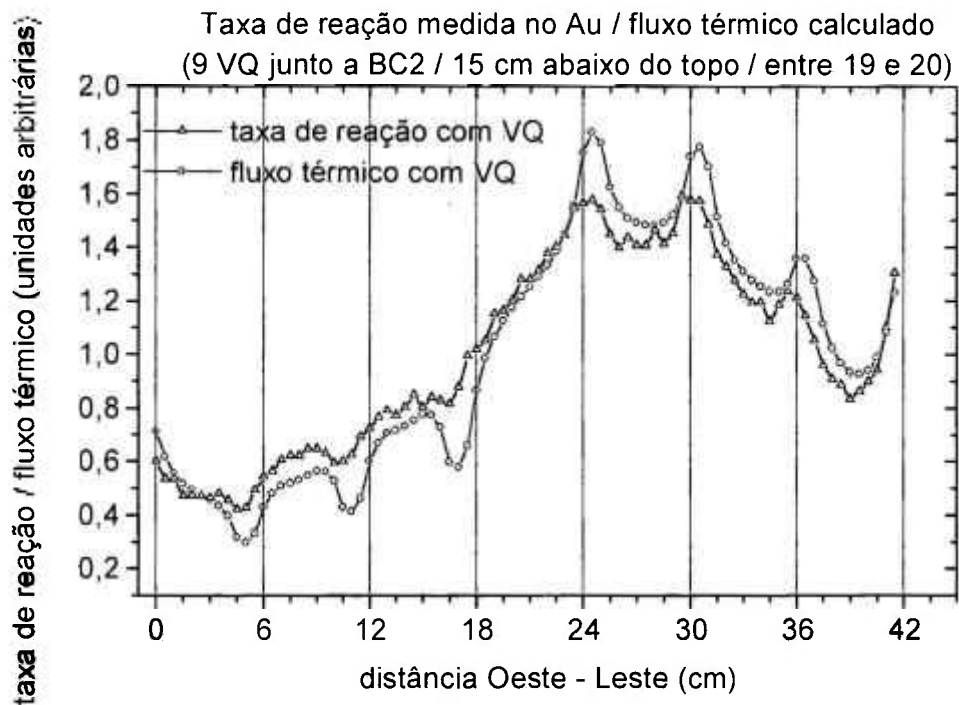


Figura 5.1 – Comparação entre a taxa de reação de nêutrons total medida no Au e o fluxo de nêutrons térmicos calculado, a 15 cm do topo do núcleo, para VQs junto da barra BC2.

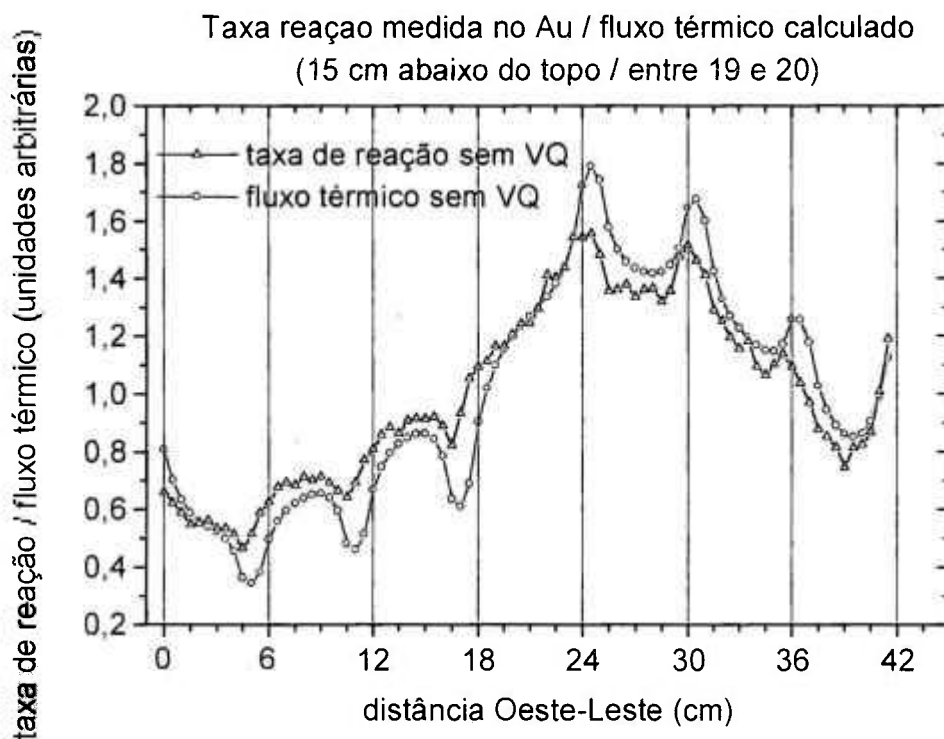


Figura 5.2 - Comparação entre a taxa de reação de nêutrons total medida no Au e o fluxo de nêutrons térmicos calculado, a 15 cm do topo do núcleo, sem a presença de VQs.

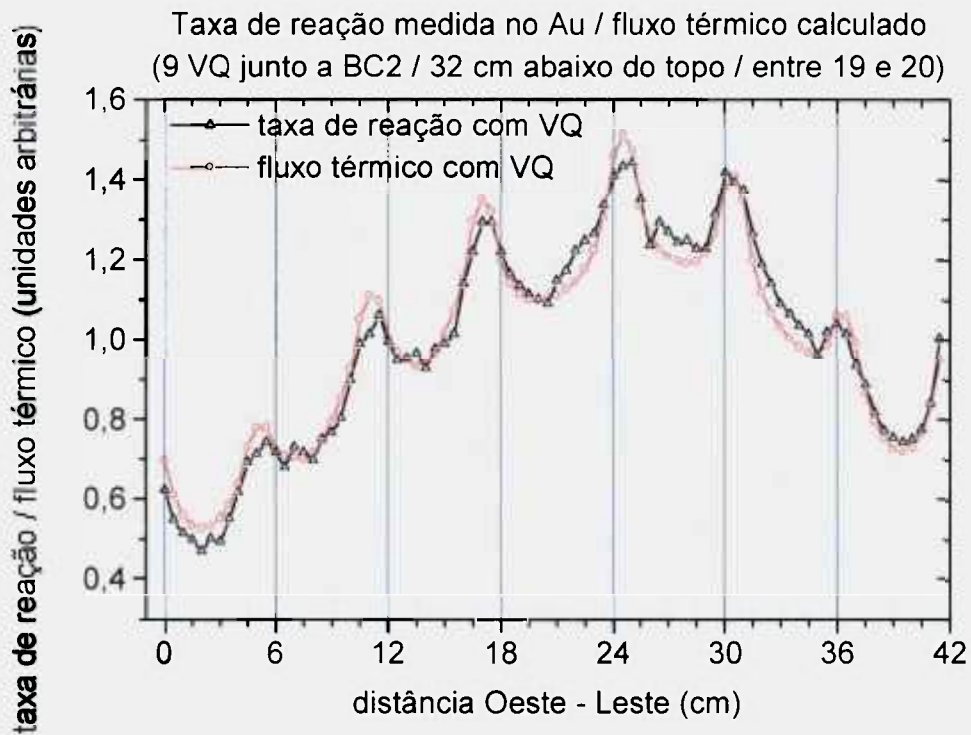


Figura 5.3 – Comparação entre a taxa de reação de nêutrons total medida no Au e o fluxo de nêutrons térmicos calculado, a 32 cm do topo do núcleo, para VQs junto da barra BC2.

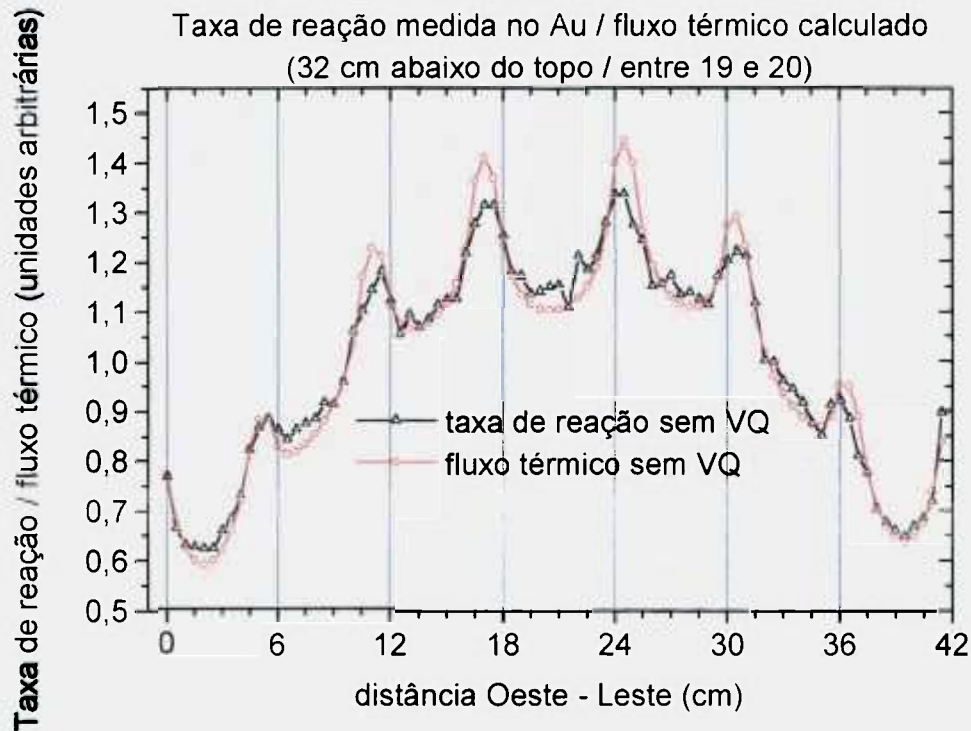


Figura 5.4 – Comparação entre a taxa de reação de nêutrons total medida no Au e o fluxo de nêutrons térmicos calculado, a 32 cm do topo do núcleo, sem a presença de VQs.

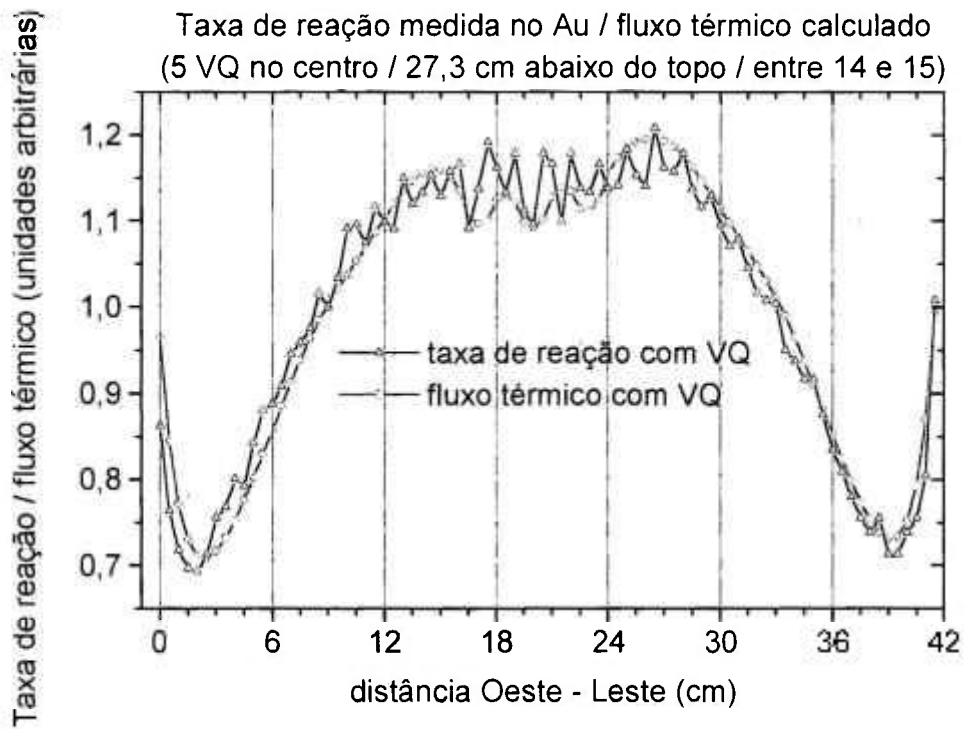


Figura 5.5 - Comparação entre a taxa de reação de nêutrons total medida no Au e o fluxo de nêutrons térmicos calculado, a 27,3 cm do topo do núcleo, para VQs no centro do núcleo.

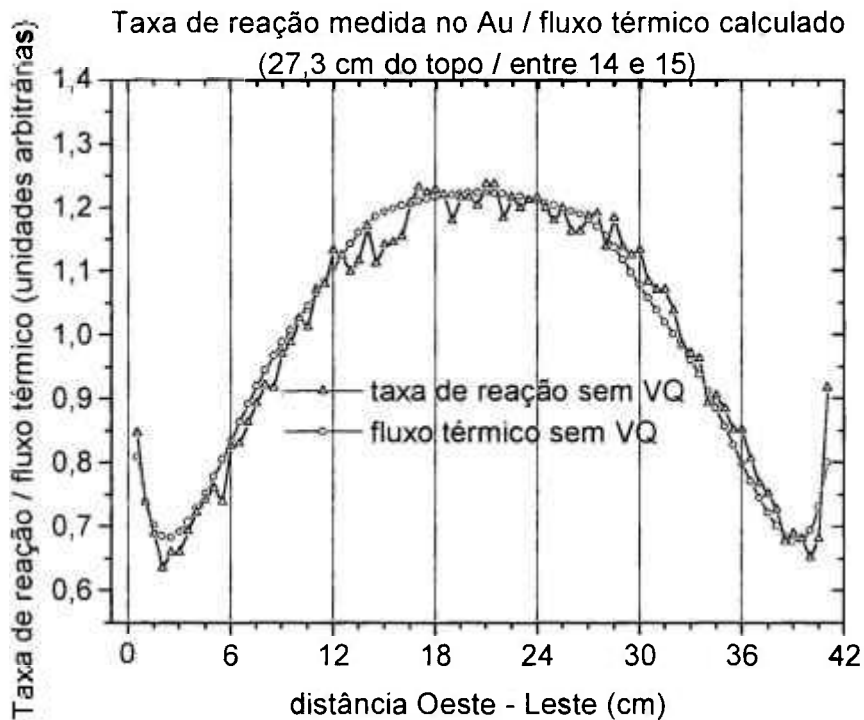


Figura 5.6 - Comparação entre a taxa de reação de nêutrons total medida no Au e o fluxo de nêutrons térmicos calculado, a 27,3 cm do topo do núcleo, sem a presença de VQs.

Outra razão provável é que as seções de choque da barra de controle estariam um pouco mais elevadas do que deveriam ser pois a distribuição calculada é inferior à distribuição medida na região da barra BC2. Entretanto, esta afirmação não se confirma quando se comparam os resultados de reatividade que são apresentados nas próximas seções. Assim, a primeira razão é a mais provável para explicar a diferença e será verificada com detalhe em trabalho futuro.

Tabela 5.1 – Desvios médios entre as distribuições de fluxo de nêutrons térmicos calculadas com os programas HAMMER/CITATION e as distribuições de taxas de reação de nêutrons no fio de Au.

Caso	Desvio Percentual Médio (%)
Config. C3 – 15,0 cm de altura – Fig. 5.1	12,0
Config. C8 – 15,0 cm de altura – Fig. 5.2	12,0
Config. C3 – 32,0 cm de altura – Fig. 5.3	4,2
Config. C8 – 32,0 cm de altura – Fig. 5.4	3,9
Config. C2 – 27,3 cm de altura – Fig. 5.5	3,4
Config. C7 – 27,3 cm de altura – Fig. 5.6	3,2

5.3. Comparação entre cálculo e medida de depressão de fluxo

As Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 mostram as distribuições de fluxo de nêutrons térmicos calculadas para as situações contendo e não contendo veneno queimável. A Tabela 5.2 mostra os resultados de depressão de fluxo térmico na região do veneno queimável para as várias regiões indicadas na Seção 4.1. Na Tabela 5.3 comparam-se os resultados de depressão da taxa de reação medidos da Tabela 4.1 com os resultados calculados de fluxo térmico da Tabela 5.2. Longe da barra BC2 a discrepância está em torno de +2 % e próximo a ela chega a -4,5 %. Como a comparação que se está fazendo é entre fluxo térmico calculado e taxa de reação no fio de Au medido, espera-se que as depressões calculadas sejam mais intensas que as medidas, pois o veneno queimável é predominantemente um absorvedor térmico. Entretanto, as comparações se apresentam diferentes, indicando direções para a melhoria da metodologia de cálculo. No cálculo, a vareta de veneno queimável sozinha não causa uma depressão no fluxo térmico tanto quanto o resultado medido indicando que sua seção de choque não é intensa o suficiente para tal. Entretanto, nas proximidades das varetas da barra de controle BC2, o resultado calculado produz uma depressão no fluxo térmico maior que o experimental. Isto indica que o efeito

conjugado da vareta de veneno queimável e vareta absorvedora da barra está mais intenso e, portanto, suas seções de choque devem estar maiores do que seria a correta. Colabora para esta conclusão o fato de que ao serem geradas as seções de choque da barra de controle e de veneno queimável utilizou-se a metodologia da supercélula considerando apenas combustível ao redor das varetas absorvedoras, seja da barra de controle ou do veneno queimável. Assim, as seções de choque de absorção para a vareta de veneno queimável longe da barra deveriam ser um pouco maiores e próximo à barra deveriam ser um pouco menores.

5.4. Comparação entre cálculo e medida de reatividade de veneno queimável

Várias situações foram consideradas nos cálculos com o CITATION para determinação da inserção de reatividade devida ao veneno queimável. A reatividade inserida foi calculada comparando-se o valor de k -efetivo para o núcleo sem e com veneno queimável, considerando-se as posições críticas das barras de controle obtidas nos experimentos para os vários casos.

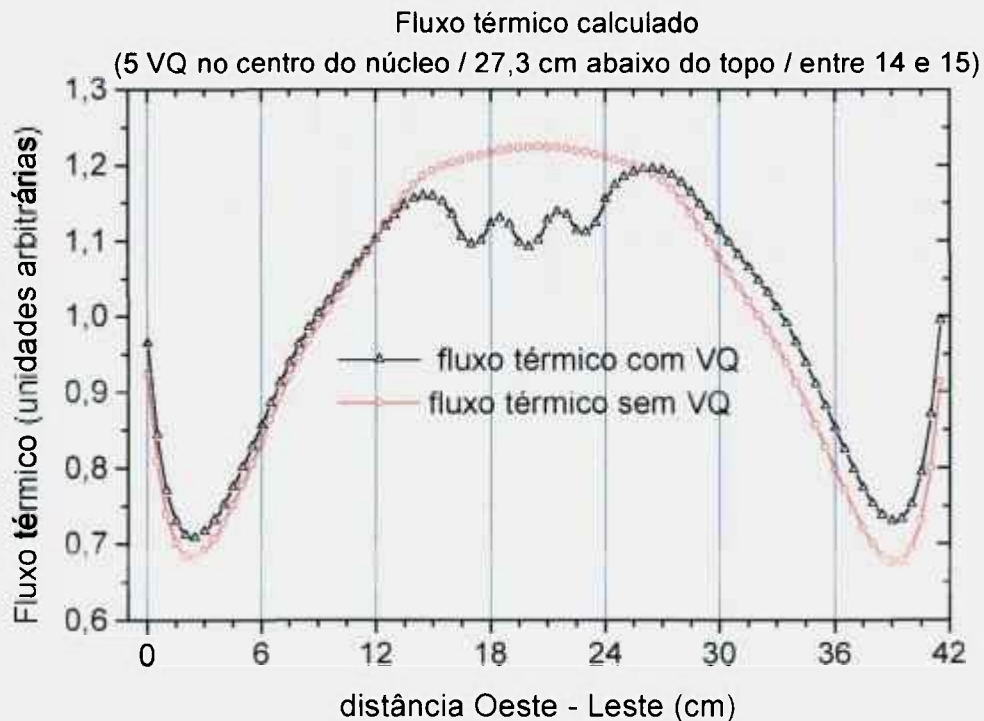


Figura 5.7 – Distribuições de fluxo térmico calculado mostrando a depressão causada pela presença de 5 varetas de veneno queimável no centro do núcleo.

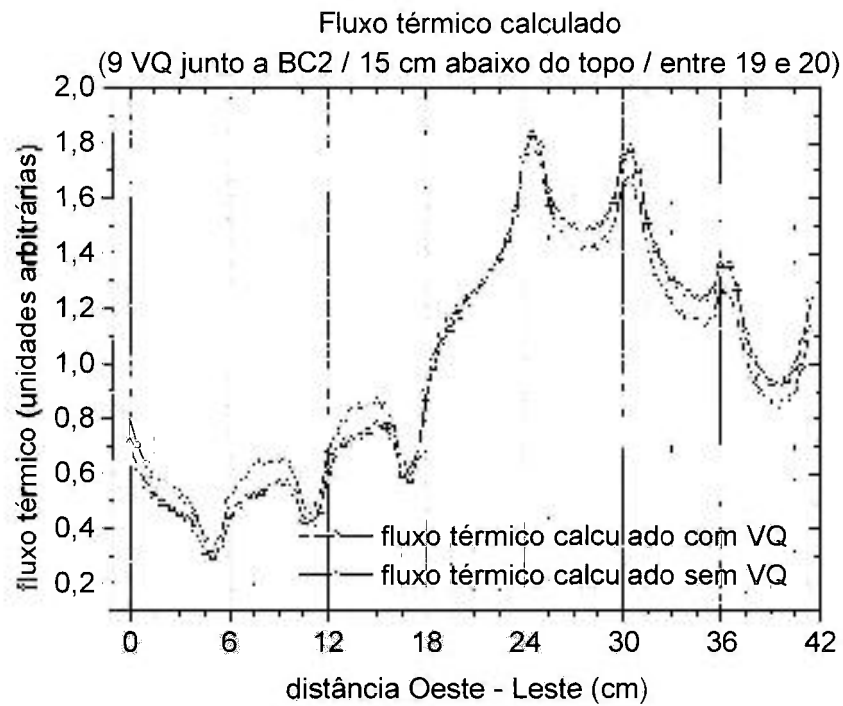


Figura 5.8 – Distribuições de fluxo térmico calculado mostrando a depressão causada pela presença de 9 varetas de veneno queimável sob a barra de controle BC2.

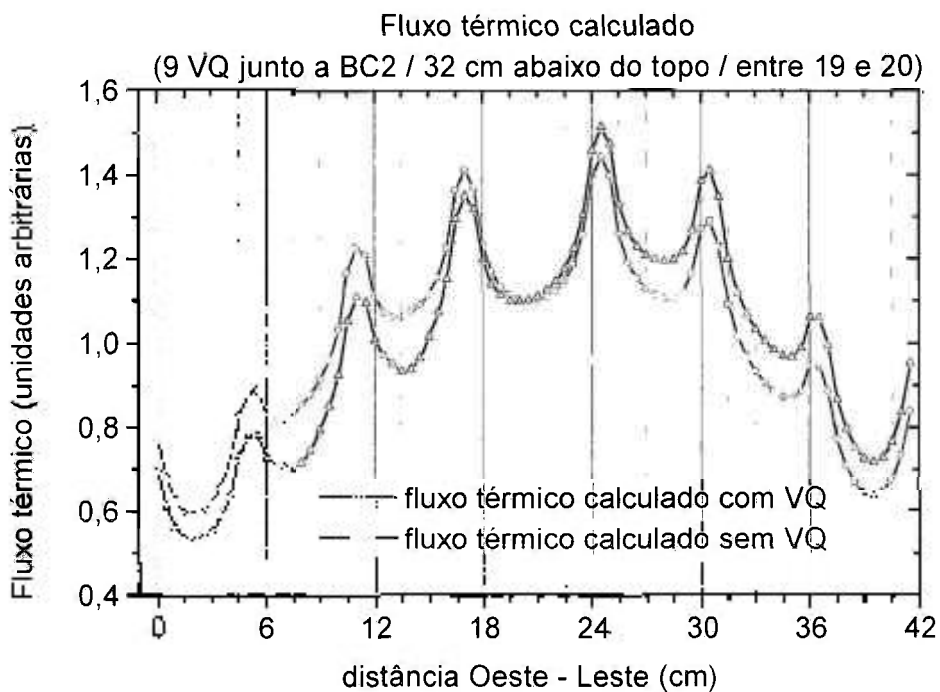


Figura 5.9 – Distribuições de fluxo térmico calculado mostrando a depressão causada pela presença de 9 varetas de veneno queimável sob a barra de controle BC2.

Tabela 5.2 – Fluxos neutrônicos térmicos médios nas imediações das varetas de veneno queimável e a estimativa da depressão do fluxo neutrônico térmico.

Região	Fluxo térmico médio(com VQ)	Fluxo térmico médio(sem VQ)	Depressão estimada no fluxo neutrônico térmico
Centro (entre 14 e 26 cm e altura de 27,3 cm)	1,21	1,14	0,94
Barra BC2 (entre 12 e 15 cm e altura de 15 cm)	0,71	0,62	0,87
Barra BC2 (entre 6.5 e 9.5 cm e altura de 15 cm)	0,62	0,53	0,85
Barra BC2 (entre 12 e 15 cm e altura de 32 cm)	1,08	0,99	0,91
Barra BC2 (entre 6.5 e 9.5 cm e altura de 32 cm)	0,87	0,75	0,86

Tabela 5.3 – Comparação da depressão entre taxa de reação e fluxo neutrônico térmico devido ao veneno queimável

Região	Valor medido da depressão na taxa de reação (tabela 4.1)	Valor calculado da depressão no fluxo térmico (tabela 5.2)	Discrepância (%)
Centro (entre 14 e 26 cm e altura de 27,3 cm)	0,96	0,94	-2,1
Barra BC2 (entre 12 e 15 cm e altura de 15 cm)	0,89	0,87	-2,3
Barra BC2 (entre 6.5 e 9.5 cm e altura de 15 cm)	0,89	0,85	-4,5
Barra BC2 (entre 12 e 15 cm e altura de 32 cm)	0,89	0,91	2,2
Barra BC2 (entre 6.5 e 9.5 cm e altura de 32 cm)	0,83	0,86	3,6

Tabela 5.4 – k-efetivo para diferentes situações do núcleo do reator.

Número	Estado do reator	k-efetivo	
0	Núcleo limpo – sem barra de controle	k0	1,0245917
1	Núcleo sem barra de controle e 9 VQ junto a BC2	k1	1,0085850
2	Núcleo sem barra de controle e 5 VQ no centro	k2	1,0086268
3	Núcleo com barra de controle BC1=BC2 em 59%	k3	1,0008560
4	Núcleo com barra de controle BC1=BC2 em 59%, e 5 VQ no centro	k4	0,9843354
5	Núcleo com barra de controle BC1=BC2 em 80%	k5	1,0172641
6	Núcleo com barra de controle BC1=BC2 em 79%	k6	1,0172641
7	Núcleo com barra de controle BC1=BC2 em 80%, e 5 VQ no centro	k7	1,0009542
8	Núcleo com barra de controle BC1=BC2 em 79% e 9 VQ junto a BC2.	k8	1,0004717
9	Núcleo com barra de controle BC1=BC2 em 59% e 9 VQ junto a BC2	k9	0,9859979

A Tabela 5.4 mostra os valores de k-efetivo calculados.

A reatividade introduzida devido a uma mudança entre dois estados é dada por

$$\Delta\rho = \frac{k_i - k_o}{k_i k_o} \times 10^5 \quad [pcm] \quad (5.1)$$

onde k_i e k_o são valores de k-efetivo para os respectivos estados. A Tabela 5.5 mostra a reatividade calculada para o caso das nove varetas embaixo da barra BC2 e das cinco varetas no centro do núcleo a partir de vários conjuntos de estados. O resultado relativo ao caso 1 dá a reatividade do veneno queimável embaixo da barra BC2, mas sem esta estar presente, pois a BC1 e BC2 estão fora do núcleo. Esta reatividade não inclui a interação das varetas de veneno queimável e as varetas absorvedoras da barra BC2. O caso 2 mostra o mesmo resultado obtido a partir das situações 3 e 6 que não têm o veneno queimável presente, mas têm as posições da barra BC2 em estado crítico para o núcleo sem veneno queimável (situação 3) e com veneno queimável (situação 6). A Tabela 5.6 compara os resultados medidos e calculados, este último tomado como a média dos resultados da Tabela 5.5, fornecendo valores muito próximos.

Tabela 5.5 - Estimativa da reatividade do veneno queimável de 5,01 mg/cm³

Caso	Cálculo de reatividade	Número varetas de VQ	$\Delta\rho$ total (pcm)	$\Delta\rho$ / vareta (pcm)
1	Varetas embaixo da barra BC2 $[(k_0-k_1)/(k_0*k_1)] \times 10^5$	9	1549	172
2	Varetas embaixo da barra BC2 $[(k_6-k_3)/(k_6*k_3)] \times 10^5$	9	1612	179
3	Varetas embaixo da barra BC2 $[(k_6-k_8)/(k_6*k_8)] \times 10^5$	9	1650	183
4	Varetas no centro do núcleo $[(k_3-k_9)/(k_3*k_9)] \times 10^5$	9	1506	167
5	Varetas no centro do núcleo $[(k_0-k_2)/(k_0*k_2)] \times 10^5$	5	1545	309
6	Varetas no centro do núcleo $[(k_5-k_3)/(k_5*k_3)] \times 10^5$	5	1612	322
7	Varetas no centro do núcleo $[(k_5-k_7)/(k_5*k_7)] \times 10^5$	5	1602	320
8	Varetas no centro do núcleo $[(k_4-k_3)/(k_4*k_3)] \times 10^5$	5	1677	335
9	Varetas no centro do núcleo $[(k_7-k_4)/(k_7*k_4)] \times 10^5$	5	1687	337

Tabela 5.6 – Comparação entre reatividade das varetas de veneno queimável calculada e medida.

Caso	Reatividade calculada por vareta de VQ (pcm)	Reatividade medida por vareta de VQ (pcm)	Discrepância (%)
9 varetas embaixo da barra BC2	175	179±11	-0,2
5 varetas no centro do núcleo	324	339±5	-4,4

Um comentário importante cabe quanto aos resultados medidos e calculados. Os resultados apresentados são uma média de vários estados do reator com diferentes

posições de barra BC1 e BC2. Na região com veneno queimável, temos então, influenciando os resultados de medida e de cálculo, toda a altura ativa do reator ora com barra de controle e veneno queimável juntos e ora com veneno queimável sozinho. Assim, efeitos da interação entre o veneno queimável e a barra de controle não podem ser inferidos.

5.5. Comparação entre cálculo e medida de sombreamento de barra

Os resultados calculados de sombreamento de barra devido à presença do veneno queimável encontram-se nas Figuras 4.19 a 4.22. Os resultados são quase coincidentes, como se vê nas figuras, sendo as discrepâncias menores que 1 %.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Santos, A. dos, Ferreira, C. R., Yamaguchi, M., **Seções de choque da barra de controle/segurança da UCRI – Avaliação da metodologia de cálculo**. Rel. Técnico CNEN-SP/COPEP, R410-50-0037-415, 1989.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou os resultados de experimentos realizados no reator IPEN/MB-01 sobre o veneno queimável de $B_4C-Al_2O_3$ com concentração de $5,01 \text{ mg/cm}^3$ de ^{10}B a ser utilizado na INAP.

Foi medido o impacto da presença do veneno queimável sobre vários parâmetros neutrônicos do núcleo. Os resultados obtidos para o caso de varetas de veneno queimável próximas às varetas absorvedoras de uma barra de controle (BC2) mostraram que ele altera de maneira sensível diversos parâmetros. Os principais resultados foram que o sombreamento da barra de controle é aproximadamente 30 %, o coeficiente de reatividade de vazio local diminui cerca de 39 %, o coeficiente de reatividade isotérmico diminui cerca de 5 % e a diminuição do fluxo de nêutrons térmicos é de aproximadamente 10 %.

Este impacto grande do veneno queimável no reator IPEN/MB-01 pode ser explicado pelas pequenas dimensões de seu núcleo. Para reatores maiores, em que o veneno queimável tenha uma presença relativa menor no núcleo, o impacto também deve ser menor.

As comparações entre os resultados calculados com os programas HAMMER/CITATION e medidos produziram resultados bastante próximos. Em relação à distribuição de taxa de reação em fios de Au e fluxo térmico, os melhores resultados são para os casos longe da presença das varetas absorvedoras da barra de controle BC2.

Em relação à depressão de fluxo térmico devido à presença do veneno queimável, longe da barra BC2 a discrepância está em torno de +2 % e próximo a ela chega a -4,5 %. Conclui-se que o efeito conjugado da vareta de veneno queimável e vareta absorvedora da barra está mais intenso e, portanto, suas seções de choque devem estar maiores do que seria a correta. Colabora para esta conclusão o fato de que ao serem geradas as seções de choque da barra de controle e de veneno queimável utilizou-se a metodologia da supercélula considerando apenas combustível ao redor das varetas absorvedoras. Para o caso da vareta de veneno

queimável longe da barra de controle, os resultados apontam para o sentido inverso. A seção de choque do veneno queimável estaria menos intensa que o valor real.

Os resultados calculados de reatividade das varetas de veneno queimável e de sombreamento concordaram com discrepâncias menores que 4,4 %. Estes resultados têm aplicação direta para o projeto da INAP, uma vez que este reator utiliza o veneno queimável de $B_4C-Al_2O_3$ para deprimir o fluxo de nêutrons térmicos na região central do núcleo e permitir um primeiro ciclo de 3,2 anos. A discrepância de 4,5 % entre cálculo e medida, obtida nos experimentos, viabiliza o projeto da INAP, onde se considerou uma discrepância máxima de 10 % para cálculo da distribuição de densidade de potência.

Como continuação deste trabalho, o programa experimental da INAP no reator IPEN/MB-01 considerará: 1) comparação dos resultados de taxa de reação medida com taxa de reação calculada com o sistema AMPX-TORT; 2) repetição das medidas para concentrações de veneno queimável de 2,54; 7,40; 10,30 e 11,2 mg/cm^3 e 3) repetição das medidas com veneno queimável de urânio-gadolíneo.

APÊNDICE A

ESPECIFICAÇÕES ADOTADAS NO DESENVOLVIMENTO E FABRICAÇÃO DAS PASTILHAS DE VENENO QUEIMÁVEL

Foram consideradas três especificações na fabricação das pastilhas sinterizadas de Alumina (Al_2O_3) e Carbetto de Boro (B_4C) [1,2,3,4]. Adicionalmente às especificações técnicas descritas anteriormente, a Divisão de Física de Reatores Nucleares, pertencente ao Departamento de Tecnologia de Reatores Nucleares, enviou ao Laboratório de Absorvedores e Cerâmicas Especiais, pertencente à Divisão de Materiais Nucleares, a Comunicação Interna nº 37 em 21 de outubro de 1997 que definiu a especificação das pastilhas de veneno queimável para experimentos no reator IPEN/MB-01.

Deve ser ressaltado que os dados técnicos constantes da comunicação interna prevaleceram sobre os dados constantes das especificações nos casos de conflitos de dados, devido ao fato desta última representar as características necessárias para experimentos de irradiação no Reator Nuclear Experimental IPEN/MB-01, que tem requisitos mais brandos que para reatores nucleares de potência. A Tabela A.1 apresenta o resumo dos dados neutrônicos das pastilhas, constantes da CI nº 37 de 21/10/97, utilizados no desenvolvimento e na fabricação das pastilhas de veneno queimável. A Tabela A.2 apresenta o resumo dos dados técnicos do pó de B_4C que nortearam a escolha da matéria prima mais adequada para o desenvolvimento é a fabricação das pastilhas de veneno queimável. A Tabela A.3 apresenta o resumo dos dados técnicos da pastilha de veneno queimável que nortearam o desenvolvimento e a fabricação das pastilhas de veneno queimável.

Durante a produção das pastilhas de veneno queimável de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$, foram realizados ensaios físicos para caracterizar as matérias primas e os produtos intermediários e final. Esta caracterização física objetivava a comparação de algumas características das matérias primas e produtos intermediários e final com as especificações técnicas de referência e objetivava, também, o controle do processo de fabricação das pastilhas. Os ensaios físicos foram realizados nas instalações do 1º Módulo do Laboratório de Materiais Nucleares (1ºB100), no Laboratório de Absorvedores e Cerâmicas Especiais (B110), ambos no CEA, e no Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM), do CTMSP-II em São Paulo. A Tabela A.4

apresenta os ensaios especificados, o número da especificação que determina a realização do ensaio e o local de realização do mesmo.

Tabela A.1 - Resumo dos dados que especificavam as pastilhas de $B_4C-Al_2O_3$ fabricadas no LABMAT.

Dados neutrônicos das pastilhas para o experimento de irradiação	Valores especificados	Referência
Densidade final das pastilhas	70% da Dens. Teórica	CI nº 37 de 21/10/97
Diâmetro final das pastilhas	$8,3 \pm 0,02$ mm	CI nº 37 de 21/10/97
Altura final das pastilhas	$10,5 \pm 0,2$ mm	CI nº 37 de 21/10/97
Concentrações de ^{10}B das pastilhas	8,7,6,4 e 2 mg/cm ³	CI nº 37 de 21/10/97
Quantidade de pastilhas por concentração de ^{10}B	500 pastilhas	CI nº 37 de 21/10/97

Tabela A.2 - Resumo dos dados técnicos do pó de B_4C .

Dados técnicos do pó de B_4C para a fabricação das pastilhas	Valores especificados	Referência
Densidade das partículas de B_4C	$\geq 2,39$ g/cm ³	R50-IPN-213PR-4EE-414
Teor de ^{10}B no pó de B_4C	$19,90 \pm 0,30$ %	R50-IPN-213PR-4EE-414
Requisitos químicos do pó de B_4C		R50-IPN-213PR-4EE-414
• Boro total	76,5 a 81,0 % em peso	
• HNO_3 Boro solúvel	0,5 máx.	
• Óxido de boro	0,2 máx.	
• Flúor	25 µg/g máx.	
• Cloro	75 µg/g máx.	
• Cálcio	0,3 % em peso máx.	
• Ferro	1,0 % em peso máx.	
• Boro total + carbono	98,0 % em peso mín.	

Tabela A.3 - Resumo dos dados técnicos da pastilha de veneno queimável.

Dados técnicos para a fabricação das pastilhas	Valores especificados	Referência
Requisitos químicos		R11.01-2133-EQ-30/1
C (livre)	1,0 % em peso	
Si	2,0 % em peso	
Fe+Cr+Ni	0,6 % em peso	
Mg	1,0 % em peso	
Na	0,2 % em peso	
Ca	0,3 % em peso	
Hf	200 µg/g de pastilha	
F	50 µg/g de pastilha	
F+Cl+I+Br	100 µg/g de pastilha	
Gd	100 µg/g de pastilha	
Sm	100 µg/g de pastilha	
Eu	100 µg/g de pastilha	
Dy	200 µg/g de pastilha	
Tamanho de grãos/poros na matriz de Al ₂ O ₃	1 a 30/1 a 10 µm	R11.01-2133-EQ-30/1
Tamanho de partícula do pó de B ₄ C	≤ 15 µm	R11.01-2133-EQ-30/1
Uniformidade de distribuição de B ₄ C na matriz	o máximo possível	R11.01-2133-EQ-30/1
Resistência à compressão axial	2 MPa	R11.01-2133-EQ-30/1
Integridade visual (lascas em cada extremidade)	5 mm ²	R11.01-2133-EQ-30/1
Integridade visual (lascas na lateral)	10 mm ²	R11.01-2133-EQ-30/1
Integridade visual (trincas superficiais)	5 mm	R11.01-2133-EQ-30/1
Limpeza	isento de materiais estranhos	R11.01-2133-EQ-30/1

Tabela A.4 – Ensaios realizados na matéria prima e no produto durante a fabricação das pastilhas de $Al_2O_3 - B_4C$.

Ensaios físicos	Especificação técnica	Local
Determinação da Distribuição Granulométrica do Pó de B_4C	R11.01-2133-EQ-30/1	1ºB100
Determinação da Distribuição Granulométrica do Pó de Al_2O_3	Controle de Processo	1ºB100
Determ. da Área de Superfície Espec. do Pó de Al_2O_3	Controle de Processo	1ºB100
Determ. da Área de Superfície Espec. do Pó de B_4C	Controle de Processo	1ºB100
Determ. da Morfologia das Partículas do Pó de Al_2O_3	Controle de Processo	1ºB100
Determ. da Morfologia das Partículas do Pó de B_4C	Controle de Processo	1ºB100
Determinação da Viscosidade das Barbotinas	Controle de Processo	B110
Determinação da Densidade das Barbotinas	Controle de Processo	B110
Teste de Compactabilidade dos Pós	Controle de Processo	B110
Determinação das Densidades a Verde das Pastilhas	Controle de Processo	B110
Teste de Dilatometria das Pastilhas de Veneno Queimável	Controle de Processo	1ºB100
Teste de Sinterabilidade das Pastilhas de Veneno Queimável	Controle de Processo	B110
Determ. da Densidade Sint. das Pastilhas de $Al_2O_3 - B_4C$	R11.01-2133-EQ-30/1	1ºB100
Determ. da Homogeneidade de B_4C nas Pastilhas Sinterizadas	R11.01-2133-EQ-30/1	LACAM 1ºB100
Controle Dimensional das Pastilhas de $Al_2O_3 - B_4C$	R11.01-2133-EQ-30/1	B110
Caracteriz. Ceramográfica das Pastilhas de $Al_2O_3 - B_4C$	R11.01-2133-EQ-30/1	1ºB100
Determ. da Morf. dos Poros e Tam. de Grão nas Past.	R11.01-2133-EQ-30/1	1ºB100

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Especificação das Pastilhas de Óxido de Alumínio com Carbeto de Boro ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$) das Varetas de Veneno Queimável**, documento nº R11.01-2133-EQ-30/.
2. **Especificação do Pó de Carbeto de Boro (B_4C) das Varetas Absorvedoras**, documento nº R50-IPN-213PR-4EE-414.
3. **Especificação das Pastilhas de Al_2O_3 da Vareta Combustível**, documento nº R11.01-2133-EQ-21/1.
4. Gomide, Ricardo - **Informações Pessoais** – CTMSP-CEA

APÊNDICE B

NÚCLEO DO REATOR IPEN/MB-01

O reator IPEN/MB-01 é um reator de pesquisa do tipo tanque, construído e projetado inteiramente no Brasil. Contém um núcleo de material fissil, onde a reação em cadeia é auto-sustentada e controlada à potência nominal máxima de 100 Watts.

É destinado ao estudo das características neutrônicas de núcleos moderados a água leve, tendo a flexibilidade necessária para testar diferentes configurações do núcleo. Seu objetivo é comprovar a validade do projeto neutrônico e garantir que o núcleo opere conforme suas especificações.

O núcleo configurado para este trabalho possui a forma de um paralelepípedo, com dimensões de 39 x 42 x 54,6 cm (parte ativa), sendo geometricamente dividido em quatro quadrantes, com elementos de controle e segurança colocados, respectivamente, em quadrantes diametralmente opostos. Este núcleo é constituído de 680 varetas combustíveis, independentes e idênticas em geometria e quantidade de material fissil e estrutural e 48 posições para varetas absorvedoras, formando um arranjo de 28 x 26.

As varetas combustíveis são constituídas de pastilhas de UO_2 sinterizadas, na forma cilíndrica, com enriquecimento de 4,3 % em ^{235}U , encapsuladas em tubo de aço inoxidável austenítico (ANSI 304 L). Internamente, para posicionamento da coluna de pastilhas, existem pastilhas de Al_2O_3 , um tubo espaçador e uma mola de fixação. As varetas são preenchidas internamente com gás hélio à pressão de 1,0 bar. O comprimento total das varetas é 119,4 cm e o espaçamento entre varetas é igual a 1,5 cm, de centro a centro.

As varetas dos elementos de controle possuem, como absorvedor, uma liga de 80 % Ag – 15 % In – 5 % Cd, encapsulada num revestimento de aço inoxidável austenítico. As varetas dos elementos de segurança são geometricamente idênticas às do elemento de controle, à exceção do absorvedor, que é carbeto de boro (B_4C) na forma de pó compactado, não havendo enriquecimento em ^{10}B . Cada elemento de controle / segurança é constituído por um conjunto de 12 varetas absorvedoras, unidas através de um componente central comumente denominado “aranha”, fabricada em aço inoxidável ANSI 304. As varetas dos elementos de controle e segurança possuem comprimento igual a 127,9 cm.

O nível de potência do conjunto crítico é ajustado por meio da inserção ou retirada dos elementos de controle da região ativa do núcleo. Os elementos de segurança têm a função de garantir o desligamento do reator quando necessário. Os elementos de controle e segurança possuem características geométricas idênticas, diferindo somente quanto ao material absorvedor.

Essas varetas absorvedoras são guiadas para dentro do núcleo por tubos guia de aço inoxidável austenítico.

O núcleo, constituído pelas varetas combustíveis, está assentado numa estrutura composta basicamente por 3 placas de aço inoxidável que suporta as varetas e garante o espaçamento adequado entre elas: uma placa inferior, uma placa superior e a placa matriz intermediária.

Estas placas estão ligadas entre si pelos tubos guia das varetas absorvedoras e por colunas, formando um conjunto rígido de posicionamento do núcleo. A instrumentação de controle e operação do conjunto crítico é constituída por dois canais de partida, dois canais de potência, dois canais lineares, um canal de segurança de partida e três canais de segurança para a faixa de potência.

O projeto neutrônico estabelece uma configuração do núcleo que, juntamente com o projeto dos sistemas de reatividades, garantem a segurança adequada ao núcleo.

O tanque moderador é um cilindro metálico que contém a água de moderação e dentro do qual fica imerso o núcleo da Unidade Crítica, ou reator IPEN/MB-01.

Este tanque é aberto na parte superior para permitir a introdução dos elementos de controle e segurança e a instrumentação.

Na sua parte inferior, há orifícios para instalação das válvulas de drenagem do moderador e um orifício para passagem do tubo guia, por onde é introduzida a fonte de nêutrons, do tipo Amerício-Berílio (Am-Be), com intensidade de $2,5 \times 10^6$ nêutrons por segundo (n/s), necessária para fornecer sinais de referência para os detectores do sistema de instrumentação nuclear do reator durante a partida.

Ao redor do tanque moderador existe uma estrutura metálica que permite acesso ao topo do mesmo, bem como para o sistema de controle de reatividade e para a estrutura suporte do núcleo.

A verificação experimental dos parâmetros neutrônicos, realizada por medidas diretas no núcleo do reator, é a principal atividade executada na instalação.