

CONGRESSO
GERAL DE
ENERGIA NUCLEAR

24 A 29 DE ABRIL DE 1988

ANAIS - PROCEEDINGS

MEDIDAS E CÁLCULOS DE REATIVIDADE NO REATOR IEA-R1

por

P.S.B. Ferreira, J.R. Maiorino, M. Yamaguchi

Divisão de Física de Reatores
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Comissão Nacional de Energia Nuclear
São Paulo, SP

RESUMO

Neste trabalho são apresentados as medidas de parâmetros de reatividade, tais como valor diferencial e integral de barras de controle, coeficiente de vazio local e coeficiente de temperatura do moderador para o reator IEA-R1. Os valores medidos foram comparados com os calculados através dos códigos HAMMER-CITATION tendo apresentado uma boa concordância.

SUMMARY

This work shows a measurement of reactivity parameters, such as integral and differential control rod worth, local void coefficient, and moderator temperature coefficient for the research reactor IEA-R1. The measured values were compared with those calculated through HAMMER-CITATION codes, having shown good agreement.

1. INTRODUÇÃO

O IPEN-CNEN-SP está concluindo a instalação de um reator de potência zero (Unidade Crítica), tipo tanque, para avaliação de parâmetros neutrônicos de reatores moderados à água leve, e pretende em futuro próximo modificar a atual configuração do reator de pesquisa IEA-R1 com aumento de potência para 5MW, utilizando combustível com baixo enriquecimento (20% em U-235).

Em vista dos objetivos acima, é necessário o desenvolvimento de técnicas para a futura realização dos testes físicos de partida (1), e medidas de parâmetros neutrônicos e comparação com o projeto, tanto da Unidade Crítica, como da nova configuração do reator IEA-R1.

Dentro deste contexto, no presente trabalho são descritas as medidas de parâmetros de reatividade realizadas na atual configuração do reator IEA-R1, e a comparação dessas medidas com os valores calculados através dos códigos HAMMER-CITATION com o objetivo de avaliação das técnicas experimentais e dos métodos de cálculo. Os parâmetros medidos e calculados foram; os coeficientes de reatividade de temperatura e vazio, e valor diferencial e integral de barras de controle.

2. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Neste trabalho os seguintes parâmetros de reatividade foram medidos para a configuração 155 do IEA-R1 ilustrado na figura 1:

- i) valor diferencial e integral de barras de controle,
- ii) coeficiente de reatividade de temperatura do moderador e
- iii) coeficiente de reatividade de vazio local.

Para a determinação da reatividade diferencial, $\partial\rho/\partial z$, utilizou-se a técnica do período estável (2). Esta técnica é baseada no fato que a população de neutrons, ou a potência, evolui como uma exponencial pura, após uma inserção de reatividade, e após um tempo suficiente para que os termos transientes tenham desaparecido, ou seja :

$$n(t) \sim \exp(w_1 t), \quad (1)$$

onde w_1 é o inverso do período estável. Desta forma, retirando-se uma barra, de uma posição inicial Z_0 e potência inicial P_0 , até uma posição Z_1 e, esperando-se um tempo, Δt , de maneira que os termos transientes desapareçam. Mede-se então o tempo necessário para que a potência dobre (T) e, portanto, da eq. (1), tem-se:

$$w_1 = \ln 2/T, \quad (2)$$

e inserindo-se na equação "inhour"⁽³⁾, pode-se obter a reatividade introduzida devido a movimentação $\Delta Z = Z_1 - Z_0$, e consequentemente a reatividade diferencial, $(\partial\rho/\partial z)_{Z_0}$.

Nas medidas do valor diferencial de barras realizadas nesse trabalho, utilizou-se o seguinte procedimento experimental:

- i) criticalizar o reator a um nível de potência baixa (-100 watts);
- ii) inserir a barra a ser calibrada o máximo possível no núcleo, retirando-se as outras barras totalmente, de maneira a manter o reator crítico;

- iii) retirar, algumas posições, a barra a ser calibrada e, após um tempo de espera, da ordem de 50 seg, para que o reator atinja o período estável, cronometrar o tempo necessário para que a potência dobre. Anotar as posições iniciais e finais da barra, e o tempo de dobramento de fluxo;
- iv) inserir uma das barras, que inicialmente, está completamente retirada, para retornar o reator à criticalidade;
- v) repetir o procedimento, até a barra que está sendo calibrada seja totalmente retirada do núcleo.

Para a determinação experimental do coeficiente de reatividade de temperatura do moderador, $\alpha_M(T)$, variou-se a temperatura do moderador, em intervalos apropriados, e verificou-se a mudança da reatividade do sistema, devido a essa variação.

Devido a problemas de realimentação existentes, quando opera-se o reator IEA-R1 a potência nominal (2MW), decidiu-se primeiramente elevar-se a temperatura do moderador antes da realização do experimento começando este com uma temperatura do moderador próxima de 38°C e ir resfriando ao invés de aquecê-lo. Por outro lado, para evitar efeitos do Xenônio, o experimento foi iniciado cerca de 3 dias antes da aquisição de dados. Para tanto, inicialmente o reator foi operado a plena potência (2MW), com o circuito secundário desligado, aumentando-se gradativamente a temperatura da água do circuito primário (moderador), até que esta situasse ao redor de 38°C. A seguir, cobriu-se toda a superfície da piscina com uma lona plástica, para evitar evaporação da água, e perdas térmicas. O reator foi desligado e esperou-se cerca de dois dias, para possibilitar o decaimento do Xenônio, e então criticalizou-se o reator a baixos níveis de potências (~100 watts). Salienta-se que, devido a grande quantidade de água na piscina, o decréscimo de temperatura do moderador não foi grande neste intervalo de tempo. Quando a aquisição de dados foi iniciada a temperatura era de 35°C. Para variar a temperatura do moderador em intervalos de ~0,5°C, o circuito secundário era ativado. Com a diminuição da temperatura, o reator deixava a criticalidade, que era retornada com a inserção de uma barra de controle. Para cada aquisição de dados eram anotados as temperaturas do moderador e a nova posição da barra, sendo as temperaturas medidas com um termopar localizado no topo do núcleo, e a posição das barras fornecidas pela mesa de controle. Este procedimento foi repetido até a temperatura de 26°C, obtendo-se dessa forma uma variação total de 9°C. Com o conhecimento da posição da barra de controle e de sua curva de calibração, descrita anteriormente, é possível determinar a reatividade inserida por cada acréscimo de temperatura, e consequentemente determinar o coeficiente de temperatura.

Finalmente, o coeficiente de reatividade de vazio local, α_v , foi determinado experimentalmente através da inserção, com auxílio de um dispositivo adequado, de placas de alumínio entre as placas dos elementos combustíveis, (canais de refrigeração) deslocando o moderador dessas regiões e introduzindo vazios locais. Após a inserção do volume vazio, o reator é criticalizado, para então retirar-se este volume vagarosamente, para evitar a inserção de altas reatividades positivas, e induzir possível acionamento do mecanismo de desligamento do reator (SCRAM). Com a retirada do volume ocorre uma excursão de potência, e a reatividade introduzida no reator é medida através do reatímetro digital do IPEN-CNEN-SP (4) (009 - NC/1-IPEN).

3. MÉTODOS DE CÁLCULO

Para o cálculo dos parâmetros de reatividade determinados experimentalmente, utilizou-se os códigos HAMMER (5), HAMMER-TECHNION e CITATION (6,7). Os códigos HAMMER e HAMMER-TECHNION foram utilizados para a geração das seções de choque homogêneas, em dois grupos de energia, para cada região do reator IEA-R1, através dos modelos da célula unitária, e supercélula. O código CITATION foi utilizado para cálculos de difusão em três dimensões de maneira a simular os experimentos realizados.

As células unitárias para os elementos combustíveis enriquecidos a 93% e 20% (detalhe 1, figura 1), foram tipo placa, com a região do combustível (U_3O_8-Al , ou $U-Al_x$) envolta por uma região de Alumínio (encamisamento), moderador e uma região extra. Nas figuras 2a e 2b ilustram-se estas células.

A célula do elemento de irradiação (detalhe 3, figura 1) foi análoga a do elemento combustível padrão, com a diferença nas espessuras das várias regiões, em vista do número diferente de placas combustíveis (0,0252 cm para U_3O_8-Al , 0,051 cm para Al, 0,1445 cm para o moderador, e 0,0911 para a região extra). As células para o elemento refletor de grafita e para os elementos de irradiação vazados foram feitas envolvendo uma espessura pequena de combustível, com grafita (ou H_2O), Alumínio e Água.

Para a célula do elemento de controle utilizou-se o modelo da supercélula, envolvendo a célula unitária do absorvedor, por uma célula de combustível, com forme ilustrado na figura 2C. Além do mais, utilizou-se a equivalência das taxas de reação dada pela teoria de transporte (HAMMER) com a teoria de difusão (CITATION) (8).

Os cálculos do reator IEA-R1, utilizando o código CITATION, foram feitos em 3 dimensões, na geometria X-Y-Z e utilizando-se dois grupos de energia. O número de intervalos foram 11 em X, 23 em Y e 10 em Z. Em X-Y o reator foi modelado de acordo com a figura 1, incluindo-se uma camada de refletor de água ao redor do núcleo. Na direção axial o reator foi modelado conforme figura 3.

Para o cálculo dos valores diferenciais das barras de controle, modelou-se o reator com as barras nas posições críticas, a baixa potência, com um erro na previsão de criticalidade de 3% ($k_{eff} = 1.03508$). A partir daí, processou-se vários casos, onde subia-se a posição da barra, cuja reatividade está sendo calculada, em passos em torno de 10 passos e, corrigindo o posicionamento das outras barras para a posição crítica.

Na determinação do coeficiente de reatividade de temperatura do moderador, modelou-se inicialmente o reator com as barras nas posições de criticalidade e a temperatura do moderador a $27^{\circ}C$. A seguir, rodou-se em segundo caso com a temperatura do moderador a $36^{\circ}C$.

Para a determinação do coeficiente de reatividade de vazio, α_v , rodou-se um caso referência, com o reator crítico, e, em seguida, casos onde simulou-se a inserção de placas de alumínio nos elementos combustíveis 86,94,110 e 125 (ver figura 1). Os valores de reatividade, devido a inserção de volume vazio, nos elementos combustíveis mencionados acima, foram obtidos comparando os valores de K_{eff} em cada caso com o caso referência.

4. RESULTADOS

Na tabela 1 tem-se os valores experimentais e calculados, das reatividades diferenciais e integrais da barra de segurança BS2, localizada na posição 119 da placa matriz (conforme figura 1).

Nas tabelas 2 e 3 encontram-se os valores experimentais e previstos dos coeficientes de reatividade de temperatura do moderador e de vazio.

5. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Pela tabela 1 pode-se verificar que o valor total da barra BS2 experimental é de 3284 pcm e o valor previsto por cálculo de 2974 pcm, fornecendo um erro de 10%.

Os resultados para o coeficiente de temperatura do moderador, α_m , foram obtidos com uma variação de -9°C na temperatura do moderador, sendo o desvio encontrado do valor previsto por cálculo para o obtido experimentalmente de -7% .

Os valores previstos para os coeficientes de vazio locais também apresentaram resultados satisfatórios, com desvios de até no máximo 12%.

Observando-se os resultados acima e das tabelas 1, 2 e 3 apresentadas, os valores estimados de reatividade, tanto para calibração de barra (reatividade diferencial e integral), quanto para os coeficientes α_m e α_v , pelos códigos HAMMER e CITATION foram subestimados.

Os erros nas previsões dos parâmetros de reatividade são em consequência das incertezas no método de cálculo, mas principalmente devido as incertezas nos valores de queima dos elementos combustíveis que acarreta grandes erros quando da geração das secções de choque. Entretanto, os valores encontrados ainda são considerados aceitáveis no ponto de vista dos testes físicos de partida.

Em consequência desse fato, e sabendo-se da previsão da instalação de um novo núcleo, com apenas elementos combustíveis de baixo enriquecimento, no reator IEA-R1, é aconselhável que o histórico de operação e um acompanhamento experimental de queima deva ser realizado, com o objetivo de reduzir as incertezas nos cálculos computacionais, podendo-se dessa forma estimar com maior eficácia os parâmetros nucleares obtidos por experimentos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao grupo de operação do Reator IEA-R1 pela condução da operação na realização dos Experimentos. Um dos autores (P.S.B.F) agradece à FAPESP pela bolsa de estudo (85/1339-0) que possibilitou que o trabalho fosse realizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Initial Test Programs for Water-Cooled Nuclear Power Plants, 1978 (Regulatory Guide 1.68).
2. PROFIO, A.E. Experimental Reactor Physics, Wiley-Interscience Publications, 1976.
3. LAMARSH, J.R. Introduction to Nuclear Reactor Theory. Addison-Wesley Publishing Co., Massachusetts, 1966.
4. MOREIRA, J.M.L. Medidas de Reatividade em Tempo Real, Anais do 19 Congresso Brasileiro de Energia Nuclear (19 CGEN), Vol.2, pag. 47, Rio de Janeiro, Março 1986.
5. SUICH, J. & HONECK, H.C. The HAMMER System Heterogeneous Analysis by Multigroup Method of Exponentials and Reactor. Aiken S.C., Savannah River Laboratory, Jan. 1967 (DP. 1064).

TABELA 1 - VALOR DIFERENCIAL E INTEGRAL DA BS2. COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS EXPERIMENTAL E CALCULADOS.

Posição da Barra * (Passos)	Valor Diferencial (pcm/passos)		Valor Integral (pcm)	
	Experimental	Calculado	Experimental	Calculado
371	5,19	4,61	1039,4	1695,3
419	5,52	4,97	1296,9	1332,2
465	5,72	5,11	1553,2	1558,9
507	5,81	5,11	1795,6	1768,7
549	5,79	4,95	2039,3	1975,5
592	5,66	4,62	2285,8	2181,0
637	5,42	4,43	2538,2	2388,1
687	5,04	3,89	2797,5	2597,0
738	4,53	3,49	3041,9	2789,6
796	3,84	2,85	3284,9	2974,2

* A posição da barra é medida em passos, sendo que o comprimento total é dividido em 1000 passos com o zero na base do Núcleo, com a barra totalmente inserida e cada passo de 0,6 mm.

TABELA 2 - COEFICIENTE DE REATIVIDADE DE TEMPERATURA DO MODERADOR.

	EXPERIMENTAL	CALCULADO
ΔT ($^{\circ}C$)	$8,74 \pm 0,37$	9
$\Delta \rho$ (pcm)	$-111,5 \pm 15,2$	106,67
α_M (pcm/ $^{\circ}C$)	$-12,8 \pm 1,8$	-11,85

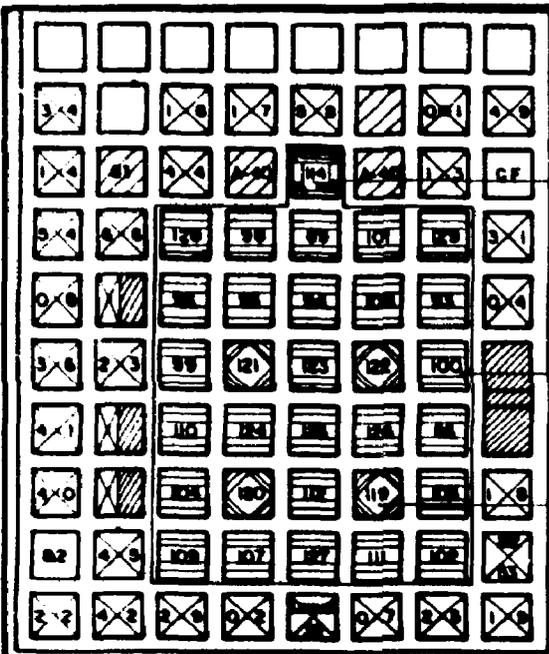
TABELA 3 - COEFICIENTE DE REATIVIDADE DE VAZIO LOCAL (α_V)*

EC	EXPERIMENTAL	CALCULADO
86	$(-4,3 \pm 0,6) \times 10^3$	$-4,03 \times 10^3$
94	$(-6,6 \pm 0,3) \times 10^3$	$-5,8 \times 10^3$
110	$(-3,9 \pm 0,4) \times 10^3$	$-3,7 \times 10^3$
125	$(-7,9 \pm 0,5) \times 10^3$	$-7,9 \times 10^3$

* O α_V é expresso em pcm por fração de vazio introduzido pelo alumínio, i.e.; pela razão do volume do Alumínio para o volume de todo o moderador da parte ativa do núcleo.

6. BARHEN, J.; ROTHENSTEIN, W & TAVIV, E. The HAMMER Code System, EPRI-NP-565, Project 709, 1978.
7. FOWLER, T.B.; VONDY, D.R. & CUNNINGHAN, G. W. Nuclear Reactor Core Analysis Code CITATION, Oak Ridge Tn., Oak Ridge National Lab., 1971 (ORNL-TN-2496-Rev.2).
8. KOSAKA, N. Estudo da Validação do Programa HAMMER-TECHNION para Barra de Controle do Reator Tipo PWR, Publicação IPEN, Sao Paulo, 1985 (IPEN-c5).

FIGURA 1 - MAPA DO NÚCLEO DO REATOR IEA - R1

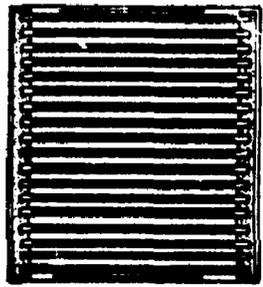


VEDE DETALHE 3

VEDE DETALHE 1

VEDE DETALHE 2

DETALHE 1
E.C. PADRÃO

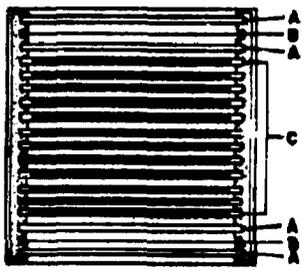


DADOS

PLACAS COMBUSTÍVEIS (TOTAL) - 10
 1) PARA EC. 93% ENRIQUECIDOS:
 FORMA QUÍMICA [COMBUSTÍVEL U₂A₃
 ENCAMBAMENTO A]
 ESPESURA DO CERNE — 0,3008 cm
 ESPESURA DA PLACA — 0,1824 cm
 ESPAÇAMENTO CENTRO À CENTRO — 0,4404 cm
 FRACÃO DE U — 89% EM PESO U₂₃₅
 MASSA DE U { U = 193g
 U = 180g

2) PARA EC. 80% ENRIQUECIDOS:
 FORMA QUÍMICA [COMBUSTÍVEL U₂A₃
 ENCAMBAMENTO A]
 ESPESURA DO CERNE — 0,310 cm
 ESPESURA DA PLACA — 0,2224 cm
 ESPAÇAMENTO CENTRO À CENTRO — 0,4404 cm
 FRACÃO DE U — 95% EM PESO U₂₃₅
 MASSA DE U { U = 190g
 U = 180g (22F)
 LARGURA ATIVA DA PLACA — 6,18 cm
 COMPRIMENTO ATIVO — 69,25 cm

DETALHE 2
E.C. CONTROLE

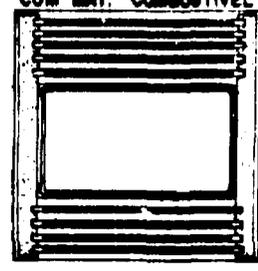


DADOS

REGIÃO C = IGUAIS AS DO EC. PADRÃO
 REGIÃO A = PLACA DE ALUMÍNIO -
 ESPESURA — 0,1824 cm
 REGIÃO B = BARRA DE CONTROLE
 FORMA QUÍMICA { A₃ — 80%
 I₂ — 15%
 Cd — 5%

PLACAS COMBUSTÍVEIS (TOTAL) - 12
 PLACAS DE ALUMÍNIO (TOTAL) - 4
 PLACAS ABSORVEDORAS (TOTAL) - 2

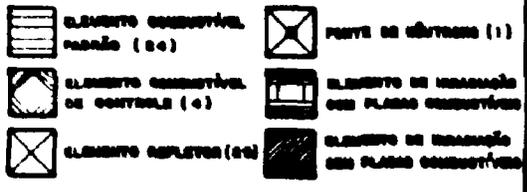
DETALHE 3
E.C. IRRADIAÇÃO
COM MAT. COMBUSTÍVEL



DADOS

PLACAS COMBUSTÍVEIS (TOTAL) - 9
 ENRIQUECIMENTO - 93%
 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS IGUAIS AO
 EC. PADRÃO

LEGENDA



IDENTIFICAÇÃO DE ENRIQUECIMENTO

ELEMENTO COMBUSTÍVEL	ENRIQUECIMENTO (%)
123	19.78
124	19.78
125	19.78
126	19.78
127	19.78
RESTANTES	88.00 - EUA

611

06f

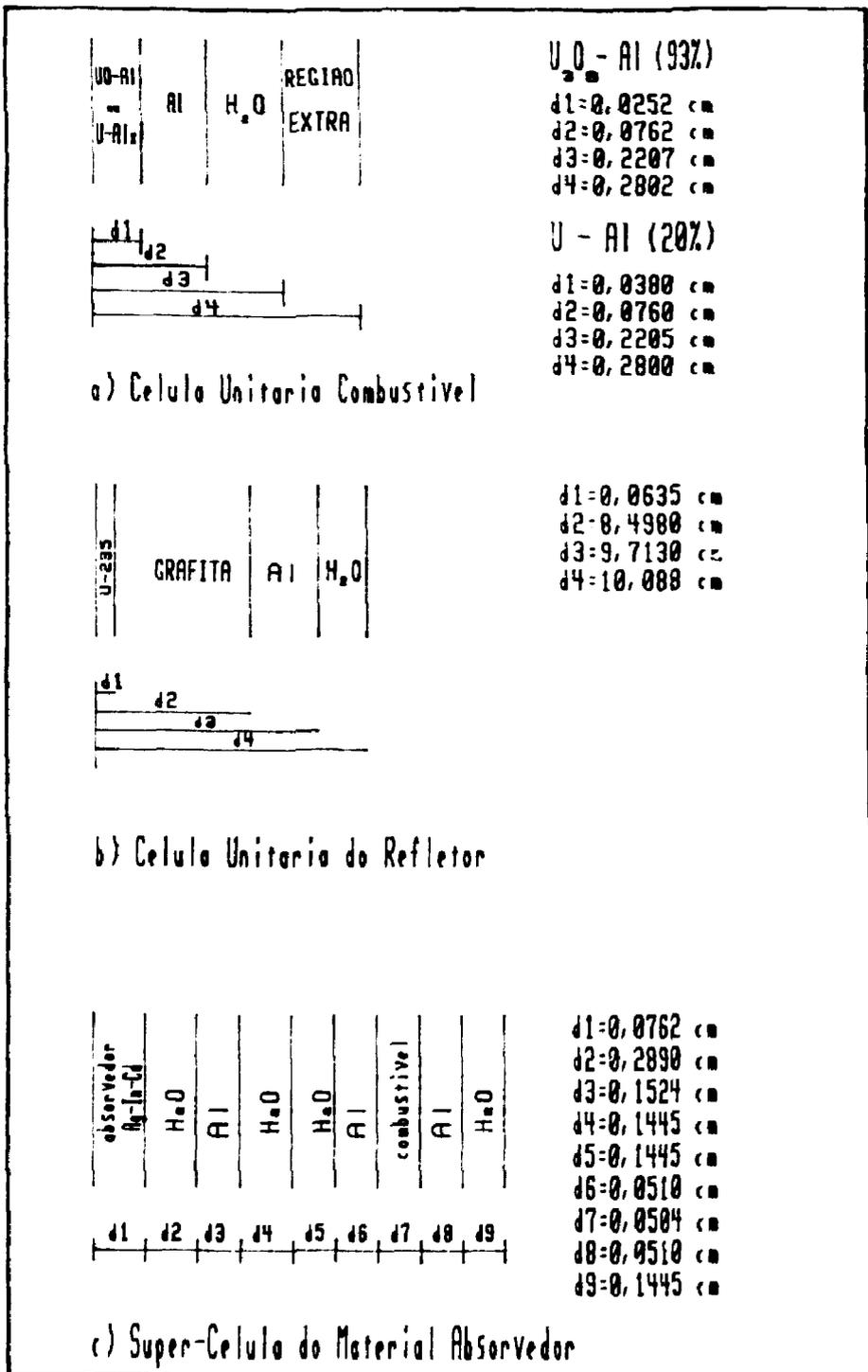


Figura 2: Celulas do Reator IEA - R1.

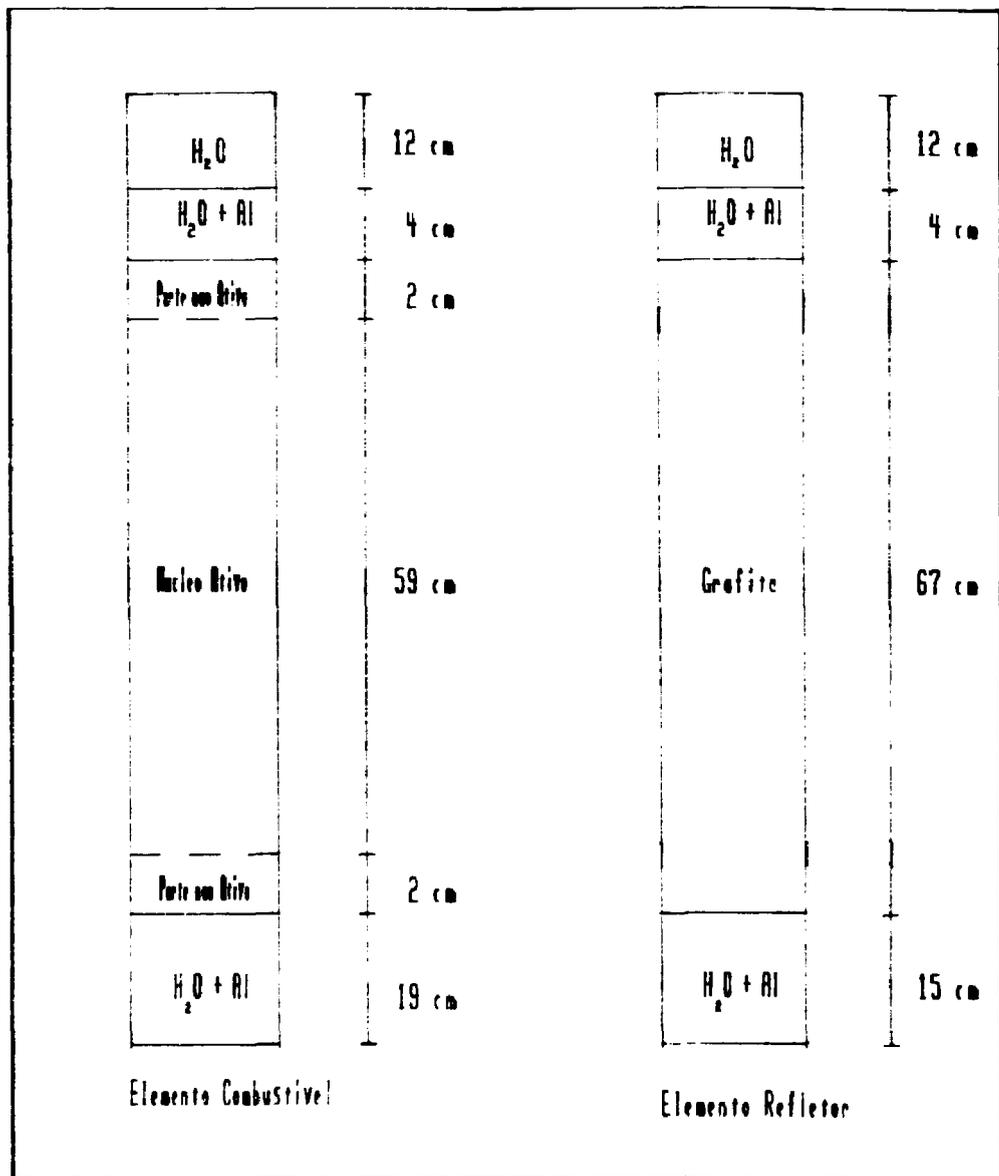


Figura 3: Modelagem Axial dos Elementos Combustíveis e Refletor (IEA-R1).