

ESTUDOS NEUTRÔNICOS VISANDO A
REDUÇÃO DE ENRIQUECIMENTO DO
REATOR DE PESQUISA IEA-R1.

por :

J. R. Maiorino; L.C.B. Fanaro;
L. A. Mai; P.S.B.Ferreira; J.G.M.Garone

Divisão de Física de Reatores(RTF)
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares(IPEN)
Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)
São Paulo, SP

RESUMO

Neste trabalho são descritos os códigos utilizados em cálculos de reatores tipo placa pela Divisão de Física de Reatores do IPEN-CNEN-SP, visando o reator de pesquisa IEA-R1. O problema padrão da IAEA para um reator tipo placa 10 MW com alto, médio e baixo enriquecimento, é solucionado através de três metodologias distintas em uso na RTF/IPEN - CNEN-SP (HAMMER & HAMMER-TECH-CITATION e LE04-2DB-UM), visando capacitação de cálculo para conversão de alto para baixo enriquecimento, dentro do contrato com a IAEA(BRA-4661). Finalmente, cálculos da atual configuração do reator IEA-R1 são comparados com medidas experimentais, com objetivo de validação da metodologia de cálculo.

1. INTRODUÇÃO (O REATOR IEA-R1)

O Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), tem operado um reator de pesquisa tipo piscina aberta, o IEA-R1, desde 1957, com uma potência nominal de 2MW utilizando combustível tipo placa com alto enriquecimento em U-235 (93%). Na figura 1, ilustra-se uma vista geral deste reator (1).

O Núcleo do reator tem a forma de um paralelepípedo e é composto por elementos combustíveis e refletores que são encaixados verticalmente em furos da placa matriz a qual é suspensa por uma estrutura de Alumínio no topo da piscina. Em média um carregamento normal comporta 30 elementos combustíveis formando um arranjo 6x5, sendo que dos 30 elementos, 4 são elementos especiais reservados para a inserção das barras de controle.

O elemento combustível é do tipo MTR (Material Testing Reactor), sendo composto de 18 placas planas paralelas montadas mecanicamente num estojo de alumínio. O elemento de controle, é formado por 12 placas combustíveis, ocupando a posição central do elemento, sendo as posições do estojo de Alumínio destinadas à 29 e 179 placas reservadas para a inserção de barras de controle/segurança (Ag-In-Cd), e as placas que antecedem e sucedem a barra absorvedora constituídas somente de alumínio. Além dos elementos combustíveis e de controle, o Núcleo do IEA-R1 possui 4 elementos de irradiação, dos quais 3 se localizam na região refletora e um interno ao Núcleo. O elemento de irradiação situado dentro do Núcleo é composto de 9 placas planas de combustível reunidas em grupos de 4 e 5, nas laterais do elemento e os outros elementos de irradiações são compostos de grafita e água. Na figura 2 ilustra-se as características do Núcleo do IEA-R1.

Atualmente (configuração 155), o IEA-R1 opera à 2MW, intermitentemente (8 hrs/dia; 5 dias/semana) utilizando-se 2 tipos de combustíveis: i) 20 elementos de fabricação americana com 93% de enriquecimento, com queimas apro-

ximadas de 38% em U-235, e ii) 5 elementos de fabricação NUKEN com 19,75% de enriquecimento, apresentando queimas da ordem de 27% em U-235.

Em vista da tendência mundial de produção de combustível com baixo enriquecimento em U-235, o IPEN-CNEN-SP iniciou um programa de estudos visando a médio prazo a conversão da utilização de combustível com alto enriquecimento para baixo enriquecimento. Além do mais, em vista da crescente demanda pela produção de radioisótopos no Brasil, e evitar a importação, o IPEN-CNEN-SP decidiu conjuntamente com os estudos de conversão de enriquecimento, iniciar os estudos para o aumento de potência para 5 MW, e mudança no ritmo de operação de intermitente para contínuo (3 semanas/mês; e 1 semana para operação a baixa potência e manutenção).

Para atingir estes objetivos, vários estudos foram iniciados: i) fabricação e irradiação de elementos combustíveis, ii) reformas no sistema de refrigeração e instalações em geral do reator, e iii) estudos neutrônicos e termohidráulico do Núcleo do reator. Com relação a fabricação e irradiação de elementos combustíveis, o Departamento de Metalurgia Nuclear do IPEN-CNEN-SP iniciou desde 1984 um programa de construção de elementos com 20% em U-235, para substituição dos combustíveis com alto enriquecimento. Este programa resultou na montagem em caráter experimental de dois elementos parciais, um com apenas 2 placas combustíveis nas posições externas do elemento, e outro com 10 placas, e as restantes de alumínio. Estes elementos combustíveis foram irradiados nas posições 128 e 129 (vide figura 2), e posteriormente inspecionados. Os resultados desses estudos irão fornecer os subsídios técnicos para a fabricação dos futuros combustíveis a 20% de enriquecimento que serão utilizados no IEA-R1.⁽²⁾ As reformas dos sistemas de refrigeração, já iniciaram-se e tendem a se completar ainda no início de 1988. Finalmente, os estudos neutrônicos e termohidráulicos serão descritos neste trabalho, principalmente as atividades que demonstram a capacidade de cálculo para o projeto de núcleos com baixo enriquecimento, que estão sendo desenvolvidas com o suporte da Agência Internacional de Energia Atômica. (Contrato F1-BRA-4661).

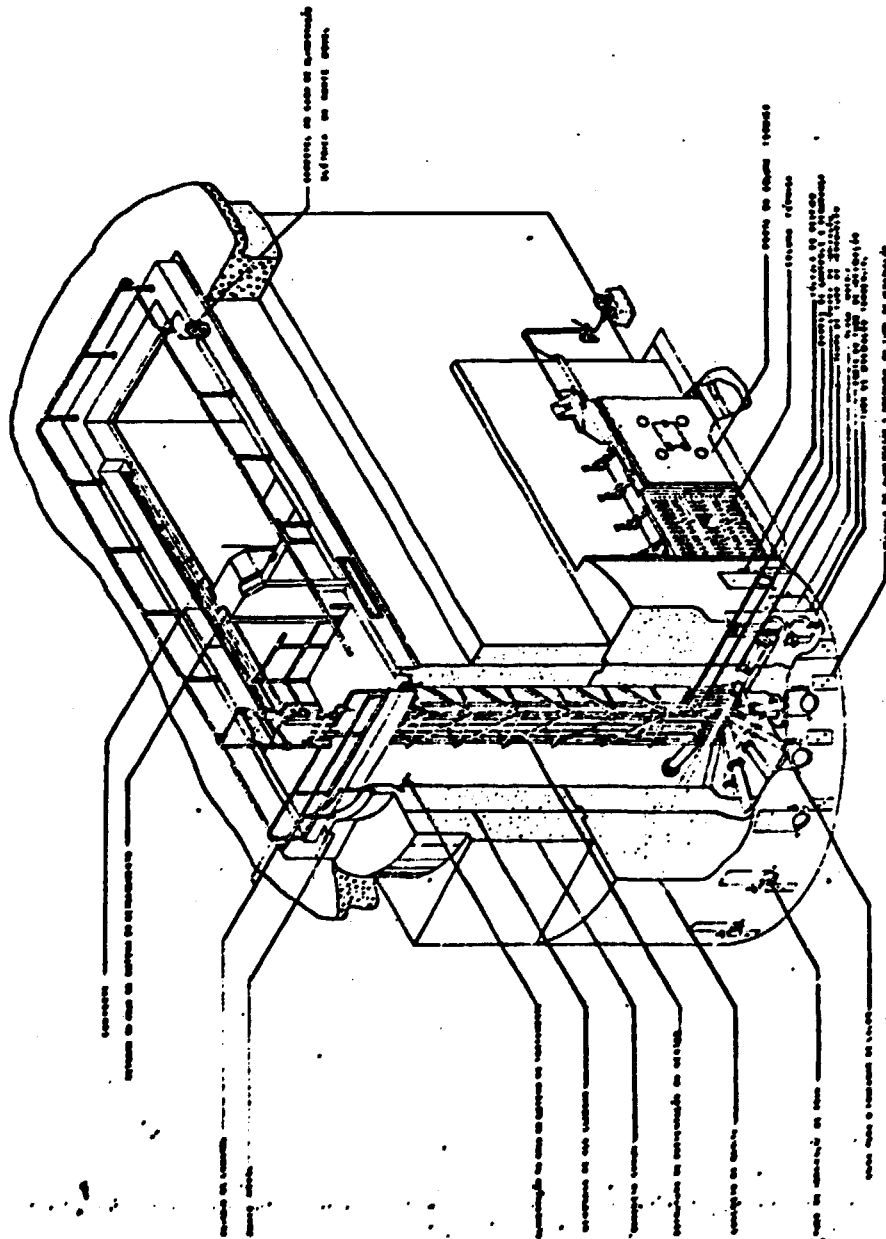
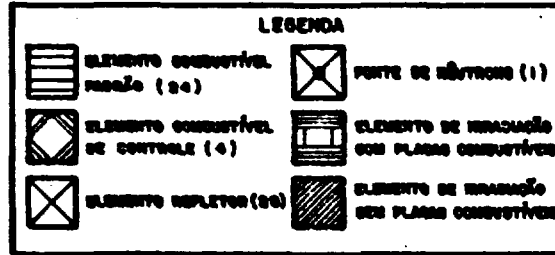
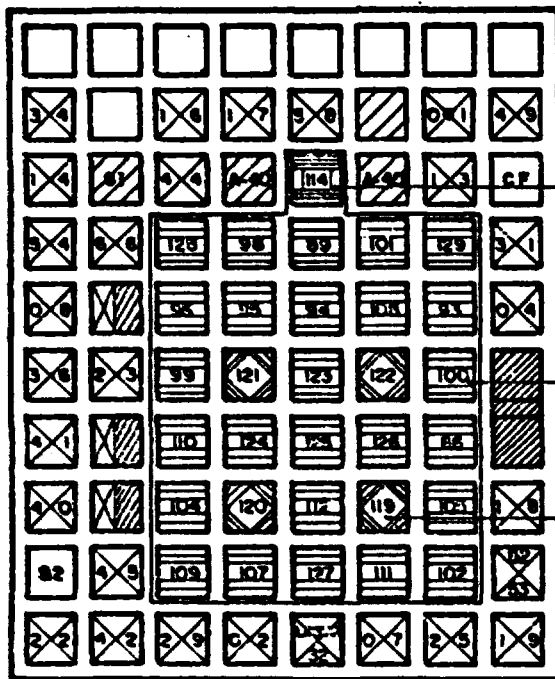


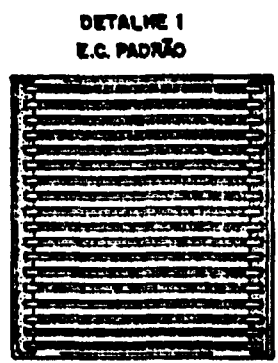
Figura 1 - Vista geral do reator IZA-AU

FIGURA 2. MAPA DO NÚCLEO DO REATOR IZA - R1



IDENTIFICAÇÃO DE ENRIQUECIMENTO

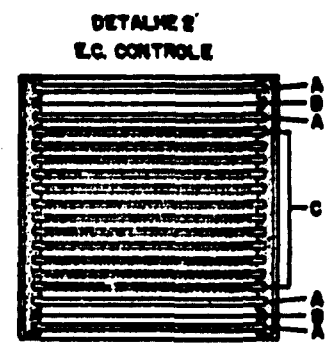
ELEMENTO COMBUSTÍVEL	ENRIQUECIMENTO (%)	
123	19,75	} NUCEN
124	19,75	
125	19,75	
126	19,75	
127	19,75	
RESTANTES	93,00	} EUA



DADOS

PLACAS COMBUSTÍVEIS (TOTAL) — 10
 1) PARA EC. 93% ENRIQUECIDOS:
 FORMA QUÍMICA { COMBUSTÍVEL U₂O₈
 ENCAMISAMENTO AL
 ESPESURA DO CERNE — 0,2508 cm
 ESPESURA DA PLACA — 0,1524 cm
 ESPACAMENTO CENTRO À CENTRO — 0,4414 cm
 FRACÇÃO DE U — 69% EM PESO U₂O₈
 MASSA DE U { U = 193g
 U²³⁵ = 180g

2) PARA EC. 20% ENRIQUECIDOS:
 FORMA QUÍMICA { COMBUSTÍVEL U₂O₈
 ENCAMISAMENTO AL
 ESPESURA DO CERNE — 0,310 cm
 ESPESURA DA PLACA — 0,1524 cm
 ESPACAMENTO CENTRO À CENTRO — 0,4414 cm
 FRACÇÃO DE U — 75% EM PESO U₂O₈
 MASSA DE U { U = 910g
 U²³⁵ = 180g (20%)
 LARGURA ATIVA DA PLACA — 6,15 cm
 COMPRIMENTO ATIVO — 69,89 cm



DADOS

REGIÃO C = IGUAIS AS DO EC. PADRÃO
 REGIÃO A = PLACA DE ALUMÍNIO -
 ESPESURA — 0,1524 cm
 REGIÃO B = BARRA DE CONTROLE

FORMA QUÍMICA { Ag — 80%
 In — 18%
 Cd — 8%

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



DADOS

PLACAS COMBUSTÍVEIS (TOTAL) — 9
 ENRIQUECIMENTO — 53%
 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS IGUAIS AO EC. PADRÃO

2. METODOLOGIA DE CÁLCULO NEUTRÔNICO

A Divisão de Física de Reatores do IPEN-CNEN-SP é responsável pelo projeto de uma nova configuração do Núcleo do IEA-R1, utilizando combustível com baixo enriquecimento. Em vista desta responsabilidade, foi obtido um contrato de pesquisa com a Agência Internacional de Energia Atômica (4661-RB) para utilizar a metodologia de cálculo disponível no IPEN-CNEN-SP em problemas padrões, principalmente o descrito no TECDOC 233 (3). A comparação dos cálculos com resultados de medidas experimentais de reatividade e distribuição de fluxo da atual configuração, tem como objetivo obter capacitação técnica, para então poder-se definir a nova configuração do IEA-R1.

Os códigos de computação, atualmente disponíveis no IPEN-CNEN-SP, para cálculos neutrônicos são mostrados na tabela 1. Para obtenção das seções de choque homogeneizadas no combustível, utiliza-se um dos códigos descritos na tabela 1, e o modelo da célula unitária. O cerne de uma placa combustível é envolta de um revestimento de Alumínio, pelo moderador, e por uma região extra (alumínio e moderador). A dependência com a queima é considerada através de cálculos consecutivos de transmutação e espectro. As seções de choque de barras de controle são calculadas utilizando-se o método da supercélula, na qual o cerne é uma região absorvedora envolta por alumínio, moderador e regiões de combustível. Estes dados são modificados de tal forma que as taxas de reação calculadas com o código de geração de seção de choque (ex: HAMMER) sejam preservadas quando calculadas pelo código de difusão (ex: CITATION). Finalmente, uma vez determinadas as seções de choque homogeneizadas de cada região do reator, este é modelado e é calculado através dos códigos de difusão, ou transporte, sendo que para estudos de gerenciamento de combustível utiliza-se cálculos em duas dimensões, e na previsão de criticalidade, ou cálculos detalhados da distribuição de fluxos, cálculos em três dimensões.

**TABELA 1 - CÓDIGOS DE COMPUTADOR DISPONÍVEIS NO IPEN-CNEN-SP
PARA ANÁLISE NEUTRÔNICA VISANDO A CONVERSÃO PARA
BAIXO ENRIQUECIMENTO.**

<u>NOME</u>	<u>COMENTÁRIOS</u>
<u>Geração de Secções de Choque</u>	
i) HAMMER (4)	i) Calcula-se o espectro, células unidimensionais, combinando os programas THERMOS, MUFT, ZUT, TUZ, FDG e, teoria integral de transporte; em 54 grupos rápidos e 30 térmicos, para gerar secções de choque homogeneizada em 4, 3 ou 2 grupos de energia, e em função da queima.
ii) HAMMER-TECHNION (5)	ii) Nova versão do código HAMMER (Technion-Israel Institute of Technology) que utiliza dados de ressonância em forma tabular, ao invés de parâmetros de ressonância.

iii) LEQ4 (6)

iii) Versão da Universidade de MICHIGAN do código LEOPARD(MUFT-SOFOCATE) para cálculos de células tipo placa. Gera seções de choque homogeneizadas e com queima no formato do código de Difusão 2DB-UM.

iv) AMPX-II (7)

iv) Sistema modular para produzir seções de choque (neutrons-gamas) multigrupo, homogeneizados a partir do ENDF-B-IV. Os cálculos celulares são feitos através do XSDRN-PM.

Códigos de Difusão

i) CITATION (8)

i) Programa de difusão, uni, bi e tridimensional, multigrupo que efetua pesquisa de criticidade, e distribuição de fluxo e potência.

ii) 2DBUM (9)

ii) Programa de difusão em 2-D com depleção macroscópica que incorpora o FIDO. Desenvolvido pela Universidade de Michigan.

Códigos de Transporte

- i) ANISN e MICRO/ANISN-W (10) i) Soluciona a equação de transporte multi grupo em geometria unidimensional com espalhamento anisotrópico. A versão para microcomputadores da linha IBM PC é também disponível.
- ii) DOT 3.5 (11) ii) Equivalente ao ANISN, para geometria bidimensional (X-Y, R-Z, R- θ).

Códigos de Cinética

- i) CINETHICA (12) e INVK (13) i) Códigos de cinética puntual e cinética puntual inversa, com realimentação. Desenvolvidos no IPEN-CNEN-SP.
- ii) FX2-TH (14) ii) Código de cinética espacial bidimensional, multigrupo e com realimentação termohidráulica.

Códigos de Termohidráulica

- i) MACABRE-II (15) i) Código termohidráulico para combustível tipo placa.

3. AVALIAÇÃO DE METODOLOGIA DE CÁLCULO PARA ESTUDOS DE CONVERSÃO.

Para avaliar a metodologia de cálculo disponível no IPEN-CNEN-SP solucionou-se o problema padrão publicado no IAEA-TECDOC 233 ⁽³⁾. Este problema consiste na avaliação de parâmetros neutrônicos, tais como: fator de multiplicação; variação em reatividade; razão de fluxos etc, de um típico reator de pesquisa de 10 MW quando da conversão de alto enriquecimento (93%) para médio (45%) e baixo enriquecimento (20%). O objetivo deste problema padrão é comparar os métodos de física de reatores de diferentes centros de pesquisa internacionais, sendo que no TECDOC 233, são publicados os resultados de sete centros internacionais (ANL-EUA; INTERATOM-RFA; EIR-Suíça; ÖSGAE-Austria; CEA-França; JAERI-Japão; CNEA-Argentina). Nesta seção, são mostrados os resultados obtidos pelo IPEN-CNEN-SP como mais uma contribuição aos esforços internacionais de avaliação de diferentes metodologias de cálculo.

Desde que o problema padrão da IAEA para reator genérico de 10MW é extensivamente discutido no TECDOC233, aqui se reproduz apenas o Apêndice F0 do referido documento, o qual define os dados gerais do reator, tendo como objetivo definir o problema (vide anexo). Os resultados obtidos pelo IPEN-CNEN-SP foram a partir de diferentes combinações de códigos disponíveis, tanto de geração de seções de choque como de cálculos de difusão. As combinações utilizadas foram :

Método 1 : HAMMER/CITATION,

Método 2 : LEO4/2DBUM e

Método 3 : HAMMER-TECH/CITATION

sendo que no Método 1 utilizou-se o HAMMER-TECHNION para geração das seções de choque dos elementos refletoras (Grafita e H₂O). Finalmente, os resultados aqui apresentados fazem parte do contrato de pesquisa entre o IPEN-CNEN-SP e a IAEA (BRA-4661).

3.1. Secções de Choque e Cálculos de Queima

Os programas HAMMER, HAMMER-TECHNION e o LEO4 foram utilizados para gerar as secções de choque em função da queima para as várias regiões do reator e para 93%, 45% e 20% de enriquecimento em U-235, usando o modelo da célula unitária, em dois grupos de energia:

Grupo Térmico : $0,0 < E < 0,625$ eV

Grupo Rápido : $E > 0,625$ eV.

As células utilizadas para as regiões de combustível, elemento de controle, refletores de água e grafita são mostradas na figura 3. É de se notar que as células para o LEO4 nos elementos refletores incluem pequenas zonas de combustível, tal fato é devido as limitações do próprio programa que exige que a região central seja combustível, e a próxima o encamisamento. Tal limitação foi superada utilizando uma fina região de U-235 com densidades de 10^{-6} . Já o HAMMER-TECHNION, fornece as secções de choque por região celular.

Na tabela 2, 3 e 4 ilustram-se os valores obtidos para as constantes macroscópicas homogeneizadas obtidas pelos programas HAMMER, HAMMER-TECHNION e LEO4, para algumas situações de queima, e na tabela 5 os valores obtidos para o fator de multiplicação infinito versus a queima; de 0% a 50%, para a célula combustível obtido pelo programa LEO4. Finalmente, as figuras 4, 5 e 6 ilustram a comparação dos resultados dos cálculos celulares (K_{∞} vs. queima) entre os vários centros de pesquisa, inclusive os obtidos neste trabalho. Desses resultados verifica-se que em geral os valores do IPEN-CNEN-SP tendem a subestimar ligeiramente o valor de K_{∞} .

TABELA 2 - CONSTANTES MACROSCÓPICAS (HAMMER/HAMMER-TECHNION/LEO4) PARA 20% U-235.

Região	Grupo	Σ_a			Σ_R			$\nu \Sigma_f$			ρ			C (1%)
		HAMMER	LEO4	HAMMERTECH	HAMMER	LEO4	HAMMERTECH	HAMMER	LEO4	HAMMERTECH	HAMMER	LEO4	HAMMERTECH	
Combustível	1	6,0510(-3)	6,2017(-3)	6,223(-3)	2,2836(-2)	2,1643(-2)	2,2568(-2)	5,8050(-3)	6,9940(-3)	6,2100(-3)	1,4040	1,4728	1,3816	0
		1,2112(-1)	1,2526(-1)	1,1897(-1)	0,0	0,0	0,0	2,2333(-1)	2,3009(-1)	2,1714(-1)	3,0761(-1)	3,1155(-1)	3,0277(-1)	
	2	5,5880(-3)	5,9784(-3)	6,0211(-3)	2,2715(-2)	2,1707(-2)	2,2558(-2)	3,4720(-3)	3,5685(-3)	3,6664(-3)	1,4082	1,4765	1,3852	50
		9,3847(-2)	9,6885(-2)	9,2389(-2)	0,0	0,0	0,0	1,4220(-1)	1,4742(-1)	1,3882(-1)	2,9750(-1)	2,9979(-1)	2,9057(-1)	
Controle	1	4,8790(-3)	5,0708(-3)	4,9970(-3)	2,4979(-2)	2,3817(-2)	2,4727(-2)	4,4020(-3)	4,5544(-3)	4,7040(-3)	1,3887	1,4372	1,3671	0
		9,7551(-2)	1,0123(-1)	9,6076(-2)	0,0	0,0	0,0	1,7327(-1)	1,7927(-1)	1,6885(-1)	2,8792(-1)	2,9034(-1)	2,8154(-1)	
	2	4,8181(-3)	4,9307(-3)	4,8772(-3)	2,4958(-2)	2,3886(-2)	2,4751(-2)	3,3419(-3)	3,4523(-3)	3,5483(-3)	1,3905	1,4386	1,3686	30
		8,6783(-2)	8,9940(-2)	8,5451(-2)	0,0	0,0	0,0	1,3531(-1)	1,4026(-1)	1,3207(-1)	2,8347(-1)	2,8519(-1)	2,7619(-1)	
Refletor	H ₂ O	4,5325(-4)	4,4558(-4)	4,5325(-4)	4,7059(-2)	4,6958(-2)	4,7059(-2)	0,0	0,0	0,0	1,1342	1,2020	1,1342	-
		1,7897(-2)	1,1994(-2)	1,7897(-2)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6317(-1)	1,5364(-1)	1,6317(-1)	
	Grafita	2,9804(-5)	1,6177(-5)	2,9804(-5)	2,0782(-3)	1,9161(-3)	2,0082(-3)	0,0	0,0	0,0	1,3227	1,2936	1,3227	-
		2,1408(-4)	2,0641(-4)	2,1408(-4)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,3187(-1)	9,2960(-1)	9,3187(-1)	

TABELA 3 - CONSTANTES MACROSCÓPICAS (HAMMER/HAMMER-TECHNION/LEO4) PARA 45% U-235.

Região	Grupo	Σ_a			Σ_R			$v\Sigma_f$			D			(Módulos)
		HAMMER	LEO4	HAMMERTech	HAMMER	LEO4	HAMMERTech	HAMMER	LEO4	HAMMERTech	HAMMER	LEO4	HAMMERTech	
Combustível		4,2940(-3)	4,3680(-3)	4,4450(-3)	2,3959(-2)	2,2687(-2)	2,3686(-2)	4,6680(-3)	4,7947(-3)	5,0130(-3)	1,4083	1,5067	1,3873	0
		1,0516(-1)	1,0819(-1)	1,0337(-1)	0,0	0,0	0,0	1,9160(-1)	1,9700(-1)	1,8640(-1)	3,0498(-1)	3,0915(-1)	2,9931(-1)	
		3,9885(-3)	3,9544(-3)	4,0308(-3)	2,4082(-2)	2,2940(-2)	2,3892(-2)	2,5594(-3)	2,6257(-3)	2,7072(-3)	1,4112	1,5091	1,3899	50
		7,6346(-2)	7,7781(-2)	7,5235(-2)	0,0	0,0	0,0	1,1213(-1)	1,1569(-1)	1,0956(-1)	2,9435(-1)	2,9712(-1)	2,8661(-1)	
Controle		3,4380(-3)	3,5281(-3)	3,4740(-3)	2,5928(-2)	2,4746(-2)	2,5233(-2)	3,5250(-3)	3,6336(-3)	3,7410(-3)	1,3913	1,4603	1,4836	0
		8,4417(-2)	8,7544(-2)	8,3706(-2)	0,0	0,0	0,0	1,4793(-1)	1,5258(-1)	1,4431(-1)	2,8506(-1)	2,8742(-1)	2,8442(-1)	
		3,2890(-3)	3,3243(-3)	3,2779(-3)	2,6000(-2)	2,4880(-2)	2,5337(-2)	2,5690(-3)	2,6461(-3)	2,7220(-3)	1,3925(-3)	1,4612	1,4849	30
		7,3259(-2)	7,5263(-2)	7,2324(-2)	0,0	0,0	0,0	1,1109(-1)	1,1465(-1)	1,0867(-1)	2,8069(-1)	2,8235(-1)	2,7874(-1)	

TABELA.4 - CONSTANTES MACROSCÓPICAS (HAMMER/HAMMER-TECHNION/LEON) PARA 93% U-235.

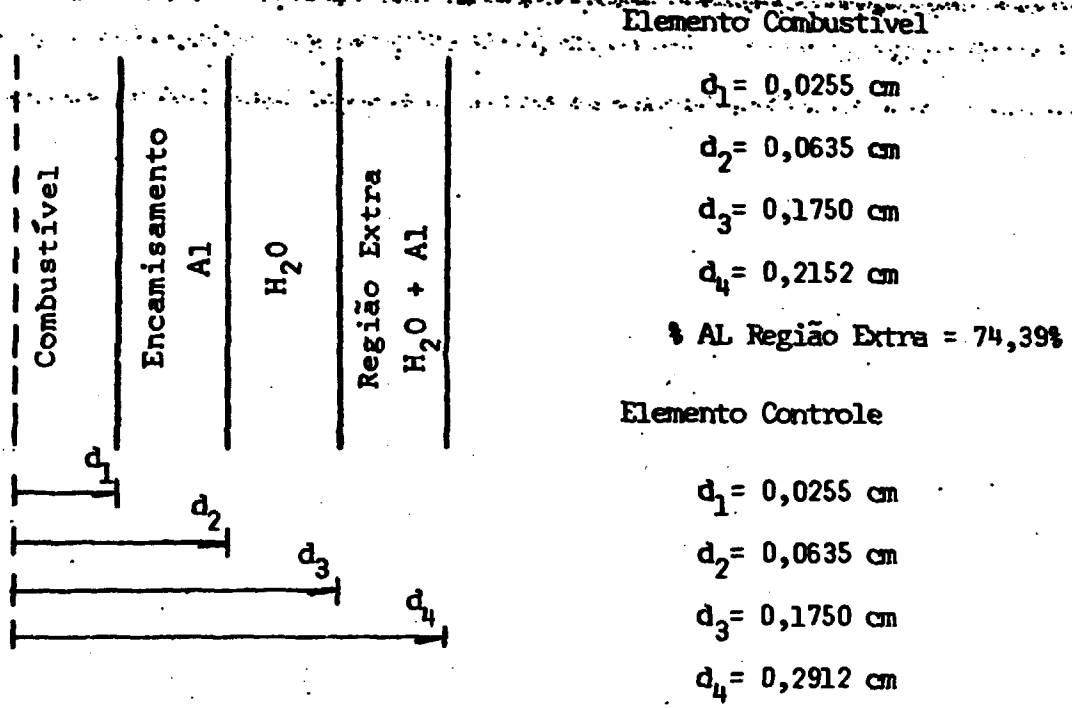
Região	Grupo	Σ_a			Σ_R			Σ_f			D			Quantia
		HAMMER	LEON	HAMMERTECH	HAMMER	LEON	HAMMERTECH	HAMMER	LEON	HAMMERTECH	HAMMER	LEON	HAMMERTECH	
Combustível	1	3,0380(-3)	3,0746(-3)	3,1770(-3)	2,4888(-2)	2,4026(-2)	2,4605(-2)	4,0830(-3)	4,2382(-3)	4,3910(-3)	1,4206	1,4065	1,3911	0
	2	9,5817(-2)	9,9074(-2)	9,4290(-2)	0,0	0,0	0,0	1,7246(-1)	1,7667(-1)	1,6794(-1)	3,0754(-1)	3,0424(-1)	2,9670(-1)	0
	1	2,5877(-3)	2,4647(-3)	2,6282(-3)	2,5158(-2)	2,4467(-2)	2,4850(-2)	2,1140(-3)	2,1856(-3)	2,2695(-3)	1,4127	1,4077	1,3931	50
	2	6,6639(-2)	6,8014(-2)	6,5795(-2)	0,0	0,0	0,0	9,5119(-2)	9,6935(-2)	9,3003(-2)	2,9226(-1)	2,9238(-1)	2,8322(-1)	0
Controle	1	2,4130(-3)	2,4249(-3)	2,5000(-3)	2,6696(-2)	2,5861(-2)	2,6433(-2)	3,0720(-3)	3,1899(-3)	3,2990(-3)	1,3927	1,3884	1,3735	0
	2	7,7507(-2)	8,0269(-2)	7,6516(-2)	0,0	0,0	0,0	1,3269(-1)	1,3634(-1)	1,2962(-1)	2,8284(-1)	2,8358(-1)	2,7497(-1)	0
	1	2,2201(-3)	2,1578(-3)	2,2653(-3)	2,8010(-2)	2,6055(-2)	2,6579(-2)	2,1837(-3)	2,2628(-3)	2,3440(-3)	1,3937	1,3890	1,3744	30
	2	6,5680(-2)	6,7613(-2)	6,4951(-2)	0,0	0,0	0,0	9,7048(-2)	9,9368(-2)	9,4980(-2)	2,7855(-1)	2,7864(-1)	2,6858(-1)	0

TABELA 5 - LEO4 K₀₀. Vs. QUEIMA DE U-235 PARA TRÊS

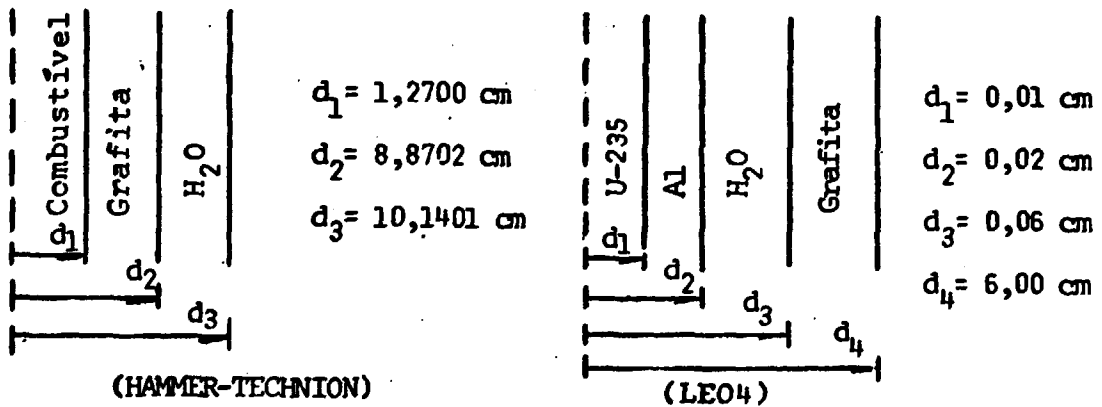
ENRIQUECIMENTOS

<u>Queima (%)</u>	<u>Enriquecimento</u>		
	<u>93%</u>	<u>45%</u>	<u>20%</u>
0	1,73811	1,70469	1,64320
5	1,63869	1,60838	1,55287
10	1,61294	1,58361	1,52812
15	1,59046	1,56236	1,50712
20	1,56691	1,54017	1,48511
25	1,54179	1,51659	1,46205
30	1,51473	1,49136	1,43759
35	1,48542	1,46433	1,41181
40	1,45306	1,43489	1,38418
45	1,41694	1,40256	1,35446
50	1,37660	1,36670	1,32210

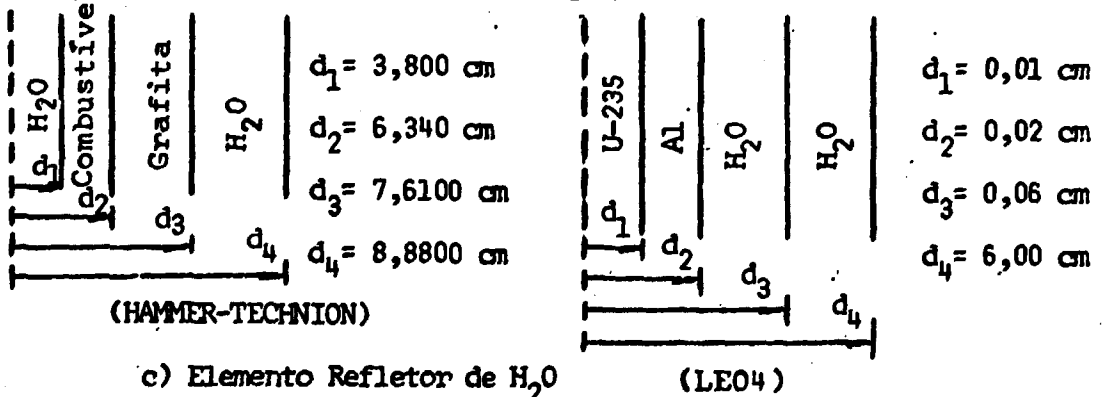
FIGURA 3 - CÉLULAS UNITÁRIAS PARA A GERAÇÃO DAS SECÇÕES DE CHOQUE HOMOGENEIZADAS.



a) Elemento Combustível e Controle (HAMMER & LE04)



b) Elemento Refletor de Grafita



c) Elemento Refletor de H₂O

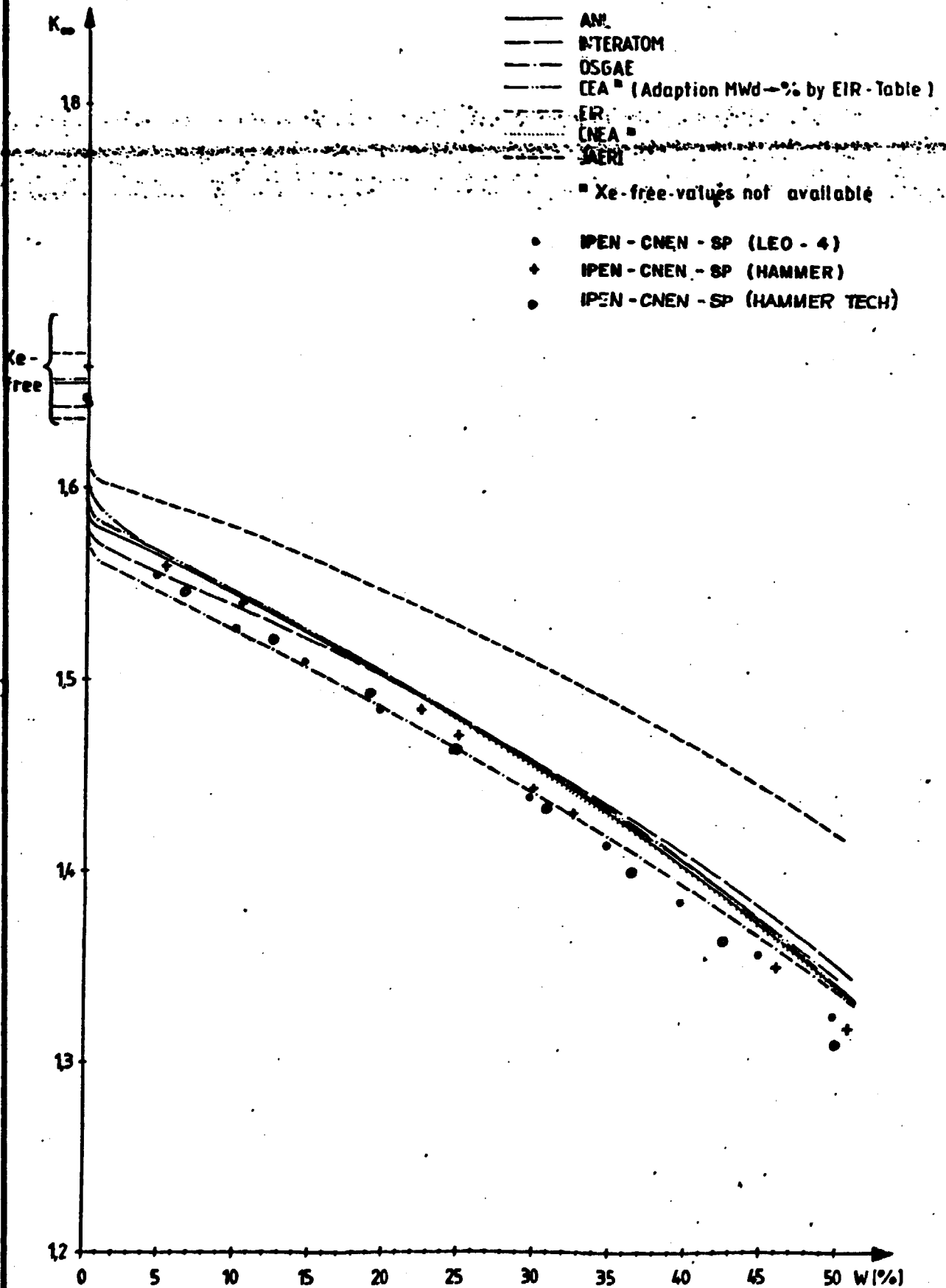


FIGURA 4- 10 MW - BENCHMARK
 K_{∞} FOR 20% ENRICHMENT AS A
 FUNCTION OF THE BURNUP W [%]

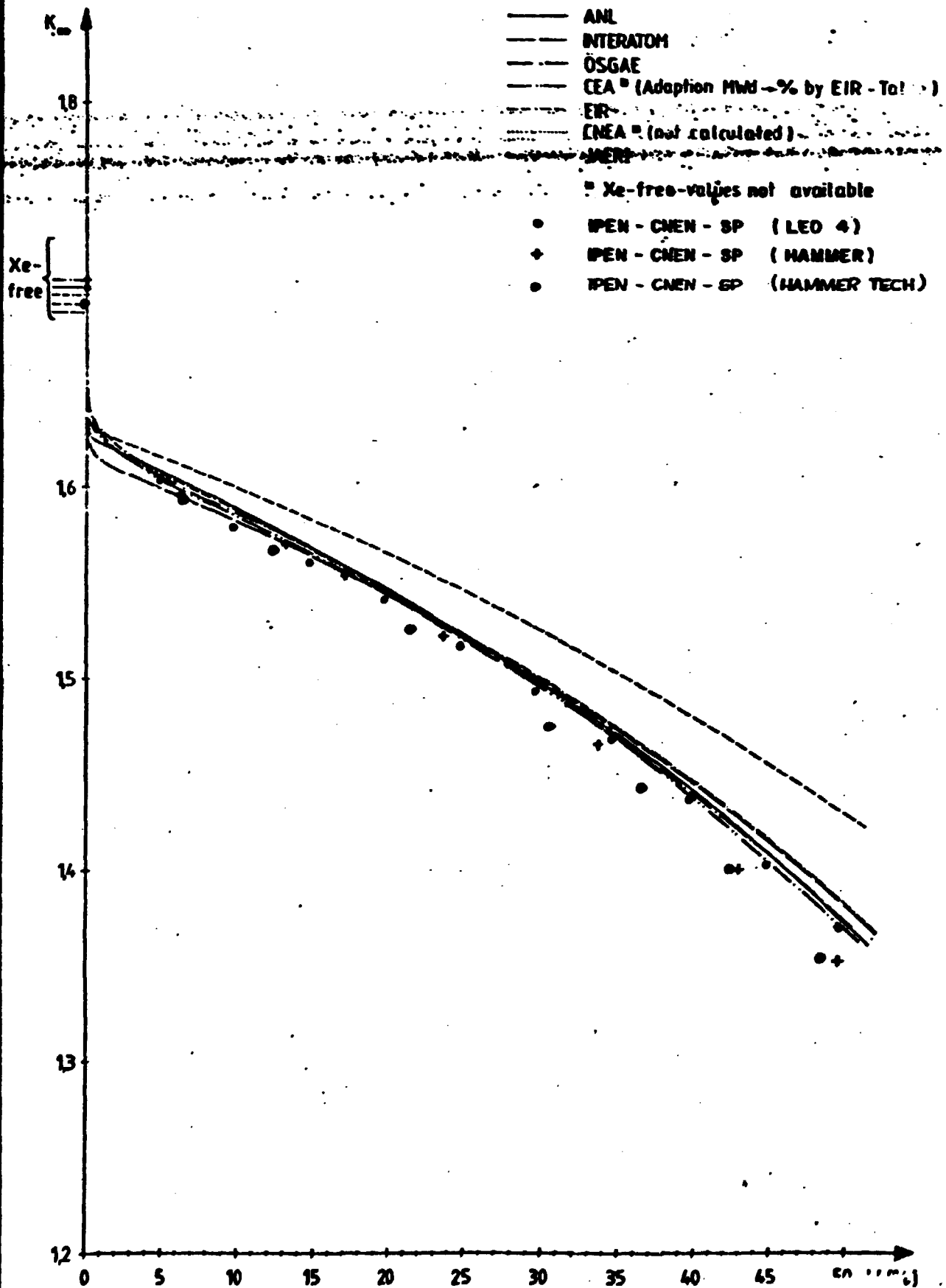


FIGURA 5- 10 MW - BENCHMARK
 K_{∞} FOR 45 % ENRICHMENT AS A
 FUNCTION OF THE BURNUP W [%]

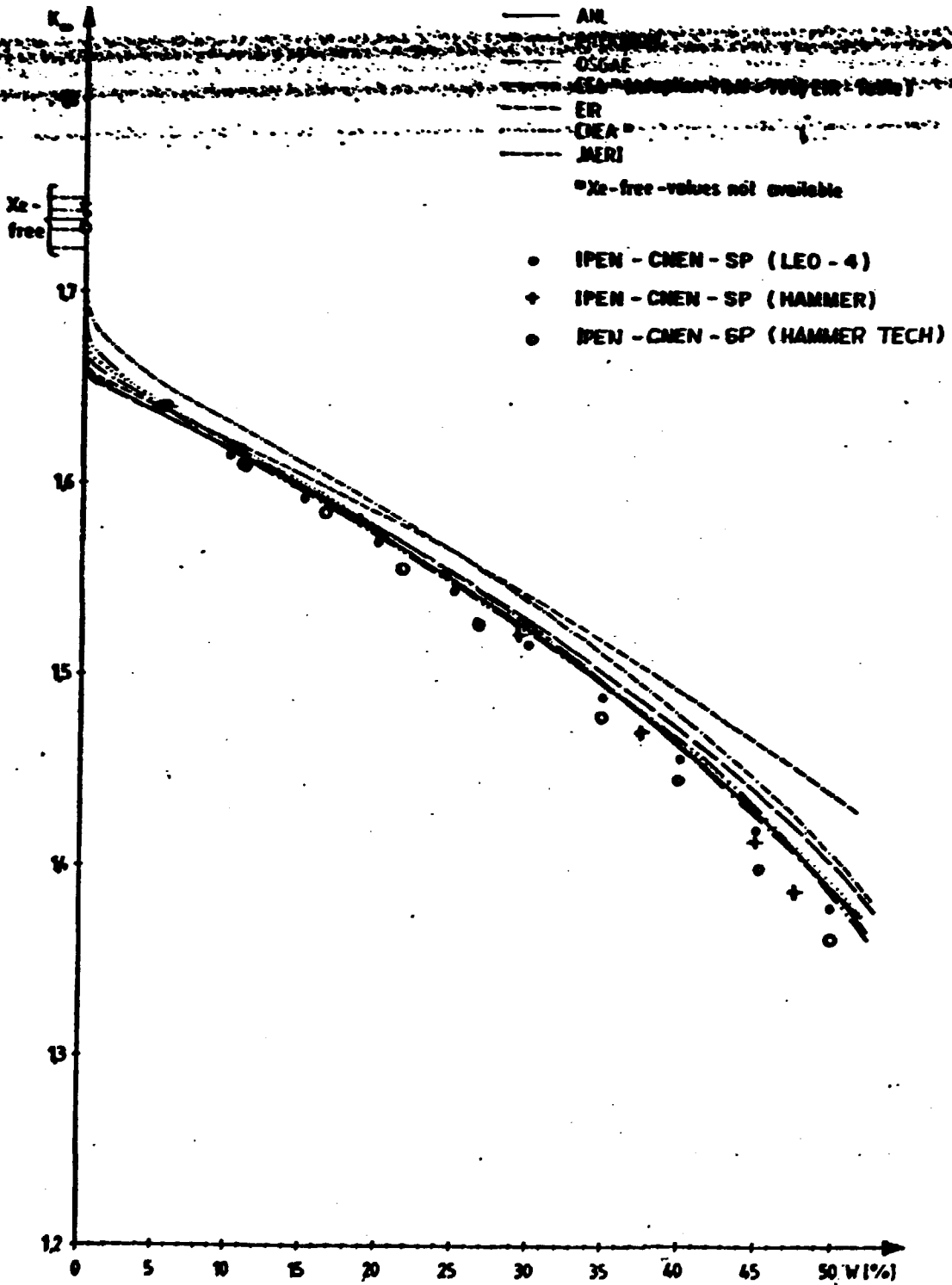


FIGURA 6- 10 MW - BENCHMARK
 K_{∞} FOR 93% ENRICHMENT AS A
 FUNCTION OF THE BURNUP W [%]

3.2. CÁLCULOS DO REATOR

Calculos utilizando teoria de difusao em geometria X-Y foram realizados com os códigos CITATION, (constantes multigrupo geradas pelos códigos HAMMER e HAMMER-TECHNION), e 2DBUM (constantes geradas pelo LEO4), para a geometria de um quarto do reator mostrado no Apêndice. Foram utilizados 4 intervalos espaciais por elemento de combustível e elemento de controle e 8 intervalos nas regiões refletoras tanto na direção x, como na direção y. Os fluxos foram normalizados utilizando-se uma densidade de potência 106,9 watts/cm³. A fuga axial foi levada em consideração através de um "buckling" axial (B^2_z) de $1,787 \times 10^{-3}$.

Os valores do fator de multiplicação efetivo (K_{eff}), para as condições, sem queima ("FRESH"), início de vida (BOL) e fim de vida (EOL), e para os três enriquecimentos, são mostrados na tabela 6, em conjunto com os obtidos pelos outros centros de pesquisa. O resultado da INTERATOM foi tomado como referência arbitrária, sendo que abaixo dos valores de K_{eff} são mostrados as variações percentuais obtidas, com relação à referência. Nota-se que os resultados do IPEN-CNEN-SP utilizando-se o sistema LEO4-2DBUM fornece resultados menores que 1%, relativos à referência, para altos enriquecimentos, entretanto aumenta-se as diferenças relativas conforme aumenta-se o enriquecimento. Por outro lado, o sistema HAMMER-CITATION apresenta um comportamento inverso. Estes resultados indicam a necessidade de investigar as causas desses comportamentos, que podem ser encontrados nas bibliotecas de dados nucleares desses códigos, ou na modelagem da célula unitária. Por outro lado, é conhecido que o código HAMMER foi desenvolvido para combustíveis tipo varetas com baixos enriquecimentos (LWK), e portanto, é necessário investigar com mais profundidade a aplicação deste programa em reatores com combustível tipo placa utilizando-se altos enriquecimentos.

Nas tabelas 7 e 8 ilustram-se comparativamente a variação de reatividade ($\Delta\rho$) em função da variação da queima no início (BOL) e fim (EOL) de vida, e em função da

redução de enriquecimento de 93% para 45% e 20%. Na tabela 9 é ilustrado a quantidade de Pu-239 em gramas por elemento

~~combustível obtidos dos cálculos de urânio calculadas pelos~~

vários centros. A variação dos fluxos térmicos e rápidos (ra

zão) quando das reduções do enriquecimento de 93% a 20% e

93% para 45% em função da distância x do centro do reator, i.

e., $(\phi_{th})_{20} / (\phi_{th})_{93}$ ou $(\phi_{th})_{45} / (\phi_{th})_{93}$ e $(\phi_r)_{20} / (\phi_r)_{93}$

Vs. X , são ilustrados nas figuras 7, 8 e 9. Estes resultados

quando comparados com os obtidos pelos outros centros de pes

quisa indicam uma razoável concordância, notando-se apenas

que os cálculos LEO4/2DBUM tendem a superestimar os valores

na região do refletor.

TABELA 6 - FATOR DE MULTIPLICAÇÃO EFETIVO (K_{eff}). COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Enriquecimento (%)	INTERATOM (RFA) "Referência"	ANL (EUA)	EIR (Suíça)	OSGAE (Austria)	CEA (França)	CNEA (Argentina)	JAERI (Japão)	IPEN-CNEN-SP LEO4/2DB HAM/CTT (Brasil)		HAM/CTT	
93	BOL	1,0328	1,0233 (-0,90%)	1,0368 (+0,37%)	1,0320 (-0,08%)	1,0404 (+0,71%)	1,0377 (-0,45%)	1,0420 (+0,85%)	1,0296 (-0,30%)	1,0446 (+1,05%)	1,0371 (+0,40%)
	EOL	1,0101	1,0004 (-0,96%)	1,0138 (+0,36%)	1,0090 (-0,11%)	1,0170 (+0,68%)	1,0143 (-0,41%)	1,0220 (+1,15%)	1,0055 (-0,45%)	1,0198 (+0,94%)	1,0140 (+0,38%)
	FRESH	1,1888	1,1838 (-0,38%)	1,1939 (+0,36%)	1,1966 (+0,55%)	1,2020 (+0,92%)	1,2002 (-0,41%)	1,1810 (-0,55%)	1,1945 (+0,40%)	1,2173 (+1,97%)	1,2069 (+1,26%)
45	BOL	1,0311	1,0247 (-0,61%)	1,0306 (-0,05%)	1,0334 (+0,22%)	1,0408 (+0,90%)	-	1,0489 (+1,65%)	1,0191 (-1,14%)	1,0404 (+0,86%)	1,0319 (+0,08%)
	EOL	1,0108	1,0033 (-0,73%)	1,0099 (-0,09%)	1,0116 (+0,08%)	1,0190 (+0,80%)	-	1,0306 (+1,90%)	0,9973 (-1,33%)	1,0173 (+0,63%)	1,0132 (+0,23%)
	FRESH	1,1790	1,1782 (-0,57%)	1,1791 (+0,01%)	1,1896 (0,76%)	1,195 (+1,14%)	-	1,1811 (+1,85%)	1,1731 (-0,43%)	1,2058 (+1,85%)	1,1931 (+1,00%)
20	BOL	1,0278	1,0213 (-0,63%)	1,0178 (-0,96%)	1,0320 (+0,40%)	1,0394 (+1,08%)	1,0332 (-0,50%)	1,0578 (+2,75%)	1,0101 (-1,70%)	1,0339 (+0,57%)	1,0287 (+0,08%)
	EOL	1,0091	1,0014 (-0,76%)	1,0000 (-0,90%)	1,0120 (+0,28%)	1,0191 (+0,98%)	1,0130 (-0,38%)	1,0412 (+3,06%)	0,9897 (-1,94%)	1,0127 (+0,35%)	1,0076 (-0,15%)
	FRESH	1,1683	1,1683 (0,00%)	1,1594 (-0,66%)	1,1813 (+0,94%)	1,1870 (+1,35%)	1,1815 (-0,96%)	1,1834 (+1,09%)	1,1579 (-0,77%)	1,1916 (+1,63%)	1,1828 (+1,05%)

Obs.: Os valores entre parentesis indicam a diferença em % relativo ao valor referência.

TABELA 7 - COMPARAÇÃO DA PERDA DE REATIVIDADE DEVIDO A QUEIMA

Enrique- cimento	Igual Queima	INTERATON	ANL	EIR	OSGAE	CEA	CNEA	JAERI	IPEN LED/2DB	IPEN HAM/CIT	IPEN HAMT/CIT
93%	%	2,18%	2,24%	2,19%	2,21%	2,21%	2,22%	1,88%	2,33%	2,33%	2,20%
45%	%	1,92%	2,08%	1,99%	2,09%	2,06%	-	1,70%	1,87%	2,18%	1,79%
20%	%	1,81%	1,94%	1,75%	1,92%	1,91%	1,93%	1,51%	2,04%	2,02%	2,04%

TABELA 8 - COMPARAÇÃO DAS VARIAÇÕES DE REATIVIDADE ($\Delta\rho$) DEVIDO A REDUÇÃO DO ENRIQUECIMENTO

		INTERATON	ANL	EIR	OSGAE	CEA	CNEA	JAERE	IPEN LEO/2DB	IPEN HAM/CIT	IPEN HAMT/CIT
93	FRESH	-0,70%	-0,38%	-1,05%	-0,49%	-0,49%	-	0,00%	-1,52%	-0,81%	-0,96%
↓	BOL	-0,16%	+0,13%	-0,58%	+0,13%	+0,13%	-	+0,63%	-1,00%	-0,38%	-0,48%
45	EOL	+0,06%	+0,29%	-0,38%	+0,25%	+0,25%	-	+0,82%	-0,82%	-0,24%	-0,08%
93	FRESH	-1,47%	-1,09%	-2,49%	-1,08%	-1,05%	-1,32%	+0,17%	-2,64%	-1,81%	-1,69%
↓	BOL	-0,47%	-0,20%	-1,80%	0,20%	-0,09%	-0,42%	+1,44%	-1,91%	-0,99%	-0,79%
20	EOL	-0,10%	+0,01%	-1,36%	+0,29%	+0,20%	-0,12%	+1,81%	-1,59%	-0,69%	-0,63%

**TABELA 9 - QUANTIDADE DE PU-239 EM GRAMAS, POR ELEMENTO
 COMBUSTÍVEL ATÉ 50% DA QUEIMA (DADOS OBTIDOS
 DOS CÁLCULOS CELULARES)**

Enrique cimento	OSGAE	ANL	INTE	EIR	JAERI	CNEA	IPEN LEO	IPEN HAM	IPEN HAMT
93%	0,42	0,44	0,42	0,45	0,37	0,43	0,41	0,43	0,43
45%	4,34	4,24	4,41	5,50	3,32	-	4,91	4,77	4,70
20%	12,30	12,71	11,92	14,80	9,13	12,71	13,07	13,17	12,97

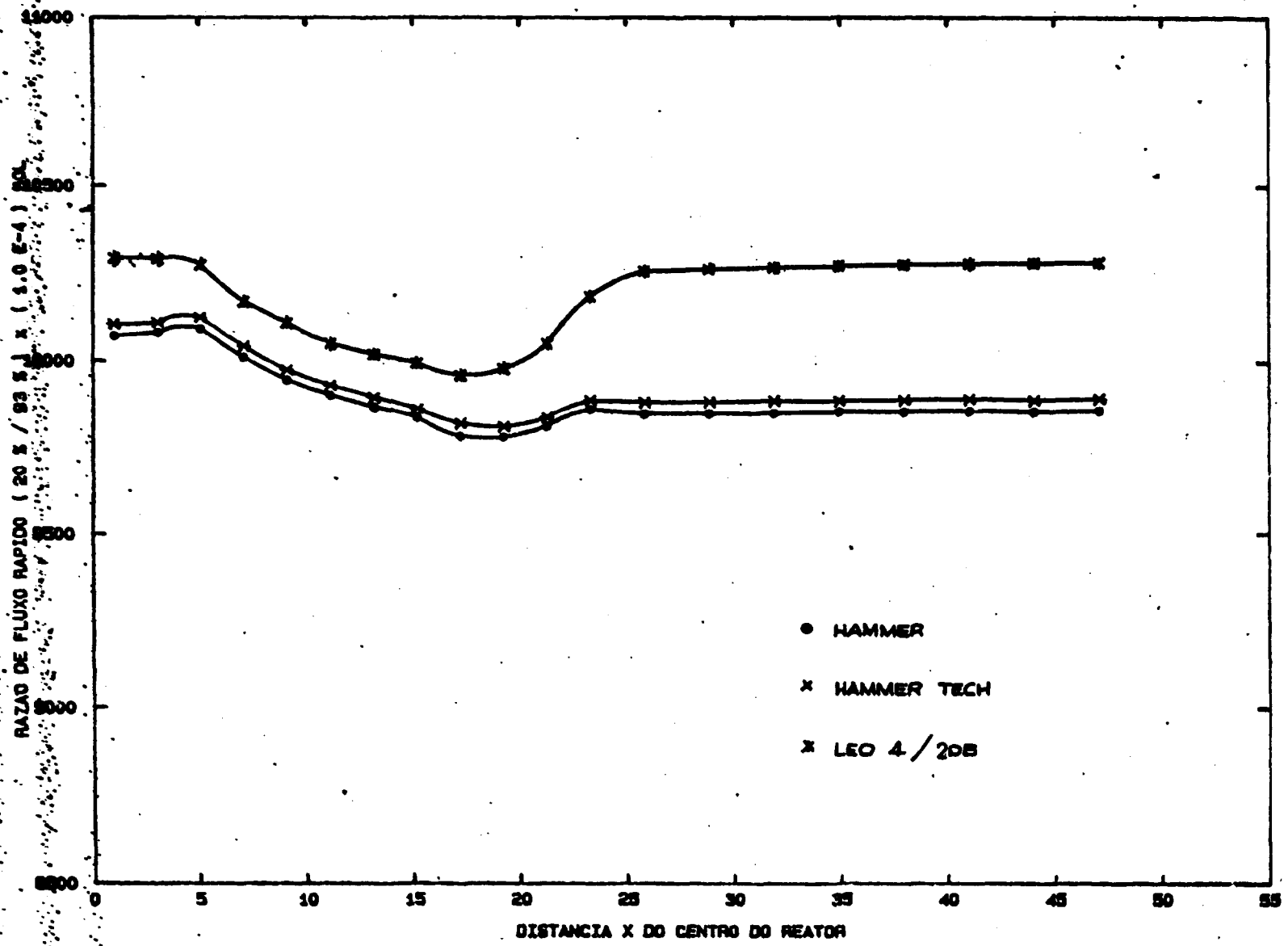


FIG.7 - RAZAO DE FLUXO RAPIDO (20 % / 93 %) VS. DISTANCIA - X . BOL

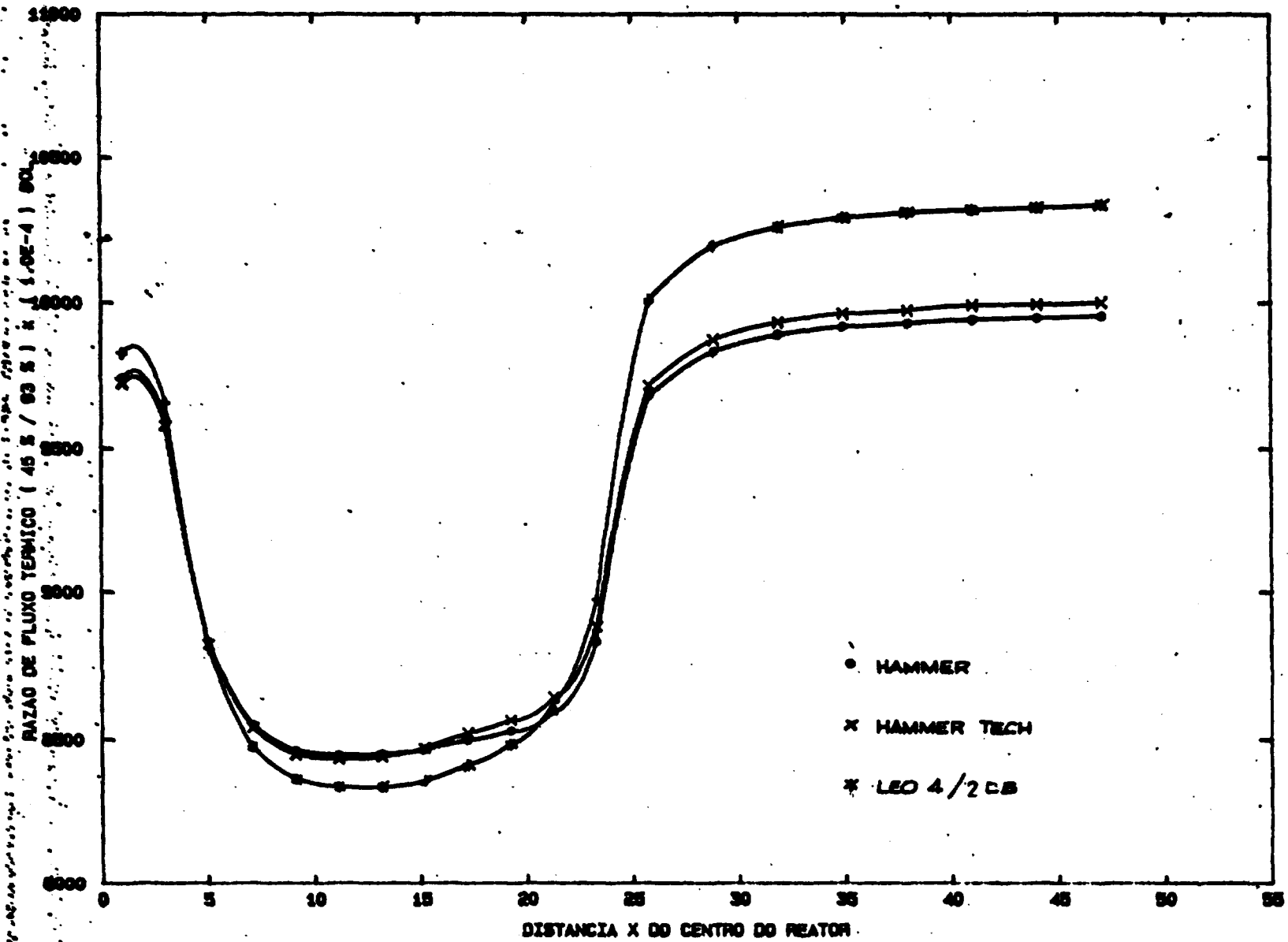


FIG. 8 - RAZAO DE FLUXO TERMICO (45 % / 93 %) VS. DISTANCIA - X . BOL

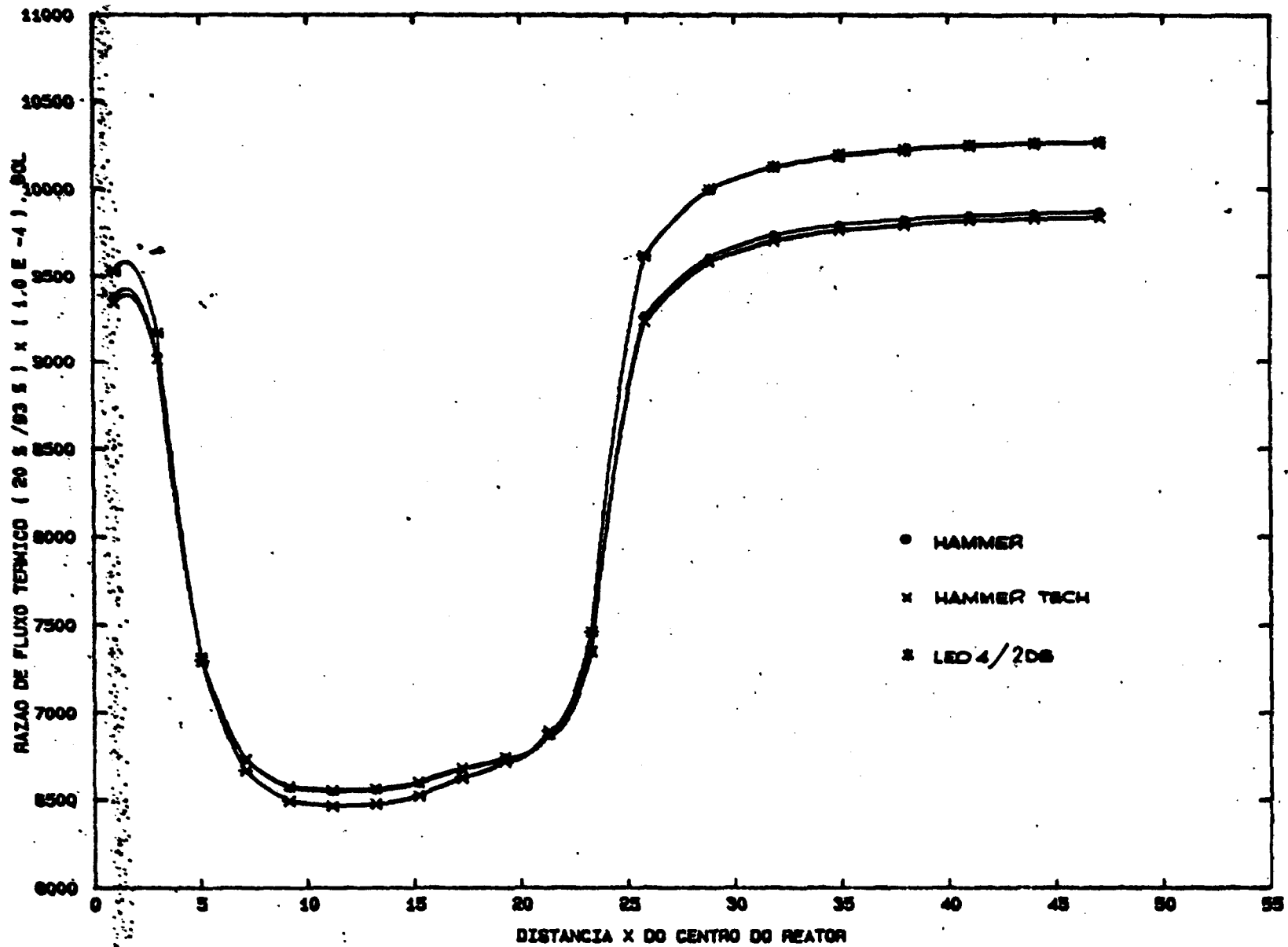


FIG. 9 - RAZAO DE FLUXO TERMICO (20 % / 93 %) VS. DISTANCIA - X . BOL

4. CÁLCULOS DE PARÂMETROS NEUTRÔNICOS E COMPARAÇÃO COM MEDIDAS EXPERIMENTAIS PARA O IEA-R1.

Para verificar os métodos de cálculo utilizados pela RTF/IPEN-CNENSP, foram medidos parâmetros de reatividade da atual configuração do reator IEA-R1 (vide figura 2) e comparados com os obtidos pelos códigos disponíveis. Os parâmetros de reatividade medidos foram :

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

Para a determinação da reatividade diferencial e integral das barras de controle $\{\partial\rho/\partial z$ e $\rho(z)\}$ utilizou-se a técnica do período estável ⁽¹⁶⁾. Os coeficientes de reatividade de temperatura do moderador $\{\alpha_m(T)\} = \partial\rho/\partial T_m$ foi obtido variando-se a temperatura do moderador com auxílio do circuito secundário, e medindo-se a reatividade introduzida com um reatímetro digital ^(16,17). O coeficiente de reatividade de vazio local foi obtido através da inserção de placas de alumínio, entre as placas combustíveis, para simular a introdução de vazio, e a medida da reatividade introduzida através de um reatímetro digital ⁽¹⁷⁾ { 009-NC/1-IPEN }.

Os cálculos dos parâmetros foram feitos com os códigos HAMMER; HAMMER-TECHNION e CITATION. As células unitárias para os elementos combustíveis enriquecidos a 93%, ou 20% foram tipo placa, com a região do combustível (U_3O_8 -Al ou U-Alx), envolta pelo encamisamento (Al), moderador (H_2O) e uma região extra ($H_2O + Al$). As regiões com elementos de controle (Ag-In-Cd), detalhe 2, da figura 2, foram homogeneizadas através do modelo da supercélula e da equivalência das taxas de reação entre a teoria de difusão e transporte ⁽¹⁸⁾. O elemento de irradiação com placas combustíveis (detalhe 3, da figura 2)

foi homogeneizado de maneira análoga ao elemento combustível padrão, com a diferença das espessuras das regiões celulares devido o menor número de placas de combustíveis desse elemento. Na figura 10 são ilustrados as células utilizadas.

Os cálculos do reator foram feitos em 3 dimensões (X-Y-Z) e em 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 2, incluindo um refletor de H_2O . Na direção axial, o reator foi modelado de acordo com a figura 11. Para o cálculo dos valores diferenciais das barras de controle, inicialmente modelou-se o reator com a posição das barras na posição crítica, a baixa potência, tendo-se obtido uma previsão de criticalidade com um erro de ~3% ($K_{eff}=1.03508$). A seguir, processou-se vários casos, subindo a posição da barra, cuja reatividade está sendo calculada, em 10 passos, e corrigindo-se a posição das outras barras para a posição crítica.

Na tabela 10 ilustra-se o valor diferencial e integral da barra de segurança BS2, localizada na posição 119. Desta tabela verificamos que o valor total da barra é 3284 pcm (experimental); sendo o valor previsto por cálculo de 2974 pcm, fornecendo um erro de 10%, aceitável do ponto de vista dos testes físicos de partida.

Na tabela 11 ilustra-se o valor dos coeficientes de reatividade da temperatura do moderador, obtidos experimentalmente e os calculados, e na tabela 12, ilustra-se o valor do coeficiente de reatividade do vazio local, tanto os obtidos experimentalmente, quanto os previstos pelos cálculos. Os resultados para o coeficiente de temperatura foram obtidos com uma variação de $-9^\circ C$ na temperatura do moderador, sendo o desvio do previsto por cálculo para o medido experimentalmente de -13%.

Os erros nas previsões dos parâmetros de reatividade são devido as incertezas no método de cálculo, mas principalmente devido as incertezas nos valores de queima dos elementos combustíveis, que acarretam grandes erros quando da geração das secções de choque. Este fato indica que quando da

instalação de um novo núcleo com baixo enriquecimento, o histórico de operação, e um acompanhamento experimental da queima deva ser realizado, com o objetivo de reduzir as incertezas nos cálculos, e desta forma poder-se gerenciar o combustível com mais eficácia.

TABELA 10 - 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	1095,3
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.

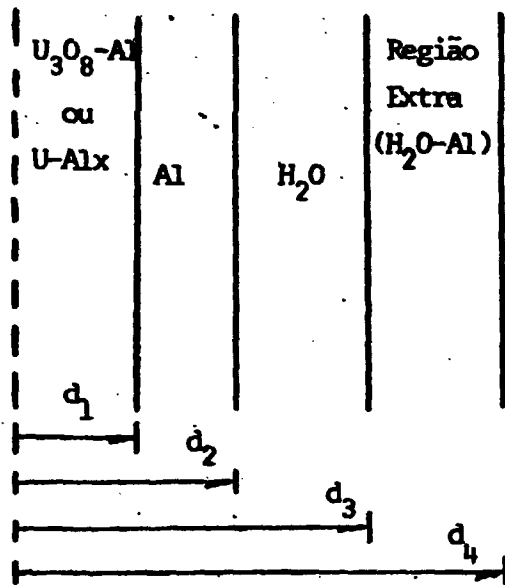
TABELA 11 - COEFICIENTE DE REATIVIDADE DE TEMPERATURA DO MODERADOR

	EXPERIMENTAL	CALCULADO
ΔT ($^{\circ}C$)	$8,74 \pm 0,37$	9
$\Delta \rho$ (pcm)	$-115,5 \pm 15,2$	106,67
α_M (pcm/ $^{\circ}C$)	$-13,6 \pm 2,4$	-11,85

TABELA 12 - 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.



U_3O_8-Al (93%)

$$d_1 = 0,0252 \text{ cm}$$

$$d_2 = 0,0762 \text{ cm}$$

$$d_3 = 0,2207 \text{ cm}$$

$$d_4 = 0,2802 \text{ cm}$$

$U-Alx$ (20%)

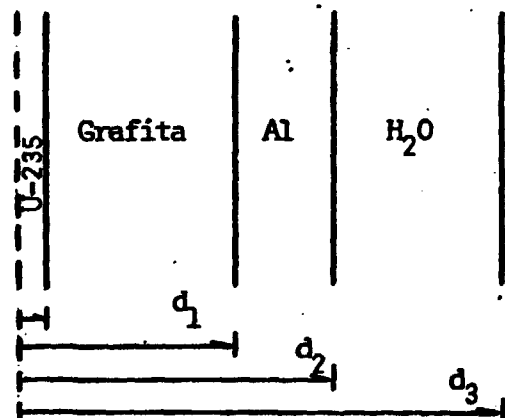
$$d_1 = 0,0380 \text{ cm}$$

$$d_2 = 0,076 \text{ pcm}$$

$$d_3 = 0,2205 \text{ cm}$$

$$d_4 = 0,2800 \text{ cm}$$

a) Célula Unitária Combustível



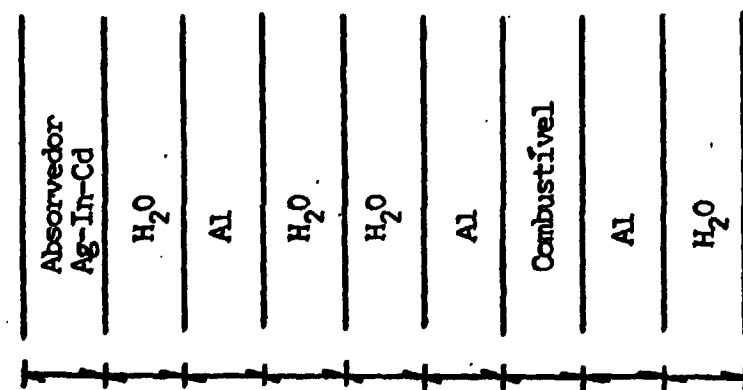
$$x = 0,0635 \text{ cm}$$

$$d_1 = 8,498 \text{ cm}$$

$$d_2 = 9,713 \text{ cm}$$

$$d_3 = 10,088 \text{ cm}$$

b) Célula Unitária do Refletor



$$d_1 = 0,0762 \text{ cm}$$

$$d_2 = 0,289 \text{ cm}$$

$$d_3 = 0,1524 \text{ cm}$$

$$d_4 = 0,1445 \text{ cm}$$

$$d_5 = 0,1445 \text{ cm}$$

$$d_6 = 0,051 \text{ cm}$$

$$d_7 = 0,0504 \text{ cm}$$

$$d_8 = 0,051 \text{ cm}$$

$$d_9 = 0,1445 \text{ cm}$$

c) Super-Célula do Material Absorvedor

FIGURA 10 - CÉLULAS DO REATOR IEA-R-1.

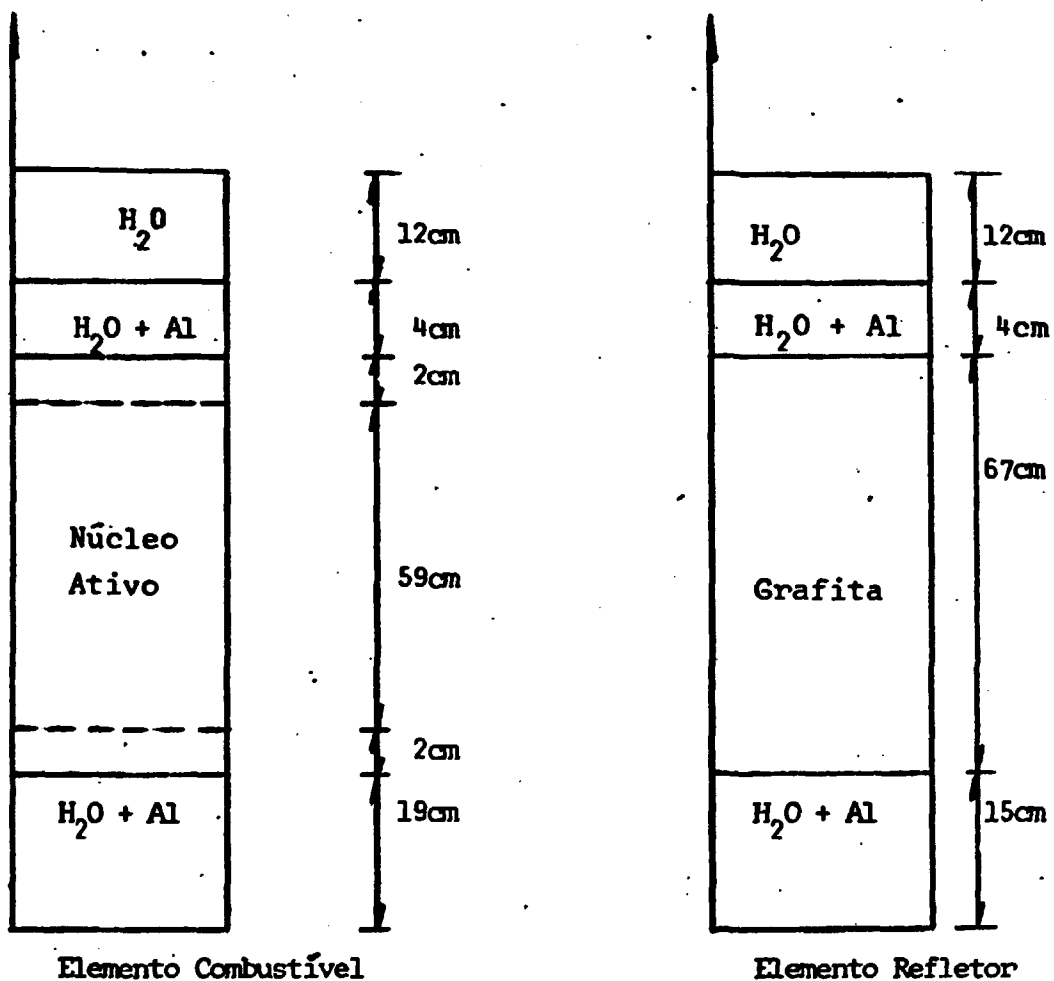


Figura 11 - Modelagem Axial dos Elementos Combustíveis e Refletor (Reator IEA-R1).

REFERÊNCIAS

1. "RELATÓRIO DE SEGURANÇA DO REATOR IEA-R1", Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1974.
2. FRAJNDLICH, R.; SOUZA, J.A. & KOSHIMIZU, S., "Irradiação e Avaliação de Elementos Combustíveis de Fabricação IPEN-CNEN-SP", Anais do VI Encontro Nacional de Física de Reatores e Termohidráulica, Revista Brasileira de Engenharia Nuclear, CTA- São José dos Campos, 186-197, Vol. 1, 1986.
3. "RESEARCH REACTOR CORE CONVERSION FROM THE USE OF HIGHLY ENRICHED URANIUM TO THE USE OF LOW ENRICHED URANIUM FUELS. GUIDE BOOK", IAEA-TECDOC-233, International Atomic Energy, Vienna, 1980.
4. SUICH, J.E. & HONECK, H.C. "The HAMMER system heterogeneous analysis of multigroup methods of exponential and reactor", Aiken, S.C., Savannah River Lab, 1967 (DP-1064).
5. BARHEN et ali, "THE HAMMER CODE SYSTEM-TECHNION-ISRAEL INSTITUTE OF TECHNOLOGY", EPRI. NP-565, 1978.
6. "LEOPARD- LEO4 " - University of Michigan, March 1980 (Relatório Interno Não Publicado).
7. "AMPX-II - Modular Code System for Generating Compled Multigroup Neutron-Gamma-Ray Cross Section Libraries from Data in ENDF Format", Radiation Shielding Information Center, ORNL, PSR-63, 1981.
8. FOWLER, T.B.; D.R. VONDY & G.W.CUNNIN GHAN, "Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION", ORNL-TN-2496, Rev. 2, 1971.
9. "UNIVERSITY OF MICHIGAN NUCLEAR ENGINEERING REACTOR DESIGN CODE 2-D DIFFUSION WITH MACROSCOPIC DEPLETION-2DB-UM", University of Michigan, September 1986 (Relatório Interno

Não Publicado).

10. "ANISN-W-Multigroup One-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering", Radiation Shielding Information Center, ORNL-CCC-255 & CCC-255-C Micro, 1975 & 1985.
11. "DOT 3.5 - Two Dimensional Discrete Ordinates Radiation Transport Code", Radiation Shielding Information Center, ORNL-CCC-276, 1973.
12. NAKATA, H. "CINETHICA", IPEN-CNEN-SP. Relatório Interno Não Publicado, 1983.
13. MOREIRA, J. "INVK: Programa de Cinética Inversa", IPEN-CNEN-SP, Relatório Interno Não Publicado, 1986.
14. SHOKER, R.A et alli, "FX2-TH: A Two-Dimensional Nuclear Reactor Kinetics Code with Thermal-Hydraulic Feed Back", ANL-7897, 1978.
15. GRIEBENOW, M.L. & RICHERT, K.D.; "MACABRE II", Idaho Nuclear Corporation. Phillips Petroleum Company, IN.1107, 1967.
16. PROFIO, A.E., "Experimental Reactor Physics", Wiley-Interscience, 1976.
17. MOREIRA, J. "Medidas de Reatividade em Tempo Real", Anais do 19 Congresso Brasileiro de Energia Nuclear (I CGEN), Rio de Janeiro, Vol. 2, 47, 1986.
18. KOSAKA, N. "Estudo da Validação do Programa HAMMER-TECHNION para Barra de Controle do Reator tipo PWR", Publicação IPEN 85, 1985.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) pelo contrato de pesquisa BRA-4661; ao Grupo de Operação do Reator IEA-R-1 pelo auxílio na condução dos experimentos; e aos Drs: H. Nakata, A. dos Santos e Nanami Kosaka pela orientação no processamento dos programas de computador.

APPENDIX F

Benchmark Calculations

F-0 Specifications

The benchmark calculations were performed by the following organizations:

- F-1 ANL (USA)
- F-2 INTERATOM (FRG)
- F-3 EIR (Switzerland)
- F-4 ÖSGAE (Austria)
- F-5 CEA (France)
- F-6 JAERI (Japan)
- F-7 CNEA (Argentina)

ABSTRACT

Benchmark calculations were performed to compare the computational methods of various organizations. The methods and results of neutronics calculations for the specified core are described in Appendices F-1 to F-7. Only limited conclusions for actual core conversions from HEU fuel to LEU fuel should be drawn from these results.

Specifications

Aim: Comparison of the different calculation methods and cross-section data sets used in different laboratories, limited conclusions for real conversion problems.

Table 1 Specifications for the Methodical Benchmark-Problem

Data and Specifications Agreed Upon:

Active Core Height 600 mm
 Extrapolation Length 80 mm (in 80 mm distance from the core, the cosine-shaped flux goes to zero)
 X-Y Calculations only

Space at the grid plate per fuel element 77 mm x 81 mm

Fuel element cross-section
 76 mm x 80.5 mm including support plate
 76 mm x 80.0 mm without support plate

Heat dimensions
 63 mm x 0.51 mm x 600 mm

Aluminum-canning with $\rho_{Al} = 2.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

Thickness of support plate 4.75 mm; $\rho_{Al} = 2.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

Number of fuel plates per fuel element:
 23 identical plates, each 1.27 mm thick

Number of fuel plates per control element:
 17 identical plates, each 1.27 mm thick

Identification of the remaining plate positions of the control elements:
 4 plates of pure aluminum $\rho_{Al} = 2.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, each 1.27 mm thick in the position of the first, the third, the twenty-first, and the twenty-third standard plate position; water gaps between the two sets of aluminum plates.

Specifications of the different fuels (UAl_x -Al Fuel) for HEU, MEU, LEU corresponding to the previous definitions:

- HEU:
- Enrichment 93 w/o (weight %) U-235
 - 280 g U-235 per fuel element, which corresponds to 12.174 g U-235 per each fuel plate
 - 21 w/o of uranium in the UAl_x -Al
 - only U-235 and U-238 in the fresh fuel
- MEU:
- Enrichment 45 w/o U-235
 - 320 g U-235 per fuel element (23 plates)
 - 40 w/o of uranium in the UAl_x -Al
 - only U-235 and U-238 in the fresh fuel
- LEU:
- Enrichment 20 w/o U-235
 - 390 g U-235 per fuel element (23 plates)
 - 72 w/o of uranium in the UAl_x -Al
 - only U-235 and U-238 in the fresh fuel

Total power: 10 MW_{th} (power buildup by 3.1×10^{10} fission/Joule)

Thermal hydraulic data:
 Water temperature 20°C
 Fuel temperature 20°C
 Pressure at core height 1.7 bar

Xenon-State:
 Homogeneous Xenon content corresponding to average-power-density

Results

k_{eff} ; fluxes and flux ratios along the two symmetry-axes of the core in three groups and for begin of cycle (BOL) and end of cycle (EOL), respectively.

$\phi_{thermal}$ with $0 \text{ eV} < E_n < 0.625 \text{ eV}$

$\phi_{epithermal}$ with $0.625 \text{ eV} < E_n < 5.531 \text{ keV}$

ϕ_{fast} with $E_n > 5.531 \text{ keV}$