

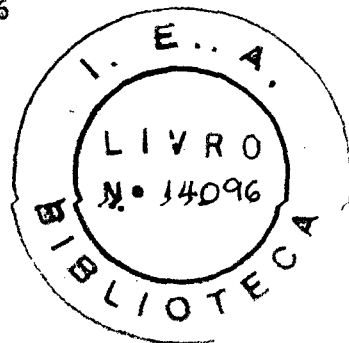
VALDEMIR GUTIERREZ RODRIGUES

VIABILIDADE NEUTRÔNICA DE UM CONJUNTO CRÍTICO TÉRMICO-RÁPIDO
DESTINADO AO ESTUDO DE ENVOLTÓRIOS DE REATORES RÁPIDOS

Orientador: Prof. Dr. Yoshiyuti Hukai

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo, para obtenção do título de
Mestre em Ciências e Tecnologia
Nucleares.

São Paulo, 1976



À Eliane

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Rômulo Ribeiro Pieroni, Superintendente do Instituto de Energia Atômica, por tornar possível a realização deste trabalho.

Ao Prof. Eng. Pedro Bento de Camargo, Coordenador Geral de Engenharia Nuclear, pelo apoio recebido.

Ao Prof. Dr. Roberto Y. Hukai, orientador deste trabalho, que propôs o tema e facultou os meios para sua realização, acompanhando com sugestões, críticas e constantes incentivos.

À Profa. Dra. Wilma S. Hehl Cintra, que auxiliou de inúmeras maneiras, com sugestões e críticas.

Aos Operadores e analistas da Coordenadoria de Processamento de Dados, pela ajuda prestada na execução dos programas.

À Srta. Creusa Moreira Diniz pelo esmero dos trabalhos de dactilografia.

Aos Colegas da Coordenadoria de Engenharia Nuclear pelo apoio e interesse demonstrado.

RESUMO

Estudou-se a viabilidade neutrônica de um conjunto térmico-rápido visando simular o cerne de um reator rápido. Este conjunto será utilizado para acionar envoltórios de reatores rápidos, objeto de estudo experimental.

Tomou-se como padrão o espectro de nêutrons na interface cerne-envoltório de um reator G C F R. O espectro na interface - filtro - envoltório do conjunto térmico-rápido foi comparado a esse espectro padrão. Foram objeto de estudo os envoltórios de UO_2 e tório metálico, para filtros de cádmio e boro. O filtro de boro mostrou-se mais eficaz do que o de cádmio na reprodução de espectro padrão (Índices espectrais mínimos de 5,6% e 7,0% , respectivamente).

Í N D I C E

1. <u>INTRODUÇÃO</u>	1
1.1 - Prefácio.....	1
1.2 - Objetivo do trabalho.....	2
1.3 - Estudos anteriores.....	5
2. <u>O REATOR DE POTÊNCIA ZERO DO I.E.A.</u>	7
2.1 - A Unidade crítica	7
2.2 - O Conjunto térmico-rápido.....	9
2.3 - As finalidades da Unidade crítica.....	10
3. <u>O REATOR G.C.F.R. DE REFERÊNCIA</u>	12
3.1 - Introdução.....	12
3.2 - Enriquecimento do carôço.....	12
3.3 - Descrição do envoltório.....	14
3.4 - Elementos de combustível do carôço e envoltório.....	18
3.5 - Frações de volume e composição do reator.....	18
4. <u>SIMULAÇÃO DO CARÔÇO DE UM REATOR RÁPIDO</u>	23
4.1 - Introdução.....	23
4.2 - Descrição do conjunto "carôço térmico-anel conversor - filtro"	23
4.2.1 - O Carôço térmico.....	23

4.2.2 - O Anel conversor-Filtro	28
4.2.3 - O Envoltório e o Refletor.....	30
5. <u>MÉTODOS DE CÁLCULO</u>	33
5.1 - Introdução.....	33
5.2 - Procedimento do cálculo.....	34
5.2.1 - Cálculo das secções de choque do reator.....	35
5.2.2 - Cálculo da criticalidade.....	35
5.3 - Programas utilizados.....	36
5.3.1 - X S D R N	36
5.3.2 - C I T A T I O N	37
5.4 - Constantes nucleares.....	37
5.5 - Conclusão.....	42
6. <u>RESULTADOS</u>	43
6.1 - Introdução.....	43
6.2 - Índice espectral.....	44
6.3 - Cálculo do Reator G.C.F.R. de referência.....	45
6.4 - Estimativa do raio crítico do carôço térmico.....	45
6.5 - Otimização do conjunto "anel conversor-filtro".....	51
6.5.1- Introdução	51
6.5.2- Cálculo para o conjunto crítico com envoltório de óxido de urânio	52
6.5.3- Cálculo para o conjunto crítico com envoltório de tório.....	56

6.6 - Análise dos resultados.....	56
6.6.1- Incertezas nos Índices Espectrais.....	69
7. <u>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</u>	75
7.1 - Conclusões.....	75
7.2 - Recomendações.....	77

APÊNDICES

A : Estrutura dos grupos de energia

B : Composições do G.C.F.R. de referência

C : Secções de choque efetivas de absorção e fissão dos isótopos férteis dos envoltórios radiais em 30 grupos de energia

D: Referências

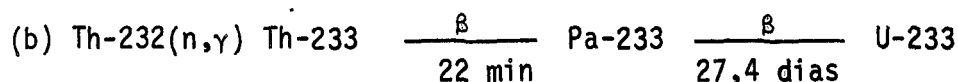
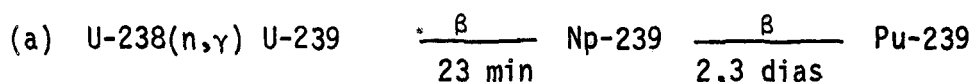
1. INTRODUÇÃO

1.1 - Prefácio

Estudos sistemáticos em vários países, demonstraram que existe um forte incentivo econômico para o desenvolvimento dos reatores rápidos de potência (regeneradores). Atualmente diversas unidades de demonstração comercial na faixa de 200 a 500 MWe estão em operação e cerca de cinco outras iniciarão sua operação até 1.980 /1/.

Basicamente, o incentivo para o desenvolvimento deste tipo de reator, advém das limitadas reservas de urânio físsil e da premente necessidade de desenvolver a tecnologia de utilização dos combustíveis férteis. O reator rápido ("breeder") tem como característica principal a capacidade de regenerar, isto é, produzir mais material físsil do que o próprio consumo.

Nos reatores rápidos, a regeneração de material físsil é conseguida envolvendo-se o carôço ("core") do reator com envoltórios ("blankets") de material fértil. Os isótopos férteis U-238 e/ou Th-232, são convertidos em isótopos físseis Pu-239 e/ou U-233, respectivamente, através das seguintes reações:



A viabilidade técnico-econômica dos reatores rápidos poderá ser melhor definida calculando-se o desempenho neutrônico desse tipo de reator através de dados

nucleares obtidos de unidades críticas. Atualmente, existe no mundo diversos programas experimentais sendo levados a efeito em unidades críticas, para a geração de constantes nucleares e aperfeiçoamento dos métodos de cálculo.

As secções de choque, até o presente, não são conhecidas com precisão suficiente para dispensar as verificações experimentais. Particularmente, para o envoltório dos reatores rápidos, o conhecimento do espectro de nêutrons e, conseqüentemente, a interação dos nêutrons em uma ampla faixa de energia e fortemente dependente dos efeitos espaciais, influencia significativamente o desempenho neutrônico do reator rápido, o que torna importantíssima a obtenção de dados experimentais.

1.2 - Objetivo do trabalho

A Coordenadoria de Engenharia Nuclear do Instituto de Energia - Atômica (I.E.A.) , presentemente, estuda, a viabilidade técnica de um conjunto térmico-rápido acionado por um carôço térmico e capaz de simular um carôço de reator rápido a ser montado no Reator de Potência Zero /2/ . Evitando a utilização de grandes massas de material físsil, próprio dos conjuntos críticos rápidos, esta unidade térmico-rápida, acionada por um carôço térmico, permitirá o estudo da fenomenologia associada aos envoltórios de reatores rápidos (G.C.F.R. Gas Cooled Fast Reactor, e L.M.F.B.R., Liquid Metal Fast Breeder Reactor) com dispêndios associados aos combustíveis nucleares similares aos das unidades críticas térmicas (massas críticas de até duas ordens de magnitude menores e estimativas de investimentos em material físsil 30 vezes menores) e grande vantagem sob o ponto de vista de segurança proveniente da não utilização do plu -

tônio e de controle próprio dos reatores térmicos.

O espectro de nêutrons, a distribuição espacial de fluxo e da potência, taxas de produção de plutônio e transmissão de nêutrons são alguns dos parâmetros físicos dos envoltórios dos reatores rápidos que podem ser analisados em condições operacionais realísticas com este sistema. Os resultados poderão ser usados para aperfeiçoar análises e projetos de outros tipos de envoltórios, além dos classicamente usados para os futuros reatores rápidos regeneradores.

Durante a última década os trabalhos de pesquisas e desenvolvimento na área da física dos reatores rápidos, segurança e ciclo de combustível, concentraram-se principalmente na região do carvão. Estudos experimentais de parâmetros tais como, massa crítica, taxa de regeneração, distribuição de potência e parâmetros relacionados com a segurança desses reatores envolvem o uso de grandes quantidades de plutônio como combustível. Reatores de Potência Zero (R PZ) tais como ZPR (Zero Power Reactor) /3/, ZPPR (Zero Power Plutonium Reactor) /4/ e os reatores experimentais regeneradores como EBR-II (Experimental Breeder Reactor)/5/ e EFR (Enrico Fermi Fast Reactor) /6/, foram construídos para aperfeiçoar esses parâmetros. Grande parte dos trabalhos de pesquisas experimentais relacionadas com o carvão dos reatores rápidos foram feitos no Laboratório Nacional de Argonne (E.U.A.) e outros laboratórios especiais por causa do custo relativamente alto e da segurança envolvida com o uso do plutônio como combustível.

As pesquisas relativas aos envoltórios destes reatores foram relegadas a um segundo plano dado o fato que o desempenho dos envoltórios não constituíam fatores de primordial importância para a economicidade dos primeiros reatores rápidos. Entretanto, comprovada a eficiência e a viabilidade desses primeiros reatores, e tendo em vista que os primeiros reatores rápidos comerciais

começarão a ser construídos, o estudo dos envoltórios tornou-se prioritário pela sua influência na economia dos reatores comerciais.

O objetivo do presente trabalho é o de verificar a viabilidade técnica de se construir um conjunto térmico-rápido acionado por um carôço térmico, cercado radialmente por um anel conversor (térmico para rápido) de nêutrons, de tal forma que este conjunto simule o carôço de um reator rápido.

Para o envoltório ("blanket") e o refletor reproduz-se uma geometria próxima ou igual a configuração real do sistema. Esta viabilidade se traduz na verificação de três parâmetros:

1. O espectro de nêutrons na interface entre o carôço "térmico - rápido" e o envoltório deve reproduzir o espectro existente na interface entre o carôço rápido e o envoltório de um reator rápido típico.
2. O fluxo de nêutrons existente no envoltório deve ser suficientemente alto para ser utilizados nas experiências.
3. O conjunto deve ser factível de ser construído, mecanicamente.

O projeto mecânico desse conjunto a ser montado sobre as mesas do Reator de Potência Zero do I.E.A. não foi objeto desse estudo, contudo, pode-se deduzir de imediato que sua construção não apresentará maiores problemas.

Tomou-se o reator G.C.F.R. para os cálculos de viabilidade deste

estudo dado a existência de dados técnicos quase completos desse reator no Instituto de Energia Atômica, contudo, a metodologia empregada é perfeitamente aplicável aos L.M.F.B.R.

1.3 - Estudos anteriores

Nos estudos para o desenvolvimento dos reatores rápidos, considerável esforço tem sido dispendido em física experimental. As pesquisas têm sido desenvolvidas em unidades críticas de baixa potência tais como ZPR-III, ZPR-VI, VERA, ZEBRA, MASURCA e SNEAK /7/, e em alguns sistemas subcríticos como CHEZEM'S /8/, SUAK e HARMONIE /9/.

Para a maioria desses sistemas, as pesquisas são orientadas para a região do carôço, e relativamente poucas pesquisas foram realizadas na região do envoltório, isto porque tais sistemas ou não possuíam envoltórios ou então se utilizaram de aproximações grosseiras para a simulação de envoltórios reais.

Em 1969, o Massachusetts Institute of Technology /10/ projetou e construiu um sistema composto de uma placa conversora (1,99% de U-235) e uma região com anidrido borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), acionado pela coluna térmica de grafita do seu reator de pesquisa de 5 MW.

A mistura de anidrido borax contém oxigênio e ferro (constituintes típicos dos envoltórios). Simulam-se assim as propriedades neutrônicas do urânio, com ferro e boro de maneira que o espectro de nêutrons e a distribuição espacial - dos mesmos tornam-se similares aos de um "blanket" real de um L.M.F.B.R. Atualmente

te esse sistema está sendo modificado, com a substituição do "blanket" simulado por um "blanket" real de um G.C.F.R.

Estudos mais recentes desenvolvidos na Universidade de Purdue /11/, utilizaram-se de um sistema subcrítico onde o urânio com enriquecimento de 1,3% são os elementos constituintes do envoltório.

Na essência, a configuração deste sistema subcrítico é similar a de um típico L.M.F.B.R., mas com o raio do carôço reduzido de 100 para 22 cm. Na sua primeira versão, a fonte acionadora deverá ser de Pu-Be, entretanto, outras fontes (ou um gerador de nêutrons) poderão ser usadas desde que o sistema seja convenientemente modificado. Neste estudo, concluiu-se que a utilização deste sistema, oferece um considerável potencial de pesquisa teórico-experimental.

O conjunto crítico térmico-rápido do I.E.A. seria o primeiro deste gênero no qual a geometria real ("engineering mockup") de envoltórios de reatores rápidos poderia ser reproduzida integralmente incluindo-se o efeito dos refletores e de blindagens térmicas, possibilitando-se assim a determinação de parâmetros de neutrônica e blindagem para projetos de reatores rápidos sem os altos investimentos exigidos em combustível e em segurança, próprios das unidades críticas totalmente rápidas.

2. O REATOR DE POTÊNCIA ZERO DO I.E.A.

2.1 - A Unidade crítica

O Reator de Potência Zero (RPZ) do Instituto de Energia Atômica pretende servir basicamente de instrumento para o estudo dos sistemas nucleares moderados por grafita e regeneradores de combustível por intermédio do ciclo de tório. Apesar dos seus objetivos extravasarem o estudo puro e simples dos reatores moderados por materiais sólidos e dos reatores rápidos regeneradores, foram estes, claramente que inspiraram a sua concepção.

Pretende-se estudar a neutrônica dos componentes do cerne do reator, de forma e tamanho realísticos, para sistemas os mais variados (por exemplo, de reatores de alta temperatura, reatores moderados por óxido de berílio, reatores rápidos, etc.). A característica básica do RPZ é a sua flexibilidade - como instrumento de formação de recursos humanos e de pesquisa e desenvolvimento.

A configuração mecânica escolhida foi a do tipo mesa partida ("Split-table"): o carôço do reator é constituído de duas partes separadas, verticalmente posicionadas, das quais uma é móvel e capaz de deslizar sobre um suporte horizontal; as partes verticais, denominadas "mesas", são preparadas para uma experiência de criticalidade, separadamente, carregando-se cada uma delas com a metade da massa crítica e, a criticalidade do conjunto é atingida pela junção da parte fixa com a móvel, movimentada sobre a cama em que ambas repousam. A Fig. 2.1 esclarece o projeto mecânico da Unidade crítica.

Dois programas experimentais de medidas de parâmetros de física

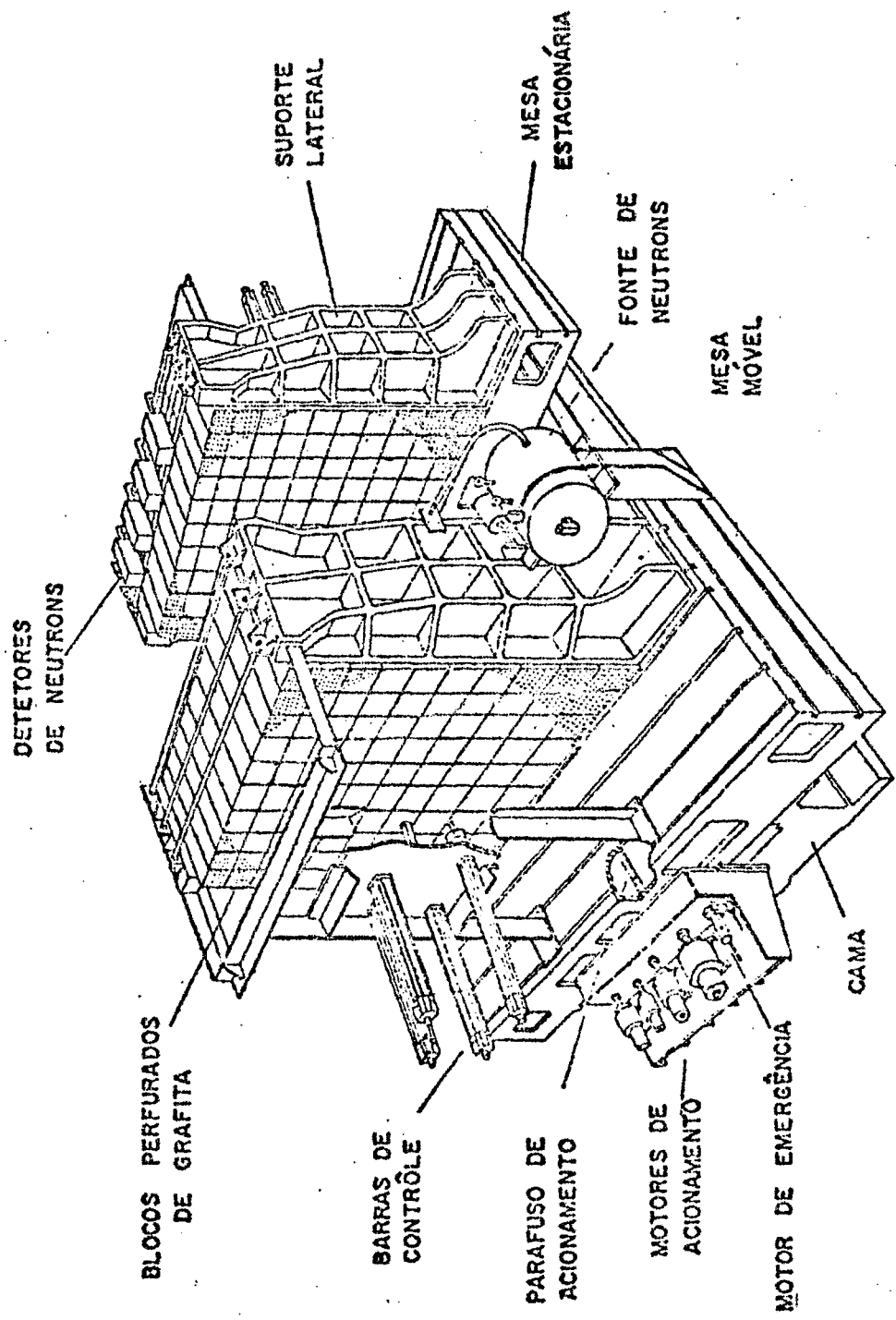


FIG. 2.1 VISTA GERAL DO RPZ

de reatores estão sendo considerados no momento:

1. "Modelo" de uma região típica de um reator de alta temperatura.
2. "Modelo" de envoltório de Tório metálico ou Urânio empobrecido de um reator rápido acionado por um carôço térmico central cercado por um anel conversor.

Para as experiências em um conjunto crítico simulando uma região típica de um reator de alta temperatura /2/, o fluxo assintótico de nêutrons será obtido numa região central, acionado por um anel térmico - exterior. Contudo é mister salientar que o projeto da matriz de grafita terá como objetivo possibilitar a simulação do carôço com grande variação dos parâmetros C/U (razão atômica de carbono e urânio) e C/Th (razão atômica de carbono e tório), suficientes para cobrir todas as composições existentes nos reatores desse tipo.

2.2 - O Conjunto térmico-rápido

Para as experiências com o "envoltório" de tório (e/ou urânio) será utilizado um carôço térmico central cilíndrico moderado por grafita e cercado por um anel conversor contendo urânio enriquecido (2%) que terá função de converter a energia média dos nêutrons, de térmica para rápida, de tal forma que, o conjunto carôço térmico-anel conversor-filtro , agirã como uma fonte de nêutrons rápidos, simulando o carôço de um reator rápido. Ao redor desse sistema será montado o envoltório. Uma descrição detalhada do conjunto "carôço térmico- anel conversor-filtro " será feita no Capítulo 4.

2.3 - As Finalidades da Unidade crítica

Esboçadas as linhas gerais da concepção da unidade crítica , é oportuno esclarecer as razões que levaram o Instituto de Energia Atômica de construí-la:

- a. A unidade crítica é um instrumento indispensável para o treinamento básico dos operadores e físicos de reatores. Por meio dela se adquire a experiência necessária para a compreensão profunda dos fenômenos e teorias e das técnicas de medida , - que nenhuma discussão " à priori" permite alcançar.
- b. Os dados experimentais dos reatores conversores térmicos e rápidos, imprescindíveis à verificação dos métodos de cálculo , a determinação das secções de choque, e à análise das várias situações comuns aos projetos de engenharia estão - ainda longe de serem exauridas.
- c. Os reatores conversores baseados no ciclo do tório apresentam especial interesse econômico para o Brasil, cujas extensas reservas de minério de tório são comprovadas. A unidade crítica serviria de instrumento prático inestimável para se formular uma estratégia energética, com ênfase particular na elaboração de uma tecnologia própria para o combustível nuclear.
- d. Uma unidade crítica é sempre o laboratório adequado para as idéias originais implicadas no projeto de novos reatores e nas

modificações dos já existentes. Ela é, por excelência, o campo de prova da imaginação do pesquisador, que poderá submeter suas concepções ao teste experimental, antes de pretender concretizá-las apoiado em bases puramente conjecturais ou teóricas.

3. O REATOR G.C.F.R. DE REFERÊNCIA

3.1 - Introdução

Neste capítulo, será feita uma descrição do reator GCFR escolhido como modelo de comparação. A razão da escolha do GCFR como modelo para os cálculos provem do interesse do Instituto de Energia Atômica, mais particularmente, da Coordenadoria de Engenharia Nuclear, em estudos de reatores refrigerados por gás e da disponibilidade de dados desse reator.

O modelo utilizado foi o GCFR protótipo de 300 MWe projetado pela General Atomic e a sua descrição detalhada pode ser encontrada na referência /12/.

O projeto do GCFR protótipo é baseado no ciclo urânio-plutônio. A Fig. 3.1 mostra em perspectiva todo o sistema G C F R, e na Tabela 3.1 as principais características físicas do reator demonstração.

3.2 - Enriquecimento do carvão

O enriquecimento médio do carvão determina a taxa de conversão interna, o qual fixará a perda da reatividade que acompanha a queima do combustível. A escolha do enriquecimento médio 17% de plutônio físsil proporciona

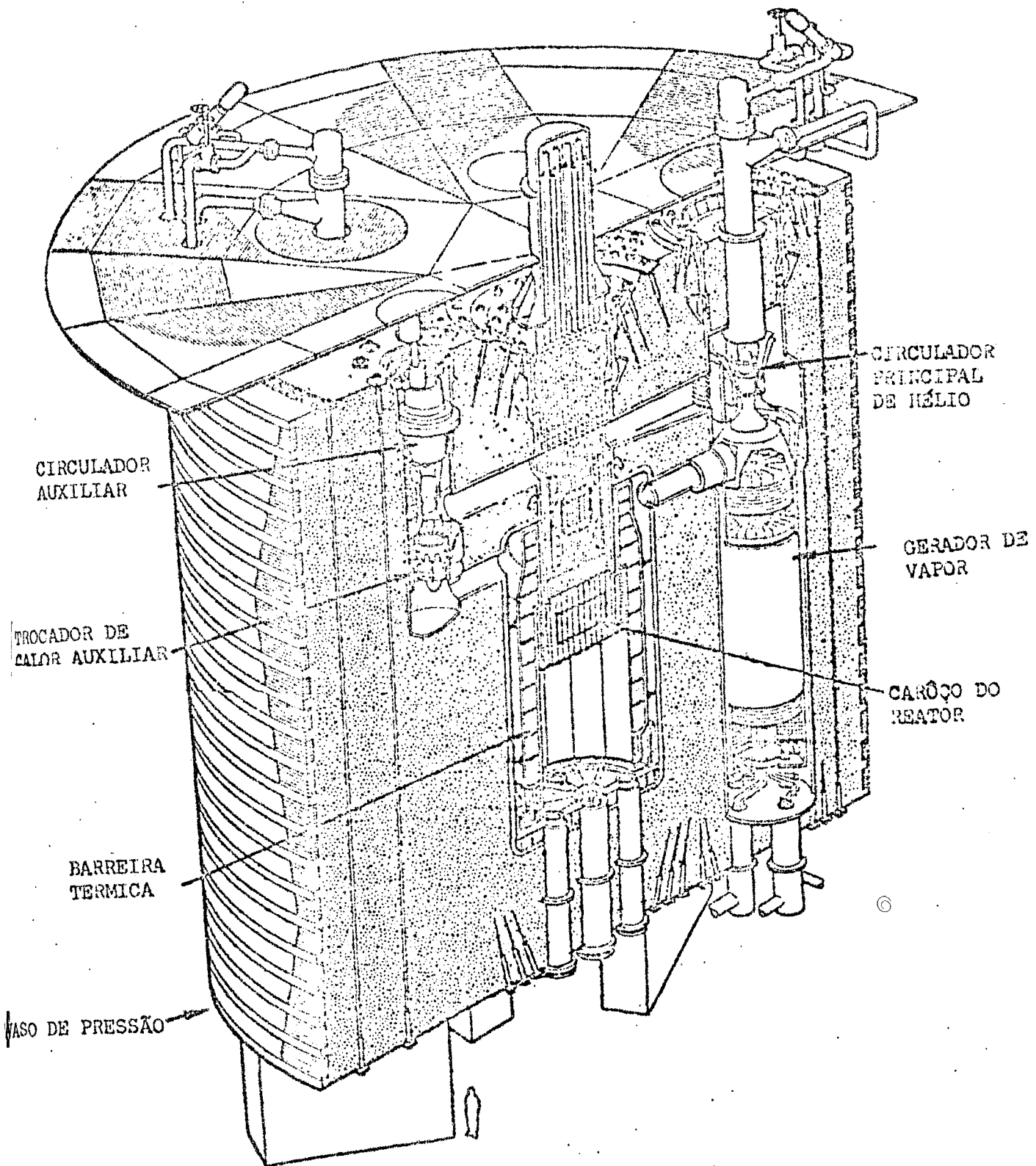


Fig. 3.1 Perspectiva do GCFR protótipo

uma perda de reatividade entre as recargas que resulte em condições aceitáveis de controle. A dimensão do carvão, forma e fração de volume do combustível foram escolhidos sob o ponto de vista da termodinâmica, da transferência de calor e da economia.

A distribuição da potência foi obtida pela subdivisão do carvão em quatro zonas de enriquecimento. Estas zonas estão mostradas na Fig. 3.2, e as características de cada zona, estão resumidas na Tabela 3.2.

3.3 - Descrição do envoltório

O envoltório do reator foi projetado com vista ao aspecto econômico e custo capital associado com o aumento da dimensão da cavidade do vaso de pressão. O combustível, sua densidade, espessura, frequência e modo de recarga representam os principais parâmetros a serem estudados.

Os cálculos demonstraram /13/ que a taxa de regeneração de 1,40 pode ser obtida com um envoltório radial de 3 linhas de aproximadamente 50 cm. Entretanto, uma avaliação econômica de 3 linhas versus 2 linhas, indicaram que um envoltório de 3 linhas com urânio empobrecido (0,2%) não é vantajoso, ao passo que um envoltório de 3 linhas de óxido de tório é muito vantajoso. Portanto, o projeto do envoltório tem-se dirigido para 3 linhas de óxido de tório ou 2 linhas de urânio. Estudos recentes /14/ mostraram que o uso de tório metálico no envoltório radial do GCFR protótipo é uma alternativa bastante favorável sob o ponto de vista neutrônico. O tório metálico mostrou-se sobremaneira vantajoso no que se refere a produção de material físsil.

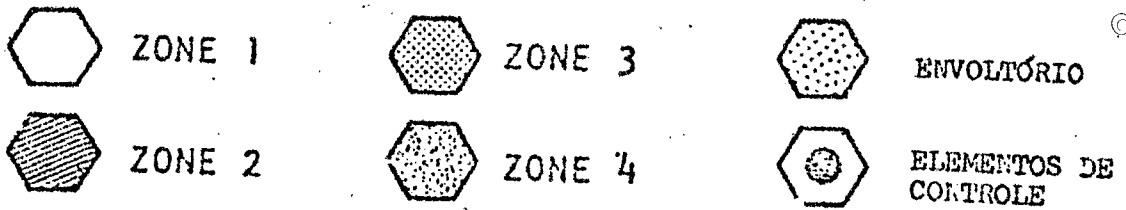
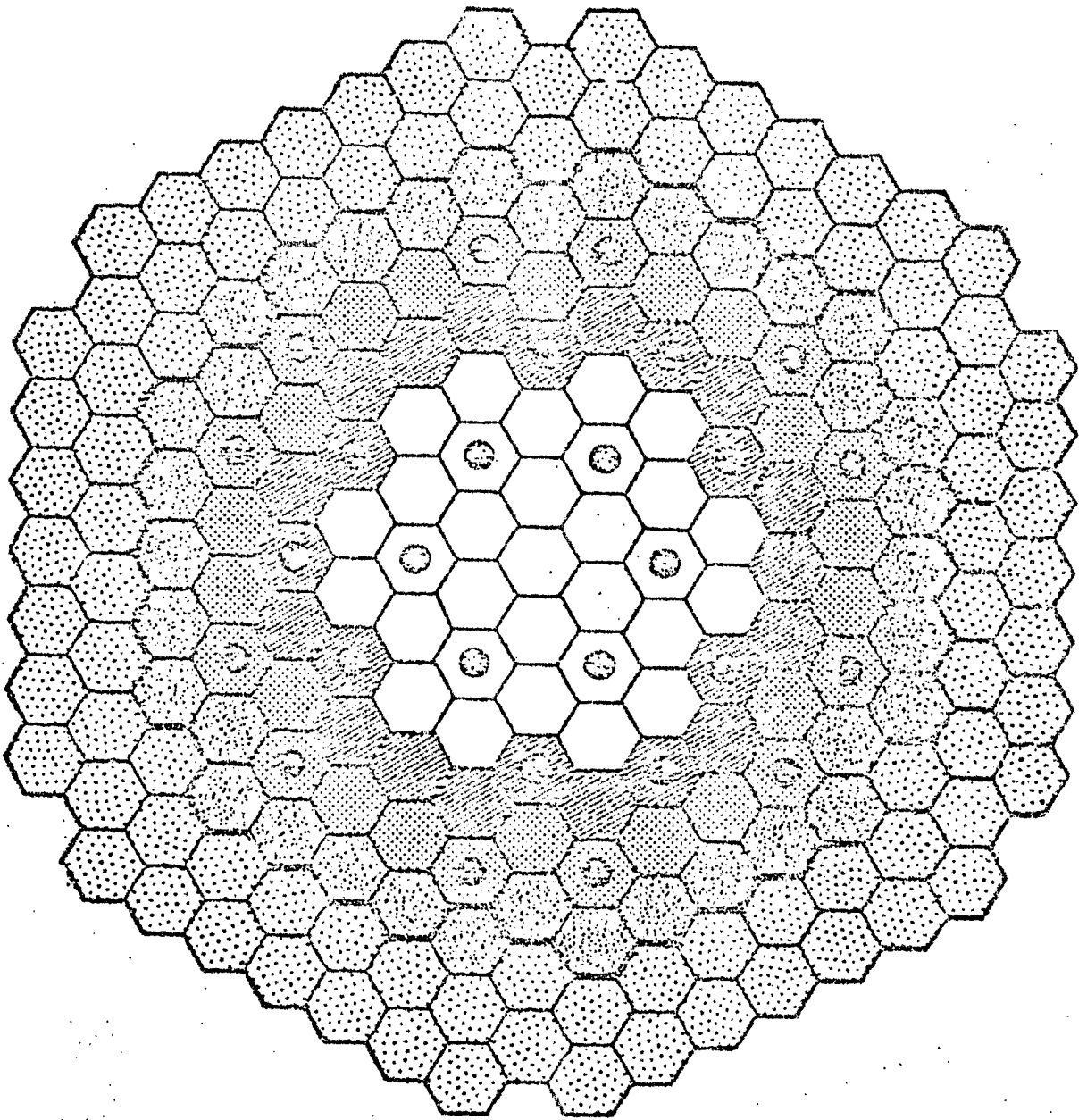


Figura.3.2 - Secção horizontal do reator a altura do caroço

TABELA 3.1 - Características físicas do Reator GCFR de Demonstração

Potência térmica do reator	830,0 MW(t)
Altura do carôço ativo	100,5 cm
Diâmetro ativo do carôço.....	200,9 cm
Volume do carôço.....	3200,0 litros
Razão do comprimento para diâmetro do carôço.....	0,5 cm
Espessura do envoltório axial.....	45,0 cm
Espessura do envoltório radial.....	33,0 cm
Número de elementos combustíveis padrões no carôço.....	91
Número de elementos de combustíveis padrões de contro- le.....	27
Número de elementos no envoltório.....	93
Ciclo de recarga	1 ano
Potência elétrica bruta.....	300 MW(e)
Eficiência do reator.....	36 %

TABELA 3.2 - Descrição das Zonas do Reator G. C. F. R.

	<u>Zona 1</u>	<u>Zona 2</u>	<u>Zona 3</u>	<u>Zona 4</u>
Número de elementos.....	31	24	30	33
Número de elementos de controle....	6	9	12	-
Fração de volume do combustível (em cada zona).....	0,2785	0,2714	0,2705	0,2861
Raio equivalente, cm.....	51,49	68,54	85,26	100,46
Volume , litros.....	836,70	645,90	811,60	890,90
Razão U/Pu.....	4,24	3,37	2,81	2,17
Enriquecimento físsil (%).....	13,2	15,8	18,10	21,80

3.4 - Elementos de combustível do carôço e envoltório

O carôço contém um total de 118 elementos de combustível, 91 dos quais são elementos padrão e 27 são de controle, cercados por 93 elementos do envoltório radial. Uma secção geométrica destes 3 tipos de elementos estão mostrados na Fig. 3.4. O elemento de combustível padrão contém 271 barras de combustíveis, com uma abertura de 0,07 mm entre o combustível e o encamisamento. Nos projetos atuais do GCFR, as pastilhas ("pellets") de combustível têm uma cavidade central cujo diâmetro é 20% do diâmetro da pastilha. Esta cavidade reduz a temperatura na linha do centro e fornece um curso para os produtos de fissão gasosos mover-se para o sistema de ventilação, na parte superior dos elementos. As dimensões das barras de combustível do carôço estão na Tabela 3.4.

3.5 - Frações de volume e composição do reator

A fração de volume para as quatro zonas do carôço e do envoltório estão mostradas na Tabela 3.5. Estes valores são baseados no número e localização das barras de controle indicadas na Tabela 3.2 e mostradas na Fig. 3.4. A densidade do óxido diluído é 87% da densidade teórica no carôço e 91,2% no envoltório (a densidade teórica é tomada como sendo 10,97g/cm³ para o UO₂ e 11,46 g/cm³ para o PuO₂). Todos os cálculos do GCFR foram feitos com programas de difusão bi-dimensional usando-se as densidades atômicas listadas no Apêndice C, e o modelo do reator cilindrizado (1/4) está mostrado na Fig. 3.5.

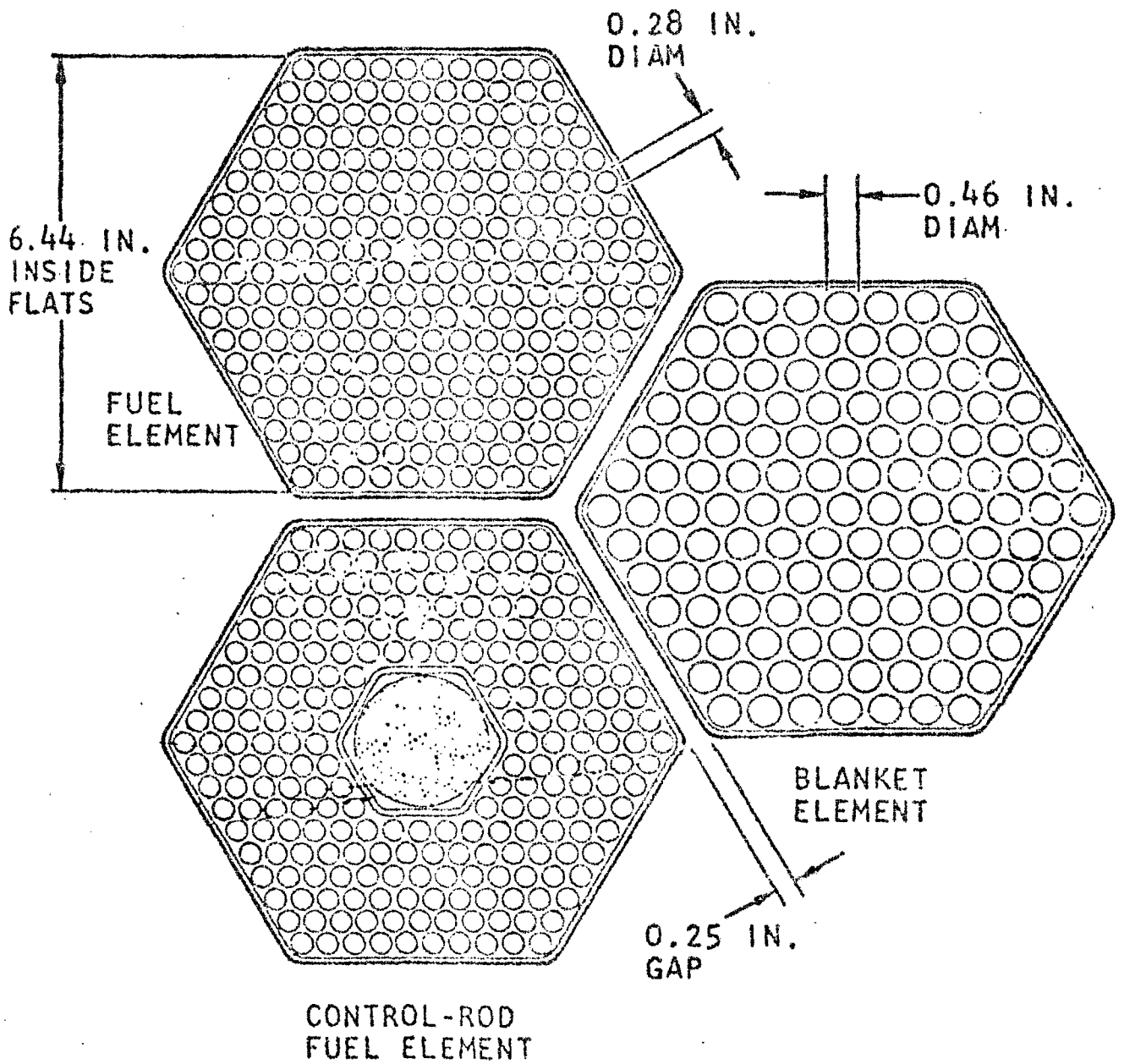


FIG. 3.4 - Elementos combustíveis

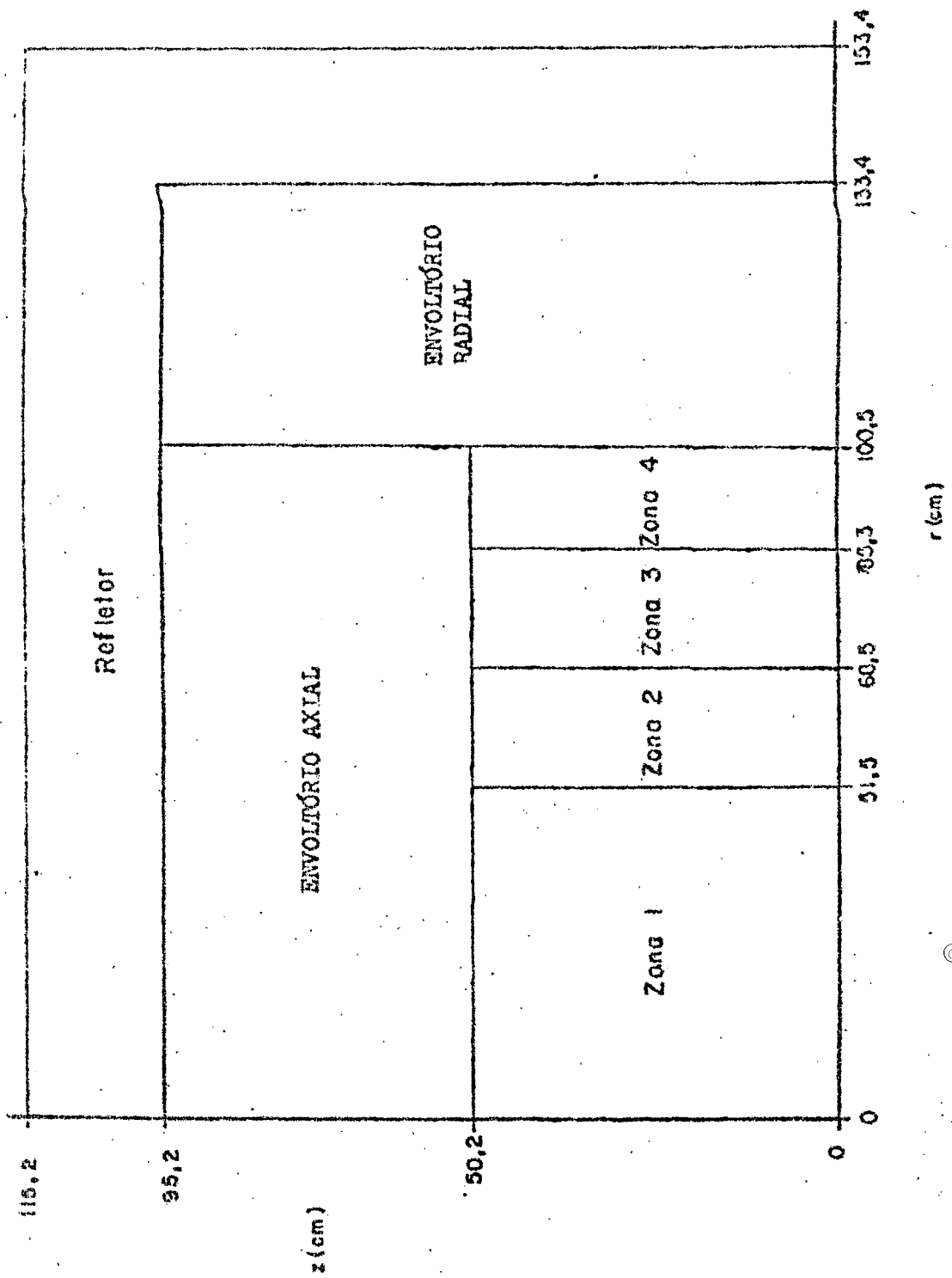


FIG 3.5 - Dimensões de um quório do reator cilindrizado equivalente ao CGFR de 300MW (e)

TABELA 3.4 - Geometria dos elementos de combustível

Espaçamento centro a centro (triangular).....	9,80 mm
Diâmetro da barra.....	7,16 mm
Espessura do encamisamento.....	0,47 mm
Razão diâmetro externo/ diâmetro interno.....	1,15 mm
Diâmetro externo da pastilha do combustível	6,10 mm

TABELA 3.5 - Frações de volume do carôço e envoltório

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Envoltório radial
Combustível.....	0,2785	0,2714	0,2705	0,2861	0,4257
Refrigerante (Hélio).....	0,4475	0,4385	0,4372	0,4573	0,3497
Encamisamento (316 SS).....	0,0977	0,0953	0,0949	0,1004	0,0906
Estrutura (316 SS)	0,0627	0,0652	0,0656	0,0601	0,0571
Vazios.....	0,1001	0,1036	0,1043	0,0961	0,0769
Controle (B ₄ C +C)	0,0134	0,0258	0,0276	-	-
Total de refrigerante + vazio.....	0,5476	0,5423	0,5415	0,5534	0,4266
Total de espaço preenchido...	0,4254	0,4577	0,4585	0,4466	0,5734

4. SIMULAÇÃO DO CARÔÇO DE UM REATOR RÁPIDO

4.1 - Introdução

Como frisamos no início deste trabalho , o objetivo é a simulação do carôço de um reator rápido de tal maneira que o espectro na interface do envoltório no conjunto térmico-rápido, seja aproximado do espectro na interface do envoltório cerne do GCFR. Para isso, utilizaremos de um carôço térmico central cilíndrico moderado por grafita, cercado de um anel contendo urânio enriquecido (2%) e de um filtro para os nêutrons térmicos. O conjunto "carôço térmico-anel conversor-filtro" agirã como uma fonte de nêutrons rápidos, ao redor do qual o envoltório será instalado.

Neste capítulo apresentaremos a descrição de cada componente - deste conjunto . As Figuras 4.1a e 4.1b mostram uma representação esquemática do reator rápido (GCFR) e do conjunto crítico.

4.2 - Descrição do conjunto "Carôço térmico-Anel conversor-Filtro"

4.2.1 - O Carôço térmico

Para o carôço térmico, foi adotado a estrutura básica definida por Ferreira e Hukai /2/ para uma unidade crítica moderado por grafita e descrita em detalhes na citada referência. Uma síntese desta descrição é feita a seguir.

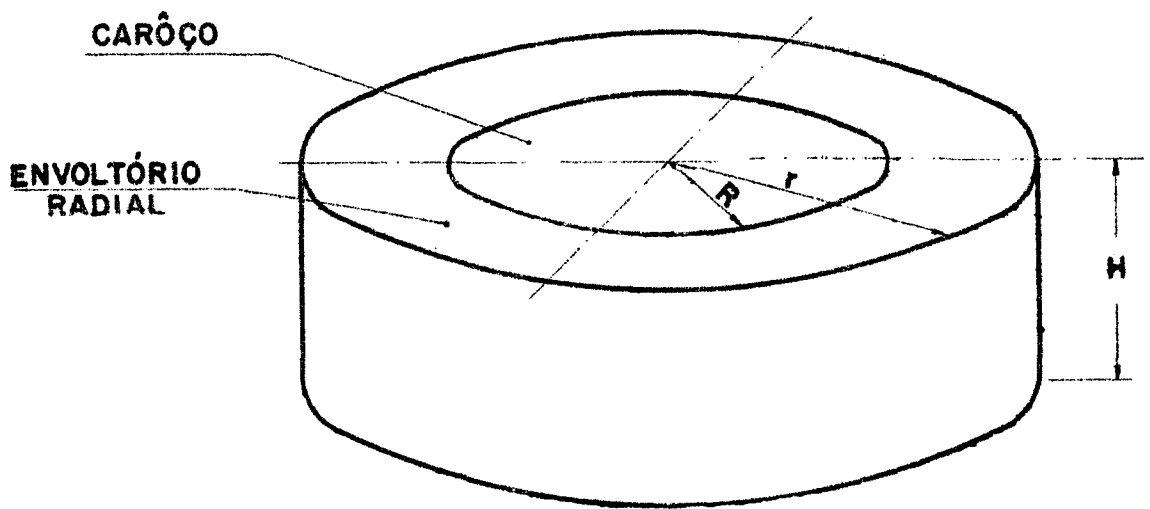


FIG. 4.1a = REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA EM GEOMETRIA CILÍNDRICA DO G.C.F.R. ©

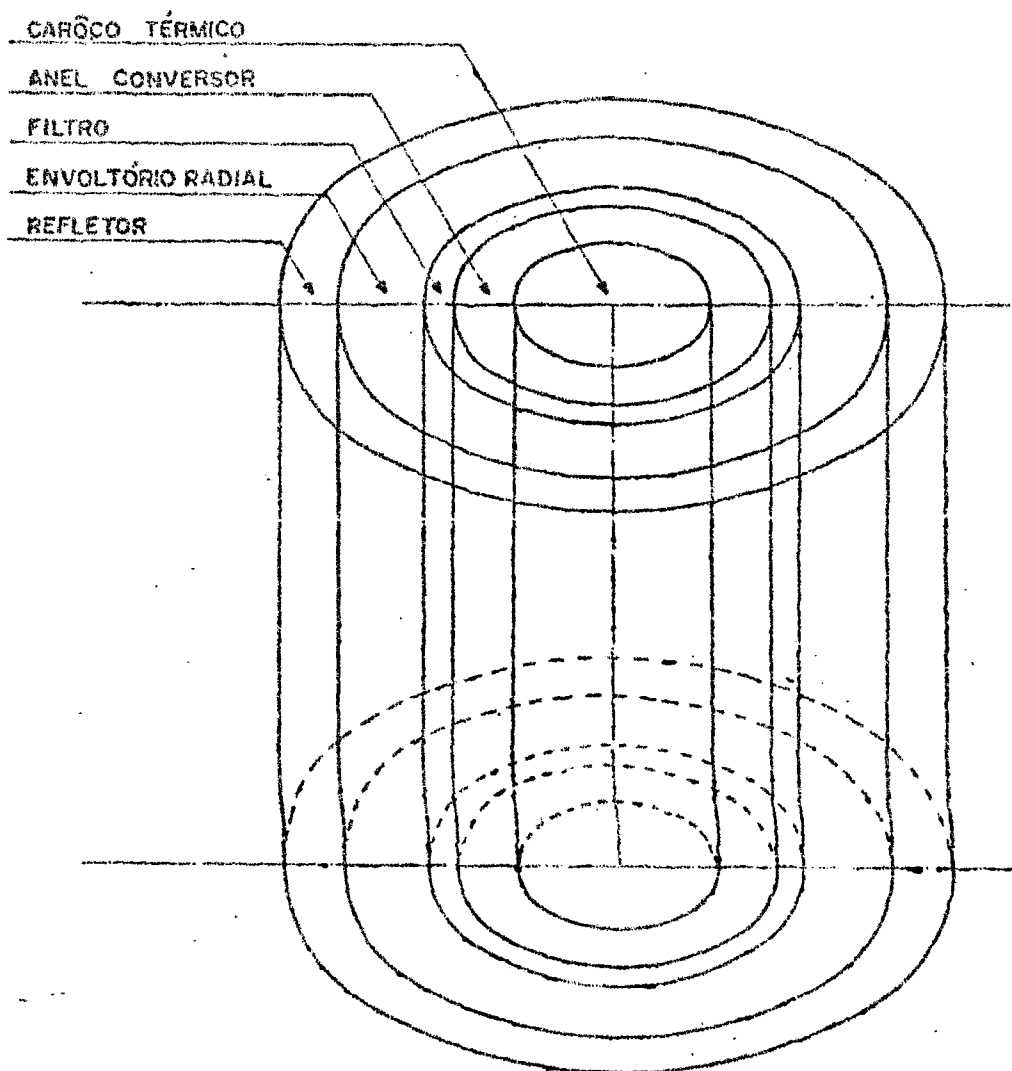


FIG. 4.1b • REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA EM GEOMETRIA CILÍNDRICA DO SISTEMA CRÍTICO

O carôço térmico é edificado pela superposição de blocos de grafita com forma de paralelepípedos que desempenham, tanto a função de moderador, como de suporte para os elementos combustíveis. Sendo os blocos de grafita estruturais de forma quadrada, um arranjo quadrangular como ilustrado na Fig. 4.2.1, será a maneira mais uniforme de distribuir os buracos. Os blocos ficarão divididos por um reticulado cuja célula unitária é um pequeno quadrado de lado a .

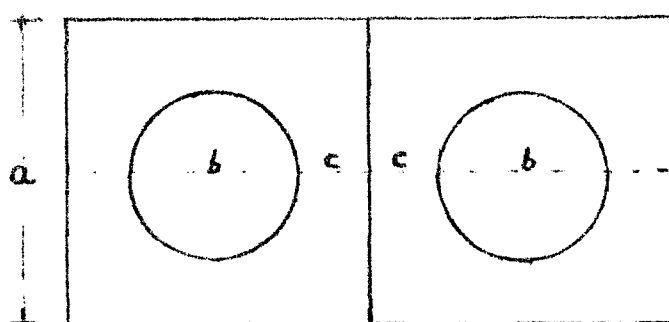


Fig. 4.2.1 - Célula unitária do carôço térmico.

Contendo no centro um canal de diâmetro b , com uma espessura mínima de $2c$ entre os bordos dos canais adjacentes.

Um dos parâmetros que influencia a flexibilidade de composição do carôço térmico é a fração da área perfurada f . A escolha de f foi feita com o compromisso entre duas determinações conflitantes; quanto maior a fração de volume disponível no carôço térmico para a alocação das barras de combustível, maior é a flexibilidade das composições; quanto menor a fração da área ocupada pela secção transversal da barra absorvedora, menores serão as múltiplas consequências de heterogeneidade no comportamento neutrôni-

co do reator.

A fração da área perfurada é dado por:

$$f = \frac{\pi(b/2)^2}{a^2} = 0,785 (b/a)^2$$

Procurando, de início, aumentar f ao máximo, o único impedimento ao crescimento da área transversal dos canais é representado pela espessura da grafita de separação dos orifícios $2c$, ou destes para as fronteiras do bloco c . Não é mecânicamente possível obter $c < 3$ mm, quer pelos limites de tolerância impostas pelos dispositivos de perfuração dos blocos, quer pela resistência da matriz ao processo de abertura dos buracos. Quanto a dimensão lateral da célula, não é conveniente tomá-la inferior a 3 cm, que é aproximadamente o livre percurso médio dos nêutrons térmicos no carbono. Neste projeto preliminar tomamos como medidas, $a = 3,0$ cm, $b = 1,60$ cm e $c = 7,0$ mm. Estes valores permitem obter um coeficiente de volume perfurado: $f = 0,22$.

⑥

Outro parâmetro que afetará o grau de heterogeneidade do RPZ, notadamente pelos efeitos de autoblindagem de absorção é a concentração dos isótopos pesados.

Os critérios adotados por Ferreira e Hukai na obtenção dos parâmetros de construção do carvão térmico foram os seguintes: obtenção de espectros tão submoderados quanto possível, o que significa, mínimos valores -

das relações carbono/físsil e carbono/fértil; maximização do volume dos vãos entre as barras e os furos; máximo alcance das razões C/Th e C/U, porém, dentro dos valores estipulados para os reatores de alta temperatura.

Dentre as múltiplas alternativas estudadas pelos autores - daquele trabalho, escolhemos o carôço térmico com a razão C/U igual a 7582 dado o fato de exigir a menor massa crítica. As características principais da célula típica são mostradas na Tabela 4.2.1 .

4.2.2 - O Anel conversor - Filtro

Para o anel conversor adotou-se a estrutura mecânica do sistema térmico-rápido do MIT, conforme descrito na Ref. /10/. Este anel, que envolve o carôço térmico, terá a função de converter a energia média dos nêutrons de térmica para rápida. Ele é constituído de um arranjo compacto de barras cilíndricas de meia polegada de diâmetro com uma camisa de alumínio de 0,030 polegadas de espessura, contendo óxido de urânio (UO_2) com um enriquecimento de 2,0% e densidade de $10,5 \text{ g/cm}^3$.

O filtro tem a finalidade de absorver os nêutrons térmicos - provenientes do cerne térmico em direção ao exterior, limitando a contribuição dos nêutrons térmicos para o espectro dos nêutrons de penetração na interface com o envoltório.

Este filtro poderá ser de cádmio ou de uma liga de carbeto de boro (B_4C) e alumínio, dependendo da facilidade de obtenção desses materiais

TABELA 4.2.1 - Especificação da rede do carôço térmico

Diâmetro dos furos.....	1,60 cm
Distância centro a centro dos furos.....	3,00 cm
Enriquecimento do combustível.....	93,0 %
Concentração de U-235 na barra de combustível.....	0,08 g/cm ³
Razão atômica (C/U-235)	7582
Espessura da camisa de Alumínio.....	0,38 mm

e do desempenho neutrônico, mas havendo fortes argumentos de ordem econômica para utilizarmos somente a liga de B_4C e Al dado o seu baixo custo em relação ao Cd. Um diagrama esquemático do arranjo "anel conversor-filtro" é mostrado na Fig. 4.2.2.

4.2.3 - Envoltório e Refletor

Procurou-se manter as mesmas dimensões e composição do envoltório e do refletor de nêutrons do GCFR de referência.

Estes são os envoltórios de urânio empobrecido (0,2%) e de tório com espessura de 32,0 cm e o refletor de ferro com 20,0 cm. A composição destes envoltórios estão descrito no Apêndice B.

A Tabela 4.2.3 dá as composições isotópicas (átomo/barn x cm) dos núclídeos constituintes do arranjo "caroço térmico-anel conversor-filtro".

Finalmente especificadas as composições do sistema, estamos preparados para iniciar o cálculo das secções de choque e num segundo passo o da criticalidade, os quais serão descritos no capítulo seguinte.

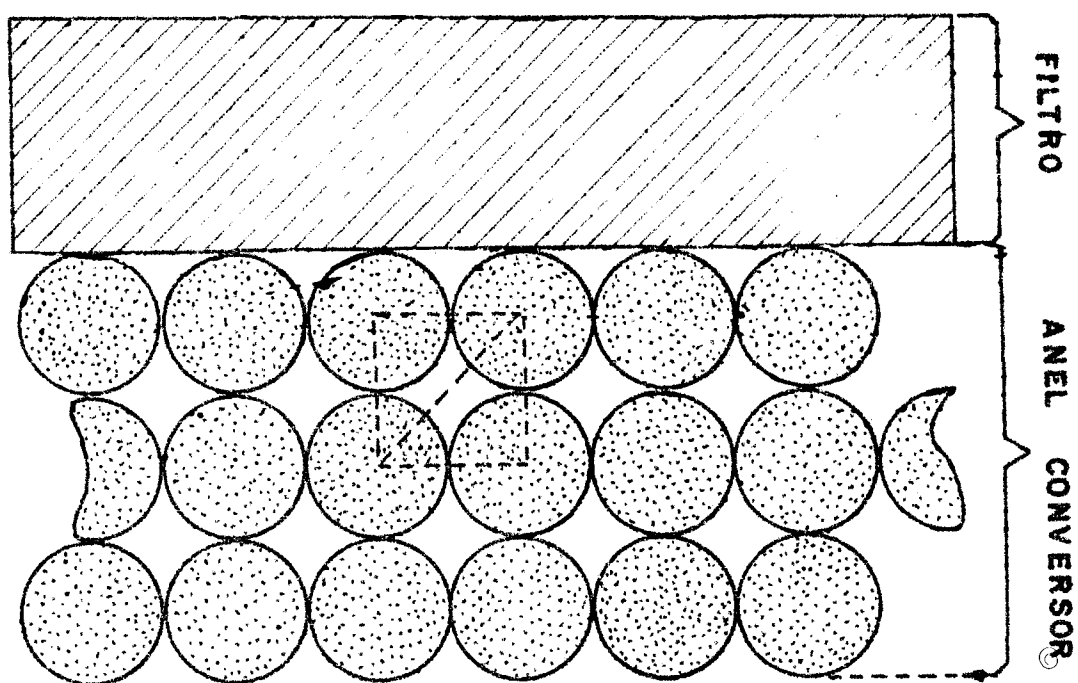


Fig. 4.2.2 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO ARRANJO ANEL CONVERSOR - FILTRO.

TABELA 4.2.3 - Densidade atômica do arranjo "carôço térmico-anel conversor-filtro"

Isótopo	Densidade Atômica $\frac{\bar{a}tomos}{barn \times cm}$		
	Carôço térmico	Anel conversor	Filtro
U-235	$8,731 \times 10^{-6}$	$4,113 \times 10^{-3}$	-
U-238	$6,751 \times 10^{-7}$	$1,645 \times 10^{-2}$	-
C	$8,287 \times 10^{-2}$	-	$6,560 \times 10^{-3}$
O	-	$4,114 \times 10^{-2}$	-
Al	$9,765 \times 10^{-4}$	$5,226 \times 10^{-2}$	$4,426 \times 10^{-2}$
B	-	-	$2,623 \times 10^{-2}$
Cd	-	-	$4,635 \times 10^{-2}$ ©

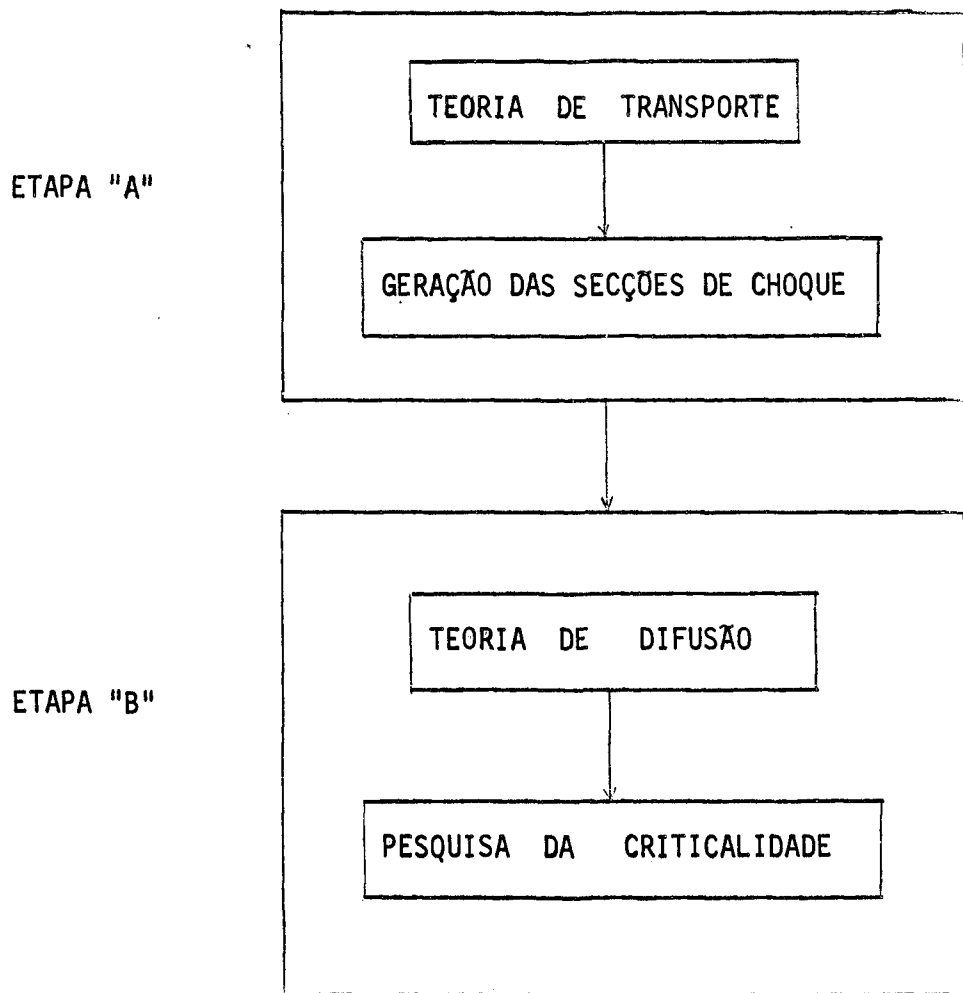
5. MÉTODOS DE CÁLCULO

5.1 - Introdução

O cálculo da criticalidade de um reator compreende normalmente duas etapas, a saber, a determinação dos parâmetros microscópicos e o estudo macroscópico do sistema. Por esse último entendemos, principalmente, o cálculo da massa crítica, das dimensões do sistema e distribuição global do fluxo de nêutrons. Os métodos fazem uso das várias soluções numéricas da equação de difusão. Por outro lado, o estudo microscópico do reator ocupa-se da estrutura fina do fluxo de nêutrons, dos efeitos locais das heterogeneidade e, finalmente, da determinação das secções de choque dos multigrupos, que atuarão como parâmetro de entrada para o cálculo de difusão de nêutrons no reator, como um todo. Esta fase inicial do cálculo da criticalidade somente pode ser conduzida convenientemente por meio da teoria de transporte uma vez que se procura determinar com rigor as taxas de reações nucleares dentro e nas imediações das interfaces de meios heterogêneos em distâncias inferiores e da ordem de uns poucos livres caminhos médios de transporte. O conhecimento das variações das taxas de reações permitirá o cálculo das secções de choque corrigidas dos efeitos da distribuição heterogênea dos elementos absorvedores no carôço e, então, proceder ao estudo macroscópico do reator sob hipótese de que este se constitui de uma ou mais misturas homogêneas dos diversos elementos constituintes (moderador, materiais físséis, férteis e estruturais).

5.2 - Procedimento de cálculo

Os métodos de cálculo utilizados, podem ser resumido em duas etapas , a saber:



Os cálculos foram efetuados tomando-se uma célula representativa de uma região vasta do reator. Esse procedimento de cálculo tem-se mostrado bastante eficaz e econômico em física de reatores. Procurou-se, no presente trabalho adotar esse procedimento, utilizando-se os programas de computação XSDRN /15/ e CITATION /16/, no computador IBM 370/155 do Instituto de Energia Atômica. O desenvolvimento de cada etapa é descrito nas seções seguintes.

5.2.1 - Cálculo das seções de choque do reator

Utilizou-se o programa XSDRN (Seção 5.3) para o cálculo das seções de choque. Este programa, baseado na teoria de transporte - calcula a distribuição espacial dos nêutrons, detalhadamente na célula unitária de cada região do reator.

O programa gera as seções de choque em 123 grupos de energia, utilizando-se em seguida do espectro de nêutrons em cada zona como função ponderadora para condensar as seções de choque de 123 para 30 grupos (Apêndice A) com cada zona possuindo o seu conjunto de seções de choque.

5.2.2 - Cálculo da criticalidade

De posse das seções de choque, estas são levadas ao programa de difusão CITATION (Seção 5.3) para o cálculo do reator como um todo. A utilização deste requer que as várias regiões do reator sejam divididas - por uma malha retangular, em cujas divisões o fluxo é numericamente calculado.

5.3 - Programas utilizados

5.3.1 - X S D R N

O XSDRN é um programa unidimensional de transporte, escrito em linguagem Fortran IV, e é especialmente utilizado para a geração de constantes nucleares nas regiões de energia rápida, ressonante e térmica.

No seu processo de cálculo, inicialmente, ele determina os parâmetros de ressonância e em seguida realiza o cálculo das constantes de multigrupos para utilizá-las em outros programas. Entre suas principais características destacam-se:

- a. Solução direta da equação unidimensional de Boltzman;
- b. Biblioteca de secções de choque em 123 grupos abrangendo energias entre 15 MeV - 0,01 eV ;
- c. Executa cálculos com geometrias cilíndricas, esféricas e retangulares.

5.3.2 - CITATION

O programa CITATION escrito em linguagem Fortran IV, tem por objetivo resolver problemas da teoria de difusão de nêutrons na representação por diferenças finitas. Entre suas principais características destacam-se:

- a. Possibilidade de resolver problemas de até três dimensões;
- b. Cálculo do comportamento temporal do reator;
- c. Vários esquemas possíveis para a administração de combustível.

5.4 - Constantes Nucleares

A incerteza nos cálculos de um reator rápido provém de duas fontes : erros provenientes do método de cálculo e erros dada a imprecisão das constantes nucleares.

As constantes nucleares são, atualmente, as mais importantes causas de incerteza no cálculo de reatores rápidos e, um dos motivos mais comuns deste problema é a inconsistência na normalização das medidas relativas. A faixa de energia coberta pelo espectro destes reatores rápidos de-

pende de um conhecimento melhor das constantes nucleares microscópicas em função da energia o que, infelizmente, não é regra geral. A Tabela 5.4a ilustra, em caráter particular este fato e a Tabela 5.4b extraída da Referência /17/ lista as incertezas nas principais secções de choque dos isótopos U-238 e Pu-239 e dá uma estimativa da incerteza para o futuro destas secções de choque. Finalmente, como reflexo destas incertezas a Tabela 5.4c apresenta uma evolução da estimativa dos principais parâmetros dos reatores rápido.

TABELA 5.4a - Várias medidas de secção de choque de captura do
U-238 para nêutron de 30 KeV (1970)

$\sigma(n,\gamma)$ mb	Autores /18/
470 \pm 38	de Saussure: Weston et al
473 \pm 74	Gibbons et al.
479 \pm 14	Menlove, Ponitz

TABELA 5.4b - Incertezas nas secções de choque atuais e recomendações para futuro*

<u>DADO NUCLEAR</u>	<u>ENERGIA DO NÉUTRON INCIDENTE</u>	<u>INCERTEZA ± %</u>	
		<u>ATUAIS</u>	<u>FUTURO</u>
U-238 $\sigma(n,\gamma)$	100 eV a 1 MeV	10	2
U-238 $\sigma(n,f)$	1 a 10 MeV	6	3
Pu-239 $\sigma(n,\gamma)$	0,1 a 500 KeV	20	3
Pu-239 $\sigma(n,f)$	0,1 KeV a 10 MeV	10	2

* Estimativas para que um determinado número de medidas diferentes sejam aperfeiçoadas nos próximos cinco anos.

TABELA 5.4c - Incerteza nos principais parâmetros físicos de reatores rápidos devido a incerteza nos dados nucleares

<u>Parâmetros</u>	<u>Evolução (b)</u>		
	<u>1966</u>	<u>1970</u>	<u>1971</u>
Massa físsil no carôço			
± % (Pu-239 + Pu-241).....	10	8	3
Taxa de regeneração, ±	0,13	0,1	0,05
Coefficiente Doppler, ± %	30	20	10

b. Dados extraídos da referência /18/ .

5.5 - Conclusão

Os métodos de cálculo empregado para a previsão de propriedades físicas de reatores tem atingido nos últimos anos um desenvolvimento tal que os erros cometidos devido a defeitos na teoria de reatores tornaram-se muito menores que erros introduzidos por incerteza nos dados nucleares. No reator rápido a "física" do envoltório é mais complicada do que a "física" do carôço, já que no envoltório o espectro é de "transição", ao contrário do carôço que é aproximadamente um espectro em "equilíbrio".

Espectros de transição são altamente dependentes do espaço e, portanto, várias das hipóteses simplificadoras que podem ser justificadas no carôço, não são geralmente válidas no envoltório. Estas hipóteses incluem a separabilidade espaço-energia na geração das constantes de multigrupo, a aplicabilidade da aproximação da difusão e o desprezo dos efeitos de heterogeneidade.

Apesar da validade do cálculo de fluxo de nêutrons dependente do espaço e energia possa ser questionada, note que somente a diferença entre os dois sistemas está sendo considerada neste estudo. Portanto, os espectros no sistema de referência e no sistema crítico, estão sendo calculados com os mesmos programas e as mesmas constantes de grupo, e o fluxo de nêutrons resultante deverá representar com uma razoável base de precisão o projeto neutrônico do sistema.

6. RESULTADOS

6.1 - Introdução

Apresenta-se neste capítulo, os resultados obtidos com a aplicação dos métodos de cálculo desenvolvidos no capítulo anterior. O método descrito foi aplicado em duas etapas a saber:

a. geração das seções de choque em 123 grupos de energia com o programa XSDRN e posterior condensação destas seções de choque em 30 grupos de energia para uso no programa CITATION.

b. Cálculo da distribuição pontual e global do fluxo de nêutrons em cada zona do reator com o programa CITATION.

A escolha da separação dos grupos de energia (Apêndice A) bem como o número total desses grupos baseou-se em distribuições comumente empregadas em cálculos de reatores rápidos /19/ como indicam estudos anteriores descritos nas referências /10/ e /11/.

©

A avaliação neutrônica do conjunto crítico consistiu na "otimização" do anel conversor de UO_2 , com 2% de enriquecimento em U-235, cercado de um filtro de nêutrons térmicos (Cd ou B_4C), considerando-se os envoltórios de urânio empobrecido (0,2% em U-235) e tório metálico. Essa otimização foi

realizada utilizando-se de um índice espectral, que definiremos a seguir, e que indicaria o quanto o espectro de nêutrons que penetram no envoltório se aproxima do espectral real, para um reator rápido.

6.2 - Índice Espectral

Na análise dos casos estudados, procurou-se definir o padrão de comparação entre os espectros do reator GCFR de referência e o conjunto crítico.

Tomou-se como medida de comparação entre os espectros a quantidade $\Delta\phi$, ao qual charemos de "Índice Espectral" que foi utilizada pelos autores constantes na Ref. /11/. A quantidade $\Delta\phi$ é definida como sendo a soma das diferenças absolutas dos fluxos de grupos normalizados no reator de GCFR de referência e os fluxos de grupos normalizados correspondentes para o conjunto crítico. Isto é ,

$$\Delta\phi = \sum_g \left| \frac{\phi_g(R^{Ref})}{\phi(R^{Ref})} - \frac{\phi_g(R^{SC})}{\phi(R^{SC})} \right|$$

Onde:

$$\phi(R) = \sum_g \phi_g(R)$$

R^{Ref} = raio da interface "carôço-envoltório" do GCFR de referência.

R^{SC} = raio da interface "carôço-envoltório" do conjunto crítico simulador .

g = índice de grupo ($1 \leq g \leq 30$)

O melhor índice espectral deverá ocorrer para $\Delta\phi$ mínimo.

6.3 - Cálculo do Reator GCFR de Referência

Calculou-se a distribuição radial do fluxo em 30 grupos de energia em cada zona do reator, utilizando-se do programa CITATION em geometria bidimensional. As figuras 6.3a e 6.3b mostram o comportamento radial do fluxo através do carôço, envoltório radial de urânio e do tório e no refletor. Somente seis principais grupos são mostrados. Os grupos de número 27 (100 eV) a 30 (têrmico) não são de interesse para o reator GCFR mas necessários para efeito de comparação com o conjunto crítico.

Nas figuras 6.3c e 6.3d estão mostrados os espectros na interface carôço-envoltório do reator de referência com envoltórios de óxido de urânio e de tório, respectivamente, e que servirão para comparação com o espectro na interface carôço-envoltório do conjunto crítico.

6.4 - Estimativa do raio crítico do carôço têrmico

No cálculo da criticalidade do reator com o programa CITATION, este requer que se forneça as dimensões geométricas, em situações de simetria, de um quarto do reator como mostrado na Figura 6.4.

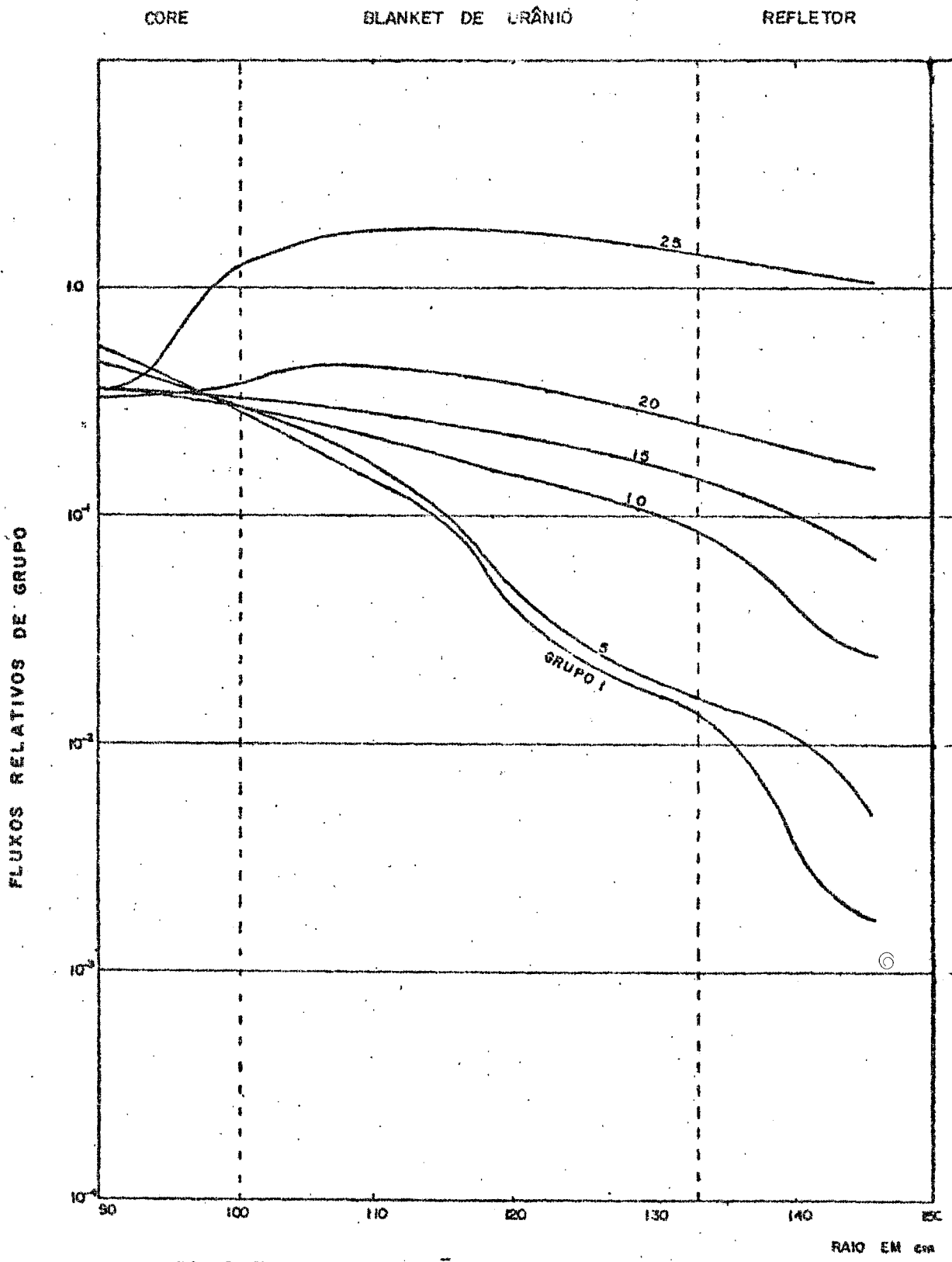


Fig.6. 3a DISTRIBUIÇÃO RADIAL DE FLUXO NO GCFR PROTÓTIPO

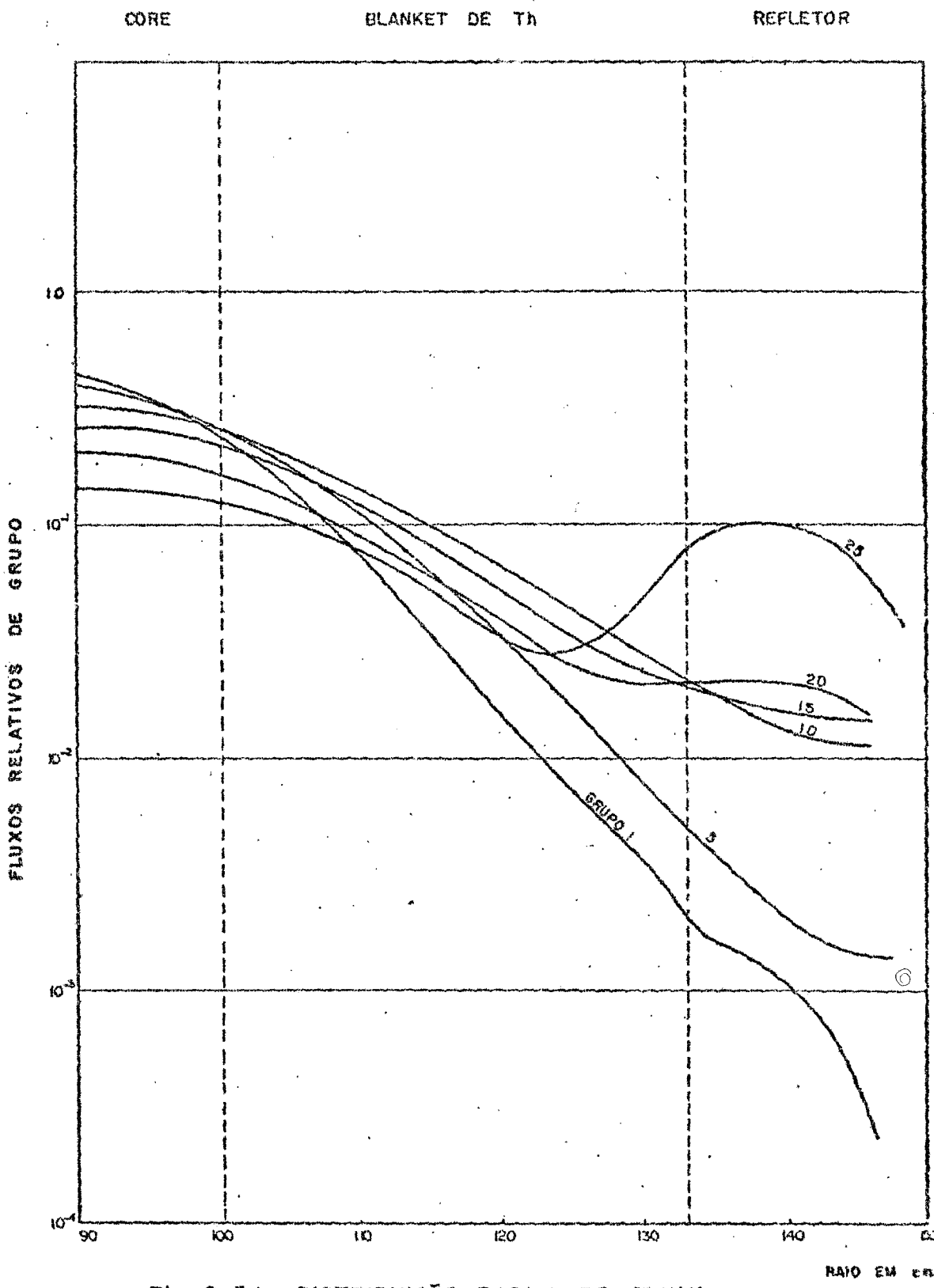


Fig. 6.3 b DISTRIBUIÇÃO RADIAL DE FLUXO NO GCFR PROTÓTIPO

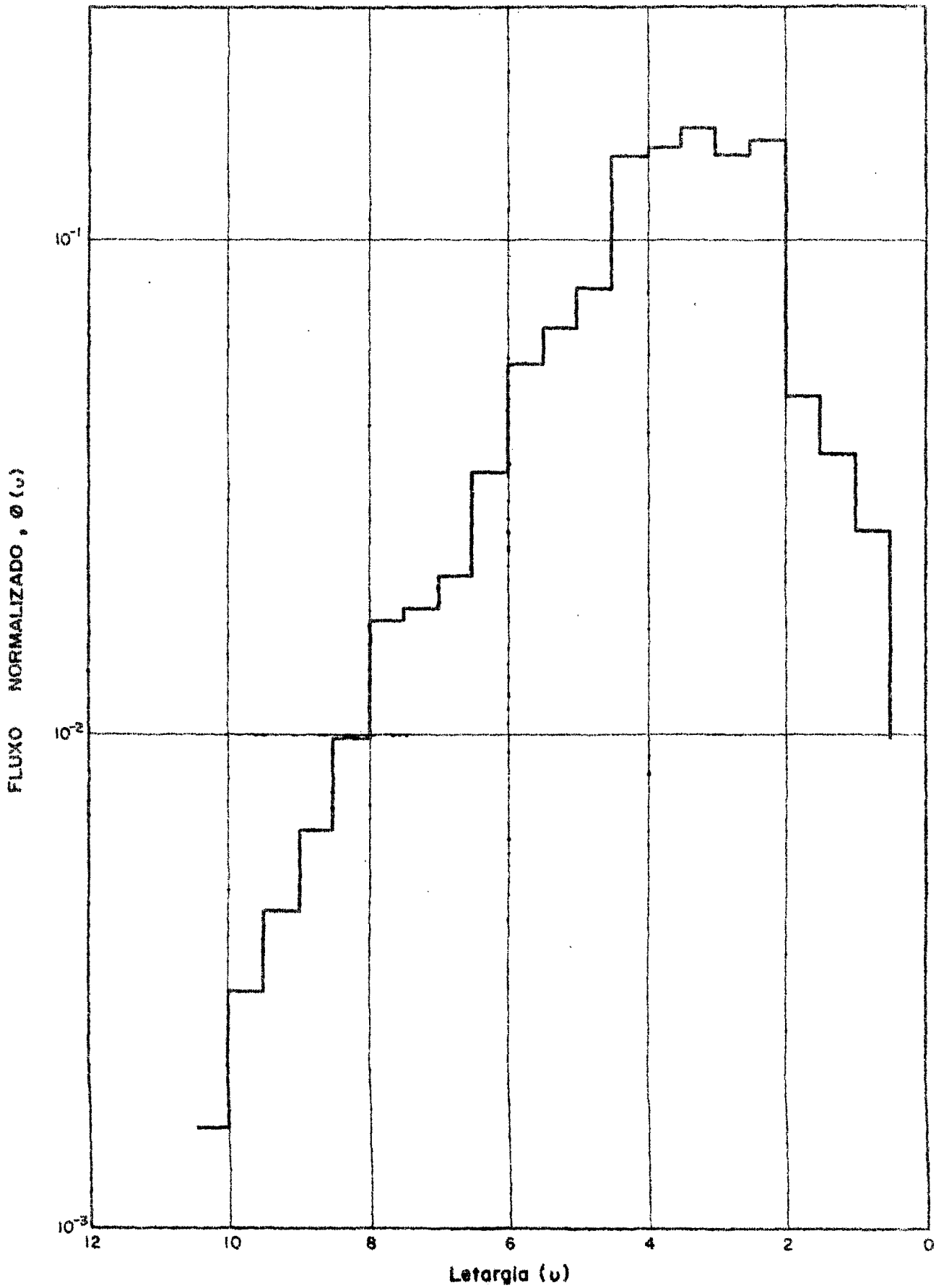


Fig. 6.3c - Espectro na interface carvão - envoltório de óxido de urânio do GCFR

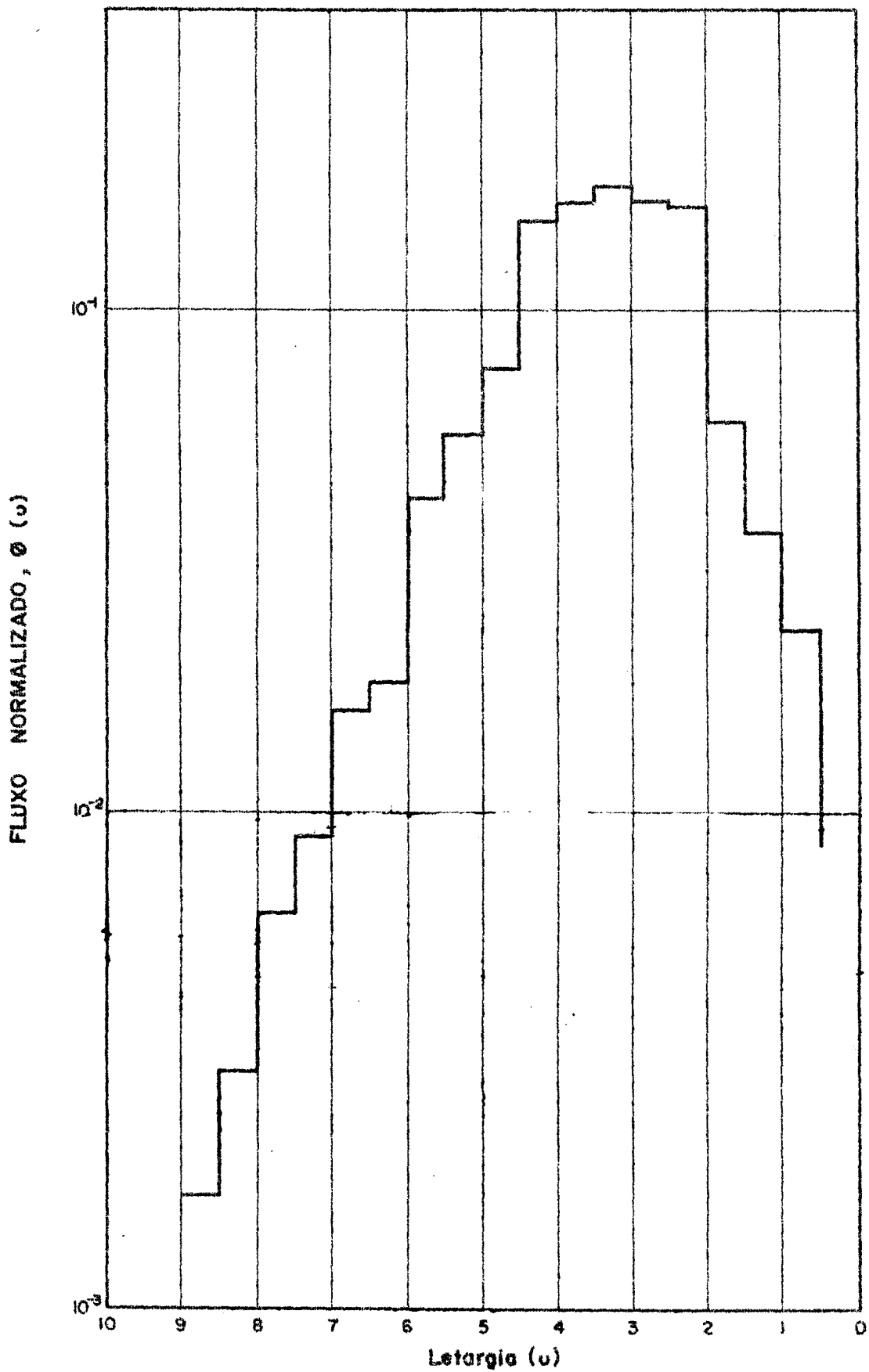


Fig. 6.3d - Espectro na interface coro - envoltório de tório do GCFR

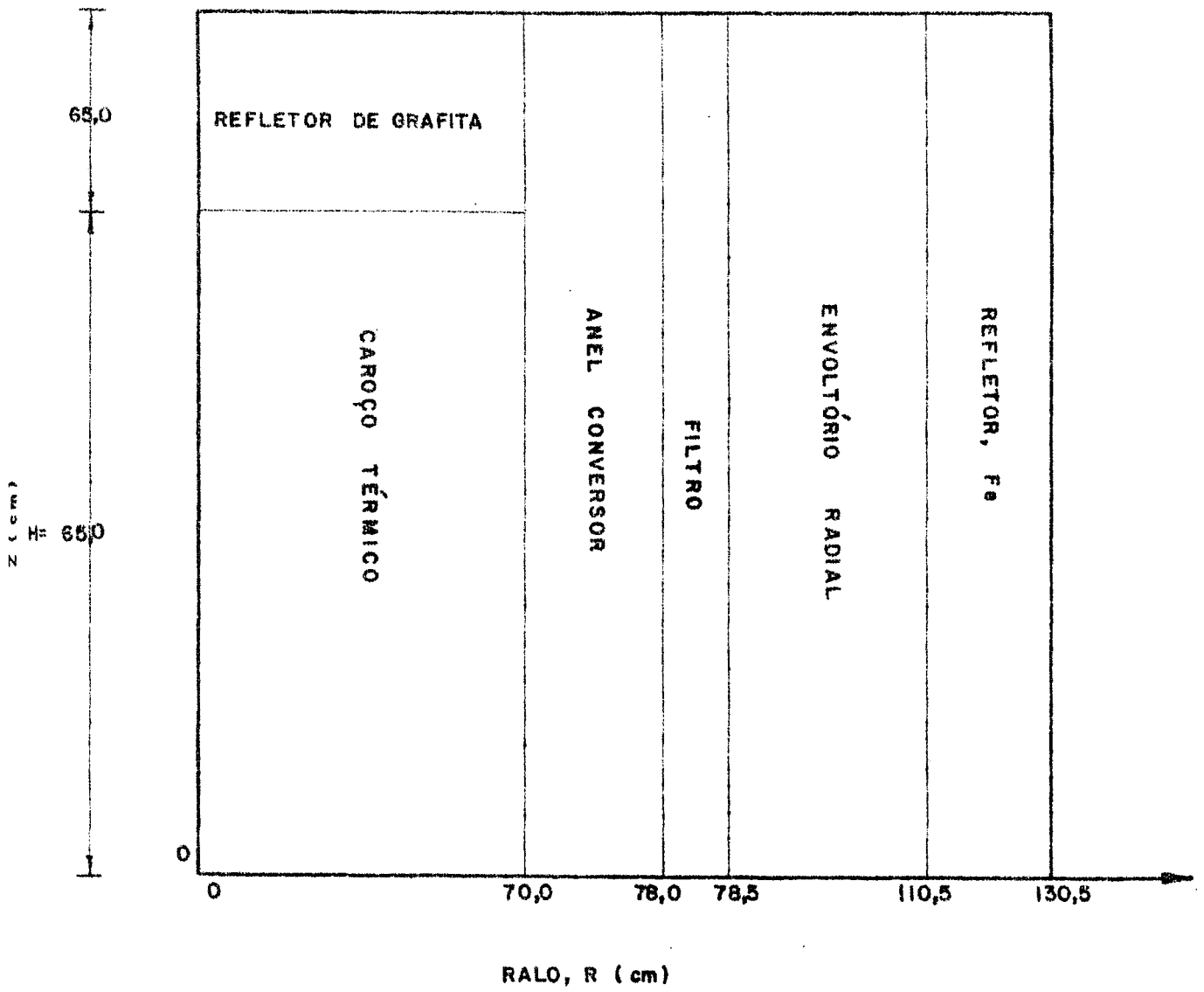


Fig. 6.4 Dimensões de um quarto do conjunto crítico cilindrado.

A estimativa do raio crítico do carôço térmico, está relacionado com a economia do tempo de computação. Gasta-se desde 25 minutos até uma hora para passarmos um programa no computador IBM 370/155, partindo-se de uma estimativa apropriada das dimensões do reator.

Tipicamente, as primeiras estimativas dos parâmetros de entrada são os seguintes:

Raio do carôço térmico.....	70,0 cm
Raio do anel conversor.....	78,0 cm
Raio do filtro.....	78,5 cm
Raio do envoltório.....	110,5 cm
Altura do carôço ativo.....	130,0 cm

Procurou-se manter a mesma composição (Apêndice B) e geometria do envoltório radial e do refletor do reator GCFR de referência . Com os dados de entrada acima, o CITATION, faz uma pesquisa da dimensão do raio do carôço térmico que levará o reator à criticalidade. O raio determinado, com as condições acima é de aproximadamente 63,0 cm.

©

Uma vez estimado o raio crítico do carôço térmico, o estudo da otimização do conjunto "anel conversor-filtro" será significativamente facilitado com a redução de 70% no tempo de computação.

6.5 - Otimização do conjunto "anel conversor-filtro"

6.5.1 - Introdução

Uma vez definidas as características do conjunto crítico, empreen

demos o estudo da "otimização" do conjunto anel conversor-filtro.

Esta otimização, consistirá no estudo de um conjunto de casos para os filtros de cádmio e carbeto de boro propostos. Variou-se a espessura do anel conversor e a espessura do filtro térmico para os seguintes casos: as espessuras do anel conversor foi variada de 3,0 cm para 4,0 cm; 6,0 cm; 8,0 cm; 10,5 cm; e 16,0 cm. Para cada espessura do anel conversor, as espessuras consideradas para os filtros foram de 0,5 cm; 1,0 cm; 2,0 cm; 3,0 cm; 4,0 cm e 5,0 cm.

É oportuno, antes de apresentar os resultados obtidos, tecer alguns comentários a respeito das propriedades neutrônicas dos filtros térmicos propostos. Estes filtros são de grande importância, uma vez que limitarão a indesejável contribuição dos nêutrons térmicos no espectro de escape para o envoltório radial do conjunto crítico. As secções de choque de boro ou cádmio na região térmica (< 1 eV) são da ordem de 2000 barns, sendo excelentes materiais para a blindagem dos nêutrons térmicos. Acima da região de 1 eV a capacidade de absorção do boro torna-se superior à do cádmio como pode ser visto na Fig. 6.5.1, onde estão mostradas as secções de choque de absorção médias geradas pelo programa XSDRN na região. É de se esperar que o filtro de carbeto de boro seja mais eficiente que o filtro de cádmio na limitação da contribuição dos nêutrons de energia abaixo da região de interesse dos reatores rápidos.

6.5.2 - Cálculo para o conjunto crítico com envoltório de óxido de urânio

Calculou-se para os filtros de cádmio e carbeto de boro o índice espectral para os casos propostos na otimização do sistema anel conversor-filtro. As Figuras 6.5.2a e 6.5.2b exibem o comportamento do índice espectral

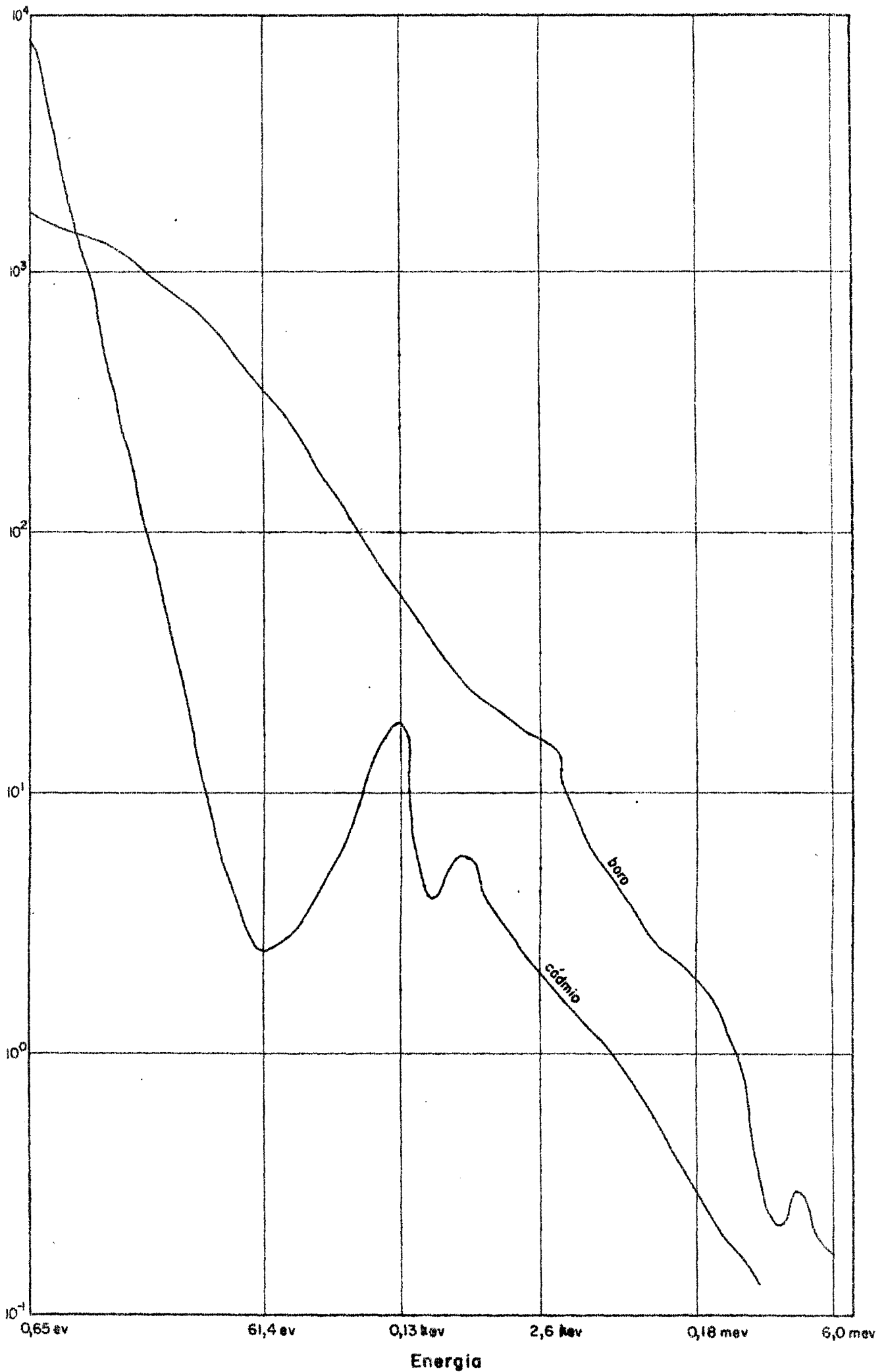


Fig.6.5.1 - Secção de choque de absorção do boro e cádmio

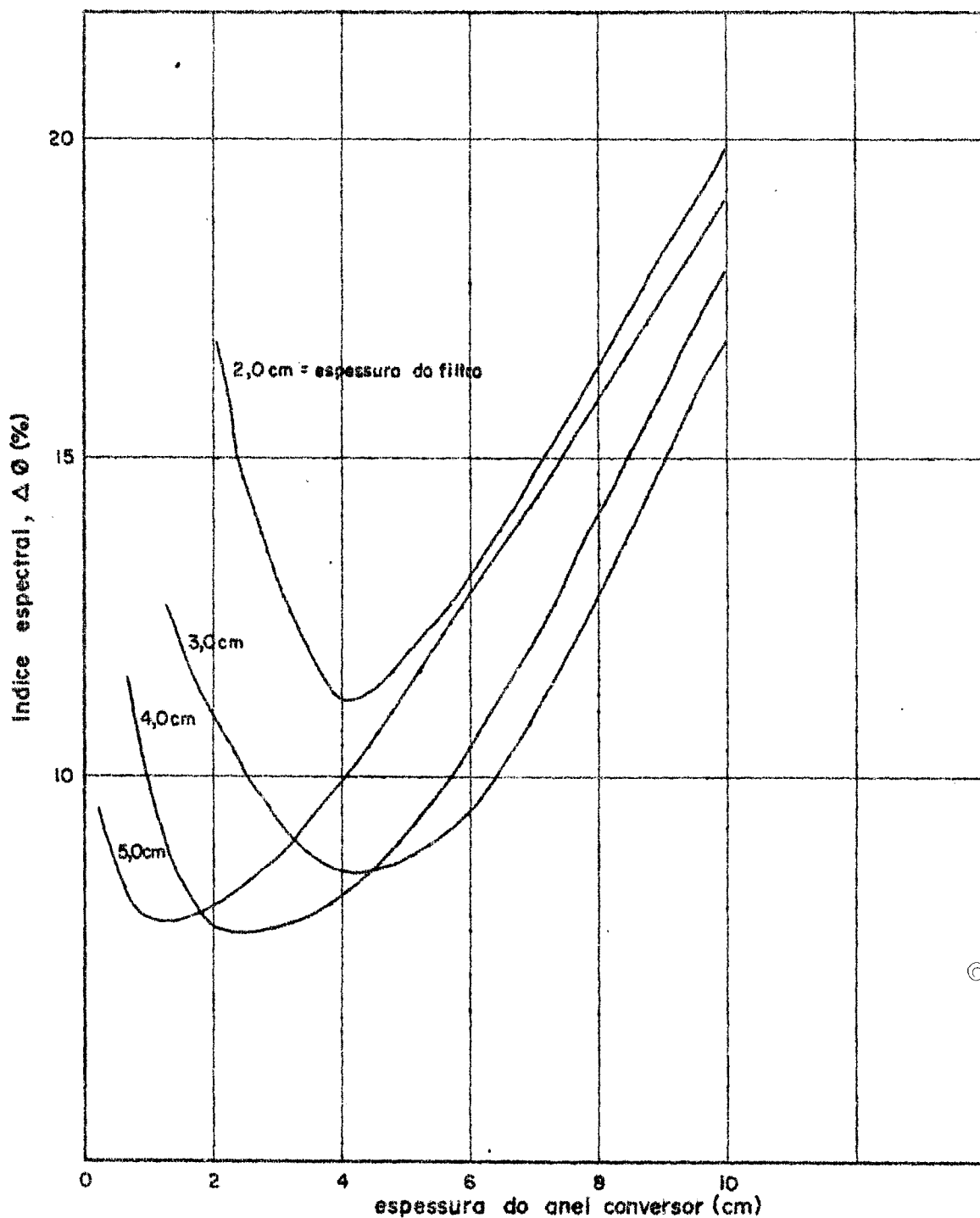


Fig.6.5.2a - Efeito do anel conversor sôbre o índice espectral do conjunto crítico para filtros de cádmio para envoltório de óxido de urânio.

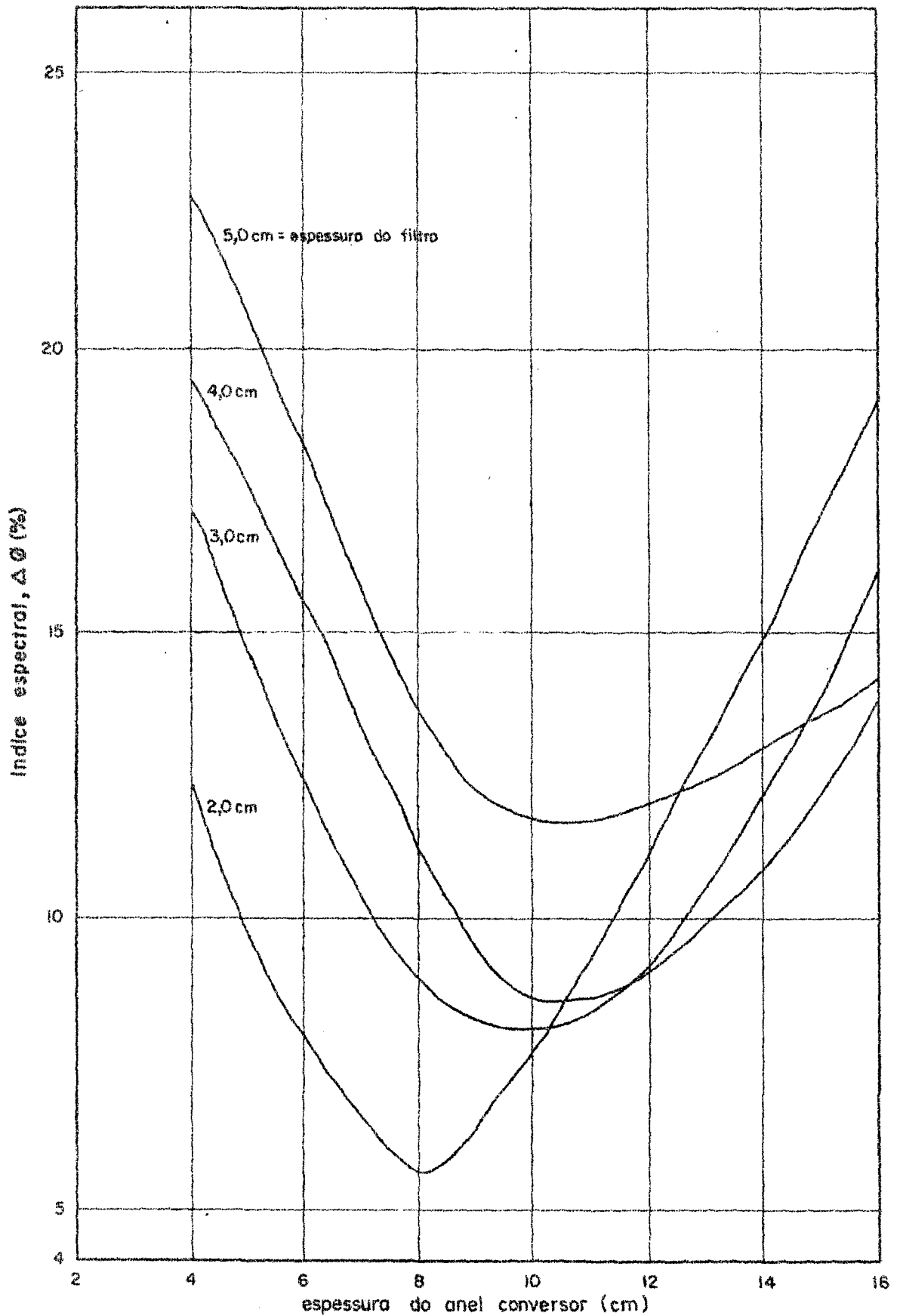


Fig. 6.5.2b - Efeito do anel conversor sobre o índice espectral do conjunto crítico para filtros de carbeto de boro para envoltório de óxido de urânio.

$(\Delta\phi)$ em função da espessura do anel conversor para os filtros de cádmio e carbeto de boro. Nas Figuras 6.5.2c e 6.5.2d apresentamos o comportamento dos índices mínimos em função da espessura do filtro. O índice mínimo calculado para o filtro de cádmio é de 7,63% enquanto para o carbeto de boro foi de 5,63%. A comparação entre os espectros na interface "carôço-envoltório" do GCFR de referência e a interface "filtro-envoltório" do conjunto crítico para os índices mínimos, estão nas Figuras 6.5.2e e 6.5.2f.

Na região de especial interesse para os reatores rápidos, entre 100 eV e 100 KeV, onde se encontram as ressonâncias e ocorre o efeito Doppler, o índice espectral correspondente a esta região foi calculado em 3,6% e, portanto, a similaridade entre o conjunto simulador e o real é considerada adequada para experiências.

6.5.3 - Cálculo para o conjunto crítico com envoltório de tório

Similarmente, calculou-se o desempenho neutrônico do conjunto crítico com envoltório de tório metálico considerando-se os filtros de cádmio e carbeto de boro. As Figuras 6.5.3a, 6.5.3b, 6.5.3c, 6.5.3d, 6.5.3e e 6.5.3f, expressam o mesmo significado das figuras correspondentes descritas na secção anterior. O índice mínimo alcançado para o filtro de cádmio é de 14,35%, enquanto para o filtro de carbeto de boro é de 7,00%. Para este último, na região de especial interesse para os reatores rápidos (100 eV a 100 KeV), o índice espectral é de 4,30%.

6.6 - Análise dos resultados

Abaixo, estão resumidos os índices mínimos calculados na avaliação

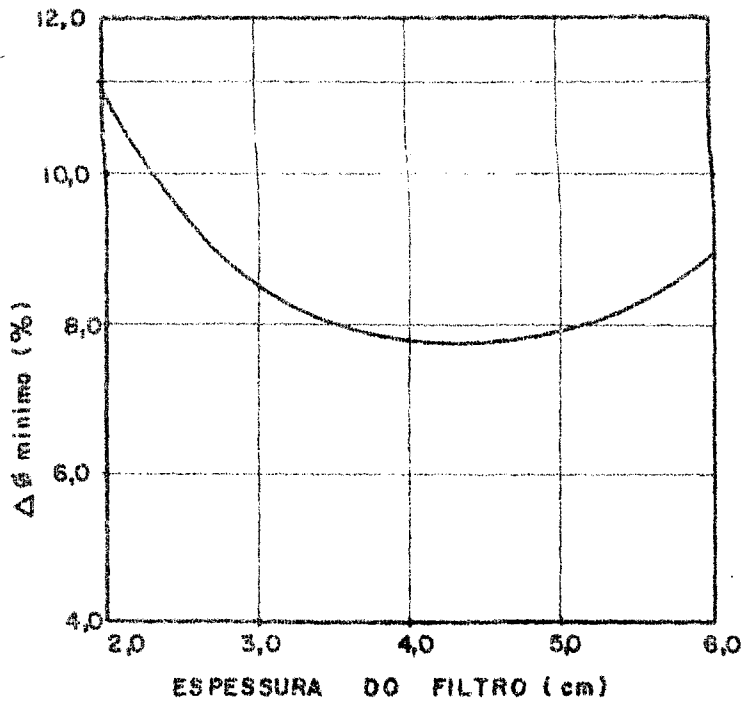


Fig. 6.5.2c ÍNDICE MÍNIMO EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DO FILTRO DE CÁDMIO PARA ENVOLTÓRIO DE ÓXIDO DE URÂNIO.

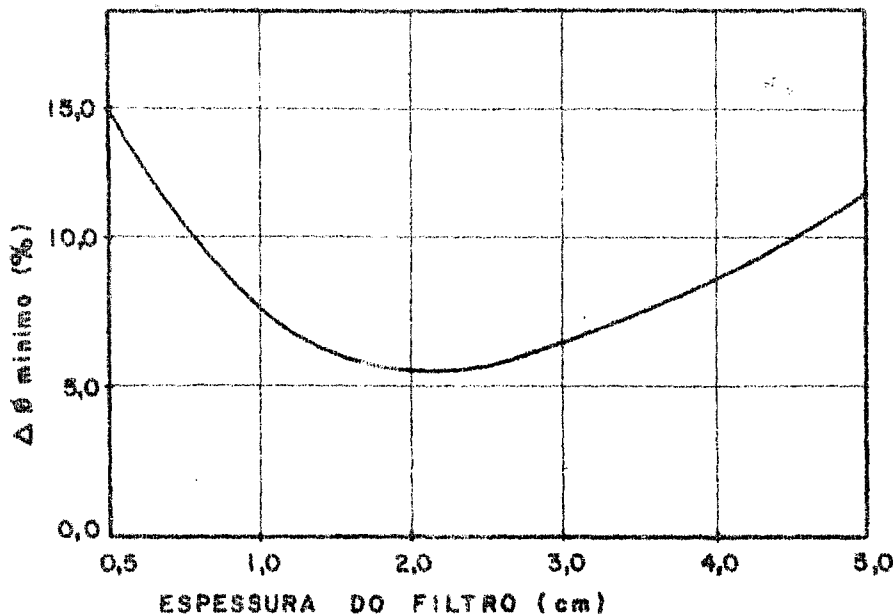


Fig. 6.5.2d ÍNDICE MÍNIMO EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DO FILTRO DE B₄C PARA ENVOLTÓRIO DE ÓXIDO DE URÂNIO.

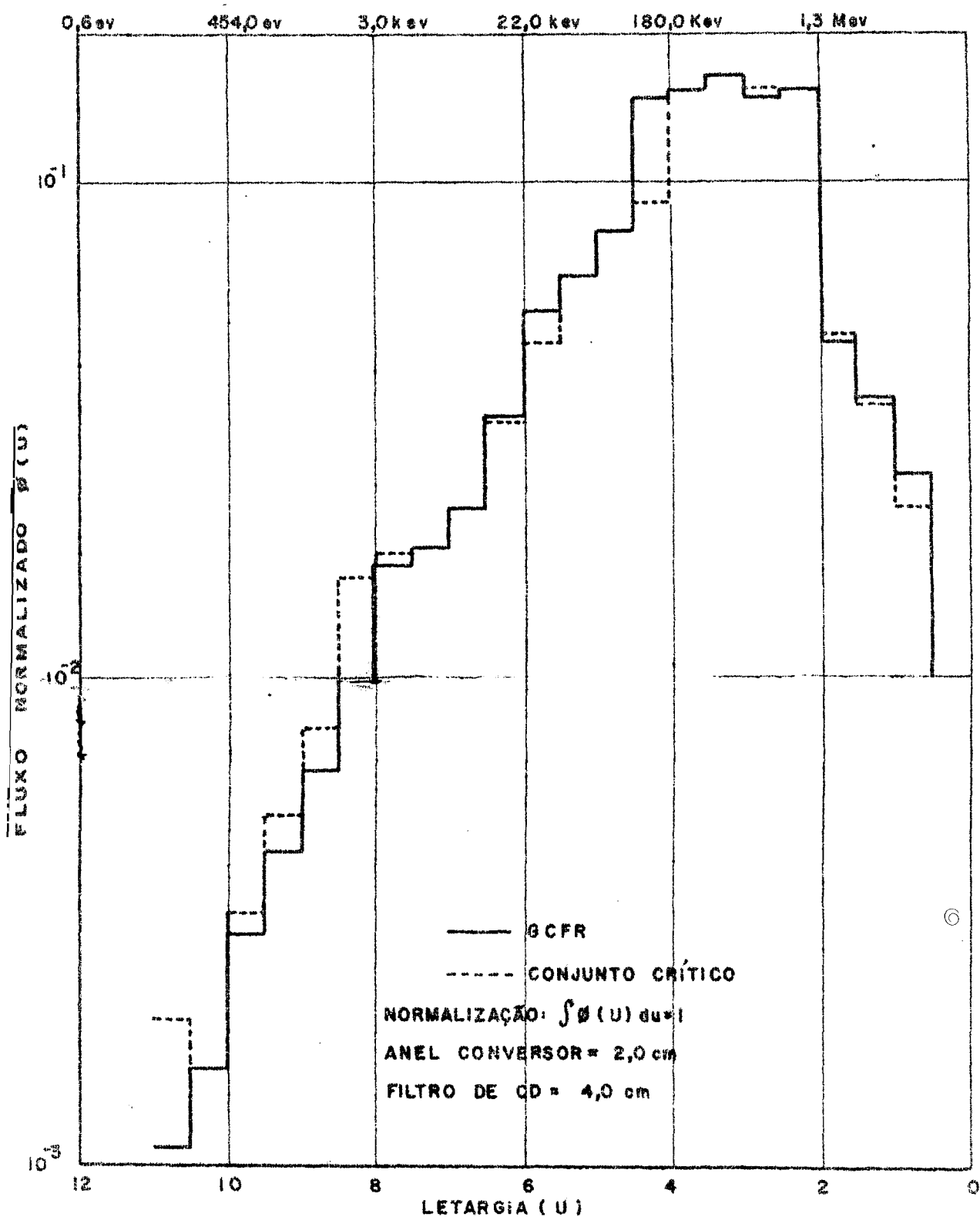


Fig. 6.5.2e COMPARAÇÃO DOS ESPECTROS NA INTERFACE FILTRO ENVOLTÓRIO DO CONJUNTO CRÍTICO E CAROÇO-ENVOLTÓRIO DO GCFR DE REFERENCIA COM ENVOLTÓRIO DE ÓXIDO DE URÂNIO.

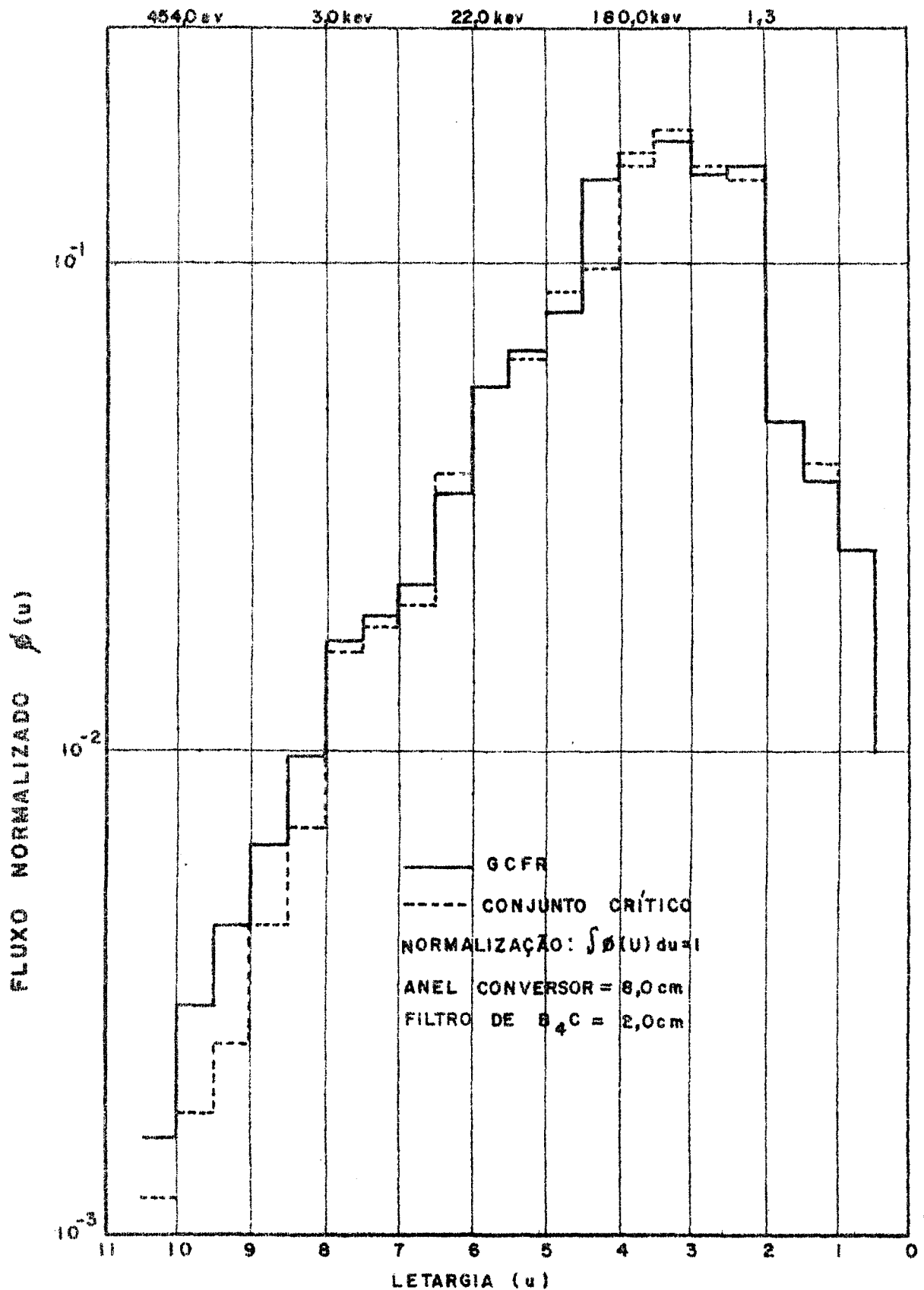


Fig. 6.5.2f COMPARAÇÃO DOS ESPECTROS NA INTERFACE FILTRO ENVOLTÓRIO DO CONJUNTO CRÍTICO E CAROÇO ENVOLTÓRIO DO GCFR DE REFERÊNCIA COM ENVOLTÓRIO DE ÓXIDO DE URÂNIO.

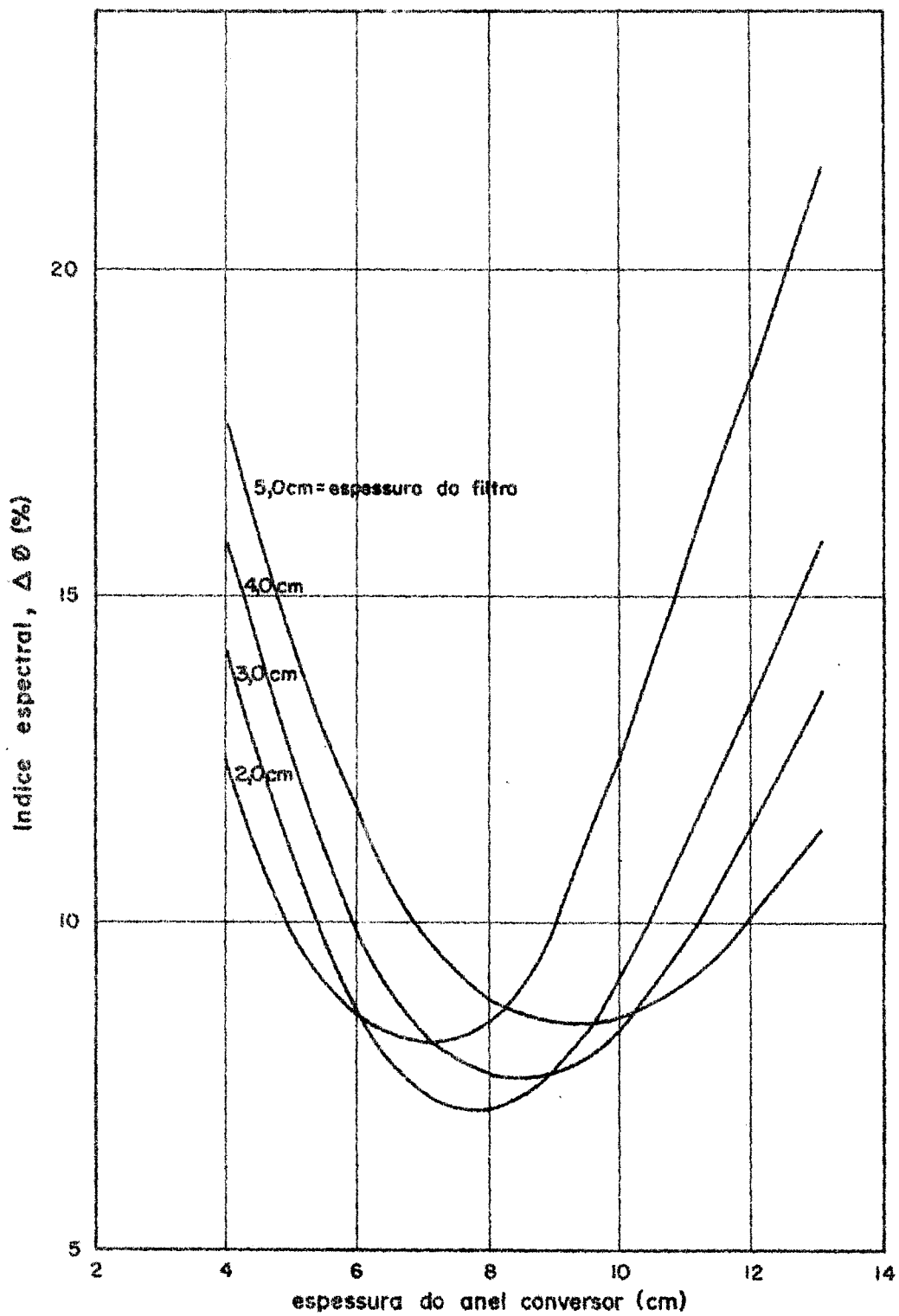


Fig. 6.5.3a - Efeito do anel conversor sôbre o indice espectral do conjunto crítico para filtros de carbeto de boro para envoltório de tório.

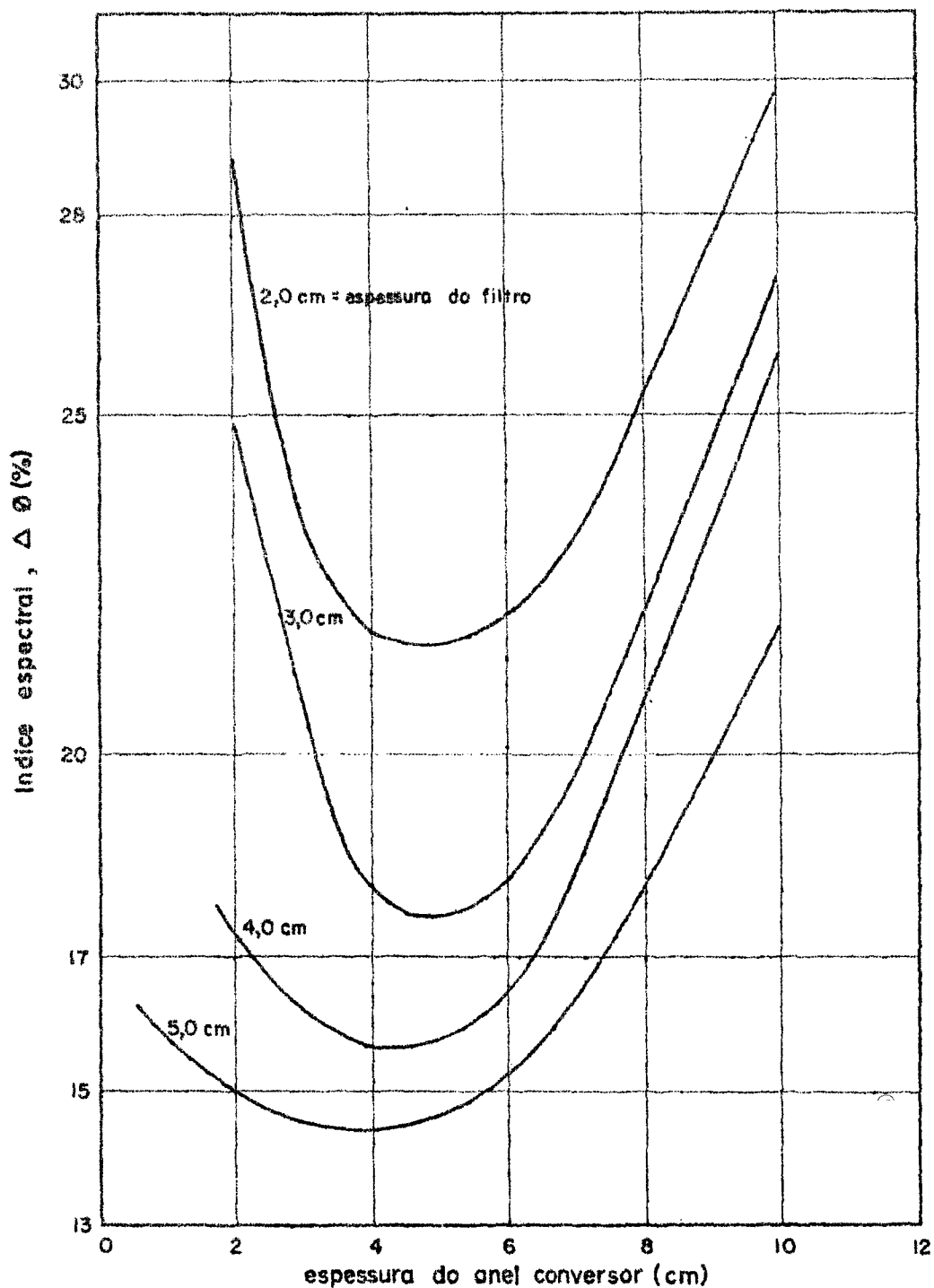


Fig.6.5.3b - Efeito do anel conversor sôbre o índice espectral do conjunto crítico para filtros de cádmio para envol-tório de tório.

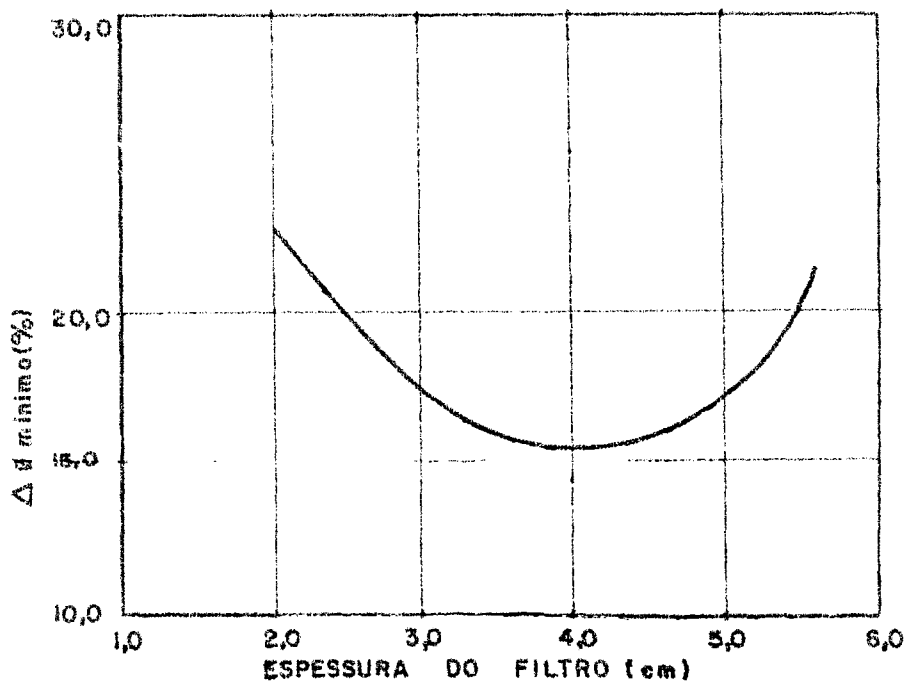


Fig. 6.5.3c ÍNDICE MÍNIMO EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DO FILTRO DE CÁDMIO PARA ENVOLTÓRIO DE Th.

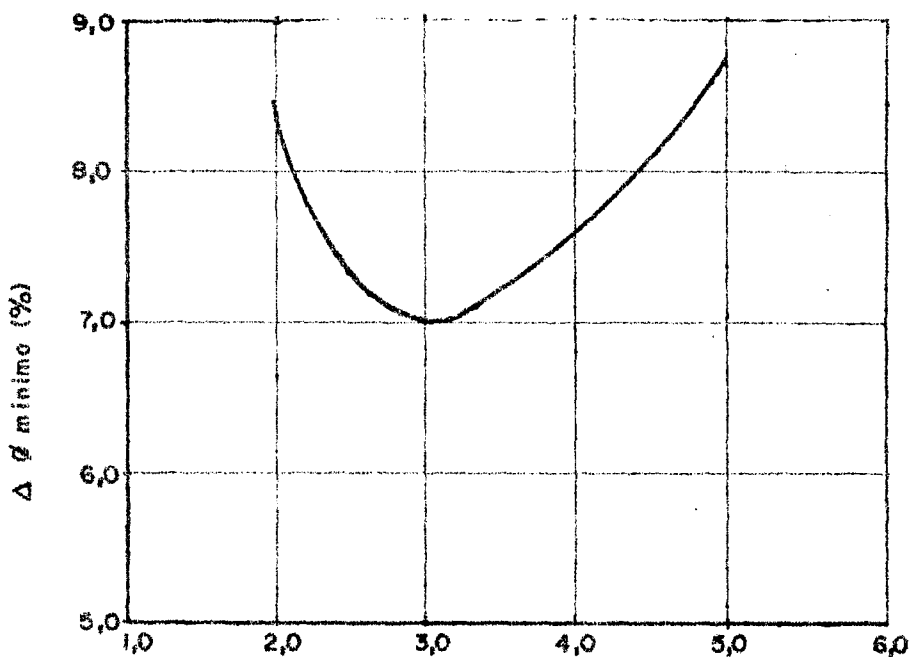


Fig. 6.5.3d ÍNDICE MÍNIMO EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DO FILTRO DE B₄C PARA ENVOLTÓRIO DE Th.

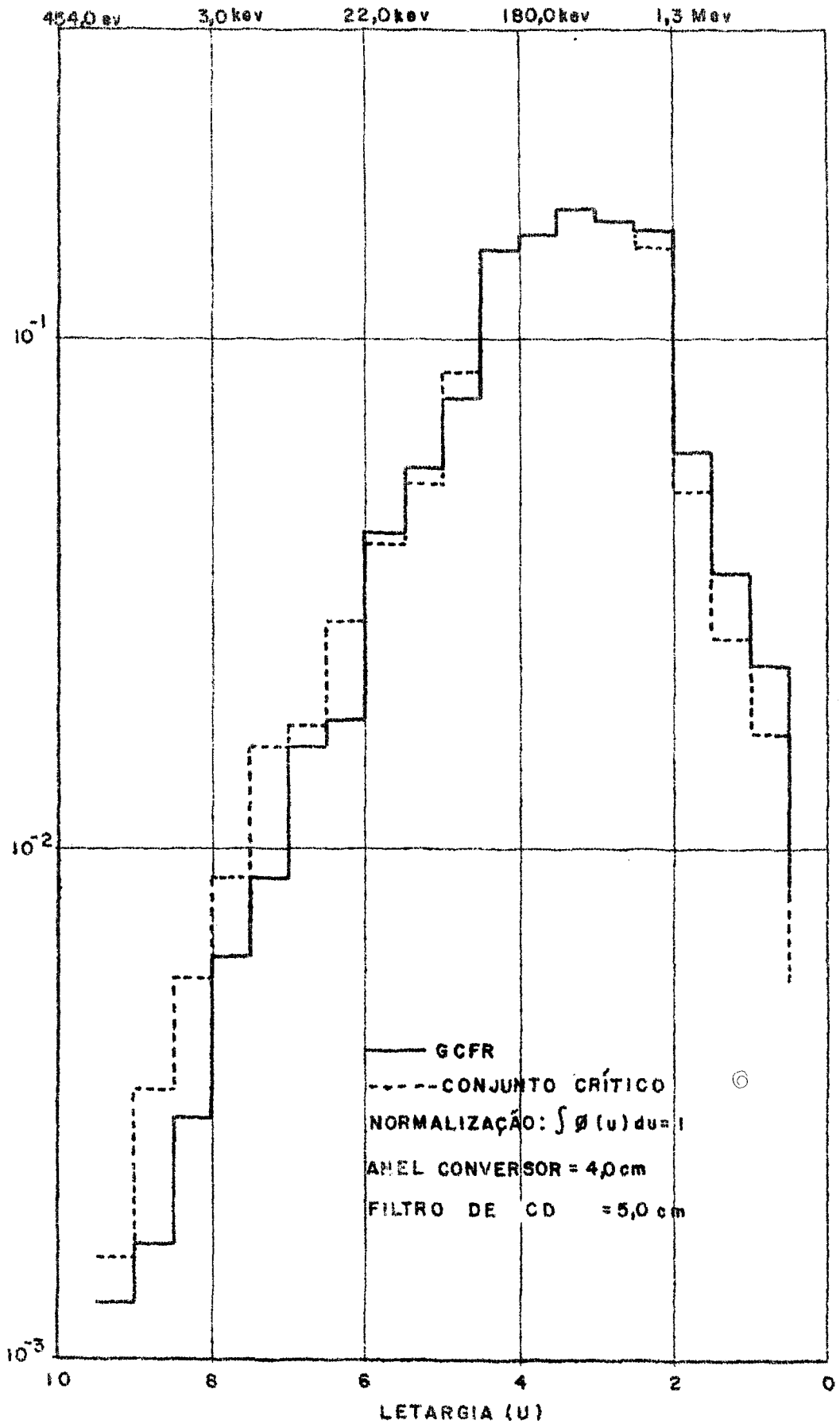


Fig. 6.5.3e COMPARAÇÃO DOS ESPECTROS NA INTERFACE FILTRO ENVOLTÓRIO DO CONJUNTO CRÍTICO E CAROÇO ENVOLTÓRIO DO GCFR DE REFERÊNCIA COM ENVOLTÓRIO DE TÓRIO.

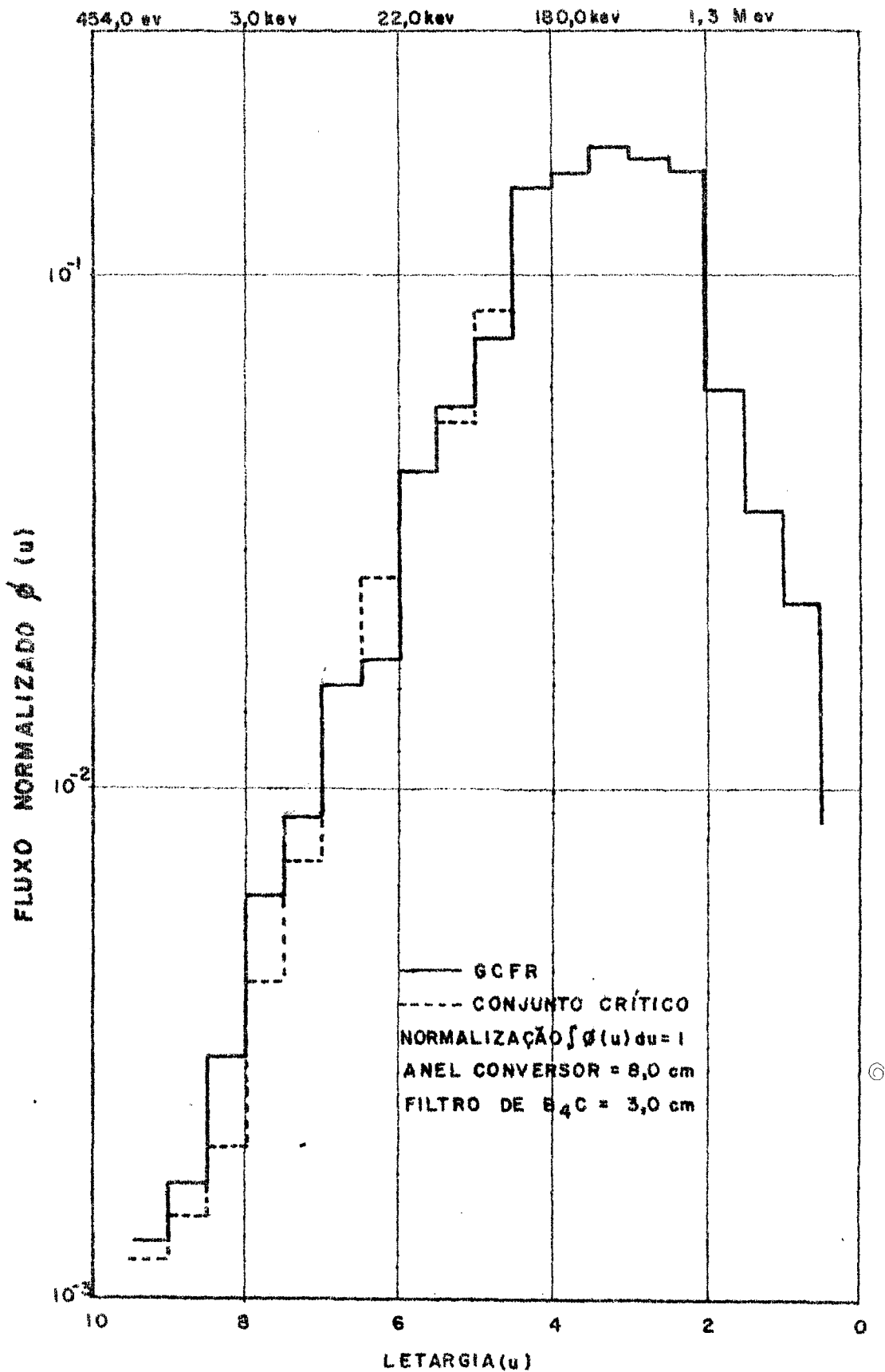


Fig.6.5.3f COMPARAÇÃO DOS ESPECTROS NA INTERFACE FILTRO ENVOLTÓRIO DO CONJUNTO CRÍTICO E CAROÇO ENVOLTÓRIO DO GCFR COM ENVOLTÓRIO DE Th.

do conjunto crítico para os envoltórios de óxido de urânio e tório.

a - Envoltório de óxido de urânio

<u>Raio do carôço térmico (cm)</u>	<u>Anel conversor (cm)</u>	<u>Filtro de cádmio (cm)</u>	<u>Filtro de B₄C e Al (cm)</u>	<u>Δφ (%)</u>
67,42	2,0	4,0	-	7,63
64,70	8,0	-	2,0	5,63

b - Envoltório de tório metálico

<u>Raio do carôço térmico (cm)</u>	<u>Anel conversor (cm)</u>	<u>Filtro de cádmio (cm)</u>	<u>Filtro de B₄C e Al (cm)</u>	<u>Δφ (%)</u>
67,00	4,0	5,0	-	14,35
65,22	8,0	-	3,0	7,00

Assim, as duas configurações ótimas obtidas são: para o envoltório de óxido de urânio é a do anel conversor de 8,0 cm de UO₂ com enriquecimento de 2% em U-235 e de um filtro de carbeto de boro e alumínio com 2,0 cm de espessura; para o envoltório de tório metálico é a do anel conversor de 8,0 cm e o filtro de carbeto de boro de 3,0 cm.

O conjunto crítico com envoltório de óxido de urânio empobrecido (0,2% em U-235) mostrou-se superior quanto as propriedades de simulação do espec-

tro do reator GCFR de referência comparado ao conjunto crítico com envoltório de tório metálico.

A diferença entre os dois sistemas resulta basicamente da maior taxa de fissão e melhor reflexão dos nêutrons para o envoltório de UO_2 comparado ao tório metálico. A existência de oxigênio e de maior percentagem de material estrutural para o caso de UO_2 é responsável pela maior reflexão de nêutrons provenientes do sistema térmico-rápido. A maior predominância dos nêutrons gerados dentro do próprio envoltório para o caso de UO_2 comparado ao tório metálico torna a sua simulação mais realista.

Examinou-se também o comportamento do espectro após os 16 primeiros centímetros para dentro dos envoltórios radiais do urânio e do tório do conjunto crítico. As Figs. 6.6a e 6.6b mostram os comportamentos para os casos ótimos calculados. Na Tabela 6.6a apresentamos a quantidade de massa de combustível e materiais para se construir o conjunto crítico.

Finalmente, a título de ilustração, apresentamos nas Tabelas 6.6b e 6.6c comparação dos fluxos normalizados em 30 grupos de energia, para interface "filtro - envoltório" do conjunto crítico e interface "carôço-envoltório" do reator GCFR de referência. Os índices espectrais calculados foram 7,67 % para o UO_2 e 11,2% para o tório metálico.

Um exame comparativo do espectro na interface filtro-envoltório (por exemplo, Figs. 6.5.2e e 6.5.2f) revela que para a região de baixa energia (letargia acima de 6) o fluxo normalizado é superior ao de referência para o caso do filtro de cádmio e inferior para o carbetto de boro.

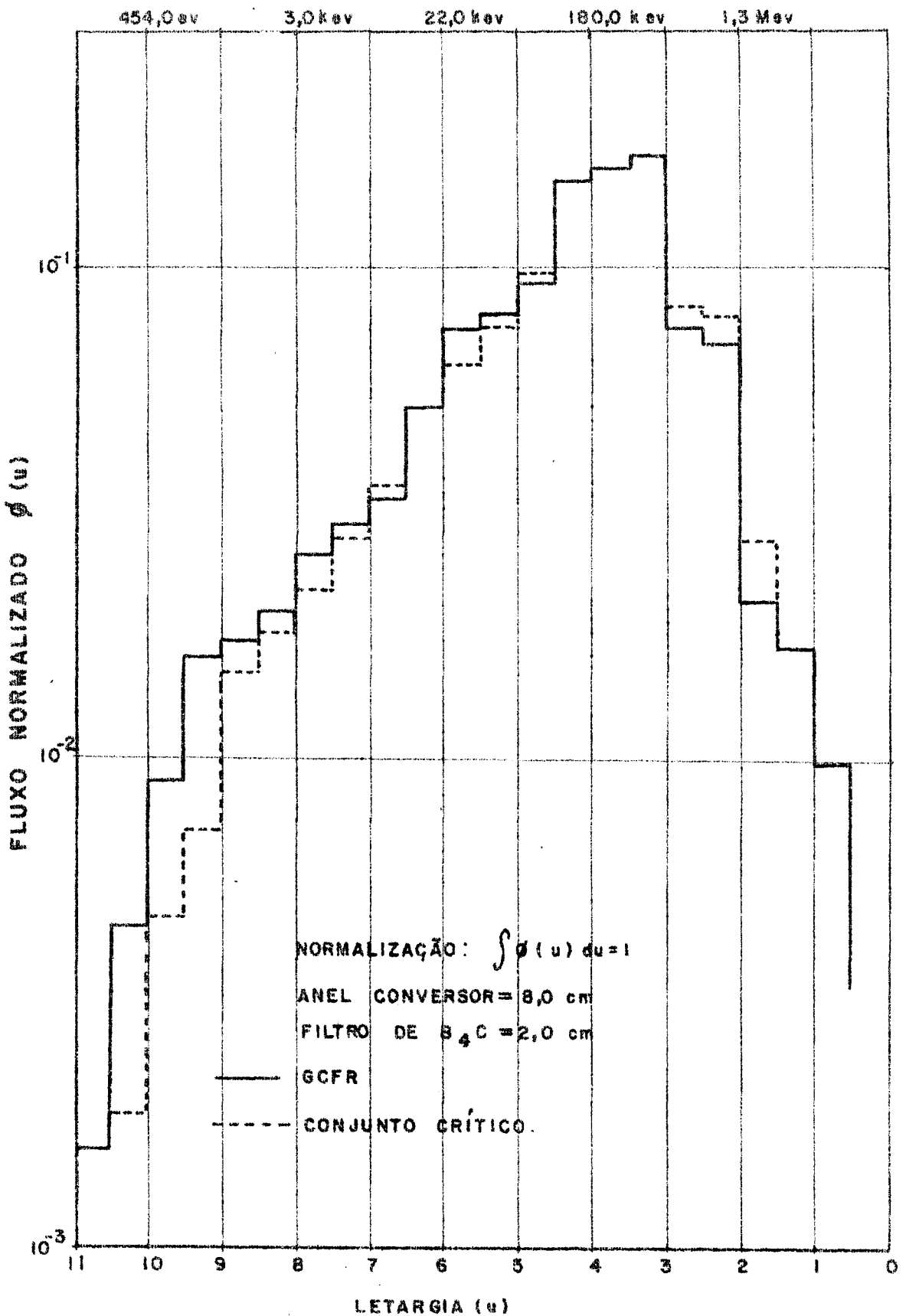


Fig. 6.6a COMPARAÇÃO DOS ESPECTROS A 16,0 cm DENTRO DO ENVÓLTORIO DE ÓXIDO DE URÂNIO DO GCFR DO CONJUNTO CRÍTICO.

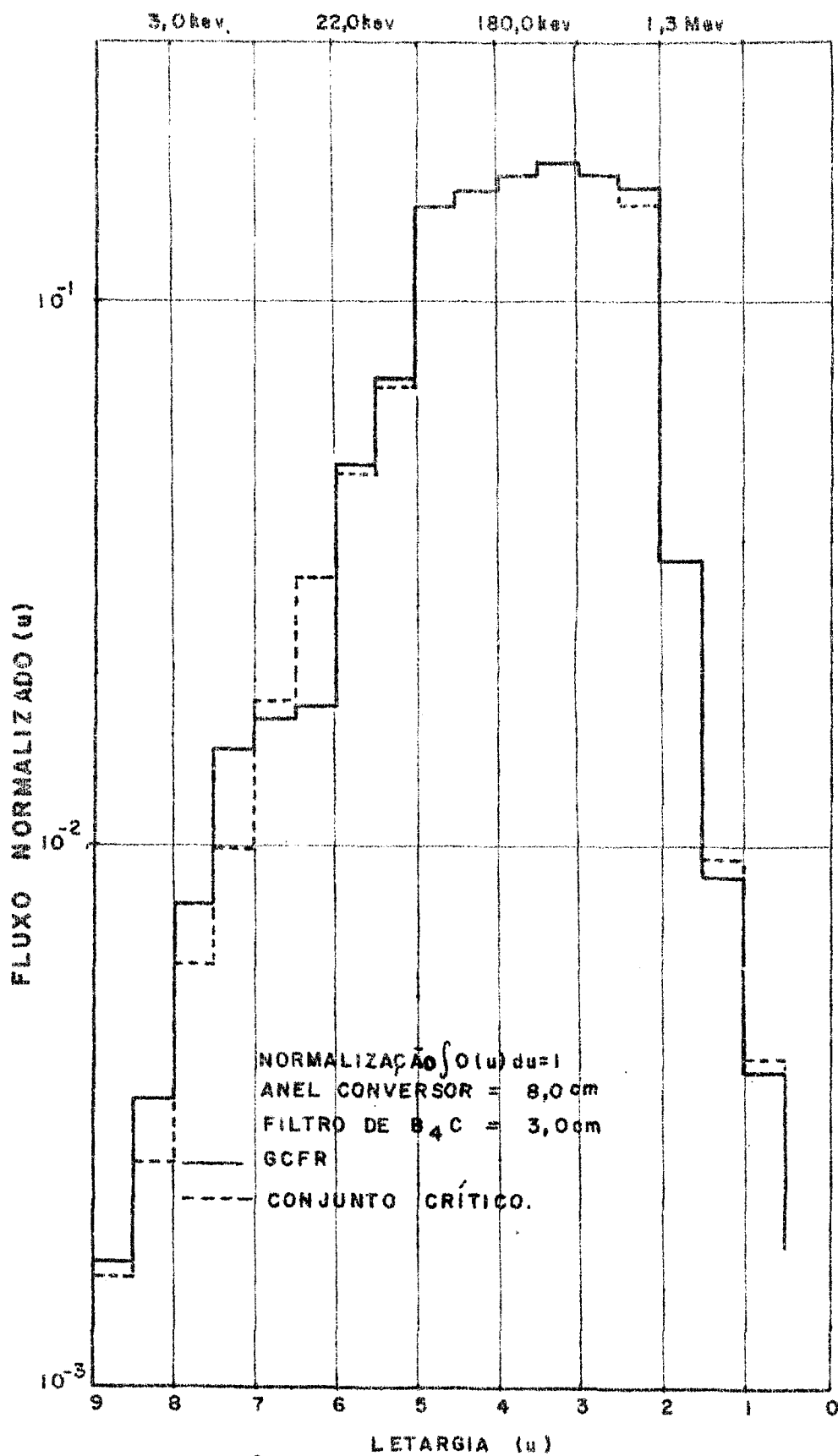


Fig. 6.6.b COMPARAÇÃO DOS ESPECTROS A 16,0 cm DENTRO DO ENVOLTÓRIO DE TÓRIO DO GCFR E DO CONJUNTO CRÍTICO.

Este fato nos motivam a tentar obter uma combinação de Cd e B_4C sobrepostos, constituindo um filtro mixto. Variou-se as espessuras de ambos os materiais até se obter um índice espectral mínimo. Para o envoltório de UO_2 a mistura ótima foi de 0,3 cm de cádmio sobreposto a 2,0 cm de carbeto de boro. O índice espectral geral para esse caso foi calculado em 5,85% e o índice na região de interesse dos reatores rápidos (100 eV a 100 KeV) o índice obtido foi de 3,8%. A Fig. 6.6c mostra o espectro para este caso.

6.6.1.- Incertezas nos Índices Espectrais

É mister tecer alguns comentários sobre as incertezas nos valores dos fluxos $\phi(u)$ calculados e sua influência sobre os índices espectrais obtidos.

As incertezas são basicamente provenientes de dois fatores, a saber, erros nas secções de choque integrais e erros inerentes ao modelo teórico de cálculo. Como os índices espectrais são resultados de comparações os erros tendem a se cancelar entre dois espectros de nêutrons obtidos com o mesmo método de cálculo inseridos nos programas XSDRN e CITATION e, dado o alto grau de confiança que esses programas inspiram baseado em inúmeras verificações já feitas no exterior, o erro proveniente do modelo de cálculo deve ser pequeno.

Quanto ao erro no índice espectral proveniente dos desvios nas secções de choque integrais, apesar de não termos uma estimativa quantitativa, podemos inferir que seja pequeno, baseado em argumentos semi-qualitativos que se seguem:

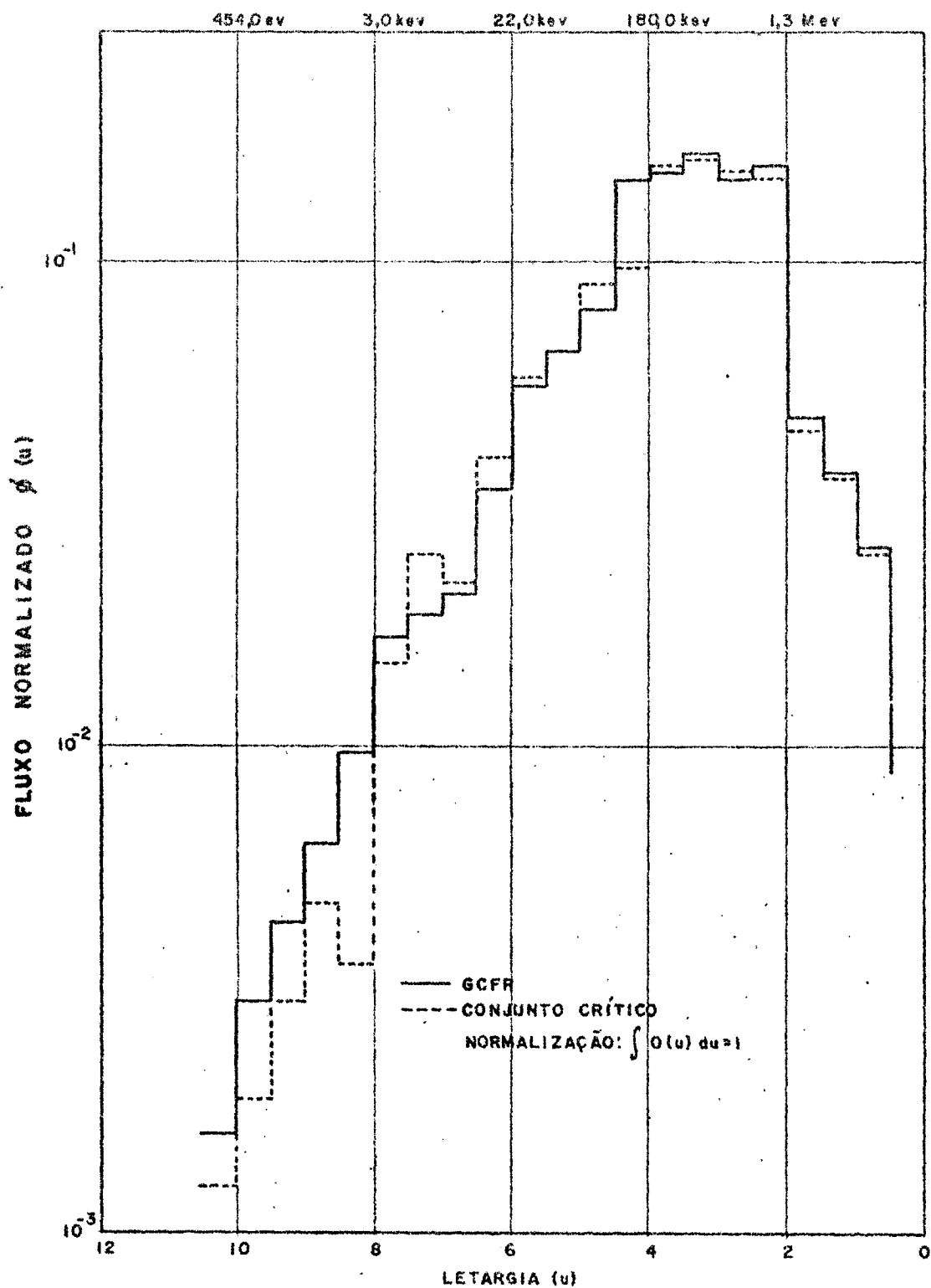


Fig. 6.6.c COMPARAÇÃO DOS ESPECTROS NA INTERFACE FILTRO ENVOLTÓRIO DO CONJUNTO CRÍTICO COM O CAROÇO ENVOLTÓRIO DE ÓXIDO DE URÂNIO DO GCFR PARA UM FILTRO COMPOSTO DE 0,3cm DE CÁDMIO E 2,0cm DE CARBETO DE BORO.

É importante assinalar que o espectro neutrônico na interface filtro-envoltório depende , em termos relativos, acentuadamente das secções de choque do próprio envoltório e menos do filtro. Para provar esta assertiva, calculamos os índices espectrais para dois casos: primeiro para o mesmo filtro (boral) comparamos os espectros para dois envoltórios distintos (óxido de urânio e tório) mantendo-se iguais todos os outros parâmetros; segundo, para um mesmo envoltório (óxido de urânio), comparamos os espectros para dois filtros diferentes (cádmio e boral), mantidos constantes , os parâmetros restantes. O índice espectral calculado para o primeiro caso foi de 24,2% enquanto para o segundo, 9,5%.

Este resultado indica que o tipo do envoltório tem mais acentuada influência do que a natureza do filtro utilizado.

Por outro lado, lembremos que os índices espectrais, para o estudo de viabilidade do simulador térmico-rápido, são calculados comparando-se o espectro na interface filtro-envoltório com o cerne-envoltório, mas sempre para um mesmo envoltório. Portanto, os erros incorridos devem ser pequenos uma vez que o envoltório desempenha maior papel que o filtro e, os erros causados pelos desvios das secções de choque integrais (do mesmo envoltório) tendem a se cancelar durante a comparação.

TABELA 6.6a - Massa dos materiais necessários para a construção do conjunto crítico ótimo estudado.

a - Conjunto crítico com envoltório de óxido de urânio (*)

Isótopo	MASSA (kg)		
	Caroço térmico	Anel conversor	Envoltório
U-235	5,8	144,0	444,0
U-238	0,4	7.064,0	17.740,0
C	2.822,0	-	-
Al	74,8	2.102,0	
Fe	-	-	3.715,0

(*) A composição do envoltório e do refletor são as mesmas da Ref. /12/.

(*) A massa do filtro de carbetto de boro é de 614,0 kg.

b - Conjunto crítico com envoltório de tório (*)

Isótopo	MASSA (kg)		
	Caroço térmico	Anel conversor	Envoltório
U-235	6,0	145,0	-
U-238	0,4	7.115,0	-
C	2.866,0	-	-
Al	76,0	2.117,0	-
Fe	-		3.776,0
Th	-		48.284,0

(*) Massa do filtro de carbetto de boro é de 933,0 kg.

TABELA 6.6b - Comparação do espectro em 30 grupos de energia na interface "carôço-envoltório" de urânio" do conjunto crítico e o GCFR de referência

GRUPO	CONJUNTO CRÍTICO *	G C F R *
1	2,17E - 03 **	2,12E - 03 **
2	9,45E - 03	9,48E - 03
3	2,66E - 02	2,60E - 02
4	3,50E - 02	3,66E - 02
5	4,81E - 02	4,83E - 02
6	1,06E - 01	1,07E - 01
7	5,04E - 02	4,56E - 02
8	5,76E - 02	5,98E - 02
9	1,37E - 01	1,35E - 01
10	1,18E - 01	1,13E - 01
11	9,70E - 02	9,80E - 02
12	8,78E - 02	7,91E - 02
13	6,31E - 02	6,51E - 02
14	3,22E - 02	3,10E - 02
15	2,31E - 02	2,50E - 02
16	3,74E - 02	3,43E - 02
17	2,07E - 02	2,13E - 02
18	1,56E - 02	1,75E - 02
19	6,36E - 03	7,76E - 03
20	4,93E - 03	6,43E - 03
21	3,80E - 03	5,27E - 03
22	3,12E - 03	4,50E - 03
23	4,11E - 03	6,44E - 03
24	2,57E - 03	4,40E - 03
25	1,57E - 03	2,94E - 03
26	9,80E - 04	2,39E - 03
27	3,50E - 04	1,12E - 03
28	2,26E - 04	1,52E - 03
29	2,06E - 05	1,87E - 04
30	3,00E - 06	5,03E - 05

* Normalização $\int \phi(E) dE = 1$

** E - 03 = exponencial de base 10 elevado a potência - 3 .

TABELA 6.6c - Comparação do espectro em 30 grupos de energia na interface "carôço-envoltório" de Th" do conjunto crítico e o GCFR de referência

GRUPO	CONJUNTO CRÍTICO *	G C F R *
1	1,98E - 03	2,10E - 03
2	8,59E - 03	8,59E - 03
3	2,31E - 02	2,30E - 02
4	3,86E - 02	3,54E - 02
5	5,86E - 02	5,96E - 02
6	1,23E - 01	1,32E - 01
7	7,80E - 02	6,86E - 02
8	5,98E - 02	6,45E - 02
9	1,50E - 01	1,54E - 01
10	1,28E - 01	1,25E - 01
11	9,67E - 02	1,02E - 02
12	8,49E - 02	7,64E - 02
13	5,15E - 02	5,50E - 02
14	2,66E - 02	2,39E - 02
15	1,70E - 02	1,80E - 02
16	2,54E - 02	1,68E - 02
17	1,09E - 02	1,25E - 02
18	7,12E - 03	8,81E - 03
19	2,57E - 03	3,62E - 03
20	1,78E - 03	2,56E - 03
21	1,29E - 03	1,78E - 03
22	8,28E - 04	1,18E - 03
23	9,57E - 04	1,36E - 03
24	4,89E - 04	6,66E - 04
25	2,62E - 04	3,23E - 04
26	1,28E - 04	1,70E - 04
27	3,76E - 05	3,66E - 05
28	4,55E - 05	3,23E - 05
29	2,70E - 06	3,79E - 07
30	9,24E - 08	1,15E - 08

* Normalização: $\int \phi(E) dE = 1$

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 - Conclusões

Os cálculos mostraram que o conjunto anel conversor-filtro otimizado para ambos os envoltórios considerados poderá simular o carôço de um reator rápido, GCFR. Neste trabalho, com respeito a viabilidade neutrônica do projeto do conjunto crítico térmico-rápido concluiu-se que:

- a. O índice espectral do conjunto crítico, para os envoltórios de óxido de urânio (empobrecido) e tório metálico (5,63 e 7,0% , respectivamente) mostra que o espectro gerado é similar ao espectro de penetração no "blanket" do reator GCFR de referência.
- b. O fluxo de nêutrons existentes nos envoltórios são de magnitudes apropriadas (da ordem de 10^8 n/cm²-seg., para 1 KW de potência) para a realização de experiências.
- c. Na região de interesse dos reatores rápidos GCFR (100 eV - 100 KeV), o índice espectral, do conjunto crítico com envoltório de óxido de urânio é de 3,6% enquanto para o conjunto crítico com envoltório de Th é de 4,3%, utilizando-se o carbeto de boro como filtro.

Cabe aqui algumas observações sobre a aplicabilidade do conjunto térmico-rápido considerado no estudo da física dos reatores rápidos na região

periférica do carôço desses reatores.

Talvez o mais importante estudo a ser feito com a utilização desse conjunto crítico seja a medida do fluxo de nêutrons em função do espaço e energia na região do envoltório. Com um melhor conhecimento do espectro de nêutrons nos materiais fora da interface carôço-envoltório os métodos de geração das constantes de grupo usada na análise do envoltório do reator - rápido poderá ser aperfeiçoada e algumas das hipóteses atualmente usadas poderão ser confirmada ou refinadas.

O conjunto deverá também permitir o estudo da transmissão de nêutrons através do envoltório ou de outros materiais periféricos utilizados como blindagem térmica, refletores e no vaso de pressão. O fluxo de escape dos nêutrons rápidos poderá ser usado para estudar e aperfeiçoar vários tipos de blindagem térmica para reatores rápidos.

Em resumo, o conjunto crítico deverá proporcionar oportunidades para:

1. Medidas da distribuição espacial e energética do fluxo de nêutrons em diferentes tipos de configuração de envoltórios de reatores rápidos;
2. O estudo da transmissão de nêutrons através do refletor, blindagem térmica e materiais constituintes do vaso de pressão, importantes para a determinação dos danos de radiação e geração de calor nestes materiais;
3. O estudo do projeto de blindagens para reatores rápidos e atenuação de nêutrons nos materiais de interesse.

4. O aperfeiçoamento das técnicas de medidas do espectro de nêutrons em regiões de grande variação do mesmo.

O conjunto crítico deverá proporcionar a formulação de um - extensivo programa educacional na área da engenharia dos reatores rápidos mantendo um alto grau de segurança e acessibilidade para os pesquisadores.

7.2 - Recomendações

O presente estudo não exaure de modo algum o problema da otimização do sistema anel conversor-filtro .

Um aperfeiçoamento posterior provávelmente poderia ser obtido - pelo estudo do efeito do enriquecimento do urânio, simultaneamente com a variação da sua espessura e composição.

Quanto ao filtro, sugere-se o estudo de diversas combinações - envolvendo outros materiais além do cádmio e boro. Um estudo minucioso do efeito das ressonâncias dos materiais envolvidos no espectro final também seria desejável.

Por outro lado, o projeto mecânico do conjunto térmico rápido deve ser examinado à luz da factibilidade de sua construção. Um exame da -

utilidade de se usar um reator térmico acionador moderado por hidrogênio, ao invés da grafita, poderia ser interessante uma vez que certos materiais hidrogenados, por exemplo polietileno, poderia ser obtido no mercado nacional com menor dispendio de capital, além de ser de mais fácil usinagem.

APÊNDICE A - Estrutura dos grupos de energia utilizado no programa

CITATION

GRUPO	LIMITE SUPERIOR (eV)	ENERGIA MÈDIA (eV)
1	1,49 x E + 07	9,51 x E + 06
2	6,06 x E + 06	4,72 x E + 06
3	3,67 x E + 06	2,86 x E + 06
4	2,23 x E + 06	1,73 x E + 06
5	1,32 x E + 06	1,05 x E + 06
6	8,20 x E + 05	6,39 x E + 05
7	4,97 x E + 05	4,28 x E + 05
8	3,68 x E + 05	3,33 x E + 05
9	3,01 x E + 05	2,35 x E + 05
10	1,83 x E + 05	1,42 x E + 05
11	1,11 x E + 05	8,65 x E + 04
12	6,73 x E + 04	5,24 x E + 04
13	4,08 x E + 04	3,18 x E + 04
14	2,47 x E + 04	2,18 x E + 04
15	1,93 x E + 04	1,70 x E + 04
16	1,50 x E + 04	1,17 x E + 04
17	9,11 x E + 03	7,10 x E + 03
18	5,53 x E + 03	4,30 x E + 03
19	3,35 x E + 03	2,96 x E + 03
20	2,61 x E + 03	2,30 x E + 03
21	2,03 x E + 03	1,79 x E + 03
22	1,58 x E + 03	1,39 x E + 03
23	1,23 x E + 03	9,61 x E + 02
24	7,48 x E + 02	5,82 x E + 02
25	4,53 x E + 02	3,53 x E + 02
26	2,75 x E + 02	1,89 x E + 02
27	1,30 x E + 02	8,93 x E + 01
28	6,14 x E + 01	1,06 x E + 01
29	1,85 x E + 00	1,10 x E + 00
30	6,55 x E - 01	5,57 x E - 02

APÊNDICE B - Composições do G. C. F. R. de referência

TABELA 1 - Densidade atômica dos isótopos pesados x 10 ⁻⁴ átomos/barn x cm				
Isótopo	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
<u>Carôço</u>				
U-235	0,1222	0,1136	0,1084	0,1066
U-238	48,1565	44,7639	42,7194	42,0029
Pu-239	6,2566	7,3253	8,3751	10,6652
Pu-240	2,8431	3,3298	3,8070	4,8477
Pu-241	1,5929	1,8646	2,1319	2,7147
Pu-242	0,6825	0,7991	0,9137	1,1634
<u>Total dos isótopos pesados</u>	59,654	58,196	58,056	61,500
<u>Envoltório</u>				
<u>Axial</u>				
U-235	0,1572	0,1532	0,1526	0,1614
U-238	61,94	60,36	60,16	63,63
<u>Envoltório</u>				
<u>Radial</u>				
U-235	0,2402			
U-238	94,68			

A PÊNDICE B (Cont.)

TABELA 2 - Densidade atômica dos materiais estruturais (átomo/barn x cm)

Isótopo	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
<u>Carôço</u>				
O	$1,193 \times 10^{-2}$	$1,164 \times 10^{-2}$	$1,161 \times 10^{-2}$	$1,230 \times 10^{-2}$
Cr	$2,310 \times 10^{-3}$	$2,310 \times 10^{-3}$	$2,310 \times 10^{-3}$	$2,310 \times 10^{-3}$
Fe	$9,170 \times 10^{-3}$	$9,170 \times 10^{-3}$	$9,170 \times 10^{-3}$	$9,170 \times 10^{-3}$
Ni	$1,810 \times 10^{-3}$	$1,810 \times 10^{-3}$	$1,810 \times 10^{-3}$	$1,810 \times 10^{-3}$
Mo	$2,660 \times 10^{-4}$	$2,660 \times 10^{-4}$	$2,660 \times 10^{-4}$	$2,660 \times 10^{-4}$
<u>Envoltório</u>				
<u>Axial</u>				
O	$1,184 \times 10^{-2}$	$1,154 \times 10^{-2}$	$1,150 \times 10^{-2}$	$1,230 \times 10^{-2}$
Cr	$2,310 \times 10^{-3}$	$2,310 \times 10^{-3}$	$2,310 \times 10^{-3}$	$2,310 \times 10^{-3}$
Fe	$9,170 \times 10^{-3}$	$9,170 \times 10^{-3}$	$9,170 \times 10^{-3}$	$9,170 \times 10^{-3}$
Ni	$1,810 \times 10^{-3}$	$1,810 \times 10^{-3}$	$1,810 \times 10^{-3}$	$1,810 \times 10^{-3}$
Mo	$2,660 \times 10^{-4}$	$2,660 \times 10^{-4}$	$2,660 \times 10^{-4}$	$2,660 \times 10^{-4}$
<u>Envoltório</u>				
<u>Radial</u>				
O	$1,898 \times 10^{-2}$			
Cr	$1,964 \times 10^{-3}$			
Fe	$8,450 \times 10^{-3}$			
Ni	$1,670 \times 10^{-3}$			
Mo	$2,450 \times 10^{-4}$			

REFLETOR : Fe = $9,170 \times 10^{-3}$

APÊNDICE C - Secções de choque efetivas de absorção e fissão dos isótopos férteis do envoltório radial em 30 grupos de energia (em barn)

GRUPO	σ_a		σ_f	
	Th-232	U-238	Th-232	U-238
1	1,960	1,722	1,953	1,710
2	0,163	0,541	0,141	0,530
3	0,167	0,571	0,125	0,546
4	0,178	0,448	0,100	0,386
5	0,127	0,157	0,002	0,024
6	0,157	0,136	0,00	0,001
7	0,170	0,124	0,00	0,0
8	0,181	0,128	0,00	0,0
9	0,216	0,162	0,00	0,0
10	0,305	0,233	0,00	0,0
11	0,411	0,278	0,00	0,0
12	0,473	0,339	0,00	0,0
13	0,500	0,399	0,00	0,0
14	0,488	0,438	0,00	0,0
15	0,474	0,475	0,00	0,0
16	0,508	0,524	0,00	0,0
17	0,546	0,573	0,00	0,0
18	0,582	0,554	0,00	0,0
19	0,595	0,456	0,00	0,0
20	0,592	0,458	0,00	0,0
21	0,591	0,393	0,00	0,0
22	0,666	0,389	0,00	0,0
23	0,553	0,526	0,00	0,0
24	0,716	0,494	0,00	0,0
25	0,527	0,457	0,00	0,0
26	0,590	0,594	0,00	0,0
27	0,521	1,063	0,00	0,0
28	0,277	0,584	0,00	0,0
29	0,650	0,396	0,00	0,0
30	1,433	0,707	0,00	0,0

- ~~17~~ / Seaborg, Glenn T., et al., "Fast Breeder Reactors", Scientific American, Nov. 1970.
- ~~12~~ / Ferreira, A.C.A. e Hukai, R. Y., "Definição das características estruturais do conjunto crítico moderado à grafita do Reator de Potência Zero do IEA", São Paulo, Instituto de Energia Atômica, 1975 (IEA-373).
- ~~13~~ / Hummel, H.H., et alii. "Experimental and Theoretical Studies of the Coupled Fast-Thermal System ZPR-VI", Proc. 2nd. International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva 1958, p/166, Vol. 12, United Nations, New York (1958).
- ~~14~~ / Kato, W. Y., et al., "Final Safety Analysis Report", ANL-7442 (Feb. 1970).
- ~~15~~ / Loewenstein, W.L. "The Physics Design of EBR-II", Physics of Fast and Intermediate Reactors, Vol. 3, p/263, International Atomic Energy Agency, Vienna (1968).
- ~~16~~ / Amorosi, A. and Yevick, J.G. "An Appraisal of the Enrico Fermi Fast Reactor", Proc. 2nd. International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva 1958, p/358, Vol. 9, United Nations, New York (1958).
- ~~17~~ / "Proceedings of the International Conference on Fast Reactors" (Critical Experiments)", ANL-7320 (October, 1966).
- ~~18~~ / Chezem, C.G., "A Uranium-Metal Exponential Experiment", Nucl. Sci. Eng., 8, 652-669 (1960).
- ~~19~~ / "Reactor Physics Efforts Requirement in Support of Fast Breeder Development Program", WASH-1066 (1966).
- ~~130~~ / Forbes, I.A. et alii. "Designs, Construction and Evaluation of a Facility for the Simulation of Fast Reactor Blankets", MIT-4105-2 MITNE-110, Massachusetts Institute of Technology (1970).

- ~~111~~ Krauss, F.G. et alii. " The Conceptual Design of a Fast Subcritical Blanket Facility", Nucl. Technol., 25, 429 (1975).
- ~~112~~ Pellaud, B., " Physics Design of the Gas-Cooled Fast Breeder Reactor Demonstration Plant", GA-10509 (1971).
- ~~113~~ Brewer , S.T. et al., " The Economics of Fuel Depletion in Fast Breeder Reactor Blankets" - MITNE-123, Massachusetts Institute of Technology (1972).
- ~~114~~ Faya, A. G., " Avaliação Neutrônica de "Blankets" de Tório Metálico em Reatores Rápidos Refrigerados por Gás", Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - São Paulo -SP (1975).
- ~~115~~ Greene, N.M. et alii. "XSDRN : A Discrete Ordinates Spectral Averaging Code " - Oak Ridge National Lab., July 1969 (ORNL-1320).
- ~~116~~ Fowler, T.B. et alii. " Nuclear Reactor Analysis Code: CITATION", Oak Ridge , Oak Ridge National Lab., July 1971 (ORNL-TM-2496, Rev.2).
- ~~117~~ Davey, W.G. , " An Analysis of the Neutrons Capture Cross Section of U-238 between 1 KeV and 15 MeV ", Nucl. Sci. Eng. 39 , 337-360(1970)
- ~~118~~ Gleebler, P., et alii. " Implications of Nuclear Data Uncertainties to Reactor Design", Proc. 2nd. International Conference on Nuclear Data for Reactors, Helsinki , Vol. 1 , 17-33 (1970).
- ~~119~~ Kidman, R.B. , and Schenter, R.E., " Group Constant for Fast Reactor Calculations", HEDL-TIME-7136 (1971).