

BR 77C 10 FG



**CÁLCULO DA MASSA FÍSSIL DE UM CONJUNTO CRÍTICO MODERADO
POR GRAFITA UTILIZANDO-SE URÂNIO ENRIQUECIDO EM 93%**

**Francisco Correa, Marco A. S. Marzo, Irso Collussi e
Antonio C. A. Ferreira**

**PUBLICAÇÃO IEA 422
CEN 44**

JUNHO/1976

**CÁLCULO DA MASSA FISSIL DE UM CONJUNTO CRÍTICO MODERADO
POR GRAFITA UTILIZANDO-SE URÂNIO ENRIQUECIDO EM 93%**

**Francisco Correa, Marco A.S. Merzo, Irso Collussi e
Antonio C.A. Ferreira**

**COORDENADORIA DE ENGENHARIA NUCLEAR
(CEN)**

**INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
SÃO PAULO - BRASIL**

APROVADO PARA PUBLICAÇÃO EM FEVEREIRO/1976

CONSELHO SUPERIOR

Eng.º Roberto N. Jafet — Presidente
Prof. Dr. Emilio Mattar — Vice-Presidente
Prof. Dr. José Augusto Matins
Dr. Ivano Humbert Marchesi
Eng.º Helcio Modesto de Costa

SUPERINTENDENTE

Prof. Dr. Rômulo Ribeiro Pieroni

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal 11.049 (Pinheiros)
Cidade Universitária "Armando de Salles Oliveira"
SÃO PAULO — BRASIL

NOTA: Este trabalho foi conferido pelo autor depois de composto e sua redação está conforme o original, sem qualquer correção ou mudança.

CÁLCULO DA MASSA FISSIL DE UM CONJUNTO CRÍTICO MODERADO POR GRAFITA UTILIZANDO-SE URÂNIO ENRIQUECIDO EM 93%

**Francisco Correa, Marco A. S. Marzo, Irso Collussi e
Antonio C. A. Ferreira**

RESUMO

Determinou-se a massa crítica de urânio de um conjunto crítico moderado por grafita e alimentado com urânio enriquecido em 93% para ser montado no Reator de Potência Zero do Instituto de Energia Atômica.

A composição do caroço do reator foi otimizada para permitir o estudo de um número máximo de configurações.

A análise de três composições do caroço mostrou que 8 kg de urânio enriquecido em 93% de U-235 (em massa) e 100 kg de tório são suficientes para experiências de criticidade.

1 – O REATOR DE POTÊNCIA ZERO DE IEA

1.1 – INTRODUÇÃO

O Reator de Potência Zero do Instituto de Energia Atômica (RPZ) encontra-se, atualmente, em fase final de projeto. O RPZ não visa a produção de energia, mas tem por finalidade servir de instrumento para pesquisas teóricas e experimentais e para o estudo de sistemas nucleares moderados por grafita e que regeneram o combustível, utilizando o ciclo do tório.

1.2 – DESCRIÇÃO DO RPZ

O RPZ tem uma configuração do tipo mesa-partida (split-table). O caroço do reator é constituído de duas partes separáveis: uma fixa, e outra móvel sobre um suporte horizontal. Cada parte, denominada mesa, é preparada para uma experiência de criticidade, sendo carregada com meia massa crítica, de forma tal que, juntando-se as mesas, é atingida a criticidade do conjunto. A Figura 1.1 ilustra o projeto mecânico da unidade crítica.

O caroço do RPZ é constituído pela superposição de blocos de grafita com formato de paralelepípedos. Estes blocos funcionam como moderadores de nêutrons e como suportes para as barras de combustível. Os blocos podem ser de dois tipos: a) uns (a maioria) contendo canais cilíndricos de igual diâmetro e mesmo espaçamento (Figura 1.2), onde estão alojadas as barras que contêm os elementos combustíveis para as experiências (Figura 1.3); b) outros, compactos, utilizados apenas na última camada de blocos que delimita o caroço.

As barras que preencherão os canais dos blocos são de três tipos: a) barras contendo urânio, b) barras contendo tório e c) barras de grafita pura (grafita igual a grafita estrutural dos blocos). Todas as barras tem uma cobertura de alumínio (Figura 1.4). As barras de elementos físseis (de urânio) e as de férteis (de tório) são formadas pela justaposição de bastões de grafita (grafita de ligamento) contendo, respectivamente, grânulos de UC_2 e ThO_2 recobertos por finas camadas de carbono. A Figura 1.5 mostra um grânulo de UC_2 (partícula Triso) e um de ThO_2 (partícula Biso).

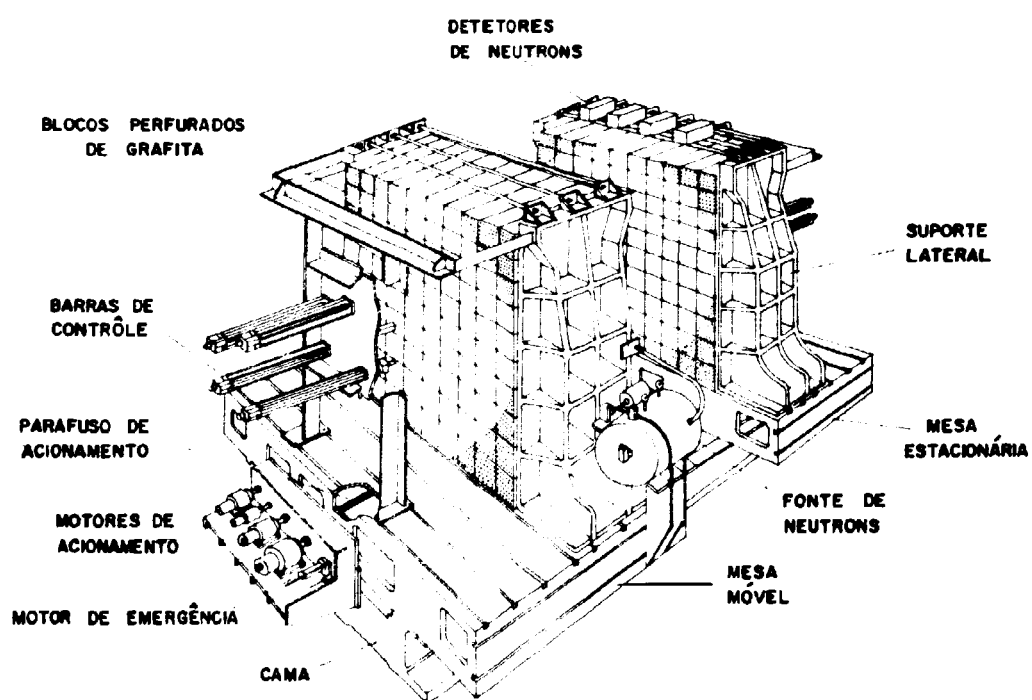


Figura 1.1 – Concepção artística do RPZ

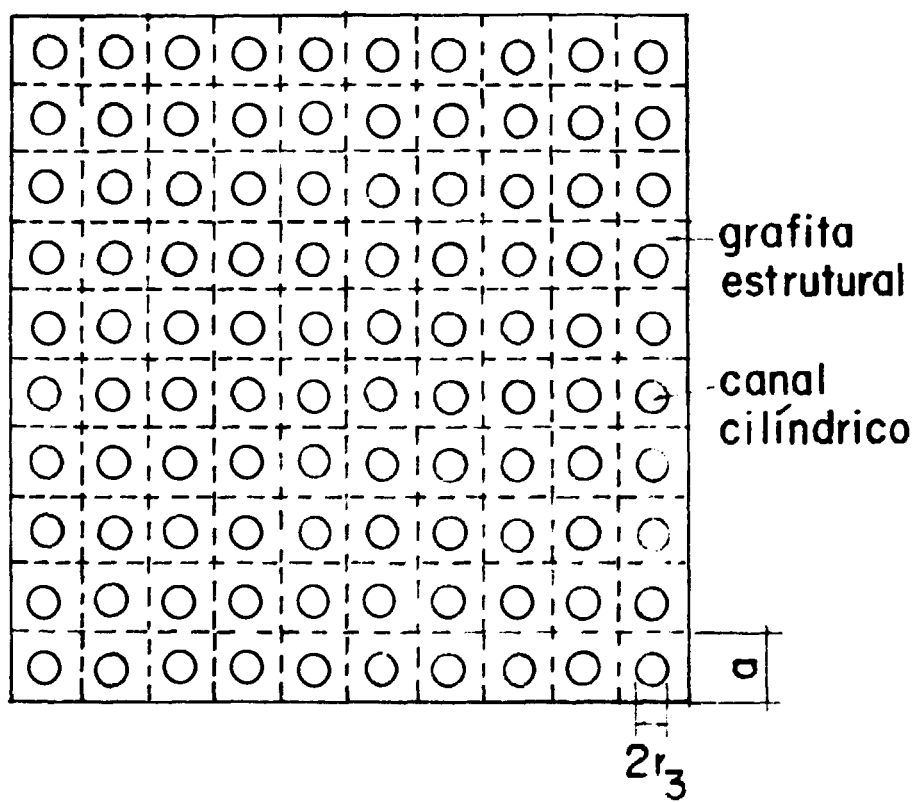
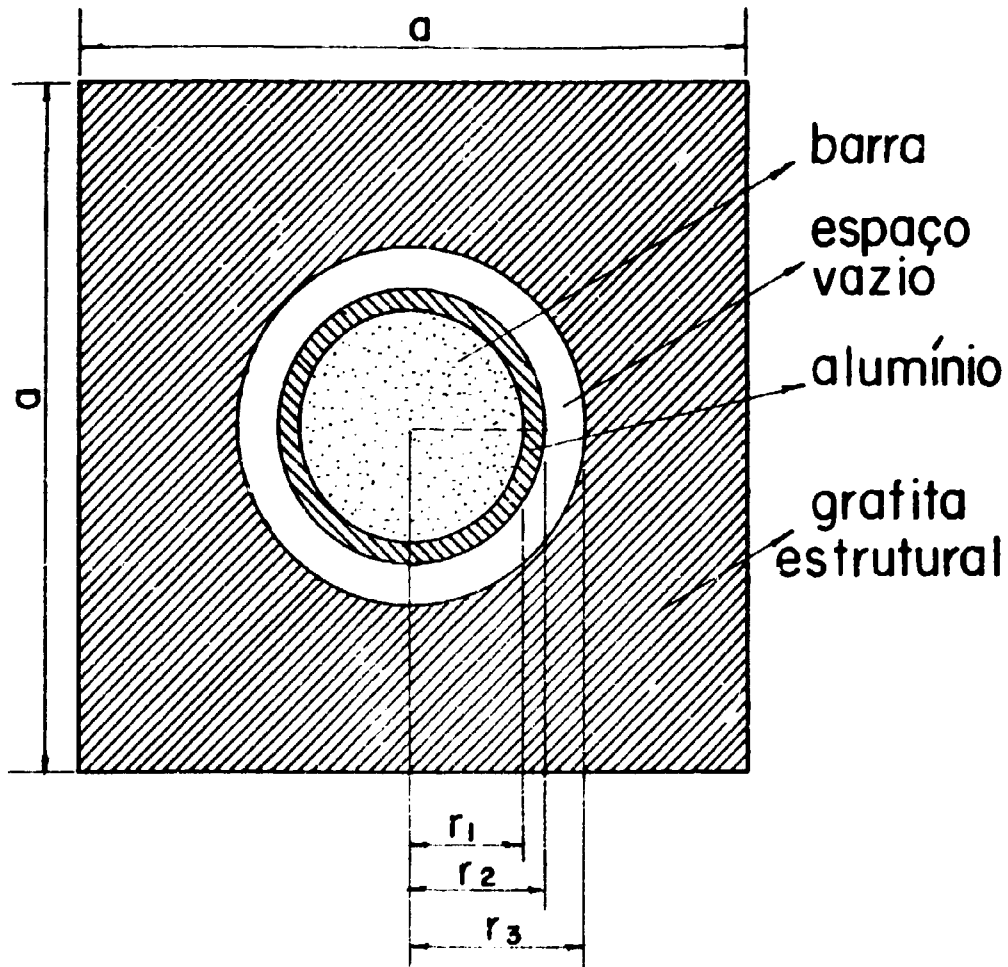
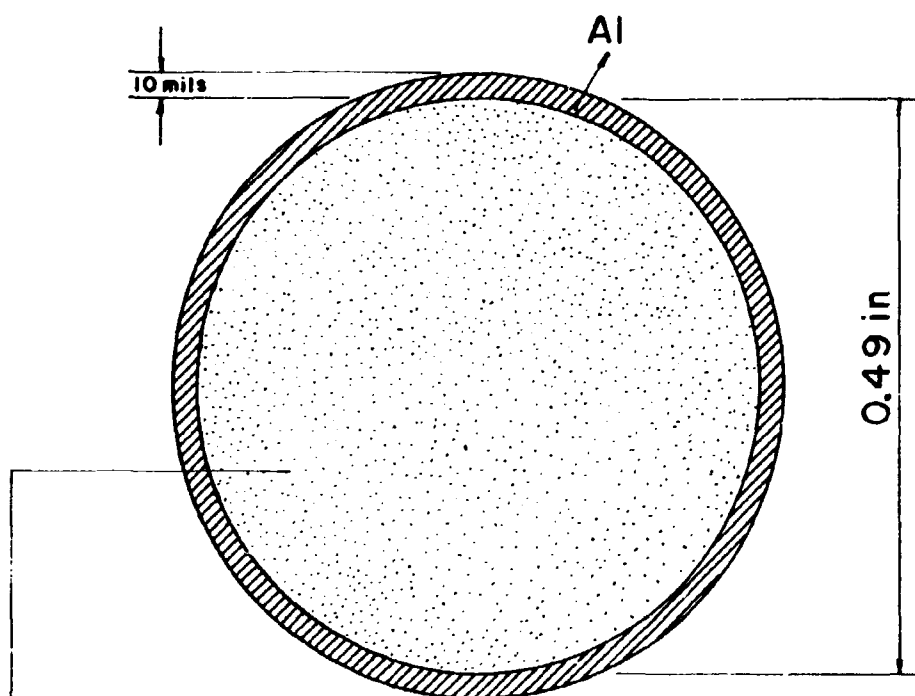


Figura 12 – Bloco estrutural perfurado



$$\left\{ \begin{array}{l} r_1 = 0,245 \text{ in} \\ r_2 - r_1 = 10 \text{ mils} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} a : a \text{ serem} \\ r_3 : \text{determinados} \end{array} \right.$$

Figura 13 – Esquema de uma célula elementar



- 1- Grafita de ligamento+ UC_2 (barra físsil) ou
- 2- Grafita de ligamento+ ThO_2 (barra fértil) ou
- 3- Grafita pura (barra de C puro)

Figura 1 4 – Corte de uma barra

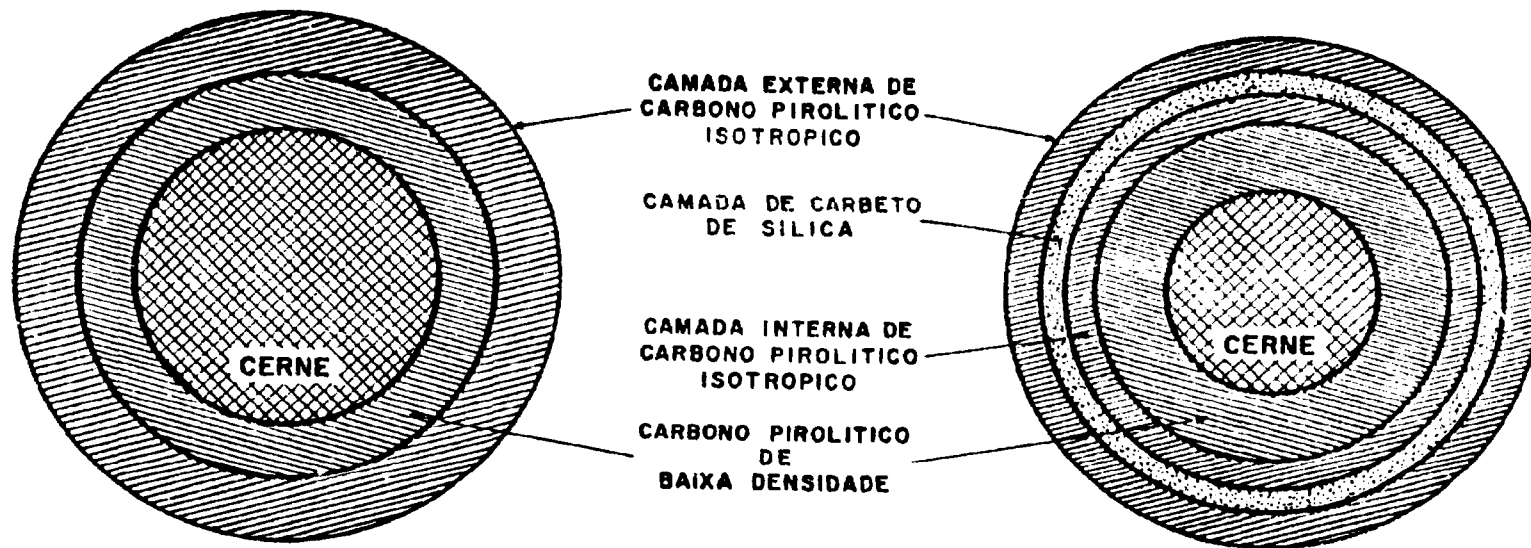


Figura 1.5 – Partículas BISO e TRISO

O caroço é dividido em três zonas, cada uma tendo sua própria configuração e finalidade:

Zona 1 – Caroço Central: É a zona para medidas e análises; tem a forma cilíndrica e está disposta no centro da estrutura das mesas. Barras de urânio, tório e grafita são dispostas, segundo padrões geométricos simples, nessa região, procurando simular as composições dos HTGRs.

Zona 2 – Anel Acionador: Esta zona circunda o caroço central em forma de corôa cilíndrica. Nesta região se encontram apenas barras de urânio e de grafita com a finalidade de levar o conjunto mais facilmente à criticalidade, isto é, com menor massa físsil (U-235).

Zona 3 – Refletor: Envolve o anel acionador e é constituída apenas por grafita.

Além deste sistema de três zonas permitir uma boa redução na massa crítica, o raio do caroço, bem como os das outras duas zonas, podem ser variados conforme as exigências de criticalidade do conjunto, mas sempre abrangendo uma área suficientemente grande das mesas, para permitir medidas seguras. A Figura 1.6 apresenta um esquema do caroço.

1.3 – FINALIDADES DO REATOR DE POTÊNCIA ZERO DO I.E.A.

As finalidades nas quais se fundamentam o projeto e a construção do RPZ do I.E.A. são enumeradas a seguir:

F.1 – Servir de instrumento prático para o estudo de reatores conversores baseados no ciclo de tório, os quais apresentam especial interesse para o Brasil que é auto-suficiente em tório⁽⁶⁾ e deficiente em urânio⁷⁾.

F.2 – Permitir o treinamento básico de operadores e físicos de reatores.

F.3 – Obter experiência na administração de projetos e construção de reatores, que representa um aspecto importante na formação de engenheiros nucleares pelo I.E.A.

F.4 – Aquisição de capacidade experimental para a aprendizagem de métodos clássicos de medida de parâmetros de reatores e desenvolvimento de novas técnicas de medidas.

F.5 – Desenvolvimento de uma tecnologia nuclear própria. Deve-se ressaltar que países como os Estados Unidos, Inglaterra, França, Alemanha, Rússia, Japão e outros construíram unidades críticas, para obter essa tecnologia.

1.4 – OBJETIVOS DESTE TRABALHO

Os cálculos de criticalidade para um conjunto crítico moderado a grafita, simulando uma região típica do HTGR, a ser montado no RPZ do I.E.A., já foram executados⁽¹⁾. O índice de enriquecimento do urânio, utilizado naqueles cálculos, foi fixado em 20% e o diâmetro dos buacos na grafita e seu espaçamento, em 2,4 cm e 3,0 cm, respectivamente. Contudo, devido ao fato das barras combustíveis serem mais facilmente fabricadas pelo fornecedor com outras especificações, os cálculos de criticalidade tiveram de ser refeitos.

Este trabalho trata da obtenção das faixas de valores do diâmetro e do espaçamento dos furos nos blocos de grafita, e das faixas de valores das concentrações de urânio-235 e de tório nas respectivas barras, que melhor atendimento provêem à concepção e finalidades do RPZ. O enriquecimento do urânio foi tomado igual a 93% e o diâmetro de todas as barras, igual a 0,49 polegadas (Figura 1.4), como especificações do fornecedor.

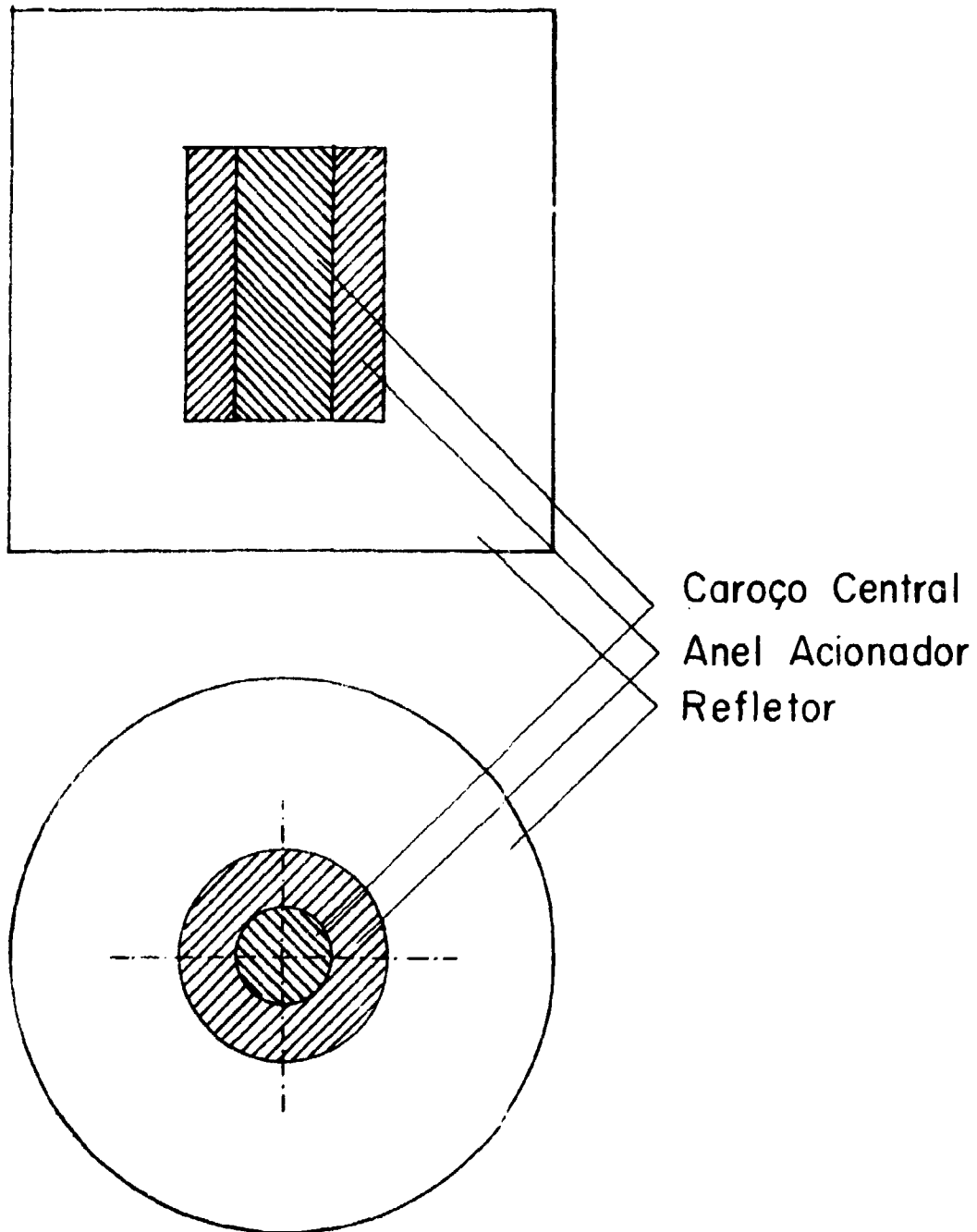


Figure 1.6 – Esquema do caroço do RPZ

A seguir são calculadas as massas críticas de U-235 e de Th-232 para três diferentes conjuntos de parâmetros mencionados no parágrafo anterior, decorrendo daí uma estimativa das necessidades mínimas de U-235 (e de Th) que garantam a operação do RPZ.

2 – CRITÉRIOS E ESPECIFICAÇÕES DO CAROÇO DO RPZ

2.1 – INTRODUÇÃO

Fixada a concepção do caroço da unidade crítica, o problema do projeto consiste da especificação de um certo número de dados de construção, e da verificação das garantias que eles oferecem para serem atingidos os fins gerais propostos no capítulo anterior.

Os parâmetros mais importantes a serem examinados neste capítulo (Secção 1.4) são os seguintes:

P.1 – o diâmetro dos furos ($2r_3$) a serem feitos nos blocos de grafita (Figura 1.3);

P.2 – o espaçamento (a) entre os centros dos buracos, e que é igual à aresta da célula elementar (Figura 1.3);

P.3 – a concentração (ρ_U) de U-235 nas barras fisséis, e,

P.4 – a concentração (ρ_{Th}) de Th nas barras férteis.

Estas especificações estabelecem, de um lado, o intervalo de composições do caroço que pode ser alcançado, e de outro, o grau de homogeneidade, do ponto de vista do comportamento neutrônico, das experiências de criticalidade.

A Tabela 2.1 reúne alguns dados importantes referentes ao caroço do RPZ, fixados, ou no projeto geral do RPZ, ou pelo fornecedor das barras de combustível.

Tabela 2.1

Alguns Dados Importantes do Caroço do RPZ

Altura máxima do caroço	297 cm
Espessura máxima do caroço ativo	2 x 130 cm
Espessura do encamisamento de alumínio das barras	10 mils
Densidade da grafita de ligamento dos bastões	1,5 g/cm ³
Densidade da grafita estrutural (dos blocos e das barras de grafita pura)	1,74 g/cm ³
Enriquecimento do urânio (razão atômica)	93%
Densidade do UC ₂	11,28 g/cm ³
Densidade do ThO ₂	9,86 g/cm ³
Comprimento de uma barra	65 cm

2.2 – CRITÉRIOS PARA OBTENÇÃO DAS QUATRO ESPECIFICAÇÕES BÁSICAS

Os parâmetros básicos (Secção 1.4 e 2.1) a serem examinados nesta seção, devem satisfazer uma série de critérios relacionados a seguir, dos quais alguns são de natureza técnica e outros de natureza essencialmente física:

C.1 – $[\lambda_{tr}/a]$, razão entre o livre caminho médio de transporte na grafita estrutural e o espaçamento dos buracos, deve ser a menor possível a fim de evitar interferência entre barras vizinhas;

C.2 – $[\lambda_g/a]$ barra físsil, razão entre o livre caminho médio de absorção de nêutrons na barra físsil e o espaçamento entre os centros dos buracos, deve ser maior que 3 (três), de modo a tornar o meio o mais homogêneo possível, do ponto de vista neutrônico;

C.3 – $[\lambda_g/a]$ barra fértil, idem ao critério C 2, para a barra fértil;

C.4 – $[\frac{\pi(r_3^2 - r_2^2)}{a^2 - \pi(r_3^2 - r_2^2)}]$, razão entre o volume vazio de uma célula elementar e o volume restante

ocupado pela mesma (Figura 1.3), deve ser a mínima possível, dentro das condições de viabilidade técnica, tal que a análise neutrônica seja facilitada devido à maior homogeneidade do sistema. Na prática tomou-se o valor 0,1 (um décimo) como valor máximo dessa fração;

C.5 – $[C/U-5]$ célula físsil, razão atômica entre o carbono de uma célula elementar (Figura 1.3) e o urânio-235 da barra físsil contida nessa célula, deve ser a menor possível, dentro dos padrões do HTGR⁽⁸⁾, a fim de deixar submoderado o espectro de nêutrons (como nos HTGR); e

C.6 – $[C/Th]$ célula fértil, razão atômica entre o carbono de uma célula elementar fértil e o tório da barra fértil dessa célula (Figura 1.3), deve ficar dentro dos padrões dos HTGR⁽⁸⁾. Na prática, determinou-se a concentração de tório (ρ_s) com base nas proporções de massa de urânio e tório existentes nos reatores térmicos conversores. No HTGR de 1100 Mw, por exemplo, a concentração média de tório é cerca de 20 (vinte) vezes superior à do urânio-235⁽⁴⁾.

2.3 – DETERMINAÇÃO DAS FAIXAS DE VALORES ÓTIMOS DOS PARÂMETROS BÁSICOS.

Como o livre caminho médio de transporte (λ_{tr}) do carbono estrutural vale cerca de 2,53 cm, para que o primeiro critério (C 1) seja, pelo menos, parcialmente satisfeito, o espaçamento (a) entre os furos dos blocos deve ser maior ou da ordem desse valor. Com isso, verifica-se, através da Figura 2.1, que a concentração de U-235 nas barras físsis (ρ_s) deve ser menor que 0,09 g/cm³ a fim de cumprir o segundo critério (C 2), concomitantemente ao primeiro (C 1)

Como o RPZ deverá funcionar com uma potência menor que 1 KW, portanto praticamente à temperatura ambiente, os valores, tais como seções de choque, que dependem da temperatura do caroço foram calculados tomando-se a temperatura do meio igual a 20°C.

A Figura 2.2 mostra a variação do livre caminho médio de absorção na barra fértil com a densidade de tório na mesma (ρ_{Th}). Pode-se verificar, através dessa figura, que a terceira condição (C.3) é facilmente satisfeita e o que delimita (ρ_{Th}) é o critério sexto (C.6).

Através da Figura 2.3, pode-se analisar o comportamento da razão atômica $[C/U-5]$ na célula físsil com a variação do raio (r_3) dos furos, tendo as curvas como parâmetros, o espaçamento (a) entre os centros dos furos e a concentração (ρ_s) de U-5 na barra físsil. A variação do raio (r_3) do furo nessa figura obedece ao quarto critério (C.4). A faixa de valores convenientes da razão atômica $[C/U-5]$ na célula físsil é de 1800 a 2200⁽¹⁾ (para que se possam obter razões atômicas $[C/U-5]$, no caroço central do RPZ, semelhantes às do HTGR⁽⁸⁾ vide Secção 3.1).

A Figura 2.4 é semelhante à Figura 2.3 e mostra o comportamento da razão atômica $[C/Th]$ na célula fértil conforme a variação do raio (r_3) dos furos, tendo para parâmetros das curvas o espaçamento (a) entre os furos e a concentração (ρ_{Th}) de tório na barra fértil. Essa figura foi construída com base na Figura 2.3 e no sexto critério (C.6)

Com base nas Figuras 2.3 e 2.4, as faixas de valores dos quatro parâmetros básicos (a, r_3 , ρ_{U-5} , ρ_{Th}), que mais de perto satisfazem os critérios estabelecidos na Secção 2.2, estão reunidas na Tabela 2.2. Vale a pena frisar que a Tabela 2.2 serve apenas como guia na escolha dos valores dos quatro parâmetros

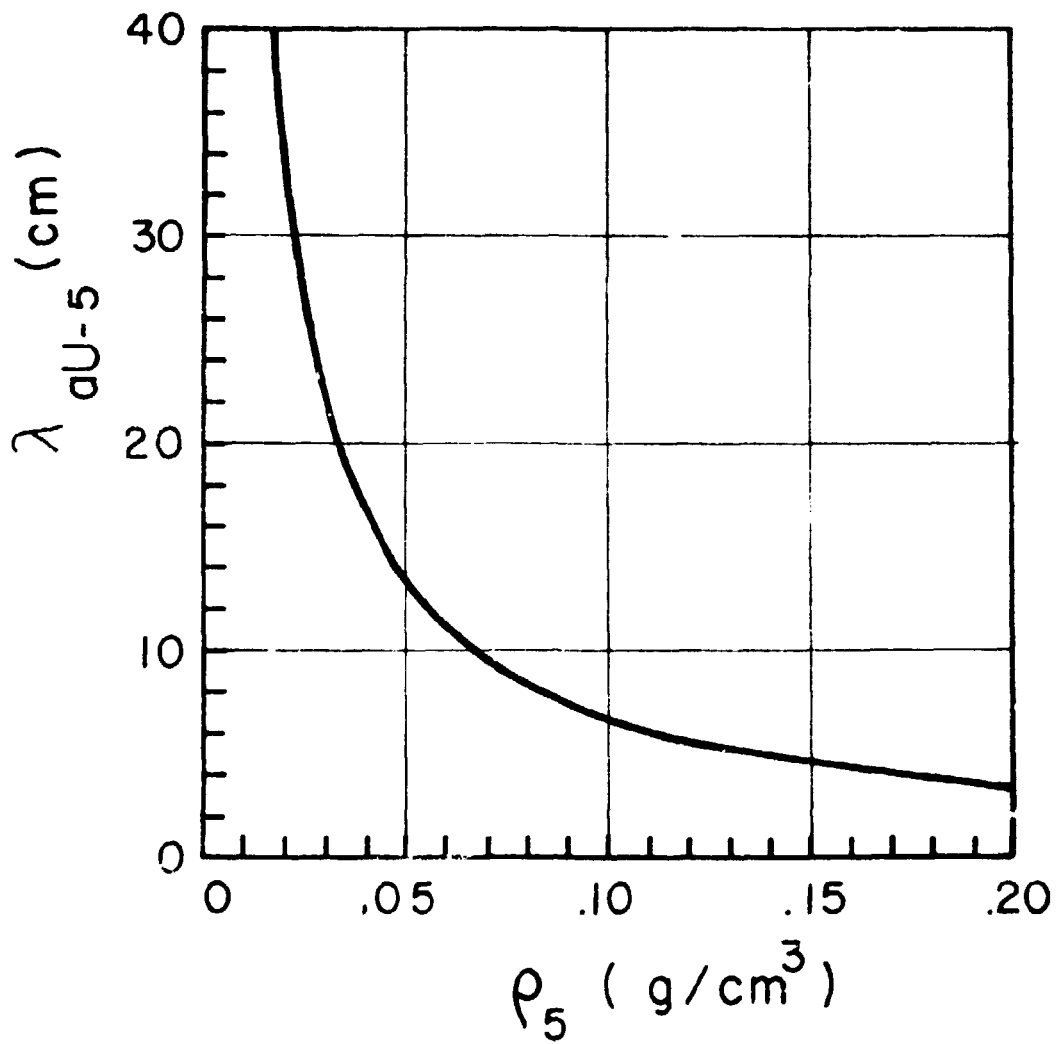


Figura 2.1 – Livre caminho médio de absorção de neutrons versus densidade de U-235 na barra físsil

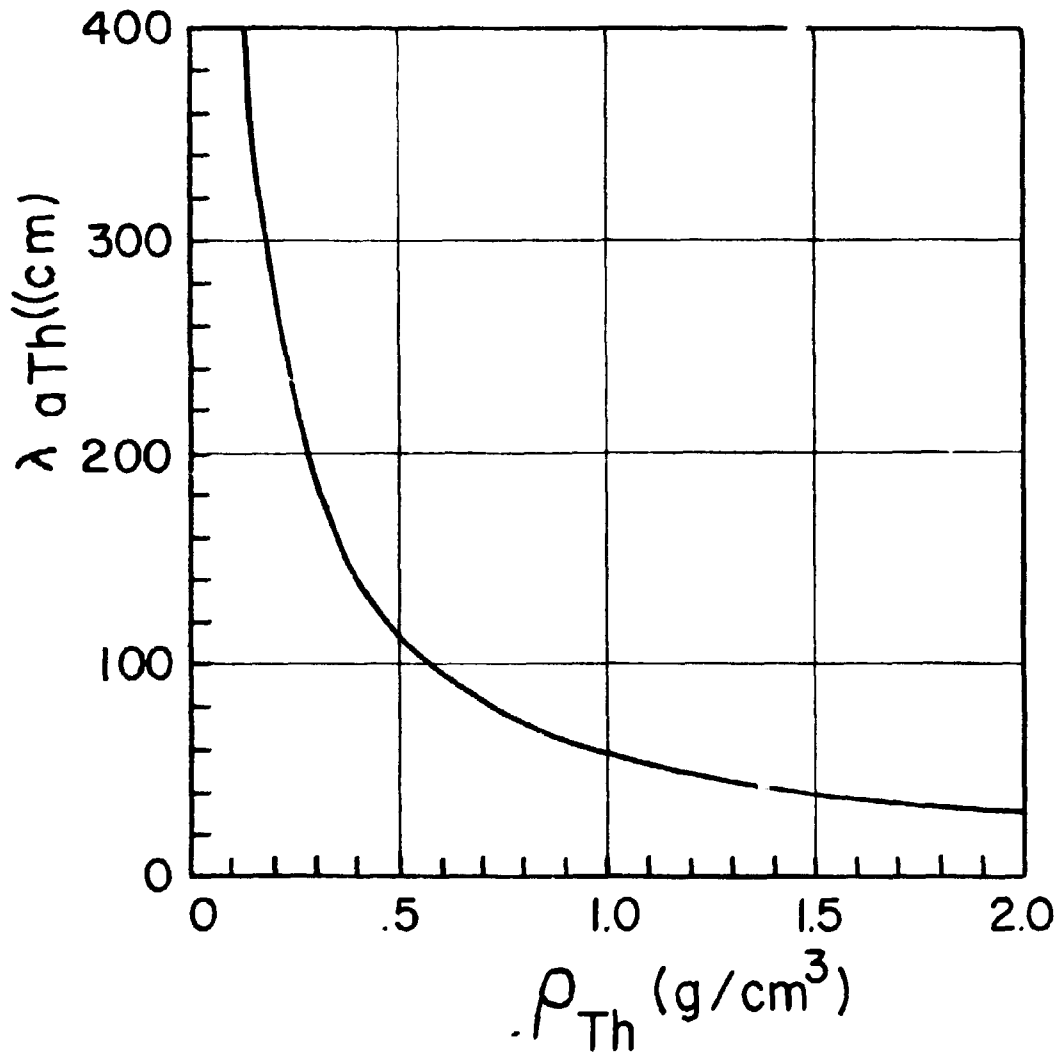


Figura 2.2 – Livre caminho médio de absorção do neutrons versus densidade de Th na barra fértil

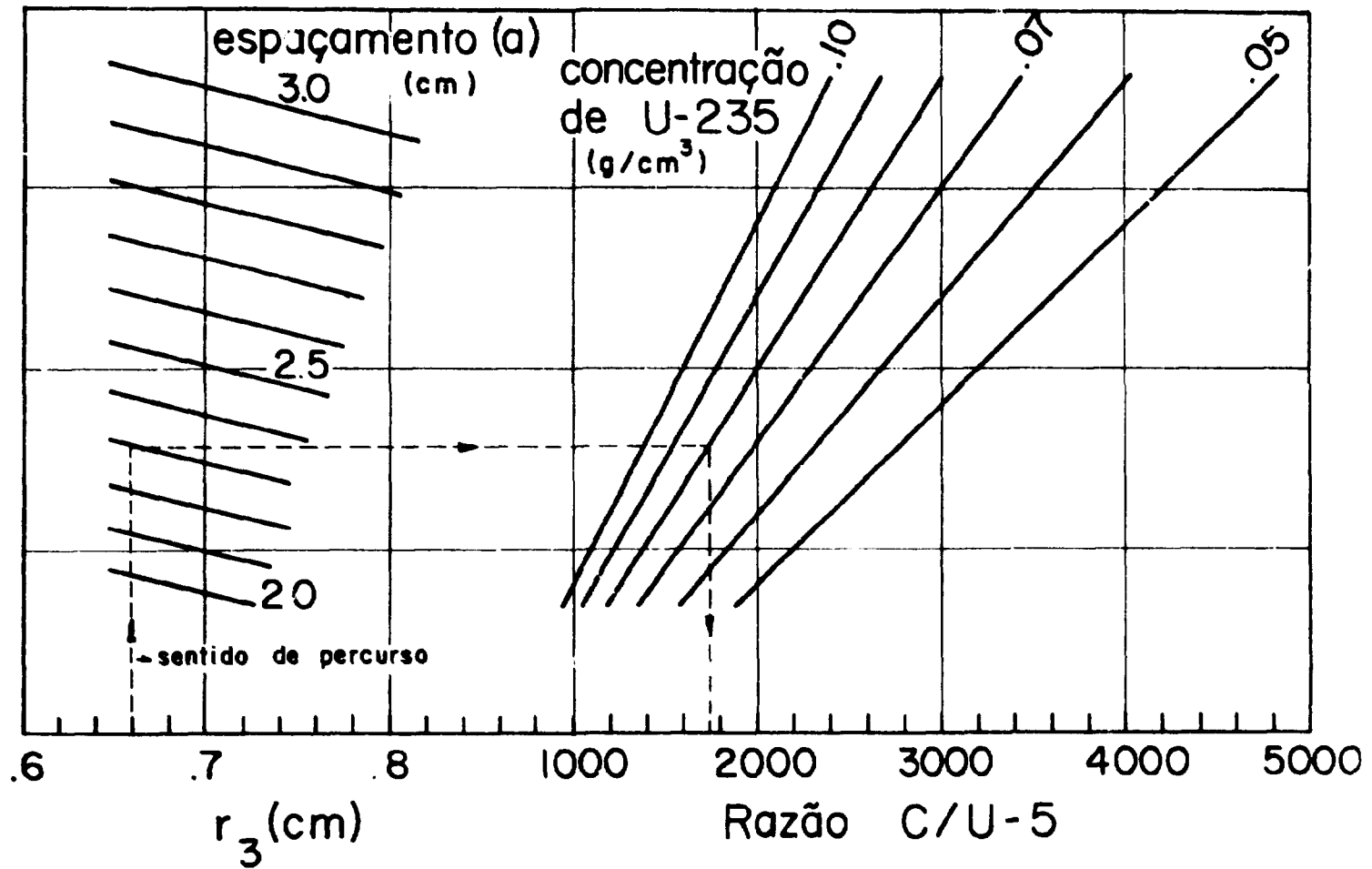


Figura 2.3 – Variação da razão atômica [C/U-5] na célula fissil, segundo o raio (r_3) dos furos nos blocos de grafita, tendo para parâmetros das curvas o espaçamento (a) entre os furos e a concentração (ρ_{235}) de U-235 na barra fissil

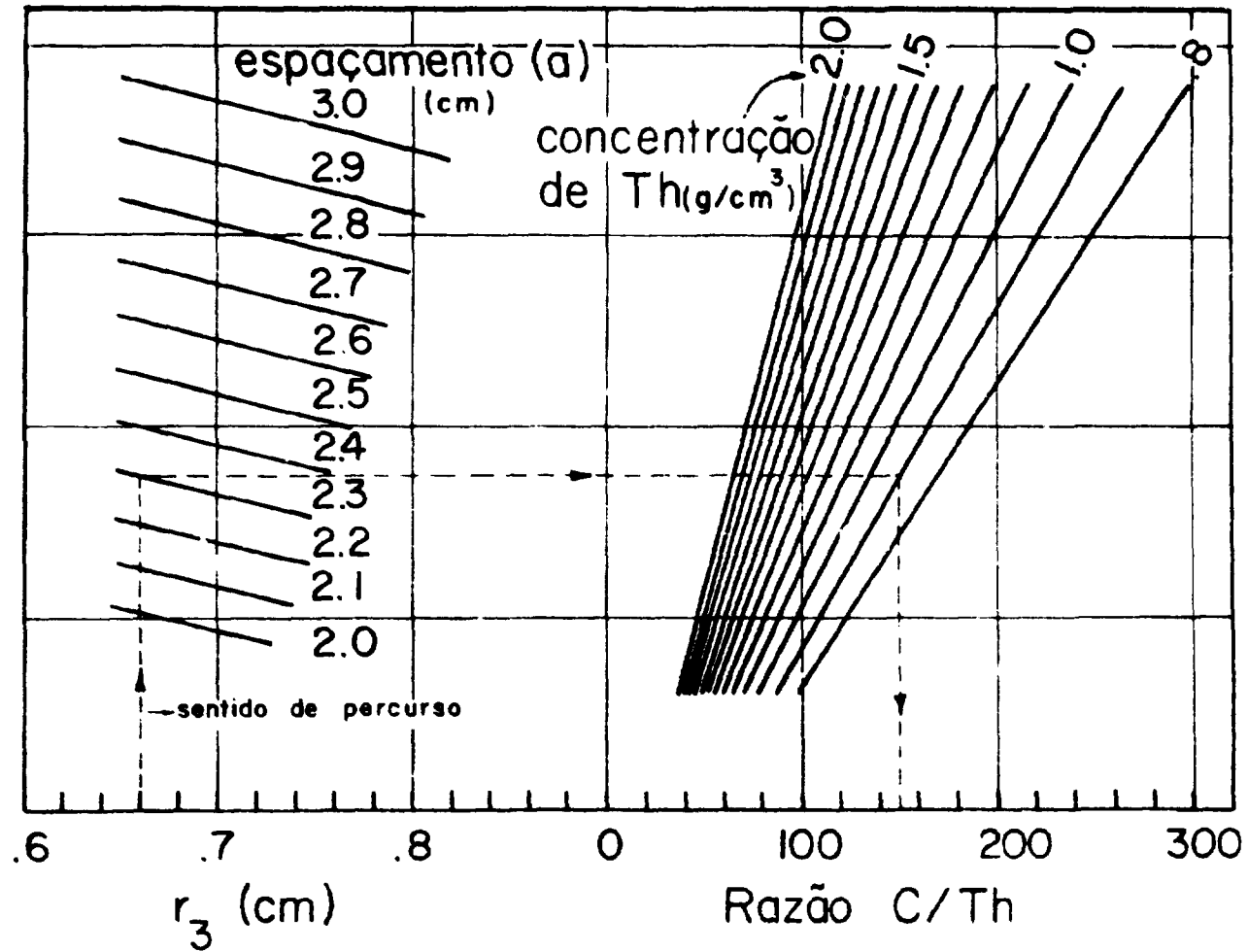


Figura 2.4 – Variação da razão atômica $[C/Th]$ na célula fértil, segundo o raio (r_3) dos furos nos blocos de grafita, tendo para parâmetros das curvas o espaçamento (a) entre os furos e a concentração (ρ_{Th}) de Th na barra fértil.

básicos que realmente serão utilizados no RPZ. Fatores técnicos podem levar a valores levemente diferentes aos ali reunidos. Uma observação importante é que o raio (r_3) dos furos para as barras de combustível e de seu espaçamento (a) valem, respectivamente 0,79 cm e 2,30 cm nos HTGRs⁽⁴⁾ comerciais.

Tabela 2.2
Faixas dos Valores dos Quatro Parâmetros Básicos
(a , r_3 , ρ_{U-235} e ρ_{Th}) que melhor atendem os
critérios enunciados na Seção 2.2

	Valor Mínimo	Valor Máximo
[a] (espaçamento dos furos, em cm)	2,3	2,7
[r_3] (raio dos furos, em cm)	$r_2 = 0,6447$	0,79
[ρ_5] (concentração de U-235 nas barras físseis, em g/cm ³)	0,06	0,09
[ρ_{Th}] (concentração de Th nas barras férteis, em g/cm ³)	0,9	1,9

Com base nesses resultados, a Tabela 2.3 apresenta três conjuntos de valores, levemente diferentes dos quatro parâmetros básicos (a , r_3 , ρ_5 e ρ_{Th}) que são usados no estudo das massas críticas de U-235 e de Th-232 necessárias ao funcionamento do RPZ. É conveniente notar que esses três conjuntos são apenas levemente diferentes, pois em cálculos executados anteriormente⁽¹⁾, já havia sido determinado que esses valores estão próximos do conjunto de menor massa crítica.

Tabela 2.3
Três Conjuntos de Valores dos Quatro Parâmetros
Básicos para o Estudo das Massas Críticas
de U-235 e Th no Capítulo 3

	1º Conjunto	2º Conjunto	3º Conjunto
[a] (cm)	2,5	2,5	2,5
[r_3] (cm)	0,7	0,7	0,8
[ρ_5] (g/cm ³)	0,08	0,07	0,08
[ρ_{Th}] (g/cm ³)	1,3	1,2	1,3
[ρ_{Th}/ρ_5]	16	17	16
[C/U-5] célula físsil	2000	2300	1850
[C/Th] célula fértil	119	130	109

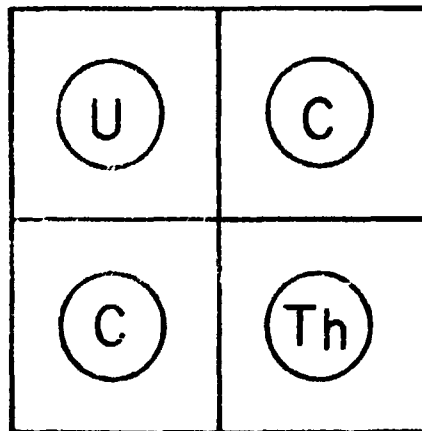
3 – CÁLCULO DAS SECÇÕES DE CHOQUE E DAS MASSAS CRÍTICAS

3.1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo são escolhidas as configurações do caroço central e do anel acionador. Feito isto podem ser calculadas as secções de choque e parâmetros de difusão dessas duas regiões, através do código computacional HAMMER⁽⁹⁾. O cálculo das massas críticas é, então, feito utilizando esses parâmetros de difusão e secções de choque como dados de entrada no código computacional CITATION⁽³⁾.

3.2 – ESCOLHA DAS CONFIGURAÇÕES DO CAROÇO CENTRAL E DO ANEL ACIONADOR

A escolha dessas configurações pode ser feita de diversas maneiras, sendo que a mais simples é o estudo das razões atômicas $[C/U-5]$ e $[C/Th]$ em células de quatro canais. A Figura 3.1 mostra uma possível combinação dos três tipos de barras (Secção 1.2) formando uma célula de quatro canais. A Tabela 3.1 apresenta o resultado do estudo das razões atômicas $[C/U-5]$ e $[C/Th]$ nessas células de quatro canais, para os três conjuntos de valores dos quatro parâmetros básicos da Tabela 2.3



célula ThUC 112

Figura 3.1 – Ilustração de uma célula de quatro canais

Tabela 3.1

Razões Atômicas [C/U-5] e [C/Th] em Células de Quatro Canais para os Três Conjuntos de Valores dos Quatro Parâmetros Básicos da Tabela 2.3

Nº de barras			1º Caso		2º Caso		3º Caso	
Th	U	C	[C/U-5]	[C/Th]	[C/U-5]	[C/Th]	[C/U-5]	[C/Th]
0	1	3	8568	—	9418	—	7582	—
0	2	2	4200	—	4671	—	3761	—
0	3	1	2744	—	2675	—	2487	—
0	4	0	2016	—	2303	—	1851	—
1	1	2	8344	506	9293	535	7469	454
1	2	1	4086	496	4612	531	3704	450
1	3	0	2669	486	2675	462	2450	446
2	1	1	8120	246	9168	264	7355	224
2	2	0	3973	241	4135	238	3647	222
3	1	0	7896	160	9042	173	7241	167

Com base na Tabela 3.1 e na faixa de razões atômicas [C/U-5] e [C/Th] semelhantes às dos HTGRs⁽⁸⁾ ([C/U-5] de 3000 a 6000 e [C/Th] de 180 a 260), a célula ThUC 220 é a mais conveniente para servir de unidade básica para o caroço central do RPZ.

Como a o anel acionador serve, principalmente, para alimentar com nêutrons o caroço central, então, a célula ThUC 013 é a que mais se presta para ser a sua unidade básica; isso porque, essa é a mais moderada das células de quatro canais contendo elemento físsil.

As Figuras 3.2 e 3.3 mostram, respectivamente, um esquema das malhas que compõem o caroço central e o anel acionador, construídas por translação simples das células 220 e 013.

3.3 – CÁLCULO DAS SECÇÕES DE CHOQUE E DOS PARÂMETROS DE DIFUSÃO DAS ZONAS DO RPZ

Para o cálculo desses parâmetros, através do código HAMMER⁽⁹⁾, é necessária a cilindrização das células 220 e 013 pelo método de Wigner-Seitz⁽⁵⁾.

Pode-se ver nas Figuras 3.2 e 3.3 que a célula 220 pode ser considerada centrada numa barra físsil (célula ThUC 220 U) ou numa barra fértil (célula ThUC 220 Th) e, a célula 013, centrada numa barra físsil. As células equivalentes cilindrizadas dessas três células estão esquematizadas na Figura 3.4. Todos os elementos contidos em cada região das células cilindrizadas são homogeneizados na mesma, porque é a sua concentração média que interessa ao HAMMER⁽⁹⁾.

Os resultados da análise de produção e absorção de nêutrons nas células 220 U e 220 Th, apresentados nas Tabelas 3.2 e 3.3, respectivamente (apenas para o primeiro conjunto de dados da Tabela 2.3, 1º Caso), indicam que é indiferente o uso das secções de choque macroscópicas e parâmetros de difusão de uma ou outra célula para o caroço central (como era de se esperar).

Através do código HAMMER⁽⁹⁾ são obtidos os parâmetros de difusão e secções de choque

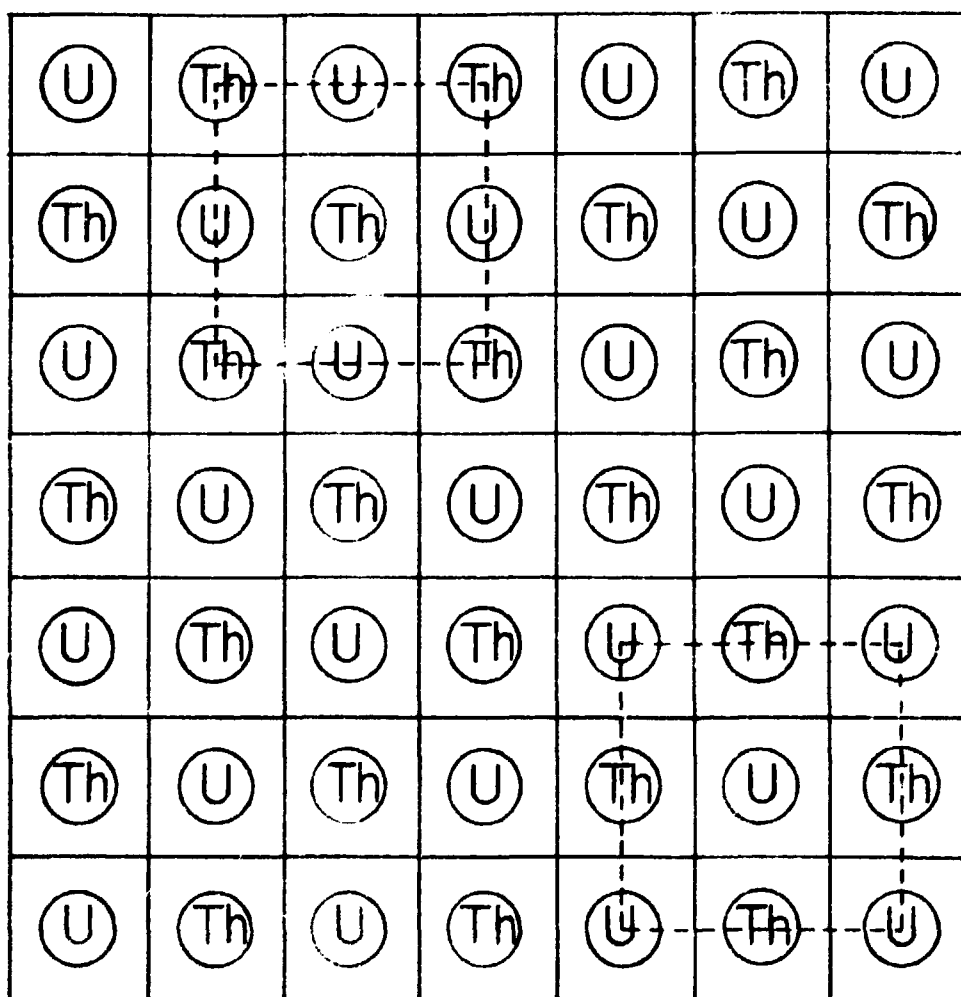


Figura 3.2 – Esquema da configuração central do caroço do RPZ

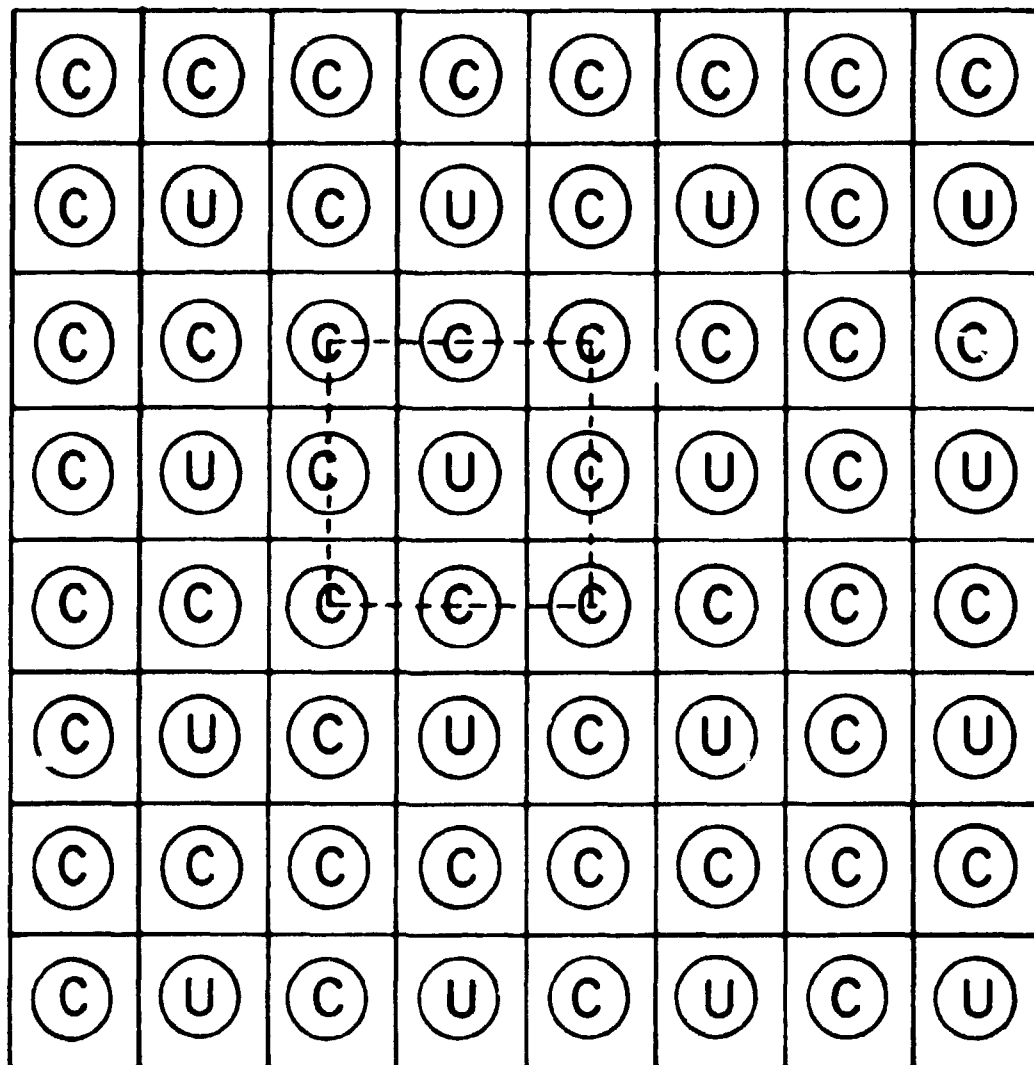


Figura 3.3 – Esquema da configuração do anel acionador do RPZ

macroscópicas do caroço central e do anel acionador do RPZ. Os cálculos estão feitos para quatro grupos de energia. A Tabela 3.4 apresenta esses dados para o 1º Caso (Tabela 2.3) e as Tabelas 3.5 e 3.6 apresentam-nos para os outros dois casos, respectivamente. Nestas três últimas tabelas: D representa a constante de difusão do respectivo grupo; $SIGA$, a secção de choque macroscópica de absorção de nêutrons do grupo; $SIGR$, a secção de choque macroscópica de remoção de nêutrons de cada grupo; e $NUSIGF$, o produto do número de nêutrons emitidos por fissão em cada grupo de energia pela secção de choque macroscópica de fissão respectiva

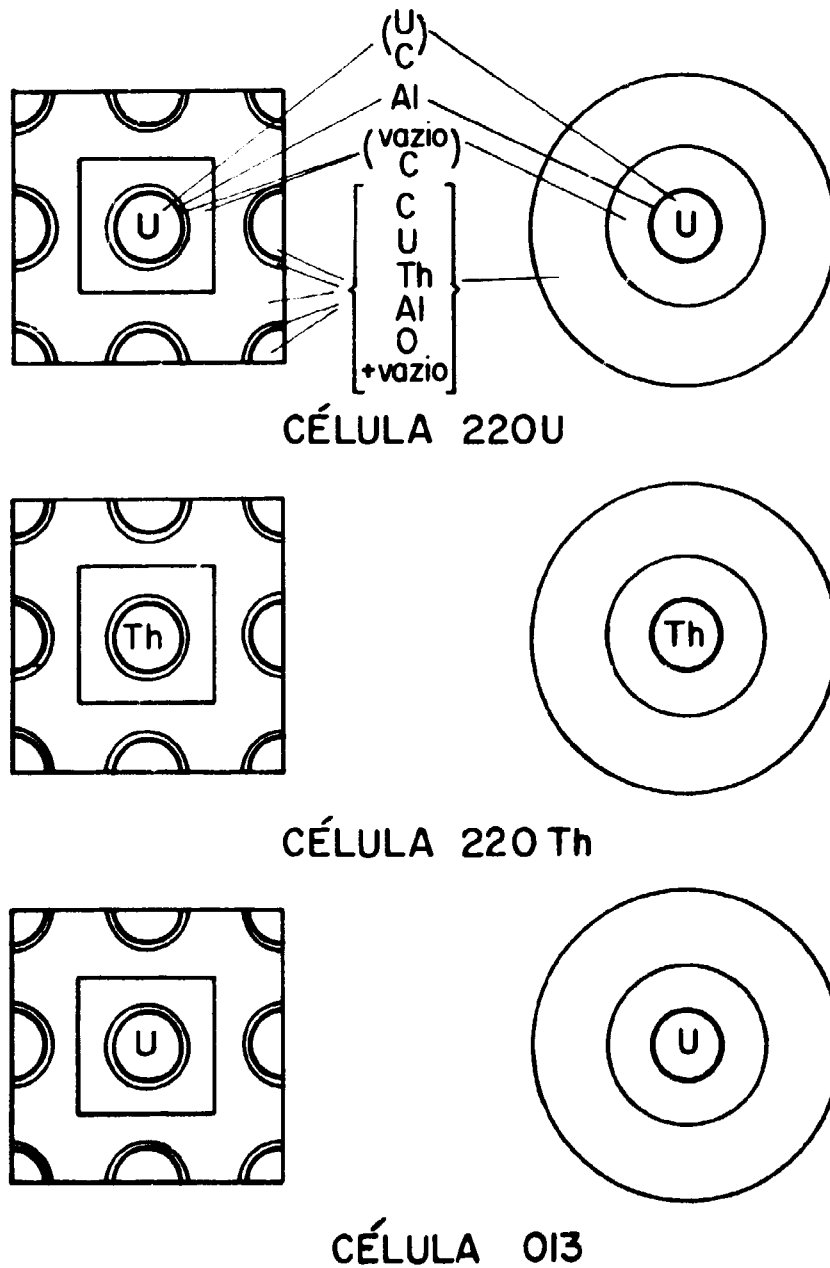


Figura 3.4 – Células ThUC-220 U, 220 Th e 013, e suas células cilíndricas de Wigner-Seitz

Tabela 3.2

Balanco de Nêutrons para a Célula ThUC 220 U (1º Caso)

Lattice 2 Asymotopic Flux Weighting		Célula de 4 Canais ThUC 220U									
		Absorption					Fission				
Neutron Balance Sheet Based on 1000 Neutrons											
Isotope	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Total	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Total	
92335	0.7415	4.1264	79.8903	414.0069	499.3652	1.8084	7.8191	128.5559	860.0212	999.2048	
92238	0.0178	0.0375	4.2914	0.1350	4.4819	0.0385	0.0001	0.0	0.0	0.0386	
90232	1.4447	5.4500	182.4918	85.5119	274.8992	1.7592	0.0	0.0	0.0	1.7592	
8000	0.1061	0.0	0.0	0.0	0.1061	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
13000	0.1290	0.2692	1.9012	7.6403	9.9397	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
6012	0.0899	0.0	0.0	9.1871	9.2770	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
OTHER				0.0	0.0						
	<u>2.5290</u>	<u>9.8831</u>	<u>268.5745</u>	<u>517.0811</u>	<u>798.0681</u>	<u>3.6062</u>	<u>7.8192</u>	<u>128.5559</u>	<u>860.0212</u>	<u>1000.0017</u>	
CNTRL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0						
ZLEAK	42.0697	57.0236	68.1784	34.6456	201.9223						
RLEAK	0.0039	0.0009	-0.0010	0.0066	0.0103						
LEAK	42.0736	57.0299	68.1774	34.6521	201.9326						
EIGEN	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0						
TOTAL	<u>44.6027</u>	<u>66.9126</u>	<u>336.7520</u>	<u>551.7334</u>	<u>999.9993</u>	<u>3.6062</u>	<u>7.8192</u>	<u>128.5559</u>	<u>860.0212</u>	<u>1000.0017</u>	

Tabela 3.3
Balço de Neutrons para a Célula ThUC 220 Th (1º Caso)

Lattice 3 Asymotopic Flux Weighting		Célula de 4 Canais ThUC 220 Th								
		Absorption					Fission			
Isotope	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Total	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Total
90732	1.4421	5.4511	184.7557	22.5890	274.2378	1.7554	0.0	0.0	0.0	1.7554
92235	0.7051	4.1082	79.5646	414.9248	499.3027	1.7168	7.7819	128.0649	860.6460	998.2095
92238	0.0160	0.0374	4.2697	0.1351	4.4590	0.0362	0.0001	0.0	0.0	0.0362
13000	0.1260	0.2688	1.8958	7.4693	9.7599	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8000	0.1053	0.0	0.0	0.0	0.1058	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6012	0.0892	0.0	0.0	8.9365	9.0264	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
OTHER				0.0	0.0					
	<u>2.4858</u>	<u>9.8655</u>	<u>270.4856</u>	<u>514.0544</u>	<u>796.8916</u>	<u>3.5083</u>	<u>7.7819</u>	<u>128.0649</u>	<u>860.6460</u>	<u>1000.0007</u>
CNTRL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
ZLEAK	42.4629	51.6107	68.7181	34.3143	203.1060					
RLEAK	0.0009	0.0001	-0.0015	0.0026	0.0020					
LEAK	42.4647	57.6108	68.7166	34.3169	203.1081					
EIGEM	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0					
TOTAL	<u>44.9496</u>	<u>67.4763</u>	<u>339.2024</u>	<u>548.3713</u>	<u>999.9998</u>	<u>3.5083</u>	<u>7.7819</u>	<u>128.0649</u>	<u>860.6460</u>	<u>1000.0007</u>

Tabela 3.4

Seções de Choque Macroscópicas e Parâmetros de Difusão do Carçoço do RPZ,
para o 1º Caso (Referente ao 1º Conjunto de Dados da Tabela 2.3)

ZONE MACROSCOPIC CROSS SECTIONS						
ZONE	NAME	GRP	D	S GR	S GA	NUSIGF
1	CAROÇO	1	2 22542E 01	2 51090E 02	8 99993E 05	1 28000E 04
		2	1 03656E 00	1 08160E 02	1 19999E 04	9 50000E 05
		3	9 27237E 01	5 12600E 03	2 44700E 03	1 17100E 03
		4	8 54978E 01	0 0	8 54740E 03	1 42160E 02
2	ANEL	1	2 17346E 00	2 49990E 02	2 49967E 05	4 10000E 05
		2	1 01988E 00	1 08670E 02	2 89977E 05	4 80000E 05
		3	9 10365E 01	5 86700E 03	4 10996E 04	6 01000E 04
		4	8 77501E 01	0 0	4 31700E 03	8 25365E 03
3	REFLETOR	1	2 41000E 00	2 75200E 02	2 99886E 06	0 0
		2	1 04900E 00	1 12500E 02	0 0	0 0
		3	9 34000E 01	6 57000E 03	0 0	0 0
		4	8 97000E 01	0 0	2 38000E 04	0 0

Tabela 3.5

Seções de Choque Macroscópicas e Parâmetros de Difusão do Carçoço do RPZ,
para o 2º Caso (Referente ao 2º Conjunto de Dados da Tabela 2.3)

ZONE MACROSCOPIC CROSS SECTIONS						
ZONE	NAME	GRP	D	S GR	S GA	NUSIGF
1	CAROÇO	1	2 21437E 00	2 48470E 02	7 89985E 05	1 12000E 04
		2	1 04548E 00	1 07510E 02	1 06998E 04	8 30000E 05
		3	9 34743E 01	5 07000E 03	2 28500E 03	1 02700E 03
		4	8 64150E 01	0 0	7 90211E 03	1 30662E 02
2	ANEL	1	2 65022E 00	2 53220E 02	2 29999E 05	3 60000E 05
		2	1 00757E 00	1 0340E 02	2 69988E 05	4 20000E 05
		3	8 99439E 01	6 00000E 03	3 63998E 04	5 29000E 04
		4	8 68848E 01	0 0	3 94725E 03	7 46675E 03
3	REFLETOR	1	2 41000E 00	2 75200E 02	2 99886E 06	0 0
		2	1 04900E 00	1 12500E 02	0 0	0 0
		3	9 34000E 01	6 57000E 03	0 0	0 0
		4	8 97000E 01	0 0	2 38000E 04	0 0

Tabela 3.6

Seções de Choque Macroscópicas e Parâmetros de Difusão, para o 3º Caso
(Referente ao 3º Conjunto de Dados da Tabela 2.3)

ZONE MACROSCOPIC CROSS SECTIONS						
ZONE	NAME	GRP	D	S GR	S GA	NUSIGF
1	CAROÇO	1	2 24380E 00	2 50930E 02	8 20000E 05	1 14000E 04
		2	1 03855E 00	1 08300E 02	1 11000E 04	8 40000E 05
		3	9 28290E 01	5 10500E 03	2 30500E 03	1 04500E 03
		4	8 58024E 01	0 0	8 01188E 03	1 32541E 02
2	ANEL	1	2 22155E 00	2 49440E 02	2 40000E 05	4 10000E 05
		2	1 02575E 00	1 08470E 02	2 90000E 05	4 80000E 05
		3	9 14265E 01	5 85600E 03	4 10000E 04	6 00000E 04
		4	8 61451E 01	0 0	4 29934E 03	8 24465E 03
3	REFLETOR	1	2 41000E 00	2 75200E 02	3 00000E 06	0 0
		2	1 04900E 00	1 12500E 02	0 0	0 0
		3	9 34000E 01	6 57000E 03	0 0	0 0
		4	8 97000E 01	0 0	2 38000E 04	0 0

3.4 – CALCULOS DAS MASSAS CRITICAS DE U-235 (E TAMBÉM DE TH) PARA OS TRÊS CASOS ESTUDADOS

Os dados das Tabelas 3.4, 3.5 e 3.6 servem como parâmetros de entrada para o código CITATION⁽³⁾ o qual pesquisa o raio do caroço central para algumas dimensões do anel acionador e do refletor

A Tabela 3.7 apresenta os raios críticos e massas críticas das zonas do caroço do RPZ para os três casos estudados (referentes aos três conjuntos de dados da Tabela 2.3), em diversas situações. Como o comprimento de difusão térmico na grafita estrutural é cerca de 60 cm (L_T), as espessuras do refletor nessa tabela fornecem uma boa fase para a verificação de como varia a massa crítica de U-235 com as mesmas. Também verifica-se na Tabela 3.7 que as massas de U-235 e de Th são bastante sensíveis à espessura do anel acionador

Tabela 3.7

As Massas Críticas para os Três Casos Estudados

Refletor	Caroço Central			Anel 013			Conjunto	
	Ceu a ThUC - 220							
Espessura (cm)	Raio (cm)	Massa U-235 (kg)	Massa Th (kg)	Espessura (cm)	Massa U-235 (kg)	Raio (cm)	Massa U-235 (kg)	Massa Th (kg)
60	35,1	3,92	63,8	15	2,03	110,1	5,96	63,8
	25,6	2,08	33,8	20	2,26	105,6	4,34	33,8
	17,1	0,93	15,1	25	2,35	102,1	3,28	15,1
90	30,7	2,99	48,6	15	1,82	135,7	4,81	48,6
	21,7	1,49	24,3	20	2,01	131,7	3,51	24,3
	13,8	0,61	9,9	25	2,09	128,8	2,70	9,9
120	29,6	2,78	45,1	15	1,77	164,6	4,55	45,1
	20,7	1,36	22,2	20	1,95	160,7	3,32	22,2
	13,0	0,54	8,8	25	2,03	158,0	2,57	8,8
60	38,0	4,00	68,7	15	1,90	112,9	5,90	68,7
	28,4	2,23	38,3	20	2,14	108,3	4,37	38,3
	19,6	1,07	18,4	25	2,24	104,6	3,31	18,4
90	33,4	3,10	53,3	15	1,71	138,4	4,81	53,3
	24,3	1,64	28,2	20	1,91	134,3	3,55	28,2
	16,2	0,73	12,6	25	2,00	131,3	2,73	12,6
120	32,3	2,90	49,8	15	1,86	167,3	4,56	49,8
	23,3	1,50	25,9	20	1,86	163,3	3,36	25,9
	15,4	0,66	11,3	25	1,94	160,4	2,60	11,3
60	35,7	3,78	63,5	15	2,06	110,7	5,86	63,5
	25,9	1,99	33,5	20	2,28	105,9	4,28	33,5
	17,3	0,88	14,9	25	2,37	102,3	3,26	14,9
90	31,2	2,88	48,5	15	1,84	136,2	4,74	48,5
	22,0	1,43	24,0	20	2,03	131,9	3,43	24,0
	14,0	0,58	9,8	25	2,11	129,0	2,71	9,8
120	30,1	2,69	45,3	15	1,79	165,1	4,49	45,3
	21,0	1,31	22,0	20	1,97	161,0	3,27	22,0
	13,2	0,52	8,7	25	2,04	158,2	2,54	8,7

4 – CRÍTICAS E CONCLUSÕES

De acordo com a Tabela 3.7 pode-se concluir que um estoque de cerca de 8 kg de U-235 seja suficiente para várias experiências de criticalidade do RPZ do I.E.A. A massa de tório não precisará ser maior do que 100 kg.

A Tabela 2.2 apresenta uma boa fase para a escolha final, pelos engenheiros da CEN-IEA, do quatro parâmetros básicos do caroço do RPZ (Seção 2.3).

Para um refinamento posterior, os cálculos das seções de choque, parâmetros de difusão, e de criticalidade podem ser melhorados levando-se em conta:

a) O efeito granular das partículas de UC_2 e ThO_2 (Triso e Biso) nas seções de choque médias das barras físséis e férteis, respectivamente, pelo efeito de auto-blindagem. Um artigo sobre o assunto foi escrito recentemente⁽²⁾

b) As formas reais das células 220 e 013, desde que para a utilização do código HAMMER é necessário a cilindrização dessas células, e

c) Os efeitos das impurezas da grafita estrutural nos parâmetros de difusão.

ABSTRACT

The critical mass of uranium has been calculated for a graphite moderated fueled with 93% enriched uranium to be mounted on the Instituto de Energia Atômica split table Zero Power Reactor.

The core composition was optimized to permit the maximum number of configurations to be studied.

Analysis of three core compositions shows that 8 kg of uranium enriched to 93% — U-235 (by weight) and 100 kg of thorium would be sufficient for criticality experiments.

RÉSUMÉ

On a déterminé la masse critique d'uranium d'un ensemble critique modéré par graphite et alimenté en uranium enrichi à 93% afin d'être monté sur le réacteur de puissance zéro de l'Institut d'Énergie Atomique.

La composition du cœur a été optimisée afin de permettre l'étude d'un nombre maximum de configurations.

Des analyses de trois compositions de cœur ont montré que 8 kg d'uranium enrichi à 93% U-235 (en poids) et 100 kg de thorium seraient suffisants pour des expériences de criticalité.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. FERREIRA, A. C. A. *Projeto do caroço do reator de potência zero do Instituto de Energia Atômica*. São Paulo, 1974. (Dissertação de Mestrado).
2. _____ & RODRIGUES, V. G. *Fator de auto blindagem em combustível com estrutura granular do tipo encontrado no HTGR*. São Paulo, Instituto de Energia Atômica, Coordenadoria de Engenharia Nuclear, 1974. (Relatório interno)
3. FOWLER, T. B. et alii. *Nuclear reactor core analysis code: CITATION*. Oak Ridge, Oak Ridge National Lab., Jul. 1971. (ORNL-TM 2496, rev. 2).
4. GENERAL ATOMIC CO., San Diego, Calif. *HTGR, nuclear training: fuel technology workshop, São Paulo, Brasil, July 24 26, 1974*. San Diego, Calif., 1974.

5. LAMARSH, J. R. Heterogeneous reactors. In: _____, *Introduction to nuclear reactor theory*. Reading, Mass., Addison-Wesley, 1966 p. 370-416.
6. MACIEL, A. C. & CRUZ, P. R. *Perfil analítico do tório e terras raras*. Rio de Janeiro, Departamento Nacional da Produção Mineral, 1973. (DNPM, Bol. 28).
7. _____ & CRUZ, P. R. *Perfil analítico do urânio*. Rio de Janeiro, Departamento Nacional da Produção Mineral, 1973. (DNPM, Bol. 27)
8. POUND, D. C. et al. *Hazards report for modified HTGR critical facility*. San Diego, Calif., General Dynamics Corp., General Atomic Div., Nov. 1965. (GA-6452, Rev.).
9. SUICH, J. E. & HONECK, H. C. *The HAMMER system: heterogeneous analysis by multigroup methods of exponential and reactors*. Aiken, S. C., Savannah River Lab., Jan. 1967. (DP-1064).

