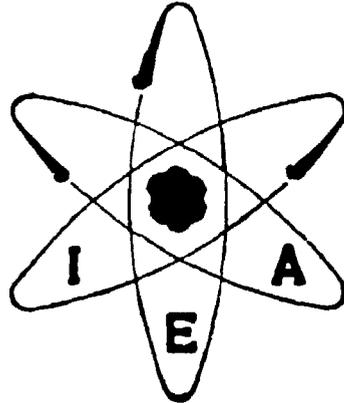


BR-00013



**DEFINIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS
DO CONJUNTO CRÍTICO MODERADO POR GRAFITA
DO REATOR DE POTÊNCIA ZERO DO IEA**

ANTÔNIO CARLOS DE ALMEIDA FERREIRA e ROBERTO Y. HUKAI

PUBLICAÇÃO IEA N.º 373
Janeiro — 1975

INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal 11049 (Pinheiros)
CIDADE UNIVERSITÁRIA "ARMANDO DE SALLES OLIVEIRA"
SAO PAULO — BRASIL

**DEFINIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS
DO CONJUNTO CRÍTICO MODERADO POR GRAFITA
DO REATOR DE POTÊNCIA ZERO DO IEA**

Antonio Carlos de Almeida Ferreira e Roberto Y. Hukai

**Coordenadoria de Engenharia Nuclear
Instituto de Energia Atômica
São Paulo - Brasil**

**Publicação IEA Nº 373
Janeiro - 1975**

Instituto de Energia Atômica

Conselho Superior

Eng^o Roberto N. Jafet - Presidente
Prof. Dr. Emilio Mattar - Vice-Presidente
Prof. Dr. José Augusto Martins
Prof. Dr. Milton Campos
Eng^o Helcio Modesto da Costa

Superintendente

Prof. Dr. Rômulo Ribeiro Pieroni

DEFINIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS DO CONJUNTO CRÍTICO MODERADO POR GRAFITA DO REATOR DE POTÊNCIA ZERO DO IEA

Antonio Carlos de Almeida Ferreira e Roberto Y. Hukai

RESUMO

Foram definidas as especificações da estrutura mecânica do caroço de um conjunto crítico moderado a grafita a ser instalado no Reator de Potência Zero do IEA. Estas especificações se referem às dimensões dos blocos de grafita, à disposição, as dimensões e ao número de buracos de cada bloco, as dimensões dos bastões e serem introduzidas nas lacunas e aos mecanismos que asseguram a reprodutibilidade experimental do sistema. Foram também definidas as composições dos bastões com combustível nuclear e moderadores. As condições de contorno principais foram o intervalo de alcance das relações C/U e C/Th observados nos HTGRs comerciais e o grau de homogeneidade neutronic.

Introdução.

Em fins de 1972, a Coordenadoria de Engenharia Nuclear do Instituto de Energia Atômica, foi incumbida pela Superintendência do IEA, de projetar e construir uma unidade crítica. Trata-se de um reator nuclear não destinado à produção de energia, mas com fins de pesquisas teóricas e experimentais.

O reator de Potência Zero do Instituto de Energia Atômica (ou R.P.Z, como o chamaremos simplifadamente), pretende basicamente servir de instrumento para o estudo dos sistemas nucleares moderados por grafita e regeneradores de combustível por intermédio do ciclo do tório. Apesar de seus objetivos extravasarem o estudo puro e simples dos reatores do tipo H.T.G.R. e G.C.F.R. foram estes, claramente, que inspiraram a concepção da unidade crítica.

A configuração mecânica escolhida foi a do tipo mesa partida ("Split table"): o caroço 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 à distância uma da outra carregando se cada uma delas com meia 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 Figura 1 esclarece o projeto mecânico da unidade crítica.

Dois programas experimentais de medidas de parâmetros de física de reatores estão sendo considerados no momento:

- a - "Mockup" de uma região típica de um reator de 1160 MWe HTGR
- b - "Mockup" de um "blanket" de tório de um GCFRacionado por um caroço térmico central cercado por um anel conversor.

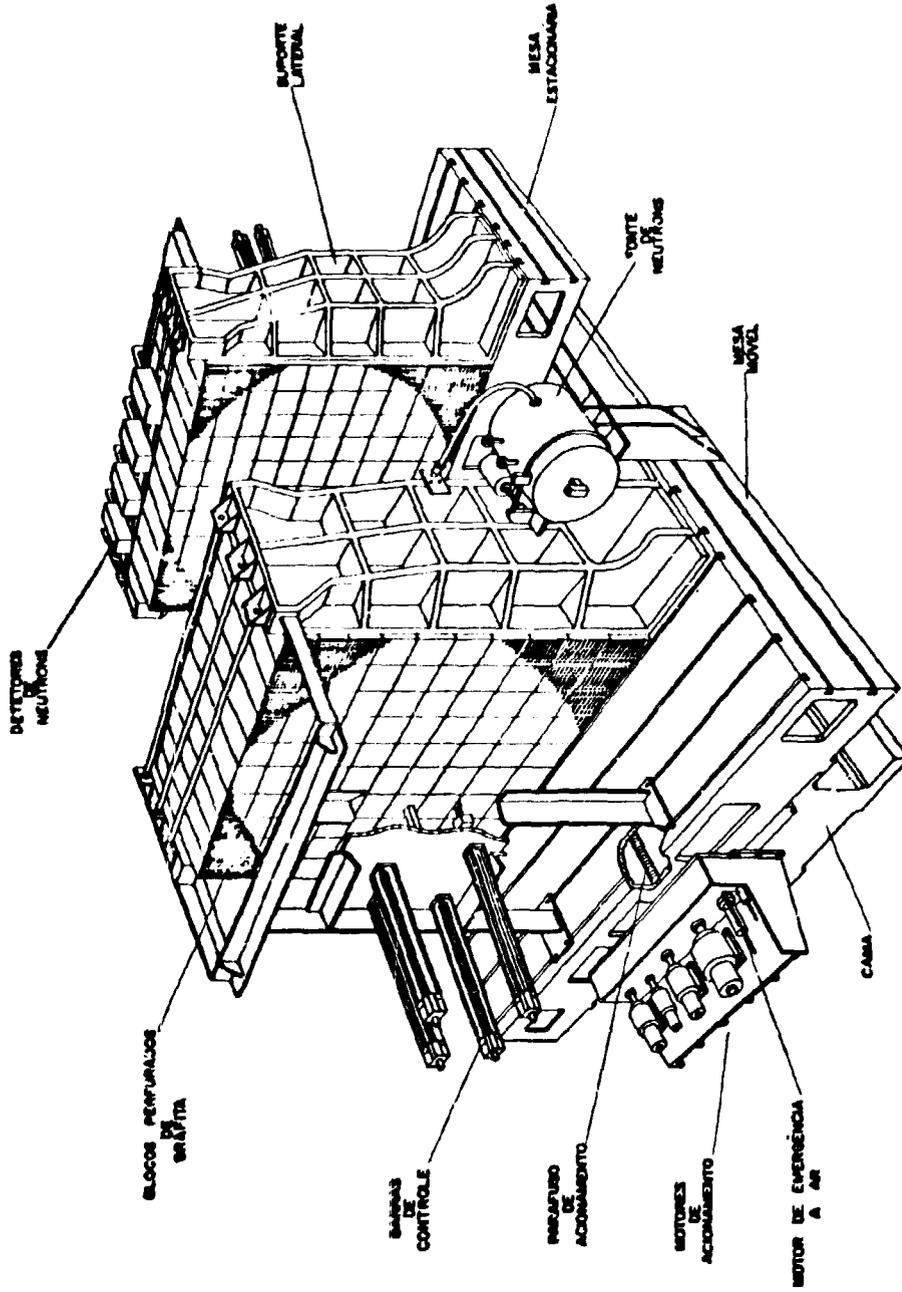


FIGURA 1
Vista Geral do Reator de Potência Zero do IEA

Para as experiências com o "blanket" de torio será construído um caroço térmico central cilíndrico moderado a grafita cercado de um anel contendo urânio enriquecido¹ que terá a função de converter a energia média dos neutrons, de térmica para rápida, de tal forma que, o conjunto térmico conversor, agira como uma fonte de neutrons simulando um caroço de reator rápido. Ao redor do anel o "blanket" será instalado.

Para as experiências em um conjunto crítico simulando uma região típica de HTGR o fluxo assintótico de neutrons será obtido numa região central, acionada por um anel térmico exterior. Contudo, é mister salientar que o projeto da matriz de grafita terá como objetivo possibilitar a simulação de caroços com grande variação dos parâmetros C/Th (razão atômica de carbono e tório) e C/U (razão atômica de carbono e urânio), suficientes para cobrir todas as composições existentes nos HTGR'S comerciais.

O presente trabalho tem por finalidade definir as características estruturais da matriz de grafita para o conjunto crítico destinado às experiências sobre HTGRs, a saber, as dimensões geométricas das perfurações e dos espaçamentos na grafita e as especificações das barras de combustível de tal forma que a variação das composições possíveis de serem obtidas cubram os casos dos HTGRs comerciais.

2. O conjunto Crítico.

O caroço, propriamente, 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. Muitos dos blocos são perfurados por canais cilíndricos de diâmetros iguais, onde são alojadas as barras que contém os demais elementos que participam das experiências. Os outros são inteiriços, reservados unicamente para reflexão de neutrons.

As barras destinadas a preencher as lacunas são de três tipos: barras de grafita pura ou mudas; barras contendo tório, e barras contendo urânio ou ativas, as quais designamos por barras "de" tório, e barras "de" urânio. A estrutura interna destes dois últimos tipos é similar à das barras do H.T.G.R.: são formadas pela justaposição de bastões de grafita, em cujo interior estão dispersados grânulos de ThO_2 e UC_2 , recobertos por finas camadas de carbono. Este revestimento procura formar uma barreira primária à passagem dos produtos de fissão. A concentração de material pesado é a mesma em todas as barras de um mesmo tipo.

Os bastões, cujas alturas não são suficientes para preencher um canal, poderiam ser introduzidos diretamente nas cavidades. Entretanto, como se espera que o número deles necessário para carregar o caroço em uma experiência seja considerável, o tempo dispendido na operação poderá ser grande. Além do inconveniente do retardamento que isso representaria para o início dos trabalhos, tornar-se-ia obrigatório o revezamento de muitas pessoas encarregadas periodicamente de retirar e substituir os bastões na sala que abriga o equipamento, pois a radioatividade que impregna o recinto deverá limitar o tempo de exposição.

Um modo de contornar estas dificuldades consistiria no uso de tubos de alumínio protetores dos bastões. Em um compartimento anexo à sala do reator, os bastões seriam introduzidos dentro de tais tubos, constituindo uma barra, cujo posterior encaixe no caroço ficaria fácil e rápido. Estas vantagens em relação ao emprego dos bastões nus seriam acrescidas da possibilidade de mantê-los firmemente justapostos, por meio de dispositivos mecânicos

interiores aos tubos, o que asseguraria a reprodutibilidade do conjunto. Há, porém, uma desvantagem: a concepção da unidade crítica foi ideada para evitar a presença de núclídeos estranhos, e o alumínio dos estojos é indesejável. Retomaremos estas considerações a propósito das barras e seu eventual encapsulamento no próximo capítulo, quando pormenorizaremos o projeto.

Ao contrário do H.T.G.R.², o tório e o urânio vêm em bastões separados. A mistura de ambos os materiais pesados fixaria de vez a proporção entre eles, e uma das finalidades do projeto é permitir ao caroço composições variadas, em termos das quantidades de tório, urânio e grafita. As barras, contendo apenas um tipo destes materiais, garantem combinações que seriam impossíveis se o isótopo físsil se fizesse acompanhar permanentemente de uma proporção definida dos isótopos férteis.

Outra diferença importante em relação ao H.T.G.R. é o enriquecimento do urânio: se neste, o urânio-235 constitui 93% da massa combustível, no R.P.Z. prevê-se que o enriquecimento seja apenas de 20%. Não se trata de uma escolha motivada por questões atinentes aos objetivos da unidade crítica, mas por conveniência ditada por fatores políticos. É mais certo e mais fácil o Brasil obter dos países produtores o urânio enriquecido com 20% de combustível físsil do que ao grau de 93%; no mínimo simplificam-se os trâmites e encurtam-se os prazos na aquisição da mais importante das matérias-primas. A unidade crítica, portanto, operará com uma proporção de urânio-238 muito maior do que o H.T.G.R.

Contudo, estudos similares estão sendo realizados na Coordenadoria de Engenharia Nuclear do IEA., para o caso de utilização de urânio com 93% de enriquecimento.

Como dissemos acima, as experiências de criticalidade serão realizadas preenchendo-se as cavidades do caroço com barras de grafita, de urânio, e de tório; haverá, também, buracos vagos, análogos aos canais de refrigeração do H.T.G.R. A disposição geométrica das barras, e as composições resultantes, em termos das razões atômicas dos núcleos de carbono, urânio e tório, e do volume vago, definem uma configuração. O caroço crítico compreenderá três zonas, sendo cada uma delas dotada de sua própria configuração.

1. - Caroço central, que é a zona de interesse para as medidas e análises. As barras de urânio, tório e grafita são dispostas no centro da estrutura das mesas, formando um caroço cilíndrico. O raio do caroço pode ser variado, conforme as exigências de criticalidade do conjunto, mas sempre abrangerá uma área suficientemente grande das mesas para permitir medidas seguras: o espectro no centro deve alcançar o seu valor assintótico, definido unicamente pela configuração da zona, quaisquer que sejam as configurações das duas outras zonas, e ela deve oferecer facilidade de posicionamento dos dispositivos de medida, tantos quantos se fizerem necessários.
2. - Anel acionador, uma zona em forma de coroa cilíndrica, que circunda o caroço central. Não contém barras de tório ou canais vazios; as barras de urânio e grafita nela colocadas destinam-se a levar o conjunto à criticalidade. A configuração do anel acionador, em uma experiência, é de importância menor.
3. - Refletor, que envolve o anel acionador, e é constituído puramente de grafita. Poderá consistir de blocos maciços, o que dispensaria a perfuração de um número

grande de prismas e a fabricação das barras de grafita necessárias ao seu carregamento. Os mecanismos de suporte verticais das mesas são móveis, de modo que a espessura do refletor pode ser alterada pela retirada de uma ou mais colunas verticais ou filas horizontais de blocos da estrutura.

Este sistema de três zonas permite reduzir drasticamente a necessidade de massa crítica: fora da região central objeto das medidas e análises o torio representaria apenas uma absorção superflua, que deveria ser compensada por massa físsil para sustentar a criticalidade. O anel acionador, portanto, tem a finalidade de alimentar as reações em cadeia no caroço central com o mínimo de combustível.

As configurações estão associadas aos espectros de neutrons que se estabelecem nessas zonas. Se bem que a caracterização exata do espectro requeira a descrição pormenorizada da geometria do caroço e o conhecimento das concentrações dos materiais nas barras de carregamento, é habitual e útil simplificá-la aos termos dos parâmetros que governam o espectro que efetivamente se estabeleceria em um reator infinito, homogêneo, de mesma composição que o reator real, de estrutura heterogênea, e finito. Em outras palavras, é possível, com boa aproximação, ajuizar o espectro na base das proporções da quantidade de moderador para a de isótopo físsil e para as de isótopos férteis. A configuração de uma zona do R.P.Z., portanto, será definida, a grosso modo, pela relação entre o número de átomos de carbono e o de urânio-235 (C/U-235) e pela relação entre o número de átomos de carbono e o de urânio-238 mais o de tório (C/U 238 + Th), independente do arranjo geométrico das barras no caroço, das dimensões dos orifícios que ocupam, e das concentrações dos materiais nelas contidos

A presença de canais livres também influirá no espectro: é, pois, necessário, incluir na definição, além das razões atômicas, um fator que de algum modo represente o volume vago. No estudo que fizemos com vistas ao projeto do caroço da unidade crítica, o fator de vazio foi definido pela relação entre o volume total vazio, e o volume ocupado pelas barras que contêm os materiais pesados (urânio e tório). Essa definição é arbitrária: ela procura relacionar a perda em efetividade de moderação ao volume dos centros absorvedores de neutrons. Há bons motivos para crermos agora que uma definição de maior conteúdo físico relacionaria o volume vago ao volume do moderador ou ao volume total do conjunto. A que adotamos, entretanto, não deixa de ser uma medida do efeito global dos vazios nas estruturas do caroço do R.P.Z., e, de qualquer forma, as descrições das configurações podem facilmente ser passadas dos termos desta para os das outras definições possíveis.

3. As finalidades da unidade crítica.

Esboçadas as linhas gerais de concepção da unidade crítica, é oportuno esclarecer as razões que levaram o Instituto de Energia Atômica à iniciativa 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 in abstracto permite alcançar.
- b. - Os dados experimentais dos reatores conversores do tipo H.T.G.R., imprescindíveis à verificação dos métodos de cálculo, à determinação das seções de choque, e à

análise das várias situações comuns aos projetos de engenharia ainda são escassos. A unidade crítica colocaria a pesquisa nacional imediatamente na linha de frente dos problemas atuais da ciência e tecnologia nucleares.

- c. - Os reatores conversores baseados no ciclo de 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 para o futuro do país com ênfase particular na elaboração de uma tecnologia voltada para a emancipação do fornecimento externo do 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 engenheiro nuclear, que poderá submeter suas concepções ao teste experimental, antes de pretender concretizá-las apoiado em bases puramente conjecturais ou teóricas.
- e. - Todos os países do mundo que se empenharam no desenvolvimento de uma tecnologia nuclear própria construíram unidades críticas. Basta lembrar os Estados Unidos, a Inglaterra, a França, a Alemanha, a Rússia, o Japão, o Canadá e a Índia. Eles apontam, portanto, o caminho a seguir, se o Brasil tiver a mesma ambição.

4. O projeto da estrutura do caroço.

Chegamos ao ponto em que se pode colocar o problema do projeto da estrutura do caroço da unidade crítica.

Primeiramente, o caroço da unidade crítica deve ser suficientemente flexível para permitir uma ampla variedade de configurações, conforme as conceituamos acima. As dimensões dos canais perfurados nos blocos, a sua disposição e as concentrações do urânio e do tório nas barras devem ser escolhidas de tal maneira que seja possível obter-se, por combinações das barras de carregamento no caroço, um extenso intervalo de relações $C/(U-238 + Th)$ e fator de vazão. Em particular, é desejável que se consigam reproduzir na unidade crítica espectros tão sub-moderados quanto possível, o que significa o alcance de composições com elevadas proporções dos materiais pesados.

A outra diretriz que deve guiar o projeto diz respeito ao grau de homogeneidade neutrônica do caroço. A concepção da unidade crítica leva inevitavelmente a um certo grau de heterogeneidade: o urânio e o tório não se encontram uniformemente disseminados na grafita estrutural, mas concentram-se em barras, e, dentro destas, em grânulos isolados. No entanto, a escolha das concentrações dos materiais absorvedores nas barras, do tamanho dos grãos, e da geometria dos orifícios pode manter a heterogeneidade, do ponto de vista do comportamento dos neutrons, em níveis aceitavelmente baixos. A razão para não desejarmos uma interferência forte dos efeitos específicos de heterogeneidade é que eles podem escapar à previsão teórica; nestas condições, as seções de choque, que são os parâmetros que regem a interação dos neutrons com o ambiente, tornaram-se dificilmente calculáveis com exatidão. As ambiguidades na análise teórica das experiências poriam a perder uma das finalidades do R.P.Z. que é a de testar os instrumentos analíticos.

Fixada a concepção do caroço da unidade crítica, o problema do projeto consiste na especificação de um certo número de dados de construção e na verificação da garantia que eles oferecem de serem atingidos os fins gerais da concepção do Reator de Potência Zero

Os dados mais relevantes a determinar são:

1. As dimensões dos buracos e seu espaçamento, vale dizer, a fração de volume do do caroço a ser perfurado;
2. As concentrações dos materiais pesados, urânio e tório, nos bastões.

Como já dissemos, 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.

Afora estes, a definição, do projeto exige que se definam uma série de dados mais ligados à estrutura mecânica do caroço do que propriamente às características de desempenho físico do reator: as dimensões dos blocos, o número total destes, a disposição e número dos buracos de um bloco, as dimensões dos bastões a serem introduzidos nas lacunas e os mecanismos que assegurem a reprodutibilidade experimental do sistema. Finalmente, dados referentes aos materiais a empregar: as densidades das grafitas estrutural e de ligamento, e seu teor de impurezas.

Algumas destas especificações dependem em grande parte das opções oferecidas pelos fabricantes, interferindo aí razões comerciais e de oportunidade. Para estas, enquanto ainda pendentes, servimo-nos dos dados constantes do P.S.A.R. (Preliminary Safety Analysis Report) do H.T.G.R. de 1160 MWe, como base de avaliações.

Dada a extensão do presente estudo, dividiremos o trabalho nas seguintes quatro seções.

Na primeira, investigamos de modo geral como se deve preencher o volume vago disponível do caroço com os diferentes materiais, para que se alcance uma composição estipulada; na segunda seção propomos os dados fundamentais à definição da estrutura do caroço, cuja flexibilidade é estudada parametricamente na seção seguinte e, na quarta, completamos o projeto, com sugestões para os aspectos complementares da estrutura mecânica. Uma tabela, com os dados e características mais importantes da estrutura do caroço projetado, encerra o estudo.

5. As equações de utilização do caroço.

Sejam dados:

- A, ΔW , V a área da seção transversal, a espessura e o volume do conjunto crítico disponível para o preenchimento das cavidades;
- S, a área de cada buraco;
- N; o número de buracos;

- γ , a relação carbono/urânio - 235 em massa;
 z , a relação carbono/(urânio - 238 + tório) em massa;
 ξ, η , as porcentagens em massa do urânio - 235 e do urânio - 238 no combustível;
 ρ , a densidade da grafita estrutural e dos bastões de grafita;
 ρ' , a densidade do carbono de ligamento dos bastões de urânio e tório;
 ρ_{01} , a densidade do óxido de tório;
 ρ_{02} , a densidade do carbetto de urânio;
 μ_1 , a concentração de tório nos bastões de tório em g/cm^3 ;
 μ_2 , a concentração de urânio nos bastões de urânio em g/cm^3 .

A configuração do caroço estará definida se forem conhecidos:

- N_1 , o número de buracos preenchidos com bastões contendo tório;
 N_2 , o número de buracos preenchidos com bastões contendo urânio;
 N_3 , o número de buracos preenchidos com bastões contendo grafita;
 N_4 , o número de buracos vagos.

Para o equacionamento dos N 's é conveniente também introduzir as grandezas:

- M_1 , a massa total de tório;
 M_2 , a massa total de urânio - 235;
 M_2' , a massa total de urânio - 238;
 M_3 , a massa total de carbono, compreendendo a grafita estrutural, as barras de grafita pura, o carbono de ligamento dos bastões, e o carbono presente sob a forma de carbetto de urânio

Definiremos ainda:

- μ , a massa de carbono dos bastões de tório por unidade de volume;
 μ' , a massa de carbono dos bastões de urânio por unidade de volume;

$$f_1 = \frac{N_1 S \Delta W}{A \Delta W} = \text{fração de volume ocupada pelos buracos preenchidos com bastões contendo tório};$$

$$f_2 = \frac{N_2 S \Delta W}{A \Delta W} = \text{fração de volume dos buracos preenchidos com bastões contendo urânio};$$

$$f_3 = \frac{N_3 S \Delta W}{A \Delta W} = \text{fração de volume dos buracos preenchidos com bastões de grafita};$$

$$f_4 = \frac{N_4 S}{A} = \text{fração de vazio};$$

$$m_1 = \frac{M_1}{V}, m_2 = \frac{M_2}{V}, m_3 = \frac{M_3}{V}.$$

Admitiremos, por enquanto, que os diâmetros dos bastões são iguais aos dos buracos. Posteriormente examinaremos como o preenchimento parcial das lacunas pelas barras de

carregamento afeta a composição.

As grandezas M_1 , M_2 , M'_2 e M_3 são dadas por:

$$M_1 = \mu_1 N_1 S \Delta W$$

$$M_2 = \xi \mu_2 N_2 S \Delta W$$

$$M'_2 = \eta \mu_2 N_2 S \Delta W$$

(1)

$$M_3 = \mu' N_1 S \Delta W + \mu'' N_2 S \Delta W + \rho N_3 S \Delta W + \rho (A - N_3) S \Delta W$$

Das proporções y e z :

$$y = \frac{M_3}{M_2} = \frac{\mu' N_1 S \Delta W + \mu'' N_2 S \Delta W + \rho [A - (N_1 + N_2 + N_4) S] \Delta W}{\xi \mu_2 N_2 S \Delta W}$$

$$z = \frac{M_3}{M_1 + M'_2} = \frac{\mu' N_1 S \Delta W + \mu'' N_2 S \Delta W + \rho [A - (N_1 + N_2 + N_4) S] \Delta W}{\mu_1 N_1 S \Delta W + \eta \mu_2 N_1 S \Delta W}$$

obtem-se o sistema de equações para N_1 , N_2 :

$$(\mu_1 S z - \mu' S + \rho S) N_1 - (\mu'' S - \rho S - \eta \mu_2 S z) N_2 = \rho A - \rho N_4 S$$

$$-(\mu' S - \rho S) N_1 + \xi \mu_2 S y - \mu'' S + \rho S) N_2 = \rho A - \rho N_4 S$$

cuja solução é a seguinte:

$$N_1 = \frac{\mu_2 \rho (A - N_4 S) (\xi y - \eta z)}{S [\xi \mu_1 \mu_2 y z + \mu_2 (\xi y - \eta z) (\rho - \mu') + \mu_1 z (\rho - \mu'')]} \quad (2)$$

$$N_2 = \frac{\mu_1 \rho (A - N_4 S) z}{S [\xi \mu_1 \mu_2 y z + \mu_2 (\xi y - \eta z) (\rho - \mu') + \mu_1 z (\rho - \mu'')]}$$

As concentrações de carbono nas barras combustíveis não são independentes das concentrações de tório e urânio. Para determinarmos a relação entre μ' e μ_1 , consideremos um bastão de tório, de área S e comprimento ΔW . A massa de tório é $\mu_1 S \Delta W$ e a massa correspondente de óxido de tório é $\mu_1 S \Delta W A_{ThO_2} / A_{Th}$, onde A 's representam as massas atômica e molecular. O volume ocupado por esta massa é

$$\frac{\mu_1}{\rho_{O_1}} S \Delta W \frac{A_{ThO_2}}{A_{Th}}$$

de modo que: esta para o carbono de ligamento o volume

$$S \Delta W - S \Delta W \frac{\mu_1}{\rho_{O_1}} \frac{A_{ThO_2}}{A_{Th}}$$

Logo, a massa de carbono é dada por

$$\rho' S \Delta W \left(1 - \frac{\mu_1}{\rho_{01}} \frac{A_{Th02}}{A_{Th}} \right)$$

Pela definição de μ' , concluímos que

$$\mu' S \Delta W = \rho' S \Delta W \left(1 - \frac{\mu_1}{\rho_{01}} \frac{A_{Th02}}{A_{Th}} \right),$$

de onde se tira

$$\mu' = \rho' - C \mu_1,$$

com C dado por

$$C = \frac{\rho' A_{Th02}}{\rho_{01} A_{Th}}. \quad (3)$$

O cálculo de μ'' pode ser feito de maneira análoga, devendo-se, porém, incluir o carbono presente sob a forma de carvão. Resulta:

$$\mu'' = \rho' - B \mu_2$$

onde

$$B = \frac{\rho' A_{uc2}}{\rho_{02} A_u} \frac{A_{r2}}{A_u} \quad (4)$$

Estas expressões para μ' e μ'' podem ser substituídas nas equações (2). Usando as frações de volume já definidas, elas ainda podem ser escritas na forma abaixo, independentemente das dimensões dos orifícios:

$$f_1 = \frac{\mu_1 \rho t (1 - f_4)}{\xi \mu_1 \mu_2 yz + (\rho - \rho') (\mu_1 z + \mu_2 t) + \mu_1 \mu_2 (Bz + Ct)} \quad (5)$$

$$f_2 = \frac{\mu_1 \rho z (1 - f_4)}{\xi \mu_1 \mu_2 yz + (\rho - \rho') (\mu_1 z + \mu_2 t) + \mu_1 \mu_2 (Bz + Ct)} \quad (6)$$

onde, por comodidade, introduzimos a notação

$$t = z \xi \left(\frac{y}{z} \frac{\eta}{\xi} \right) \quad (7)$$

As equações que relacionam as massas por unidade de volume total às frações de ocupação podem ser obtidas das equações (1):

$$m_1 = \frac{M_1}{V} = \frac{\mu_1 N_1 S \Delta W}{A \Delta W} = \mu_1 \left(\frac{N_1 S}{A} \right) = \mu_1 f_1 \quad (8)$$

$$m_2 = \xi \mu_2 f_2 \therefore f_2 = \frac{m_2}{\xi \mu_2} \quad (9)$$

$$m'_2 = \eta \mu_2 f_2$$

Em termos dos m 's, as proporções de massas são dadas por

$$m_3 = Y m_2 = y \xi \mu_2 f_2 \quad (10)$$

$$m_3 = z (m_1 + m'_2) = z (\mu_1 f_1 + \eta \mu_2 f_2) \quad (11)$$

Desta última equação é possível isolar f_1 . Substituindo f_2 , dado pela equação (9), e m_3 , dado pela equação (10), na equação (11), obtemos:

$$f_1 = \frac{m_2}{\mu_1} \left(\frac{Y}{z} - \frac{\eta}{\xi} \right) = \frac{m_2}{\mu_1} \frac{t}{z \xi} \quad (12)$$

O volume vazio pode ser determinado com auxílio da equação (6), eliminando-se f_2 segundo a equação (9). Resulta:

$$f_4 = 1 - \frac{m_2}{\xi \rho} \left[\xi z + (\rho - \rho') \left(\frac{1}{\mu_2} + \frac{t}{z \mu_1} \right) + (B + C \frac{t}{z}) \right] \quad (13)$$

O conjunto de equações (9), (12) e (13), define as condições de utilização do caroço da unidade crítica para uma experiência: dada a massa de urânio, as relações carbono/U-235 e carbono/ (U-235 + tório), elas indicam quais as frações de volume ocupadas pelos bastões de urânio e tório, e a fração de vazio. A fração de volume destinado à complementação da massa de carbono pelos bastões de grafita pura é dada por:

$$f_3 = f - (f_1 + f_2 + f_4) \quad (14)$$

As proporções entre o carbono e os elementos pesados em geral não são especificados em termos de massas, como constam nas equações deduzidas, mas sim sob a forma de relações entre números de átomos. É fácil mostrar que a conversão pode ser feita através das equações:

$$y = y' \frac{A_c}{A_{u5}} \quad (15)$$

$$\frac{y}{z} = \frac{y'}{z'} \frac{A_{Th}}{A_{u5}} + \frac{\eta}{\xi} \left(1 - \frac{A_{Th}}{A_{u8}} \right) \quad (16)$$

onde y' e z' são os valores correspondentes a y e z , expressos como razão atômica.

Se os enriquecimentos também forem dados em porcentagens de números de átomos, ξ' , η' , a relação de transformação a empregar é a seguinte:

$$\frac{\xi}{\eta} = \frac{A_{u5}}{A_{u8}} \frac{\xi'}{\eta'}$$

Cabe observar que o enriquecimento limita a gama de experiências possíveis ao intervalo $\frac{y}{z} > \frac{\eta}{\xi}$. O sinal de igual corresponde ao caso em que não haverá necessidade de tório para que a proporção z seja atingida. O volume vazio total disponível, por outro lado, restringe a escala de composições de tal modo que $f_1 + f_2 + f_4 < f$ seja sempre respeitada.

As equações deduzidas incluem a massa de urânio por unidade de volume, que não é um parâmetro conveniente. Com efeito, a maneira de ocupar o volume disponível na zona central

requer primeiramente que as proporções y e z sejam respeitadas, não se impondo nenhuma condição à suas dimensões ou à massa de urânio nele distribuída, uma vez que a criticalidade não é autosustentada. A complementação da massa físsil necessária para que a reação em cadeia seja mantida é disposta no volume circundante, onde o valor da relação carbono/urânio, é por hora, de importância secundária. Isso desacopla o problema da criticalidade do problema do projeto da estrutura do caroço, ensejando à eliminação de m_2 das equações anteriores. Para tanto, basta substituir este parâmetro pelo fator de vazio, a saber, a relação entre o volume total vazio e o volume ocupado pelas barras que contêm os materiais pesados (urânio e tório), por $k = f_4 / (f_1 + f_2)$, e que, juntamente com y e z , permitirá caracterizar grosseiramente o espectro de neutrons. A interconexão entre a escala de variação dessas grandezas e a fração de esburacamento total f , por um lado, e as concentrações dos elementos pesados nas barras de carregamento, por outro, estabelecerá a flexibilidade do caroço, em termos das composições alcançáveis.

Fixado o fator de vazio, a massa de urânio-235 por unidade de volume do caroço central pode ser obtida combinando-se as equações (9), (12) e (13):

$$m_2 = \frac{\xi \rho}{\xi y + [\rho(1+k) - \rho'] \left(\frac{1}{\mu_2} + \frac{1}{\mu_1 z} \right) + (B + C \frac{1}{z})} \quad (17)$$

com o que as frações f_1 , f_2 e f_4 ficam definidas no caroço central quando y , z e k são dados.

Reciprocamente, estas mesmas equações permitem determinar as proporções resultantes no caroço para um certo modo de preenchimento dos canais:

$$y' \frac{A_c}{A_{Us}} = \frac{\rho}{\xi \mu_2} \frac{1-f_4}{f_2} - \frac{1}{\xi} \left[(B + \frac{\rho - \rho'}{\mu_2}) + \frac{f_1}{f_2} (C \frac{\mu_1}{\mu_2} + \frac{\rho - \rho'}{\mu_2}) \right] \quad (18)$$

$$\frac{y'}{z'} = \frac{\eta'}{\xi'} + \frac{1}{\xi} \frac{A_{Us}}{A_{Th}} \frac{\mu_1}{\mu_2} \frac{f_1}{f_2} \quad (19)$$

onde, relembramos, as frações são dadas por $\frac{f_i}{f} = \frac{N_i}{N}$ ($i = 1, 2, 3, 4$); e o fator de vazio por $k = \frac{f_4}{f_1 + f_2} = \frac{N_4}{N_1 + N_2}$.

A mínima fração de esburacamento total necessária, para que a experiência seja realizável, será:

$$f' = f_1 + f_2 + f_4 = \frac{\rho(1+k) \left(\frac{1}{\mu_2} + \frac{1}{\mu_1 z} \right)}{\xi y + [(1+k)\rho - \rho'] \left(\frac{1}{\mu_2} + \frac{1}{\mu_1 z} \right) + (B + C \frac{1}{z})} \quad (20)$$

quando o carbono permanente da estrutura é suficiente para que as proporções sejam atingidas.

Inversamente, podemos indagar quais seriam os limites de composição que uma dada fração de perfuração permitirá alcançar. A primeira restrição que pesa sobre eles provém do enriquecimento do urânio, que obriga a uma participação em proporção mínima, do material fértil que acompanha o combustível. Em acréscimo, as relações guardadas nas próprias barras, consideradas per se, e a existência de uma quantidade fixa de carbono na estrutura do caroço contribuem para reduzir significativamente a amplitude do intervalo de composições, o que pode elevar o limite inferior e valores bastantes altos.

A determinação desse limite pode ser feita com auxílio das fórmulas já escritas, e a comprovação de que ele corresponde à máxima utilização do caroço, ou seja, no caso em que $f_3 = 0$. Após um bom trabalho algébrico, chega-se à expressão:

$$y'_{\min} = \frac{A_{u3}}{\xi A_c} \frac{(\frac{G}{\mu_2} - fB) - \eta \frac{A_{Th}}{A_{u3}} (\frac{G}{\mu_1} - fC)}{f - \frac{A_{Th}}{A_c} \frac{1}{z'} (\frac{G}{\mu_1} - fC)} \quad (21)$$

onde $G = (1 - f)(1 + k)\rho + f\rho'$

É conveniente determinar também o mínimo valor de y' no anel acionador, onde não há tório. A expressão aí simplifica-se para

$$y'_{\min} = \frac{A_{u3}}{A_c} \frac{1}{f\xi} \left[(1 + k)(1 - f) \frac{\rho}{\mu_2} - f(B - \frac{f'}{\mu_2}) \right] \quad (22)$$

O estudo feito até agora supõe que os volumes das lacunas e das barras de carregamento sejam idênticos. Na verdade, isso não deverá ocorrer, pois prevê-se uma folga entre as paredes dos canais e os bastões, a fim de facilitar sua introdução; além do mais, estes poderão ser revestidos, mesmo no caroço central, por camisas de alumínio. De qualquer maneira, o volume útil de um canal é reduzido tanto pela existência do espaço intersticial, como, em geral, pela presença de capas de proteção (Figura 2), o que adiciona um inevitável "espaço morto" a toda configuração.

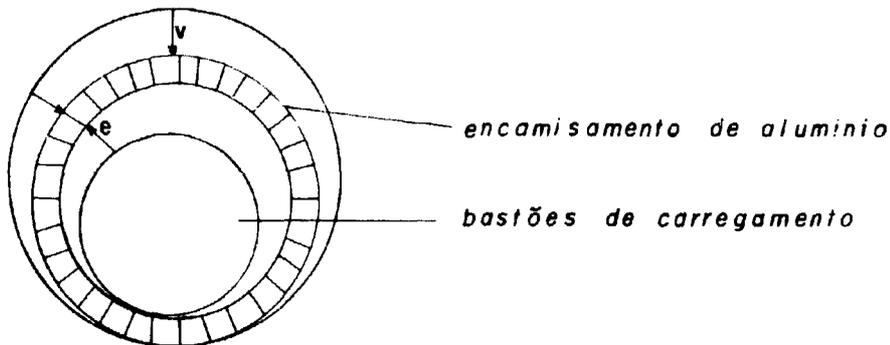


FIGURA 2

Barra Inserida em uma Lacuna

Este "espaço morto" - sem esquecer aquele representado pelo alumínio - pode ser admitido como uma contribuição ao fator de vazio, que até o momento supusemos constituído apenas pelos canais desocupados. A diferença está em que estes últimos podem se apresentar como centros substanciais de fuga de neutrons e, como tal devem ser considerados na análise do comportamento neutrônico do reator. Os espaços residuais, entretanto, representam uma fração diminuta do volume do caroço, e seu efeito pode ser assimilado a uma diminuição da densidade do moderador. Quanto ao alumínio, embora suas propriedades de absorção sejam muito diferentes das do carbono e muito mais acentuadas, - mas, evidentemente, bem inferiores às dos materiais pesados - sua capacidade de moderação é desprezível, tanto pela massa atômica,

superior ao dobro da massa do carbono, quanto pela seção de choque de espalhamento, extremamente baixa. Não é sem razão que os efeitos de espalhamento do alumínio justificam em muitos casos seus tratamentos como uma "janela" para os neutrons. Retornaremos esta discussão num estudo sobre a criticalidade do sistema. Por enquanto, basta-nos a constatação de que o alumínio pode ser adequadamente incorporado ao "vazio" do reator. Ignoraremos ainda os efeitos distintos ocasionados pelos canais livres e os vãos, supondo que o total dos espaços vagos seja um parâmetro conveniente para caracterizar o espectro em primeira mão.

Englobando no vazio total necessário, o "espaço morto", o número de buracos destinados à constituição do fator k é reduzido, e a diferença pode ser ocupada pelas barras, para compensar as perdas distribuídas de material.

Designando por δ a fração do volume do canal efetivamente tomada por uma barra de carregamento, a mesma composição alcançada sob hipótese de preenchimento pleno será agora atingida com as frações de canais ocupados aumentada para

$$\left(\frac{f_i}{f}\right)' = \frac{f_i}{f\delta} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (23)$$

às expensas da fração diminuída de buracos vagos:

$$\left(\frac{f_4}{f}\right)' = \left(\frac{f_4}{f} + \delta - 1\right)/\delta \quad (24)$$

Em termos de números de buracos, os valores corrigidos a serem empregados nas equações (18) e (19) são

$$f'_i = \frac{N_i}{N} f \delta \quad (i = 1, 2, 3) \quad (25)$$

$$f'_4 = f - (f'_1 + f'_2 + f'_3) \quad (26)$$

enquanto o fator k passa a ser dado por

$$k = \frac{N - \delta (N - N_4)}{\delta (N_1 + N_2)} \quad (27)$$

6. As especificações do projeto.

Conhecidas as expressões que relacionam a flexibilidade do caroço às várias grandezas envolvidas no projeto, coloca-se em pauta o estudo paramétrico, que, conjuntamente com as avaliações de caráter neutrônico, permitirá decidir dos valores numéricos mais recomendáveis.

Alguns dos parâmetros têm influência relativamente pequena na flexibilidade do caroço, e ademais, dizem respeito aos materiais empregados; são as densidades da grafita estrutural e de ligamento das barras. Como referência, admitimos que

$$\rho = 1.74 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho' = 1.5 \text{ g/cm}^3$$

os mesmos valores utilizados na fabricação do H.T.G.R. de 1100 MW.

As densidades do óxido de tório e do carbeto de urânio, na informação do manual de C.W. Weast, valem

$$\rho_{01} = 9.86 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{02} = 11.23 \text{ g/cm}^3$$

Restam enfim, os valores cruciais de f , μ_1 e μ_2 .

A escolha de f será o compromisso entre duas determinações conflitantes: quanto maior a fração de volume disponível no caroço para a alocação das barras, maior é o âmbito das composições realizáveis; quanto menor a fração da área ocupada pela seção transversal da barra absorvedora, menores serão as múltiplas consequências da heterogeneidade no comportamento neutrônico do reator.

Sendo os blocos de grafita estruturais de forma quadrada, um arranjo quadrangular, como ilustra a Figura 3, 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 , contendo no centro um canal de diâmetro b , com a espessura mínima de $2c$ entre os bordos dos canais adjacentes:

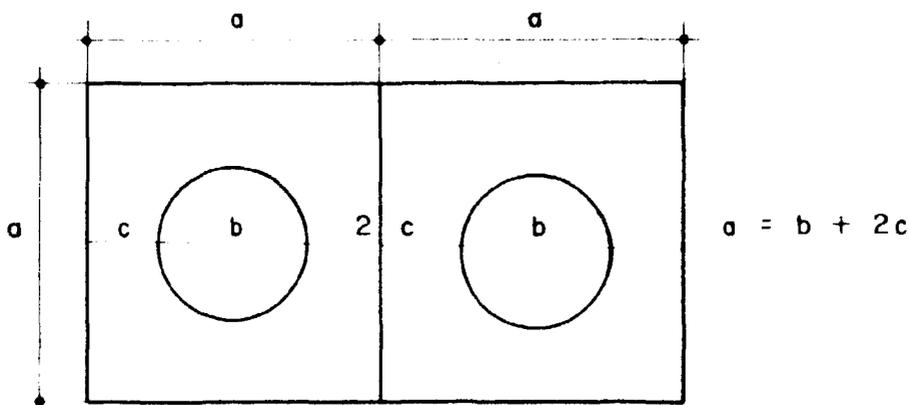


FIGURA 3

Células Unitárias Constitutivas dos Blocos

A fração da área perfurada é dada por

$$f = \frac{\pi \left(\frac{b}{2}\right)^2}{a^2} = 0.785 \left(\frac{b}{a}\right)^2$$

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 mecanicamente possível obter $c < 3\text{mm}$, quer pelas limitações de tolerância impostas pelos dispositivos de perfuração dos blocos, quer pela resistência da matriz ao processo de abertura dos buracos.

Quanto à dimensão lateral da célula, não é conveniente tomá-la inferior a 3 cm, que é aproximadamente o livre percurso médio dos neutrons térmicos no carbono. Mesmo a medida de 3 cm representa um valor comparativamente baixo, que repercutirá de diversas maneiras no cálculo de criticidade e no desempenho do reator. Algumas complicações acarretadas pela proximidade das barras absorvedoras à análise do caroço são previstas. A despeito delas, optamos neste projeto preliminar, por $a = 3$ cm, $c = 3$ mm e $b = 2.4$ cm. A Fig. 4 mostra o arranjo estrutural da matriz de grafita dividida em células individuais.

Estes valores permitem obter um alto coeficiente de volume perfurado: $f = 0.5027$, mais ou menos a metade do volume do caroço e, por conseguinte, uma larga escala de composições. As conclusões da análise da estrutura fina dos fluxos de neutrons, permitem supor que as vantagens introduzidas pela redução da área transversal dos condutos e do aumento do espaçamento entre eles, no que diz respeito à análise física do reator, só se fariam sentir, de modo decisivo, às custas de um intolerável abaixamento de f .

Resta, agora, a escolha das concentrações dos isótopos pesados, urânio e tório, nas barras de carregamento. São elas os outros componentes que afetarão o nível de heterogeneidade do R.P.Z., notadamente pelos efeitos da blindagem de absorção.

Pode-se fazer uma estimativa de interrelação entre estes e a concentração do urânio 235 traçando-se um gráfico do livre percurso médio de absorção térmico em função da concentração μ_2 , como na Figura 5.

As seções de choque microscópicas na energia de 0.0253 ev:

$$\sigma_a(U-235) = 678.2 \text{ barns}$$

$$\sigma_a(U-238) = 2.73 \text{ barns}$$

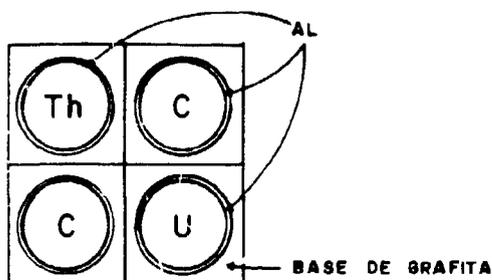
$$\sigma_a(C) = 3.4 \times 10^{-3} \text{ barns}$$

são representativas das propriedades de absorção na região térmica e o livre percurso médio de absorção dentro das barras combustíveis, dado por

$$\lambda_{ab}^{-1} = \Sigma_{ab} = N_{U-235} \sigma_a(U-235) + N_{U-238} \sigma_a(U-238) + N_C \sigma_a(C)$$

fornece uma base de avaliação das distâncias para os quais os neutrons térmicos reconhecem a sequência heterogênea dos elementos absorvedores ou apenas um conjunto indistinto constituído pela mistura do moderador e os outros materiais. Um livre percurso médio aproximadamente igual (ou maior) a três vezes a separação entre as barras é suficiente para que o agrupamento resulte razoavelmente homogêneo, e que os métodos correntes de cálculo consigam extrair, sem ambigüidades, os fatores de auto-blindagem do comportamento local dos neutrons. Logo, para $a = 3$ cm, a distância entre os centros das barras, a concentração de urânio deve ser suficientemente baixa para que $\lambda_{ab} > 9$ cm, isto é, $\mu_2 < 0.30 \text{ g/cm}^3$, como se pode ver do gráfico. Este critério nos basta para conduzir o projeto.

A concentração do tório pode ser proposta com base nas proporções de massa de urânio e tório existentes nos reatores térmicos conversores. O H.T.G.R. de 1100 MW, por exemplo,



OS QUATRO QUADRADOS BASICOS DA CONFIGURACAO 1120

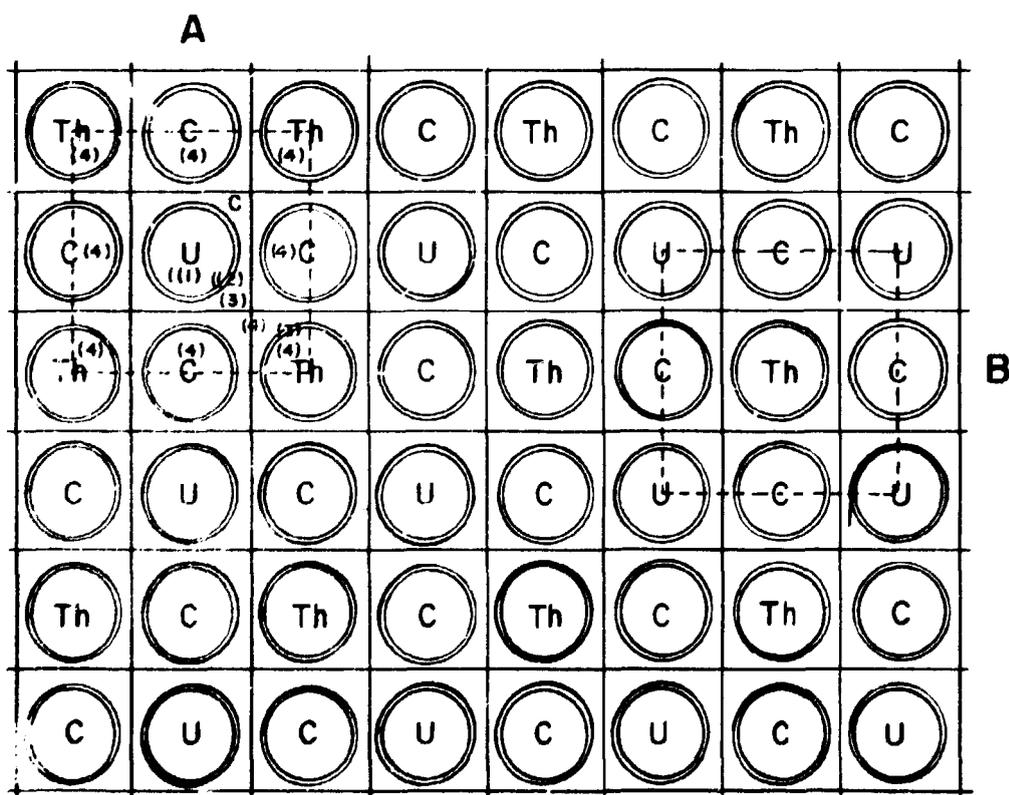


FIGURA 4

Configuração 1120, obtida por reflexões da célula unitária A ou B

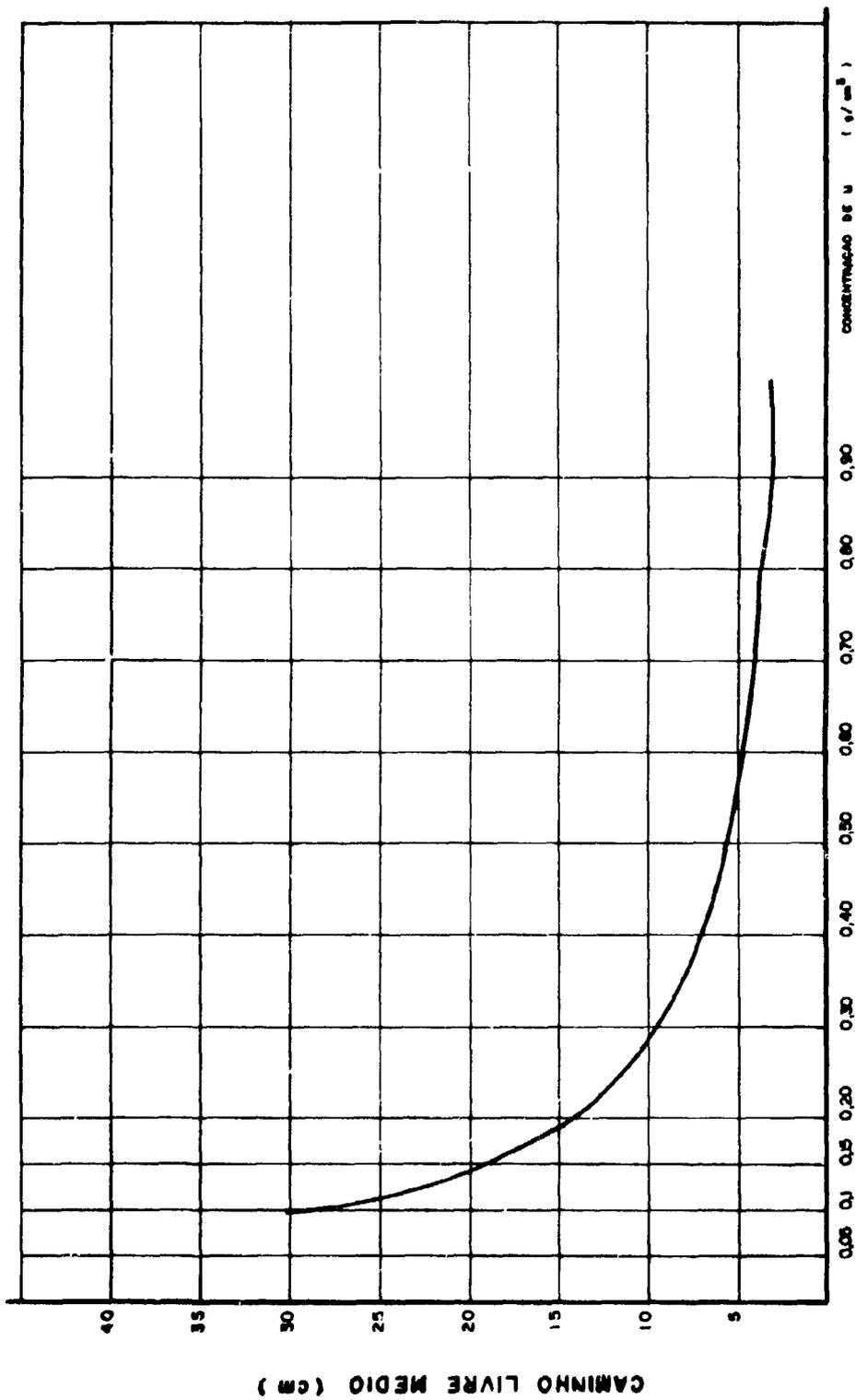


FIGURA 5

Caminho livre médio de absorção nas barras de urânio em função da concentração de U

requer um carregamento inicial de 39 242 kg de tório e 1 994 kg de urânio, e, por conseguinte, uma concentração média de tório cerca de vinte vezes superior à do urânio 235.

Assim como o aumento de esburacamento age de modo diverso na amplitude do intervalo das composições e na homogeneidade do sistema, no jogo das concentrações, quando um é beneficiado, prejudica-se o outro. Antecipamos, entretanto, que nos resolvemos, neste estudo preliminar, por $\mu_1 = 1 \text{ g/cm}^3$ e $\mu_2 = 0.2 \text{ g/cm}^3$, e que estes valores correspondem a carregamentos razoavelmente diluídos.

Estes dados, e o dimensionamento das lacunas proposto constituirão o que referiremos por dados do projeto.

Os demais parâmetros que interferem na flexibilidade do sistema e na repartição das cavidades entre os tipos de barras diferentes são a espessura da camisa de alumínio e o volume vazio não aproveitado de um canal. Buscamos, para estimativas provisórias, as referências da Unidade Crítica da General Atomic, que dão

$$e = 15 \text{ mils}$$

$$v = 1.5 \text{ mm}$$

ou seja, uma fração $\delta = 0.1796$

7. A flexibilidade do caroço.

O Quadro 1 é o tabelamento da equação (2), fornecendo os limites de composição, em termos da relação carbono/urânio-235, para as combinações possíveis dos outros parâmetros de definição do caroço. O valor $k = 0.78$ corresponde ao fator de vazio do H.T.G.R.

QUADRO 1

Valores de Y'_{min} para $\mu_1 = 1 \text{ g/cm}^3$, $\mu_2 = 0.2 \text{ g/cm}^3$, $f = 0.5027$

k → z' ↓	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.78
150	2352	2569	2798	3045	3313	3605	3925	4276	4582
200	2030	2183	2343	2512	2689	2876	3047	3282	3457
250	1873	2002	2135	2273	2417	2566	2120	2880	3014
300	1782	1897	2016	2138	2263	2393	2526	2663	2776

A Figura 6 ilustra a mesma dependência de Y'_{min} com z' e k ; as curvas limitam inferiormente as regiões acessíveis. As possibilidades do caroço podem ser melhor apreciadas com auxílio da Figura 7, onde estão lançados os pontos representativos das composições das diversas zonas e regiões do H.T.G.R., reproduzidas do P.S.A.R. no Apêndice A. Para fins comparativos, representamos as curvas limites para diferentes valores dos parâmetros do projeto. Pode-se notar que uma composição do H.T.G.R. (a da zona 5A) fica excluída da área de alcance do caroço, se $\mu_1 = 1 \text{ g/cm}^3$ e $\mu_2 = 0.2 \text{ g/cm}^3$. Em todo caso, estas especificações ainda permitem cobrir um vasto campo de composições, que atende perfeitamente aos objetivos de estudo dos reatores daqule tipo.

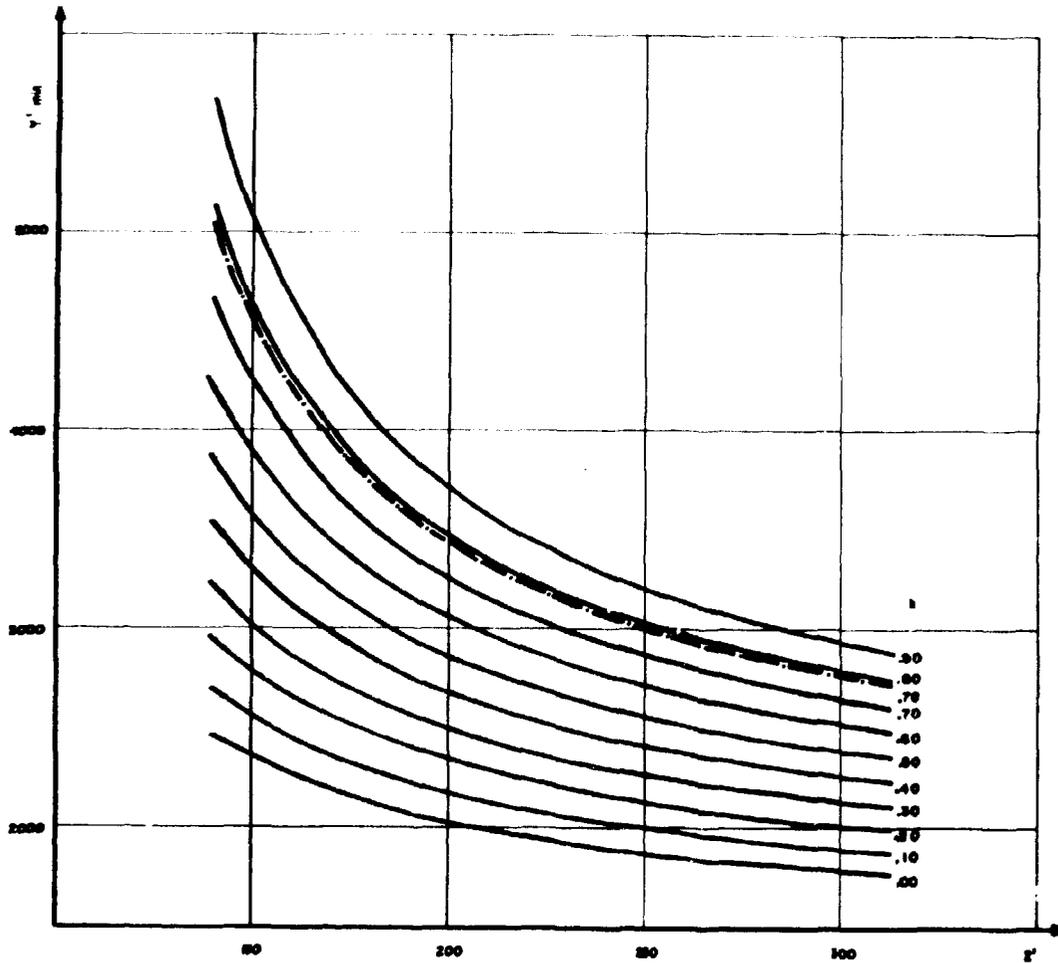


FIGURA 6

Limites das composições do caroço

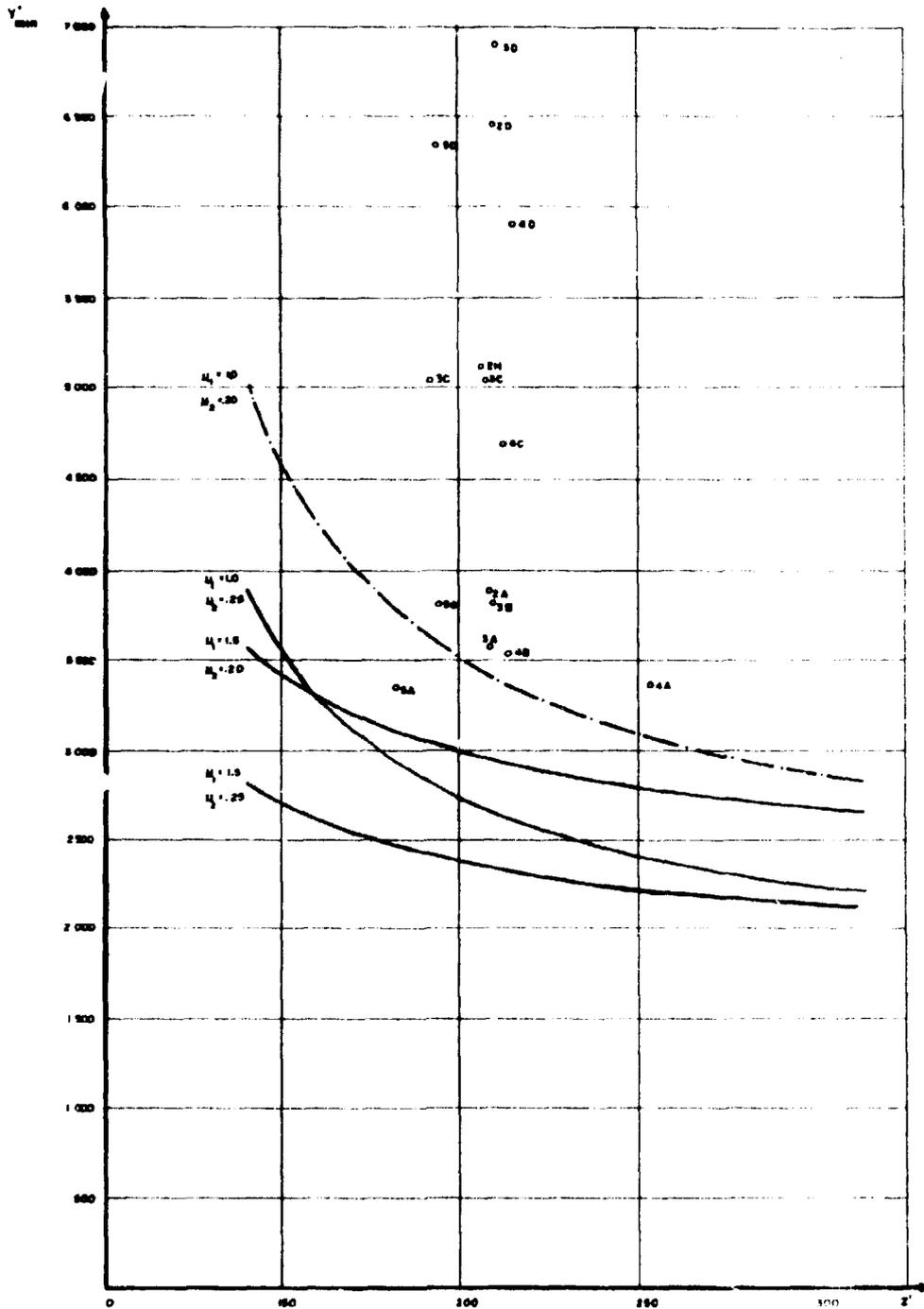


FIGURA 7

Variação dos limites das composições com as concentrações dos elementos pesados nas barras, para $k = 0,78$, $\rho = 1,74 \text{ g/cm}^3$ e $\xi = 0,2$. Os pontos correspondem às regiões do H.T.G.R.

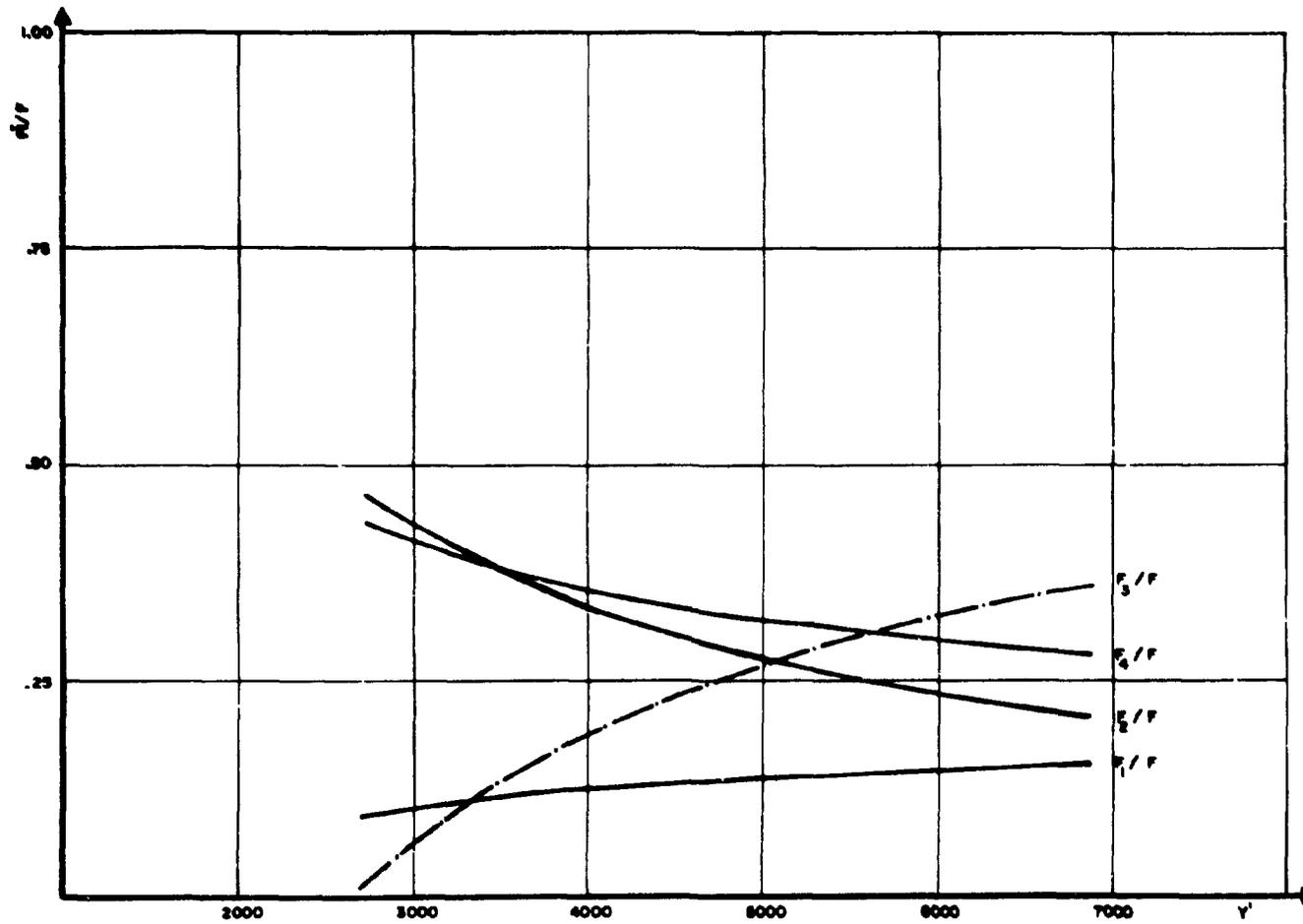


FIGURA 8

Varição das frações parciais de volume com a relação C/U - 235, para $z = 300$ e $k = 0,78$

Os gráficos da Figura 8 mostram as tendências das frações parciais f_i/f com a relação carbono/material físsil e $z' = 300$, mantido $k = 0.78$, para os dados de projeto. Vê-se que o carbono e o tório crescem com y' , enquanto o urânio e o vazio diminuem. Pode-se mostrar que, a medida que diminui o fator de vazio, as curvas se cruzam e divergem mais acertadamente, conforme nos aproximemos dos espectros menos moderados.

Gostaríamos agora de utilizar os resultados a que chegamos para resolver o seguinte problema concreto: dado um certo número de buracos, como devem eles ser repartidos entre os diferentes tipos de barras, para que uma composição, definida por y' , z' e k , seja atingida? A título de exemplo, tomemos 81 buracos (a razão desta escolha ficará clara mais tarde) e procuremos ocupá-los de modo a simular composições tão próximas quanto possível às das zonas do H.T.G.R. Selecionamos dentre estas, uma zona classificada como típica (3C), a região central (1A) e três outras nos extremos do intervalo de composições, a saber: a de máxima relação carbono/urânio (3D), de máximo carbono/tório (4A), e a de mínimos valores para estas relações (5A). Estas características podem ser conferidas pelo quadro do Apêndice A. Já observamos que o fator de vazio $k = 0.78$, retira a possibilidade de reproduzir a composição da zona 5A no caroço do R.P.Z.; se o abaixarmos a 0.66, entretanto, poderemos alcançar proporções semelhantes quanto aos materiais pesados.

As equações (17), (9), (12) e (13) permitem determinar as frações parciais de volume destinadas a cada tipo de barra, para os valores de y' , z' e k emprestados das zonas do H.T.G.R. As equações (23) e (24) incluem a correção devida ao não aproveitamento integral das lacunas e fornecem os coeficientes que, multiplicados pelo número total de buracos disponíveis (81), indicarão como eles devem ser partilhados. O Quadro 2 anexo exhibe o resultado deste procedimento.

Evidentemente, como os números de buracos são inteiros, deve-se arredondar os resultados dos produtos, o que ocasiona uma ligeira alteração na composição. Sendo desiguais as concentrações de grafita, urânio e tório, nem sempre o arredondamento "óbvio" conduz às composições mais próximas àquelas de partida.

QUADRO 2

Determinação aproximada das distribuições das barras em μ_1 bloco estrutural a partir das composições do H.T.G.R.

REGIÃO	y'	z'	k	$(\frac{f_1}{f})$	$(\frac{f_2}{f})$	$(\frac{f_3}{f})$	$(\frac{f_4}{f})$	N_1	N_2	N_3	N_4
Central (1A)	4540	241	0.78	0.2089	0.3601	0.2060	0.2249	17	29	17	18
Típica (3C)	5071	208	0.78	0.2554	0.3206	0.1937	0.2303	21	26	18	18
y'_{max} (3D)	6929	211	0.78	0.2724	0.2416	0.3040	0.1820	22	20	25	14
z'_{max} (4A)	3371	254	0.78	0.1700	0.4892	0.0809	0.2799	14	38	7	22
y'_{min}, z'_{min} (5A)	3389	182	(0.66)	0.2650	0.4898	0.00085	0.26535	21	38	0	22

O cálculo dos fatores y' , z' e k resultantes de um certo modo de divisão dos buracos pode ser feito por meio das equações (25) a (27) e (18) e (19) percorrendo-se o caminho inverso ao da determinação dos N 's. Ajustando-se, por meio de tentativas, as combinações dadas pelo Quadro 2, chega-se às distribuições que levam às composições mais semelhantes às que serviram para construí-lo, (Quadro 3).

QUADRO 3

Distribuição das barras em um bloco estrutural que levam à composições mais semelhantes às das zonas do H.T.G.R.

REGIÃO SIMULADA	N_1	N_2	N_3	N_4	Composições resultantes		
					y'	z'	k
Central (1A)	17	29	18	17	4551	240	0.76
Típica (3C)	21	26	17	17	5059	205	0.74
y'_{max} (3D)	22	20	29	10	6905	215	0.66
z'_{max} (4A)	14	38	0	21	3370	251	0.74
y'_{min}, z'_{min} (5A)	21	37	0	23	3379	182	0.70

Com os dados de projeto, as equações que relacionam a composição aos números de buracos são:

$$y' = 1672.74 \frac{N_1}{N_2} + 1896.91 \frac{N_3}{N_2} + 1036.95 \frac{N_4}{N_2} + 1773.81 \quad (28)$$

$$\frac{y'}{z'} = (4 + 25.58 \frac{N_1}{N_2})^{-1} \quad (29)$$

$$k = \frac{C 1796 (1 + \frac{N_1}{N_2} + \frac{N_3}{N_4}) + \frac{N_4}{N_2}}{0.8204 (1 + \frac{N_1}{N_2})} \quad (30)$$

como se pode deduzir facilmente das expressões anteriores.

8. Os dados complementares do projeto.

Estabelecidos o diâmetro dos condutos e o seu arranjo geométrico, o dimensionamento dos blocos estruturais não oferece dificuldade. Eles poderiam ter 27 cm x 27 cm de lado, e 65 cm de profundidade - estas dimensões permitem o manuseio fácil das peças. Cada bloco apresentaria 9 x 9 canais, dispostos no centro das células unitárias quadradas de 3 cm de lado.

A superposição de colunas de 11 x 11 blocos armaria o conjunto do caroço da unidade crítica com dimensões laterais, de 2.97 m x 2.97 m. Como o mecanismo de sustentação do conjunto é móvel, estas dimensões podem ser reduzidas pela simples retirada de uma ou mais colunas ou fileiras dos blocos estruturais.

Cada mesa da unidade crítica seria constituída pela justaposição de duas pilhas verticais de blocos e, por conseguinte sua espessura seria de 1.30 m. As colunas exteriores das mesas poderiam ser edificadas por blocos maciços, não perfurados unicamente para moderação: nas colunas interiores, os blocos de sustentação, perfurados, alojariam as barras de carregamento. A espessura do caroço ativo, com as duas mesas colocadas, teria, no máximo, 1.30 m.

As barras contendo tório e urânio poderiam ter 65 cm de comprimento, ou a metade disso: é questão apenas de conveniência. Como discutimos no capítulo introdutório, por razões de segurança e de tempo de carregamento, as barras seriam montadas em um compartimento contíguo à sala onde se localiza o reator, inserindo-se os bastões nos estojos de alumínio, depois fechados nas extremidades por uma tampa.

A altura dos bastões deverá ser limitada, de modo a impedir que no processo de fabricação, por efeito da gravidade sobre os grânulos pesados, a distribuição das partículas resulte heterogênea. A integridade mecânica das barrinhas será outro fator que poderá limitar sua altura. Por outro lado, a facilidade de carregamento dos tubos tornará conveniente que eles contenham o mínimo número de bastões. Nas experiências em que se deseja evitar a presença de núclídeos estranhos na zona central, os bastões deverão ser introduzidos diretamente nas cavidades, dispensando-se o encapsulamento dos estojos protetores de alumínio, e o número deles pode representar um determinante importante do tempo de carregamento. A possibilidade de realizar tal montagem, todavia, é uma questão ainda em suspenso, que somente a prática poderá decidir.

Dentro dos estojos de alumínio, os bastões deverão se ajustar às paredes laterais com folga mecânica mínima. A espessura das capas de alumínio deverá também ser tão pequena quanto possível, pois tanto esta, como a folga interior, têm o efeito de reduzir o aproveitamento de volume disponível dos canais. O vão entre as barras inseridas e os condutos é indispensável, e tem a finalidade de permitir a movimentação rápida das barras para dentro dos canais. Os valores que adotamos anteriormente para e e v para estimarmos a flexibilidade do caroço, como dissemos, foram tomados de construções conhecidas, e não representam imposições inamovíveis do projeto. Nestas questões todas, a última palavra caberá aos fabricantes.

Na parte posterior de cada tubo, uma mola pressionará o trem de barrinhas para a face frontal de fechamento, o ajustamento firme das peças elementares assegurará a reprodutibilidade do conjunto. Os estojos de alumínio poderão ficar presos à estrutura da matriz por placas de aço fixados na parte posterior dos blocos e com eles solidários.

As barras mudas são constituídas pela justaposição de bastões de grafita do mesmo tipo que a grafita estrutural dos blocos; seu comprimento pode ser maior que o dos bastões que contêm os elementos pesados, já que neles não existe a mesma tendência à heterogeneidade. Os diâmetros das bases, porém, são iguais, afim de permitir o uso dos mesmos envólucros de alumínio para as barras destinadas ao anel acionador.

A estrutura microscópica dos bastões contendo materiais pesados apresenta as partículas de UC_2 ou ThO_2 , já descritas no Capítulo 1. O núcleo esférico deverá ter cerca de $200 \cdot 300 \mu$ de espessura, revestido por uma ou duas camadas de carbono pirolítico, destinadas a formar uma barreira primária à passagem dos produtos de fissão. Admitimos que o diâmetro total do grânulo recoberto será de aproximadamente 500μ . Estas estimativas são coerentes com os valores adotados nos elementos combustíveis fabricados pela G.A., mas, da mesma maneira que para os outros itens mencionados nesta seção, são meramente indicativas. O diâmetro dos grãos, entretanto, constitui um fator de relevância nos cálculos precisos do comportamento neutrônico do reator, principalmente quando se desejam testar métodos de análise da estrutura fina dos fluxos de neutrons.

A pureza da grafita, é claro, quanto mais alta, melhor.

Antes de encerrarmos este esboço da estrutura do caroço seria oportuno um comentário acerca da resistência mecânica do conjunto. O empilhamento de onze fileiras de blocos pode despertar preocupação quanto à capacidade da grafita esburacada de suportar os esforços e deformações a que estarão submetidos os blocos inferiores, sem prejuízo de sua integridade mecânica. Noriyuki Koishi, da Coordenadoria de Engenharia Nuclear, do Instituto de Energia Atômica, analisou estas grandezas com o auxílio do programa de computação FEAST-1-65, sob as mais variadas condições de carga mecânica do conjunto e chegou à conclusão de que a montagem é bastante segura. Para fins de avaliação, fornecemos as cifras mais significativas: as máximas tensões de compressão encontradas, nas circunstâncias menos favoráveis, não ultrapassam $2.72 \times 10^{-2} \text{ kg/mm}^2$, enquanto o valor limite, para a grafita, situa-se em torno de 2.90 kg/mm^2 .

O Quadro 4 reúne as principais características e dados referentes ao caroço do R.P.Z., resumindo a definição do projeto apresentado neste Capítulo.

QUADRO 4

Características do caroço e das barras

Dimensões dos blocos estruturais	27 cm x 27 cm x 130 cm
Número de blocos em cada uma das quatro pilhas do caroço	.11 x 11 = 121
Número de buracos por bloco	.81
Altura máxima do caroço	2.97 m
Espessura máxima do caroço ativo	.2 x 1.30 m = 2.60 m
Massa de um bloco vazio	.40.955 kg
Diâmetro dos buracos	.2.4 cm
Distância entre os centros dos buracos	.3 cm
Espessura dos tubos de alumínio	.15 mils
Largura do vão nos canais preenchidos por bastões encapsulados	.1.5 mm

Fração de volume não aproveitados nos canais preenchidos	0.1798
Fração de volume vazio nos canais preenchidos com barras encamisadas	0.1211
Fração de volume perfurado em um bloco	0.5027
Densidade da grafita dos blocos estruturais e das barras mudas	1.74 g/cm ³
Densidade da grafita de ligamento dos bastões	1.5 g/cm ³
Concentração do tório nos bastões	1 g/cm ³
Concentração do urânio nos bastões	0.2 g/cm ³
Enriquecimento do urânio (razão atômica)	20%
Densidade do ThO ₂	9.86 g/cm ³
Densidade do UC ₂	11.28 g/cm ³
Densidade efetiva das barras contendo tório	2.465 g/cm ³
Densidade efetiva das barras contendo urânio	1.691 g/cm ³
Comprimento de uma barra	.65 cm
Relação carbono/urânio-235 em uma barra ativa	736.86
Relação carbono/tório em uma barra com tório	25.63
Massa de urânio-235 em uma barra ativa	9.649 g
Massa de tório em uma barra com tório	241.235 g
Mínimo valor da relação carbono/urânio-235 no caroço	1774
Massa de uma barra com bastões contendo tório	595 g
Massa de uma barra com bastões contendo urânio	408 g
Massa de uma barra de grafita pura	420 g
Massa de uma coluna de onze blocos (não ocupados)	450.507 kg
Massa total do caroço (não ocupado)	19.822 kg

APÊNDICE A

Composições das Regiões do H.T.G.R. no caroço inicial

LOCALIZAÇÃO	z'	y'
1 A	241	4540
2 A	208	3884
2 B	207	5148
2 C	210	6485
3 A	209	3574
3 B	210	3825
3 C	208	5071
3 D	211	6029
4 A	254	3371
4 B	214	3552
4 C	213	4701
4 D	216	5931
5 A	182	3359
5 B	184	3819
5 C	192	5063
5 D	195	6376

Reprodução da Tabela 3.5.2 do P.S.A.R. do H.T.G.R. de 1160 MWe. Os números de localização correspondem as zonas de recarga, e as letras, aos grupos de mesma composição inicial.

ABSTRACT

The structural characteristics of a graphite moderated core of a critical assembly to be installed in the Zero Power Reactor of IEA have been defined. These characteristics are the graphite block dimensions, the number and dimensions of the holes in the graphite, the pitch, the dimensions of the sticks of fuel and graphite to be inserted in the holes, and the mechanical reproducibility of the system. The composition of the fuel and moderator sticks were also defined. The main boundary conditions were the range of the relation C/U and C/Th used in commercial HTGR and the neutronics homogeneity.

RESUMÉ

Des spécifications relatives à l'structure mécanique du cœur d'un ensemble critique modéré à graphite à être installé dans le Reacteur de Puissance Nulle de l'Institut de Energia Atômica, ont été établies. Ces spécifications concernent les dimensions des blocs de graphite, la disposition, les dimensions et le nombre de canaux de chaque bloc, les dimensions des barres de combustible bien comme leur composition et la composition des barres de modérateur.

Toutes les mesures ont été prises afin d'assurer la reproductibilité du système.

Les conditions adoptées dans l'étude ont été l'intervalle de variation du rapport C/U et C/Th vérifié dans les HTGR commerciaux et le degré d'homogénéité neutronique.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. FORBES, I. A. et alii. *Design, construction, and evaluation of a facility for the simulation of fast reactor blankets*. Cambridge, Mass., Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Nuclear Engineering, Feb. 1970 (MIT 4105-2).
2. REFERENCE safety analysis report of the 1160 MWe HTGR. San Diego, Calif., General Atomic Co., 1971. (Confidential report).