

ANÁLISE BÁSICA E COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS  
DO GCFR E IMFBR NO CICLO DO TÓRIO PELA TEORIA  
DE DIFUSÃO EM UM GRUPO DE ENERGIA

GAIANÉ SABUNDJIAN  
CENTRO DE ENGENHARIA NUCLEAR  
ÁREA DE FÍSICA DE REATORES  
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES  
SÃO PAULO - SP

YUJI ISHIGURO  
LEA - CTA  
SÃO JOSÉ DOS CAMPOS - SP

RESUMO

Um estudo preliminar das características neutrônicas dos reatores regeneradores rápidos com o ciclo do tório é feita, utilizando modelos e métodos simplificados de análise de reatores, com a finalidade de encontrar um tipo de reator regenerador adequado com uma eficiente utilização do tório, que é abundante no Brasil.

São estudados métodos básicos de cálculos de seções de choque e do reator e são aplicados para análise das características de regeneração dos GCFRs e IMFBRs. O GCFR é alimentado com o combustível óxido e refrigerado a hélio. O IMFBR é alimentado com combustível metálico para alcançar altas densidades de potência. As características neutrônicas são determinadas como funções da densidade de potência média e da fração de volume do combustível.

Os resultados mostram que uma alta densidade de potência e uma alta fração de volume são desejáveis para se atingir curtos tempos de dobramento e que o IMFBR pode atingir tempos de dobramento da ordem de dez anos com uma densidade de potência média de  $600 \text{ Mw/m}^3$  e uma fração de volume de 40%.

## 1. INTRODUÇÃO

O grande esforço atualmente dispendido na pesquisa e desenvolvimento de reatores rápidos visa, acima de tudo, atender a crescente demanda de energia, de uma forma viável. Os reatores nucleares, de uma forma geral, vêm se tornando competitivos para a geração de energia elétrica, devido ao baixo custo de seus ciclos de combustível, em relação aos combustíveis fósseis.

A maioria dos reatores regeneradores rápidos, em todo mundo, utiliza o ciclo do urânio, mas pelo fato da política de não proliferação e das reservas mundiais de tório serem superiores as de urânio (da ordem de 3 a 5 vezes) despertou-se o interesse na utilização do ciclo do tório em reatores regeneradores rápidos.

Neste trabalho, procurou-se um tipo de reator regenerador com o ciclo fechado do tório, com o objetivo de utilizá-lo como uma fonte primária de energia nuclear.

Basicamente são analisados dois tipos de reatores regeneradores no ciclo do tório; são eles o GCFR (Gas Cooled Fast Reactor) carregado com combustível do tipo óxido e o LMFBR (Liquid Metal Fast Breeder Reactor) alimentado com combustível metálico. O GCFR é considerado melhor regenerador no ciclo do urânio em termos das características neutrônicas do que no LMFBR<sup>(1)</sup>. O LMFBR carregado com combustível metálico foi proposto por R.A.Karam, como sendo um bom regenerador com o ciclo do tório<sup>(2)</sup>. As características neutrônicas destes reatores são analisadas com modelos simplificados para o ciclo do tório, com o objetivo de se encontrar condições para se atingir curtos tempos de dobramento.

## 2. OBJETIVOS DO TRABALHO

Este trabalho tem por objetivo analisar e comparar as características do GCFR alimentado com ( $^{233}\text{U} - ^{232}\text{Th}$ )  $\text{O}_2$  com as do LMFBR alimentado com ( $^{233}\text{U} - ^{232}\text{Th}$ ) metálico, ambos com a potência de 2500 Mw(th), como funções do volume do caroço e da fração de volume do combustível ( $\text{FV}_C$ ). Como parte desta análise foram estudados métodos de cálculo das constantes de grupo utilizando o código  $\text{MC}^2$  ('A Code to Calculate Multigroup Cross Sections'), de análise de criticalidade e de cálculo de taxa de regeneração (T.R.), tempo de dobramento ( $T_D$ ) e massa total de material físsil, para vários enriquecimentos e frações de volume de combustível.

## 3. MODELO UTILIZADO

Neste trabalho serão analisados dois tipos de reatores rápidos :

o CCFR e o IMFBR. O GCFR apresenta melhores características de regeneração com o ciclo do urânio, quando comparado com o IMFBR. Para a realização desta análise comparativa optamos pelo combustível do tipo óxido para o CCFR e metálico para o IMFBR.

As constantes de grupo (cálculos celulares) foram gerados através do código MC<sup>2</sup>, para um grupo de energia, com limite superior de energia de 10 MeV e o inferior ou de corte de 0,0025 MeV.

Através do código MC<sup>2</sup>, além de se obter as secções de choque microscópicas de cada um dos núclídeos que constituem as células dos reatores CCFR e IMFBR, para um grupo de energia, este código nos fornece também as secções de choque macroscópicas homogeneizadas da célula para o grupo de energia em questão.

### 3.1 INTERVALO DE VARIÁVEIS

Atualmente a maioria dos reatores de potência são projetados para 1000-1200 Mw (e), o que exige uma potência de 2500-3000 Mw(th). As densidades médias de potência típicas dos CCFRs são de 200-300 Mw/m<sup>3</sup> atingindo até 500 Mw/m<sup>3</sup>. Portanto foram considerados volumes do caroço no intervalo de 6-12 m<sup>3</sup>. As frações de volume do combustível consideradas para esta análise dos IMFBRs foram de 25,30 e 35%, e são assumidas densidades médias de potência típicas de 600-700 Mw/m<sup>3</sup> e podem chegar até 900 Mw/m<sup>3</sup>. Logo os volumes de caroço considerados estão na faixa 3-5 m<sup>3</sup>, e as frações de volume do combustível assumidas foram de 30 e 40%, e também foram consideradas densidades teóricas.

### 3.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O modelo utilizado para análise do problema proposto é o de um reator cilíndrico (geometria r-z) totalmente coberto de material fértil, material estrutural e refrigerante (ver Figura (2)), o qual é constituído de um caroço com altura  $H$  e raio  $R$  e com uma única zona de enriquecimento, que é assumida para simplicidade de cálculos.

Como já mencionamos anteriormente, consideremos neste trabalho dois tipos de reatores rápidos, o GCFR e o IMFBR, com caroços carregados com uma mistura homogênea de (<sup>233</sup>U - <sup>232</sup>Th) O<sub>2</sub> e (<sup>233</sup>U - <sup>232</sup>Th) metálico respectivamente, além do material estrutural (Fe) e do refrigerante (He ou Na).

Assumiremos a altura do caroço  $H = 100$  cm, e as espessuras do cobertor radial  $b = 40$  cm e do cobertor axial  $c = 50$  cm, como mostra a figura 3.

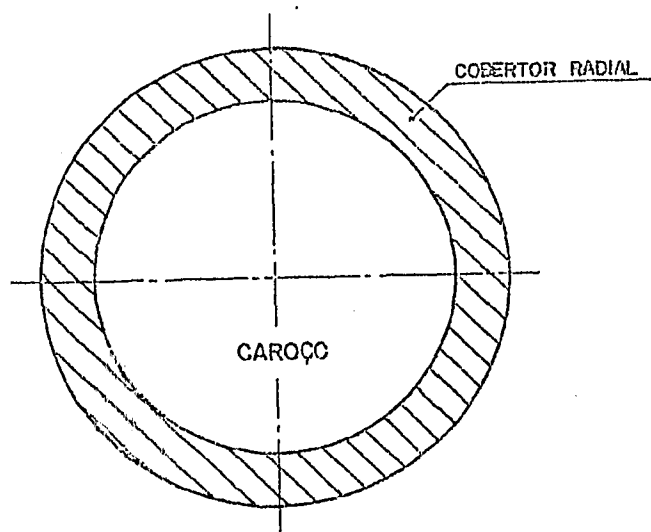


Figura (1) : Secção Radial

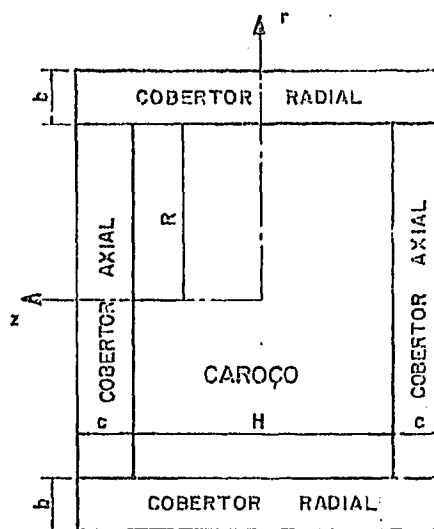


Figura (2) : Secção Axial

A equação de difusão não pode ser solucionada analiticamente no caso de um reator totalmente coberto ou refletido. Fundamentalmente, isto se deve ao fato que a solução pelo método de separação de variáveis para a equação de difusão, que satisfaçam as condições de contorno nas interfaces caroço-cobertor, não podem ser encontradas.

O problema é determinar inicialmente o raio crítico do reator, por meio da teoria de difusão em um grupo de energia, onde a composição do caroço é conhecida. Para podermos realizar este estudo, precisamos dividir a nossa análise em duas partes. Inicialmente consideramos o reator nú radialmente e determinamos alguns parâmetros, que serão utilizados como dados na segunda parte do estudo, onde assumimos o reator nú axialmente.

Através desta análise, calculamos o raio crítico, as distâncias extrapoladas e o volume crítico dos reatores considerados.

Esta análise consiste das seguintes etapas :

- (1) Como já dissemos a altura do reator é fixa e igual a 100 cm, e para um determinado volume do caroço (que está nos intervalos de 6-12 m<sup>3</sup> para o GCFR e 3-5 m<sup>3</sup> para o LMFBR) calculamos os "buckling" geométrico;
- (2) Para que o sistema seja crítico, assume-se que o "buckling" do material, que constitui o caroço, seja igual ao "buckling" geométrico, que foi calculado no item (1);
- (3) Estimamos um valor de enriquecimento (dado em porcentagem de volume  $V_0$ ), para uma determinada fração de volume do combustível ( $f_0$ ) foram considerados 25,30 e 35% para o GCFR e 30 e 40% para o LMFBR),

e com o valor do "buckling" encontrado no item (2), determinamos os dados de entrada para o código MC<sup>2</sup>, e através dele são geradas as constantes para um grupo de energia;

- (4) Utilizando as constantes de grupo obtidas no item (3) como dados de entrada do programa computacional (que foi feito para resolução deste problema), podemos determinar o volume do caroço correspondente ao valor de enriquecimento considerado no item anterior.

Este procedimento é repetido algumas vezes, para as consideradas frações de volume do combustível e para os reatores GCFR e LMFBR. Desta forma, obtemos as Figuras (4) e (12), das quais podemos avaliar os enriquecimentos que correspondem aos intervalos de volume típicos do GCFR e LMFBR respectivamente;

- (5) Finalmente determinamos as características básicas do GCFR e do LMFBR, tais como a taxa de regeneração total, a massa total de material físsil e o tempo de dobramento como funções do volume do caroço e da fração de volume do combustível.

### 3.3 RESULTADOS DO GCFR CARREGADO COM (<sup>233</sup>U-<sup>232</sup>Th) O<sub>2</sub>

Os resultados para o GCFR carregado com (<sup>233</sup>U-<sup>232</sup>Th)O<sub>2</sub> e com a altura do caroço fixa e igual a 100 cm, foram obtidos através de cálculos computacionais, utilizando as constantes de grupo geradas pelo código MC<sup>2</sup>. Estes resultados são dados a seguir :

"Buckling" do Material- é mostrado na Figura (3) para três frações de volume do combustível como função do enriquecimento (V/o).

Enriquecimento- na figura (4) são vistos os enriquecimentos necessários (% de volume) como função do volume do caroço e da fração de volume do combustível.

Taxa de Regeneração- as figuras (5) e (6) mostram respectivamente as taxas de regeneração do caroço e total como função do volume do caroço e da fração de volume do combustível. Observa-se através da Figura (6) que para a fração de volume de 25% a regeneração total é baixa e o reator considerado não é regenerador. E pela Figura (7), vemos que através do enriquecimento pode-se calcular diretamente a taxa de regeneração do caroço.

Inventário Físsil- é vista na Figura (8), que a massa de físsil cresce com o volume do caroço.

Tempo de Dobramento- a Figura (9) nos dá uma estimativa do tempo de dobramento do material físsil, no qual assume-se uma potência no caroço de 2500 Mw(th). No caso em que a fração de volume do combustível é de 30% verificamos que para volumes da ordem de 6 m.<sup>3</sup> a fuga de nêutrons é grande, conseqüentemente exi

ge-se um tempo de dobramento maior do que para os volumes acima de  $-6 \text{ m}^3$ .

O programa CITATION foi utilizado para podermos explicar a alta fuga de nêutrons no reator tipo GCFR alimentado por ( $^{233}\text{U} - ^{232}\text{Th}$ ) óxido, para pequenos volumes ( $-6 \text{ m}^3$ ) e com fração de volume do combustível de 30%, quando comparados com volumes maiores. Na tabela (1) estão resumidos tais resultados.

Tabela (1) - Fuga de nêutrons para o GCFR com diferentes volumes de caroço e fração de volume do combustível de 30%.

Enriquecimento	Tipo de Reatores	Fração de volume do combustível	CITATION		PROGRAMA PRINCIPAL		Erro Percentual do raio	Erro Percentual da Taxa de Regeneração
			Raio Crítico (cm)	Taxa de Regeneração	Raio Crítico (cm)	Taxa de Regeneração		
10,78	GCFR	30	200,5855	1,0804	197,3841	1,0639	1,11	1,55
7,63	LMFBR	30	97,8091	1,1345	97,0061	1,0900	0,83	4,08

Esta explicação se fez necessária, devido ao fato de que para o caso do GCFR com volume da ordem de  $6 \text{ cm}^3$  e com fração de volume do combustível de 30%, obtivemos tempos de dobramento maiores do que para os outros volumes (maiores do que  $6 \text{ m}^3$  e com  $FV_c = 30\%$ ); isto é devido a alta fuga de nêutrons como é mostrada na Tabela 1).

Distância Extrapolada - Na figura (10) esta é vista como função da fração de volume do combustível. Pode-se verificar pelas barras da figura que o volume do caroço tem pouca influência.

#### 3.4 RESULTADOS DO LMFBR CARREGADO COM ( $^{233}\text{U} - ^{232}\text{Th}$ ) METÁLICO

Os resultados do LMFBR carregado com ( $^{233}\text{U} - ^{232}\text{Th}$ ) metálico, com altura do caroço de 100 cm, são apresentados a seguir. Estes dados também foram obtidos através de cálculos computacionais utilizando as constantes de grupo pelo código MC<sup>2</sup>.

"Buckling" do Material - é mostrada na Figura (11) para duas frações de volume do combustível (V/o).

Enriquecimento - são vistas na Figura (12) os enriquecimentos necessários para criticidade como funções do volume do caroço e da fração de volume do combustível.

Taxa de Regeneração - encontram-se nas Figuras (13) e (14) respectivamente, as taxas de regeneração do caroço e total, como funções do volume do caroço e da fração de volume do combustível.

A taxa de regeneração do caroço e a taxa de regeneração total crescem com o volume do caroço.

Segundo a Figura (15) vemos que a taxa de regeneração do caroço pode ser determinada pelo enriquecimento.

Inventário Físsil - é visto na Figura (16)

Tempo de Dobramento - é mostrado na Figura (17)

Distância Extrapolada -- na Figura (18) vemos que a fração de volume do combustível é o fator determinante da variação da distância extrapolada, mas pelas barras da figura observamos que o volume do caroço também tem alguns efeitos.

#### 4. CONCLUSÕES

Por meio dos resultados alcançados concluímos que para o IMFBR os tempos de dobramento são menores do que para o GCFR. A razão principal é que foram assumidos menores volumes para o caroço do IMFBR, os quais nos levaram a encontrar os pequenos inventários físsis, as maiores taxas de regeneração e os curtos tempos de dobramento, quando comparados com o GCFR.

O tempo de dobramento de um sistema de operação é determinado não apenas por parâmetros, tais como a taxa de regeneração, mas também pelas condições de operação da usina. No caroço é desejável uma taxa de regeneração unitária, pelos seguintes motivos :

- é mínima a necessidade de absorvedores de controle, o que reduz a captura parasítica; e
- a operação do sistema não é limitada pela perda de reatividade devido à queima.

Observamos por meio dos resultados obtidos que a taxa de regeneração no caroço cresce com o aumento do volume do mesmo. Isto pode ser visto por outro ponto de vista : com um maior volume do caroço, o enriquecimento é baixo, e a taxa de regeneração é mais alta, a qual pode ser determinada quase que unicamente pelo enriquecimento. Verifica-se então, que menores enriquecimentos são preferíveis para se obter melhores taxas de regeneração. O enriquecimento tem um limite inferior e a fração de volume do combustível um limite superior, e são preferíveis pequenos caroços para que se obtenha menores tempos de dobramento.

Conseqüentemente, serão necessárias otimizações destes parâmetros levando-se em conta outros fatores, tais como tempo de recarregamento do reator, os custos, etc. Este trabalho é uma análise preliminar para achar as características gerais.

A conclusão principal a que chegamos neste trabalho é que, o IMFBR carregado com combustível do tipo metálico no ciclo do tório pode atingir tempos de dobramento por volta de 10-12anos, e que o reator GCFR analisado apresenta piores características de regeneração do que o IMFBR, ambos no ciclo

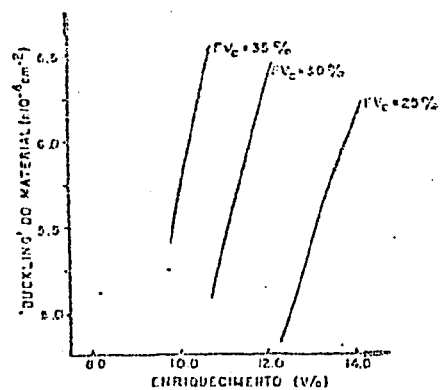


Figura (3) : "Buckling" do material x Enriquecimento do GCFR

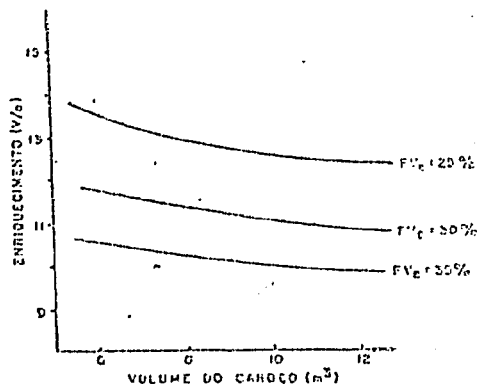


Figura (4) : Enriquecimento x volume do caroço do GCFR

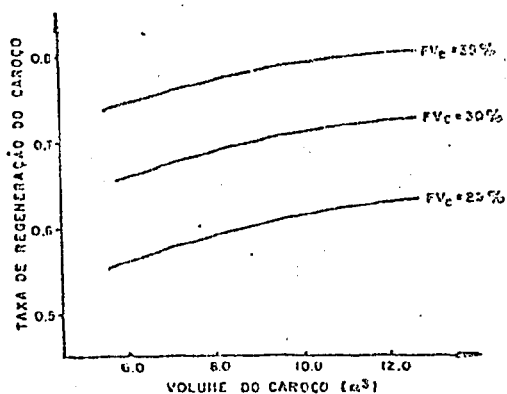


Figura (5) : Taxa de regeneração do caroço x volume do caroço do GCFR

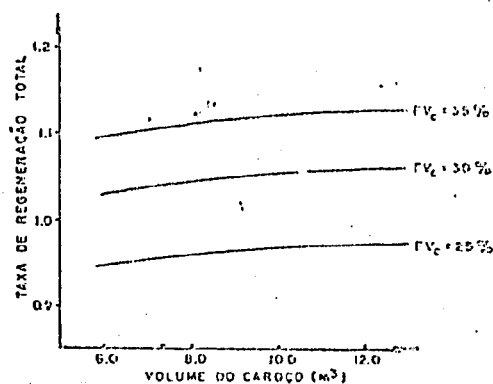


Figura (6) : Taxa de regeneração total x volume do caroço do GCFR

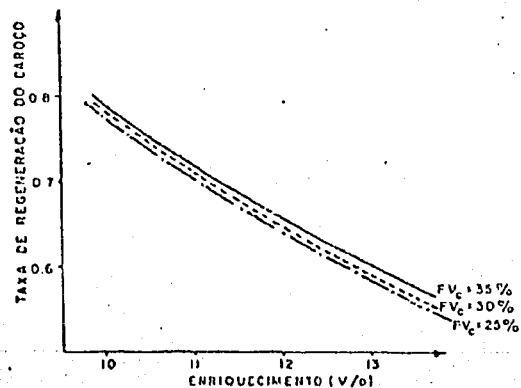


Figura (7) : Taxa de regeneração do caroço x enriquecimento do GCFR

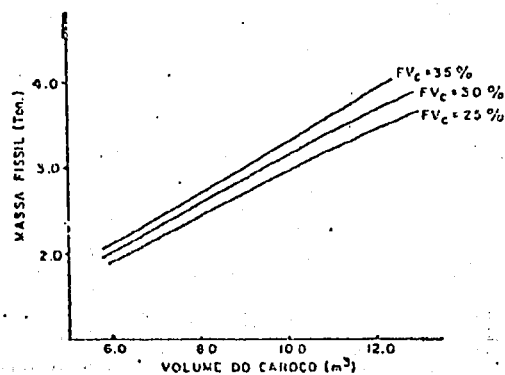


Figura (8) : Massa fissil x volume do caroço do GCFR



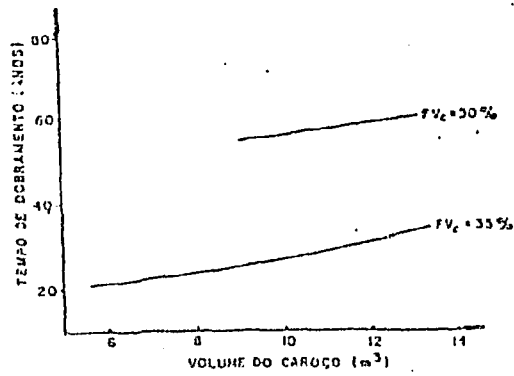


Figura (9) : Tempo de dobramento x volume do caroço do GCFR

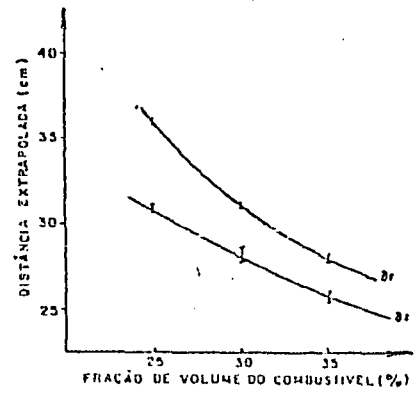


Figura (10) : Distância extrapolada x fração de volume do combustível do GCFR

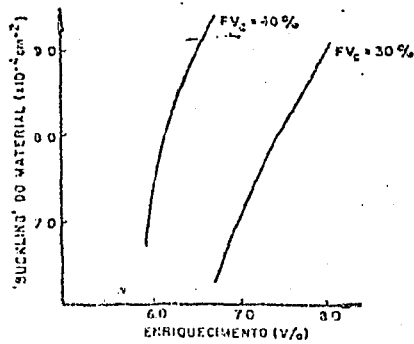


Figura (11) : "Buckling" do material x enriquecimento do IMFBR

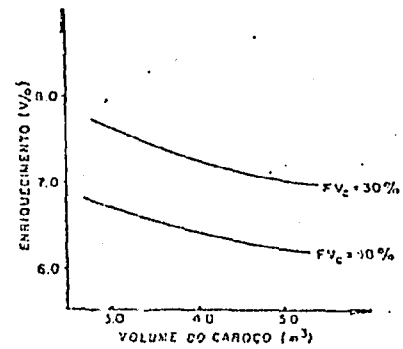


Figura (12) : Enriquecimento x volume do caroço do IMFBR

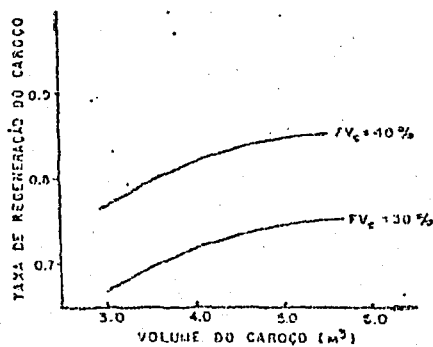


Figura (13) : Taxa de regeneração do caroço x volume do caroço do IMFBR

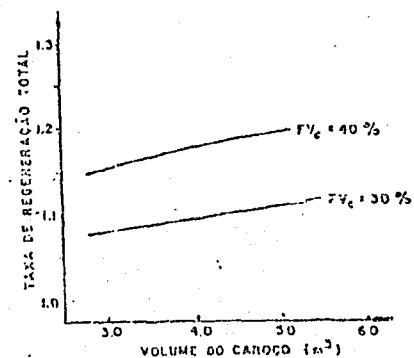


Figura (14) : Taxa de regeneração total x volume do caroço do IMFBR

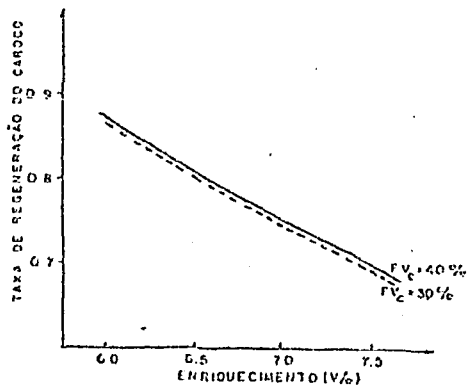


Figura (15) : Taxa de regeneração do caroço x enriquecimento do LMFBR

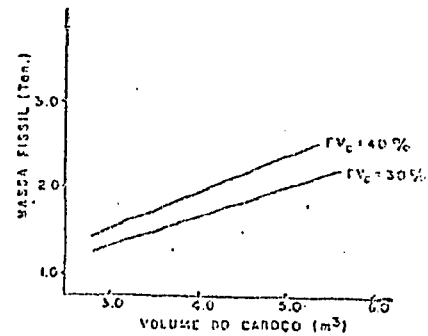


Figura (16) : Massa fissil x volume do caroço do LMFBR

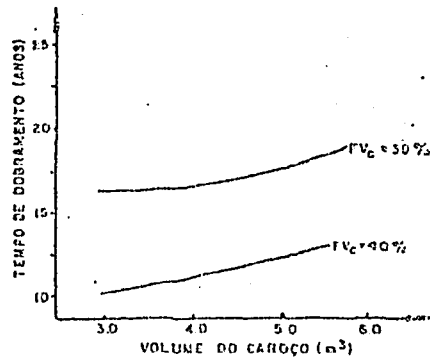


Figura (17) : Tempo de dobramento x volume do caroço do LMFBR

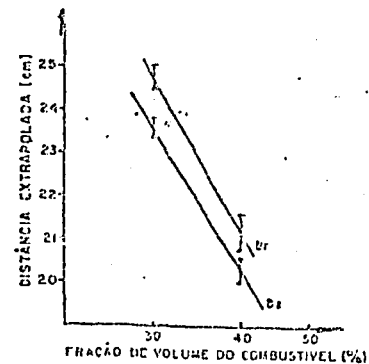


Figura (18) : Distância extrapolada x fração de volume do combustível do LMFBR

do tório. Esta conclusão vem confirmar os resultados que foram anteriormente obtidos por R.A. Karam <sup>(2)</sup>, em que o LMFBR no ciclo do tório e com combustível do tipo metálico pode atingir curtos tempos de dobramento (~10 anos).

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BADRUZZAMAN, A. & BECKER, M. A simple procedure for determining implications of design changes on fast reactor fuel cycle cost and breeding performance. Trans. Am. Nucl. Soc., 32: 405-6, 1979.
2. KARAM, R.A. The  $U^{233}$  fuel cycle as an alternative of LMFBRs. Trans. Am. Nucl. Soc., 27 : 957, 1977.