

MINISTÉRIO DE EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CÁLCULOS NEUTRÔNICOS APLICADOS AO
REATOR NUCLEAR A LEITO FLUIDIZADO

João Roberto Loureiro de Mattos
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Departamento de Engenharia Nuclear da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, dentro do Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-PROMEC.

PORTO ALEGRE

1988

**CALCULOS NETRNICOS APLICADOS AO REATOR NUCLEAR A LEITO
FLUIDIZADO**

DISSERTAÇÃO

Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
-PROMEC, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Fenômenos de Transporte

João Roberto Loureiro de Mattos

Engenheiro Mecânico

1988

Esta DISSERTAÇÃO foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, Área de Concentração-Engenharia Nuclear e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do curso de Pós-Graduação.

Orientador: Farhang Sefidvash
PhD em Engenharia
UFRGS/DENUC

Banca Examinadora: Cezar Antônio Leal
Dr em Engenharia
UFRGS/DENUC

Anildo Bristoti
PhD em Engenharia
UFRGS/PROMEC

Marco Túlio M. B. Vilhena
Mestre em Engenharia
UFRGS/DENUC

Coordenador do PROMEC
Oscar Daniel Corbella
Dr em Física

RESUMO

Foi desenvolvida uma seqüência de cálculo neutrônico simplificado, para o entendimento de conceitos físicos e matemáticos envolvidos no cálculo de criticalidade, quando aplicados ao Reator Nuclear a Leito Fluidizado (R.N.L.F.). Consta de equações para o cálculo das densidades atômicas de elementos presentes no núcleo, do cálculo dos parâmetros nucleares através dessas equações e do cálculo de criticalidade com o código ODOG, para um reator de 19 módulos, homogeneizado de duas formas distintas.

Foram desenvolvidos e comparados métodos de homogeneização utilizando a Teoria da Difusão e o conceito de célula unitária. Foi utilizado o código LEOPARD, desenvolvido para a análise de reatores do tipo PWR com núcleos compostos de varetas cilíndricas, sendo necessária a determinação das dimensões de um arranjo hipotético de varetas, que fosse netronicamente equivalente ao arranjo combustível na forma de esferas. Verificou-se que os melhores resultados foram obtidos pela consideração de um arranjo combustível composto por varetas cilíndricas hipotéticas com diâmetro igual a $2/3$ do diâmetro da esfera de combustível do R.N.L.F., fazendo com que razão VOLUME/SUPERFÍCIE das varetas seja a mesma das esferas, respeitando-se também, a razão entre moderador e combustível em cada condição de fluidização.

Foram realizados cálculos neutrônicos preliminares com o código LEOPARD e o método de homogeneização desenvolvido.

Avaliou-se a influência de parâmetros de interesse na criticalidade de um R.N.L.F. composto por 19 módulos, com altura de colapso de 70 cm, temperatura média de refrigerante de 308 °C e pressão de 158 bar. Considerando-se este reator definido para operar numa faixa de porosidades entre $E=0,5$ e $E=0,7$, o presente estudo mostrou que: o valor nominal de enriquecimento para atuar nesta faixa vale $r=2,2\%$ ($\text{min}=2,05\%$ $\text{máx}=4,00\%$); espessura máxima do revestimento das esferas combustíveis $c=0,054$ cm; espessura máxima da carcaça hexagonal $e=2,0$ cm; altura de colapso do leito na faixa entre $H_0=70$ a 100 cm. Verificou-se ainda, que a reatividade cresce 0,03 a 0,05% por cada por cento de aumento no diâmetro da esfera, dependendo da porosidade e crescendo com ela, sendo portanto desejável, sob o ponto de vista neutrônico, um maior diâmetro de esfera. Um por cento de aumento na espessura de revestimento das esferas, reduz a reatividade em $\sim 0,015\%$ durante operação. Cada por cento de aumento na espessura do tubo de fluidização diminui a reatividade $\sim 0,004\%$. Um aumento de 1% na espessura da carcaça hexagonal resulta numa reatividade negativa de $\sim 0,038\%$.

ABSTRACT

A simplified sequence of reactor physics calculation was developed to understanding of the concepts which were involved when applied in Fluidized-Bed Nuclear Reactor (F.B.N.R.). It consists of a number of elements present in reactor core densities equations, nuclear parameters calculations using these equations and criticality calculations using ODOG code, for a 19 modules reactor, homogenized on two different ways.

Homogenization methods were developed and compared. Here the reactor physics calculations were performed using the LEOPARD code. Since the code has been developed for analysis of pressurized water reactor (PWR) cores using cylindrical fuel rods, it was necessary to determine the dimensions of the hypothetical fuel rod lattice, which are neutronically equivalent to the spherical fuel pellet lattice. For this it was required that the volume/surface ratio of cylindrical rods and spherical pellets were the same. Also the ratio of moderator volume to total volume of the cell is made equal to the porosity of the fluidized bed. The best results were verified for a lattice in which the diameter of cylindrical rods are equal to $2/3$ of the diameter of the spherical pellets.

Preliminary physics calculations using LEOPARD code and the homogenization method developed were performed. The influence of interest parameters on criticality of the F.B.N.R. was studied. It was taken a 19 modules reactor with collapsed

height of 70 cm, average coolant temperature and pressure of 308 C and 158 bar, respectively. The operational range for porosity of this reactor was defined between $E=0.5$ and $E=0.7$. This study showed that the nominal enrichment to reactor operation in this range is $r=2.2\%$ (min=2.05% máx=4.00%); maximum cladding thickness $c=0.054$ cm; maximum hexagonal tube thickness $e=2.0$ cm; reactor collapsed height is from $H_0=70$ to 100 cm. Also, it was showed that the reactivity increases 0.03 to 0.05% with each percent of increase in pellet diameter, depending on the porosity and increasing with it; thus from a neutronic point of view, the largest fuel pellet diameter is desirable. A 1% increase in cladding thickness reduces reactivity by $\sim 0.015\%$ during operation. Each percent of increase in the thickness of fluidization tube decreases the reactivity by $\sim 0.004\%$. Increasing the hexagonal tube thickness by 1% results in $\sim 0.038\%$ negative reactivity.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar a minha gratidão a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, e em particular:

Ao Prof. Dr Farhang Sefidvash pelo incentivo, orientação e colaboração durante a execução deste trabalho.

Ao Prof. Marco Túlio M. B. Vilhena pela amizade e auxílio no esclarecimento de dúvidas.

Ao Prof. Dr José Rubens Maiorino pela cooperação e pela orientação nos acertos finais do trabalho.

Aos professores e demais colegas do DENUC pelo constante estímulo.

A Dra Maria Berenice D. Machado, cujo apoio permitiu a conclusão deste trabalho.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP), ao Departamento de Engenharia Nuclear e ao PRONUCLEAR-Programa de Formação de Recursos Humanos para o Setor Nuclear-, pelo fornecimento de material e pelo suporte financeiro, que permitiram a execução deste trabalho.

João Roberto Loureiro de Mattos

**Dedico este trabalho a
Marta e Gustavo**

INDICE

	Página
RESUMO	4
ABSTRACT	6
INTRODUÇÃO	19
CAPÍTULO 1	
1.1-0 Conceito do Leito Fluidizado	1.1
1.2-Descrição do Reator	1.2
1.3-Funcionamento	1.3
1.4-Controle do Reator	1.7
1.5-Vantagens do R.N.L.F.	1.8
CAPÍTULO 2	
Cálculo das Densidades Atômicas no R.N.L.F.	2.1
CAPÍTULO 3	
3.1-Introdução	3.1
3.2-Métodos de Homogeneização	3.3
3.3-Cálculo dos Parâmetros de Entrada do Código	3.12
3.4-Aplicação dos Parâmetros nos Métodos de Homogei- nização	3.28
3.5-Saídas do Código ODOG	3.34
3.6-Conclusões	3.39
CAPÍTULO 4	
4.1-Introdução	4.1
4.2-0 Código LEOPARD	4.3

4.3-Métodos de Homogeinização	4.6
4.4-Saídas do Código LEOPARD	4.23
4.5-Análise dos Resultados	4.26
CAPÍTULO 5	
5.1-Introdução	5.1
5.2-Condições Gerais de Cálculo	5.2
5.3-Enriquecimento	5.4
5.4-Diâmetro da Esfera de Combustível	5.14
5.5-Espessura do Revestimento	5.21
5.6-Espessura do Tubo de Fluidização	5.27
5.7-Espessura da Carcaça Hexagonal	5.31
5.8-Altura Inicial do Leito	5.36
CAPÍTULO 6	
6.1-Queima de Combustível	6.1
6.2-Não Uniformidade do Leito	6.5
BIBLIOGRAFIA	B.1
ÍNDICE DE FIGURAS, TABELAS E GRÁFICOS	12

INDICE DE FIGURAS, TABELAS E GRAFICOS

I-FIGURAS	Página
CAPÍTULO 1	
Figura 1.1-Vista Frontal Esquemática do R.N.L.F.	1.5
Figura 1.2-Vista Superior do R.N.L.F.-19módulos	1.6
CAPÍTULO 2	
Figura 2.1-Esquema do Núcleo	2.1
Figura 2.2-Esquema de uma Esfera de Combustível	2.2
CAPÍTULO 3	
Figura 3.1-Vista Esquemática em Corte do R.N.L.F. ..	3.5
Figura 3.2-Corte-Vista Esquemática do R.N.L.F.	3.6
Figura 3.3-Seções Transversais de Interesse no Estu- do de Homoginização	3.8
Figura 3.4-Esquema das Regiões no R.N.L.F.-Método 1	3.10
Figura 3.5-Esquema das Regiões para Entrada no Códig- o ODOG - Método 1	3.11
Figura 3.6-Esquema das Regiões no R.N.L.F.-Método 2.	3.13
Figura 3.7-Esquema das Regiões para Entrada no Códig- o ODOG - Método 2	3.14
CAPÍTULO 4	
Figura 4.1-Sistema de Códigos Computacionais Utili- zados no Projeto de Reatores	4.2
Figura 4.2-Esquema da Célula Unitária do Código LEOPARD	4.5
Figura 4.3-Modelo das Células-Método 1	4.8

Figura 4.4-Modelo das Células-Método 2	4.11
Figura 4.5-Modelo das Células-Método 3	4.15
Figura 4.6-Modelo da Barra de Combustível	4.17
Figura 4.7-Modelo das Células-Método 4	4.18
Figura 4.8-Modelo das Células-Método 5	4.21
CAPÍTULO 5	
Figura 5.1-Características do Módulo do R.N.L.F. ...	5.4
Figura 5.2-Esquema do Núcleo do R.N.L.F. para o cálculo com Refletor	5.5

II-TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1-Elementos Constituintes do Zircaloy-4 ...	2.5
--	-----

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1-Fatores de Correção para Nuclídeos que não Seguem o Comportamento $1/v$	3.16
Tabela 3.2-Características do R.N.L.F.-19 Módulos ..	3.17
Tabela 3.3-Condições de Cálculo	3.19
Tabela 3.4-Densidades Atômicas dos Elementos no Núcleo Considerado Homogêneo-Caso 1	3.20
Tabela 3.5-Densidades Atômicas dos Elementos no Núcleo Considerado Homogêneo-Caso 2	3.21
Tabela 3.6-Seções de Choque Microscópicas	3.22
Tabela 3.7-Parâmetros da Equação de Difusão para o Núcleo do R.N.L.F.-Caso 1	3.23

Tabela 3.8-Parâmetros da Equação de Difusão para o Núcleo do R.N.L.F.-Caso 2	3.25
Tabela 3.9-Parâmetros para o Tubo de Fluidização e Carcaca Hexagonal	3.27
Tabela 3.10-Parâmetros para o Anel de Água	3.27
Tabela 3.11-Características das Regiões-Método 1 ...	3.28
Tabela 3.12-Parâmetros para a Região 1	3.29
Tabela 3.13-Parâmetros para as Regiões 2 e 4 - Método 1	3.30
Tabela 3.14-Parâmetros para a Região 1	3.31
Tabela 3.15-Características das Regiões-Método 2 ...	3.32
Tabela 3.16-Parâmetros para a Região 4-Método 2	3.33
Tabela 3.17-Parâmetros para a Região 4-Método 2	3.35
Tabela 3.18-Valores de Kefetivo Obtidos Através do Código ODOG	3.36
 CAPÍTULO 4	
Tabela 4.1-Buckling do R.N.L.F. para Diferentes Condições de Fluidização	4.6
Tabela 4.2-Composição Percentual - Região do Combustível	4.9
Tabela 4.3-Frações de Volume das Regiões-Método 2 ..	4.12
Tabela 4.4-Área Ocupada por cada Região no Módulo ..	4.13
Tabela 4.5-Geometria da Célula para Entrada no Código	4.14

Tabela 4.6-Geometria das Células-Método 3	4.16
Tabela 4.7-Fracções de Volume das Regiões-Método 4 ..	4.19
Tabela 4.8-Área Ocupada pelas Regiões no Módulo	4.20
Tabela 4.9-Determinação do Passo para o Método 4 ...	4.20
Tabela 4.10-Fracções de Volume das Regiões-Método 5 .	4.22
Tabela 4.11-Geometria das Células-Método 5	4.23
Tabela 4.12-Valores do Fator de Multiplicação a partir do Código LEOPARD	4.24
 CAPÍTULO 5	
Tabela 5.1-Características do R.N.L.F.-Caso padrão .	5.3
Tabela 5.2-Valores de K para a Condição de Colapso -Caso Padrão	5.7
Tabela 5.3-Dados de Entrada para o Código LEOPARD ..	5.7
Tabela 5.4-Saídas do Código LEOPARD	5.8
Tabela 5.5-Influência da variação do Enriquecimento do Combustível, Relativa ao caso Padrão ..	5.10
Tabela 5.6-Variacão do Diâmetro da Esfera de Combustível	5.15
Tabela 5.7-Dados de Entrada para o Código LEOPARD ..	5.16
Tabela 5.8-Saídas do Código LEOPARD	5.16
Tabela 5.9-Influência da Variacão do Diâmetro da Esfera de Combustível na Faixa Operacional	5.18
Tabela 5.10-Variacão da Espessura do Revestimento da Esfera de Combustível	5.22
Tabela 5.11-Dados de Entrada para o Código LEOPARD .	5.22

Tabela 5.12-Saídas do Código LEOPARD	5.29
Tabela 5.13-Influência da Variação da Espessura do Revestimento, Relativa ao caso Padrão ...	5.23
Tabela 5.14-Variação da Espessura do Tubo de Fluidização	5.28
Tabela 5.15-Dados de Entrada para o Código LEOPARD .	5.28
Tabela 5.16-Saídas do Código LEOPARD	5.29
Tabela 5.17-Influência da Variação da Espessura do Tubo de Fluidização, Relativa ao Caso Padrão	5.29
Tabela 5.18-Variação da Espessura da Carcaça Hexagonal	5.32
Tabela 5.19-Dados de Entrada do Código LEOPARD	5.32
Tabela 5.20-Saídas do Código LEOPARD	5.33
Tabela 5.21-Influência da Espessura da Carcaça Hexa- gonal, Relativa ao Caso Padrão	5.35
Tabela 5.22-Dados de Entrada para o Código LEOPARD .	5.38
Tabela 5.23-Saídas do código LEOPARD	5.38
Tabela 5.24-Influência da Altura de Colapso no Fator de Multiplicação, Relativa ao Caso Padrão	5.39
Tabela 5.25-Influência da Altura de Colapso sob o Aspecto de Fuga de Neutrons	5.41
Tabela 5.26-Altura de Leito na Faixa Operacional, pa- ra Diferentes Alturas de Colapso	5.42

CAPÍTULO 6

Tabela 6.1-Características Termo-hidráulicas do R.N.L.F.	6.3
Tabela 6.2-Exemplos de Situações de Perturbações pa- ra a Geração de Dados a Serem Utilizados no Código ODOG	6.6

III-GRÁFICOS

CAPÍTULO 3

Gráfico 3.1-Valores de Kefetivo X E-Código ODOG	3.36
Gráfico 3.2-Fluxo Normalizado X Distância-Método 1 .	3.37
Gráfico 3.3-Fluxo Normalizado X Distância-Método 2 .	3.38

CAPÍTULO 4

Gráfico 4.1-Kinfinito X Porosidade-Código LEOPARD ..	4.25
--	------

CAPÍTULO 5

Gráfico 5.1-K X r%	5.9
Gráfico 5.2-Variação % de Kinfinito X Variação % de r, Relativa ao Caso Padrão	5.11
Gráfico 5.3-Influência da Variação do Enriquecimento no Valor do Fator de Multiplicação	5.13
Gráfico 5.4-K X d	5.17
Gráfico 5.5-Variação % de Kinfinito X Variação % de d	5.20
Gráfico 5.6-Influência da Variação do Diâmetro da Esfera na Criticalidade do R.N.L.F.	5.20
Gráfico 5.7-K X c	5.24

Gráfico 5.8-Variacão % de $K_{infinito}$ X Variacão % de c	5.25
Gráfico 5.9-Variacão % de $K_{infinito}$ X Variacão % da Espessura do Tubo de Fluidizaco	5.30
Gráfico 5.10-Influência da Espessura do Tubo de Fluidizaco, Relativa ao Caso Padrão	5.30
Gráfico 5.11- K X e	5.34
Gráfico 5.12- H/H_0 X E	5.37
Gráfico 5.13- $K_{efetivo}$ X Altura de Colapso	5.39
Gráfico 5.14-Variacão % de $K_{efetivo}$ X Variacão % da Altura de Colapso	5.40
Gráfico 5.15-Fuga de Neutrons X Altura de Colapso ..	5.41

INTRODUÇÃO

Neste trabalho determinou-se aspectos para servirem como base para os estudos e para o projeto, sob o ponto de vista neutrônico, de um novo conceito de reator nuclear, ou seja, um Reator Nuclear a Leito Fluidizado (R.N.L.F.)./1,4,19/

Os reatores nucleares usados atualmente para a geração de potência, necessariamente devem ser instalados com uma potência mínima, que geralmente é alta, para que possam gerar energia de forma econômica. Isto se deve ao alto custo dos sistemas de segurança, fazendo com que este valor tenha que ser rateado por um número maior de Kilowatts gerados para ser viável economicamente. Este fato está levando a comunidade nuclear a pensar em novos conceitos de reatores que permitam a construção de usinas nucleares de pequeno e médio porte, já que é crescente o interesse da sua utilização, principalmente por países em desenvolvimento./8/ Outra consideração é que devido a falta de segurança inerente dos reatores existentes, a credibilidade da opinião pública na opção nuclear não é grande, fazendo com que a pesquisa de novos conceitos de reatores, que sejam inerentemente seguros, se desenvolva por todos os países que optaram pelo uso de energia de fonte nuclear./2,3,4,5,6,7/

No presente trabalho, apresenta-se no Capítulo 1 a descrição do R.N.L.F. em termos operacionais e de projeto básico.

Nos Capítulos 2 e 3 desenvolveu-se uma seqüência de cálculo neutrônico simplificado, para o entendimento de conceitos

físicos e matemáticos envolvidos no cálculo de criticalidade, quando aplicados ao R.N.L.F.. Consta da dedução de equações para o cálculo de densidades atômicas em função dos parâmetros operacionais e de projeto (Capítulo 2), do cálculo de parâmetros nucleares através do uso dessas equações e do cálculo de criticalidade com o código ODOG /13/, para um reator de 19 módulos, homogeneizado de duas formas distintas (Capítulo 3).

No Capítulo 4 foram desenvolvidos e comparados métodos de homogeneização utilizando a teoria de difusão e o conceito de célula unitária. Foi utilizado o código LEOPARD /11/, o qual foi desenvolvido para a análise de reatores do tipo PWR com o núcleo composto por varetas combustíveis cilíndricas, sendo necessária a determinação das dimensões de um arranjo hipotético de varetas, que fosse neutronicamente equivalente ao arranjo de combustível na forma de esferas.

No Capítulo 5 foram realizados cálculos neutrônicos preliminares com o código LEOPARD utilizando método de homogeneização desenvolvido no Capítulo 4. Avaliou-se a influência de parâmetros operacionais e de projeto na criticalidade de R.N.L.F..

No Capítulo 6 sugeriu-se estudos futuros no desenvolvimento do R.N.L.F., especificamente, no que se refere à queima de combustível e a possíveis não uniformidades que possam ocorrer no leito fluidizado.

CAPITULO 1

O Reator Nuclear a Leito Fluidizado

1.1-O Conceito do Leito Fluidizado

O leito fluidizado é aquele no qual uma corrente de baixo para cima do fluido passa através de um leito de pastilhas sólidas, fluidizando mas não transportando ou carregando essas pastilhas. A velocidade do fluido pode ser mantida por um largo intervalo. O limite inferior é suficiente para apenas fazer boiar as pastilhas. O limite superior é aquele que poderia transportar ou carregar as pastilhas para fora do leito. O leito se encontra em estado de turbulência e as pastilhas estão em constante movimento, resultando em uma boa mistura e em alta taxa de transferência de calor.

O conceito do leito fluidizado tem características muito desejáveis na aplicação em reatores. Além da alta taxa de transferência de calor, proporciona uma íntima mistura e agitação, resultando em distribuição uniforme da temperatura ao longo do leito, reduzindo efetivamente o "hot-spot factor", possibilitando desta forma alta taxa de queima em todas as pastilhas de combustível, independentemente da forma da distribuição do fluxo de neutrons.

O controle de um reator a leito fluidizado pode ser realizado sem barras de controle por variação do fluxo de refrigerante, em um largo intervalo de fluidização. Um aumento no fluxo, aumenta a altura do núcleo ativo e portanto a distância entre as pastilhas, aumentando a razão moderador/combustível. Também o leito fluidizado tem um grande coeficiente negativo de temperatura, provendo estabilidade e segurança contra variações bruscas de potência. /10/

1.2-Descrição do Reator

O Reator Nuclear a Leito Fluidizado proposto, é composto de um módulo básico a partir do qual se pode construir reatores de várias potências. O número total de módulos é igual a $\frac{1}{3}N(N+1)+1$, onde N é o número de anéis de módulos que circundam o módulo central.

Como pode ser visto na Figura 1.1, a parte superior do módulo do reator, que inclui o núcleo e o gerador de vapor, consiste de um tubo de fluidização de 25 cm de diâmetro, circunscrito por um canal hexagonal. A parte inferior do módulo consiste de uma câmara de combustível de 10 cm de diâmetro, circundada por um canal circular, que está recoberto por uma camada de grafite.

Um canal é formado entre o tubo de fluidização e o canal hexagonal, extendendo-se entre a câmara de combustível e o ca-

nal circular, onde o refrigerante flui na descendente. Na parte superior do núcleo, uma tela móvel limita a altura de fluidização do leito, separando o núcleo do gerador de vapor. Um anel cilíndrico absorvedor de neutrons, está conectado a esta tela. Um gerador de vapor do tipo casco-tubo está integrado na parte superior do módulo.

Dentro da câmara de combustível existem esferas de combustível de diâmetro aproximado de 0,8 cm, fabricadas com urânio levemente enriquecido e revestidas com zircaloy. A alimentação do combustível será feita através do centro do eixo de acionamento da tela limitadora. Na base inferior da câmara de combustível existe uma válvula acionada através de um sistema hidráulico, que permite a retirada do combustível do interior da câmara para um reservatório, onde ficará permanentemente esfriado. O módulo é provido de um pressurizador para estabilizar a pressão e de uma válvula de despressurização, que injeta vapor no condensador, quando é necessário diminuir a pressão, permitindo a abertura da válvula de descarga de combustível.

O refrigerante movido pela bomba entra na câmara de combustível, após atravessar as perfurações do distribuidor. Sobee através do módulo até atingir uma velocidade limite, suficiente para carregar o combustível para a região do núcleo. O refrigerante que retirou calor do núcleo, atravessa a tela limitadora e entrega este calor ao gerador de vapor, voltando

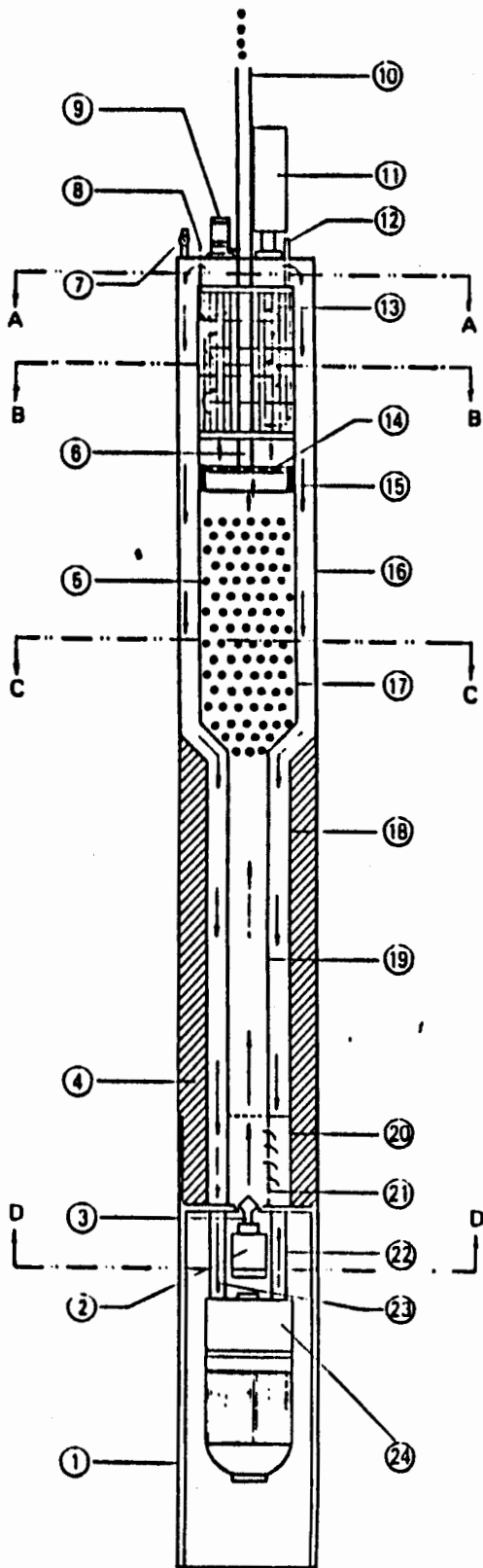
à bomba para novo ciclo.

O combustível é constituído por esferas de dióxido de urânio de 7 mm de diâmetro, revestidas por uma camada de zircaloy de 0,5 mm.

1.3-Funcionamento

Cálculos neutrônicos mostraram que a variação da razão moderador/combustível resulta numa faixa de reatividade crescente num certo intervalo de porosidades, atingindo um valor máximo, decrescendo posteriormente com ulterior aumento de porosidade. /18,19/ Baseado neste fato, o reator compensará a diminuição de reatividade, devido à queima, produção de venenos e efeito Doppler, através de um aumento de porosidade. A porosidade é controlada através do fluxo de refrigerante.

Como segurança adicional, a tela limitadora é colocada a uma certa distância da altura crítica, a qual define a máxima reserva de reatividade. Caso o limite do leito aumentar além da posição do anel absorvedor, a reatividade decresce semelhantemente a situação de inserção das barras de controle no PWR. A tela limitadora previne também o escape do combustível do módulo no caso de uma excursão de fluxo, devido a um acidente de perda de refrigerante (LOCA).



- 1-Suporte Estrutural
- 2-Acionador Hidráulico
- 3-Válvula de Descarga de Combustível
- 4-Grafito
- 5-Núcleo do Reator
- 6-Eixo da Tela Limitadora
- 7-Despressurizador
- 8-Saída de Vapor
- 9-Acionador da Tela Limitadora
- 10-Alimentação de Combustível
- 11-Pressurizador
- 12-Entrada de Água
- 13-Gerador de Vapor
- 14-Tela Limitadora
- 15-Anel Absorvedor
- 16-Carcaça Hexagonal
- 17-Tubo de Fluidização
- 18-Canal Circular
- 19-Câmara de Combustível
- 20-Distribuidor
- 21-Perfurações de Entrada
- 22-Entrada de Refrigerante
- 23-Saída de Refrigerante
- 24-Bomba do Primário
- 25-Refletor de Grafito
- 26-Blindagem Biológica

Figura 1.1-Vista Frontal Esquemática do R.N.L.F.

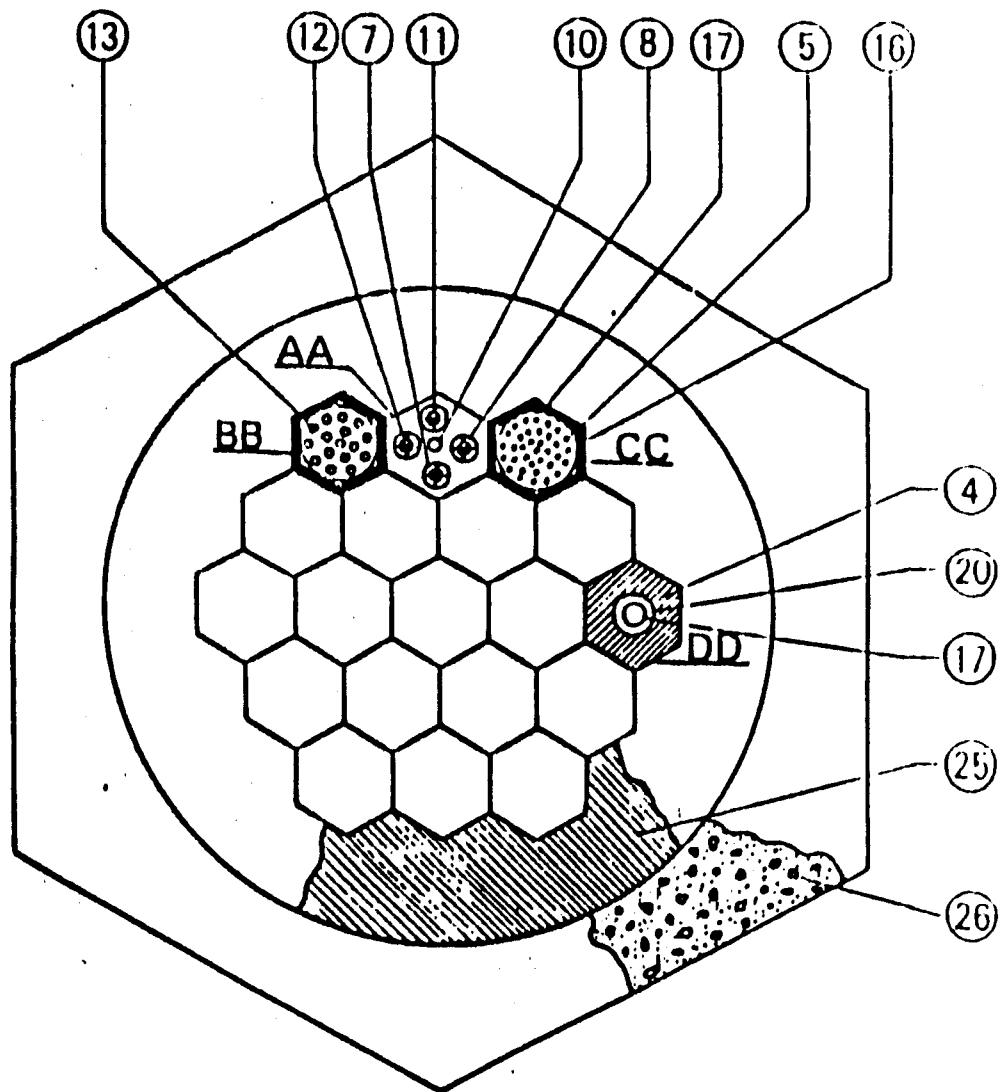


Figura 1.2-Vista Superior do R.N.L.F.-19 módulos
(Legendas na Figura 1.1)

No caso de um provável acidente, o motor da bomba é desligado ou colocado à baixa rotação, resultando na precipitação dos elementos combustíveis para a câmara de combustível onde, devido à configuração geométrica, permanecem numa condição altamente subcrítica. Os elementos combustíveis podem ser descarregados do reator através da válvula de descarga, para uma piscina abaixo do reator, onde ficarão permanentemente esfriados. A água pode também ser injetada na piscina, aumentando o seu nível até cobrir a base do módulo, afim de absorver o calor produzido por decaimento.

1.4-Controle do Reator

As quatro maiores áreas de discussão no controle do reator são: início de processo, operação em estado estacionário, parada e estado transiente. /18/

Quando o reator começa a operar, o núcleo está a uma temperatura muito mais baixa que a temperatura de operação. Devido ao coeficiente negativo de temperatura, o reator deve alcançar a potência máxima através de sucessivos ajustes na velocidade do fluxo de refrigerante, com conseqüente alteração de porosidade, variando desta maneira, a razão moderador/combustível. Estes ajustes implicam em que se faça alterações na posição da tela limitadora em vários passos. Durante as condições normais de operação, pequenas flutuações de reatividade são controladas através da variação do fluxo de refrigerante no

intervalo compreendido entre o nível superior do leito e a tela limitadora. Para compensar os efeitos da queima do combustível eleva-se o nível da tela limitadora e aumenta-se o fluxo de refrigerante. A parada do reator é facilmente obtida pelo decréscimo da velocidade da bomba, causando a diminuição da porosidade do núcleo. O leito em colapso é altamente subcrítico. De maneira geral, a tendência mostrada no estudo de transientes, quando reator está em operação em regime estacionário, é que os estados transientes resultam em configurações subcríticas.

1.5-Vantagens do R.N.L.F.

O reator proposto apresenta as seguintes vantagens sobre os reatores convencionais: /1/

- a) Simplicidade de projeto, conseqüentemente barato, confiável, podendo ser construído com a infra-estrutura existente em países em desenvolvimento.
- b) O reator é feito em sistema modular; qualquer tamanho de reator pode ser construído a partir do módulo básico. Apenas o módulo básico precisa ser desenvolvido, projetado e licenciado, resultando em menor investimento. Em adição a instalação torna-se flexível, pois admite pequenos incrementos no seu tamanho na medida em que cresce a demanda.
- c) Este reator não possui componentes pesados. Isto torna a sua fabricação simples, além de facilitar o transporte dos

seus componentes.

- d) Método relativamente simples de fabricação de combustível. O combustível constitui-se de pastilhas soltas, dispensando as complicações de fabricação dos conjuntos combustíveis utilizados em outros reatores.
- e) Contínuo reabastecimento de combustível sem o uso de equipamento complicado. Isto aumenta grandemente a economia de produção de energia, já que 43% da queda do fator de capacidade se deve ao reabastecimento.
- f) O reator, por natureza, é inerentemente seguro. O sistema de controle é simples, evitando as complicações de controle dos reatores atuais.
- g) A segurança inerente resulta na redução do investimento e aumenta a aceitação pública quanto ao uso da energia nuclear, fazendo com que se possa instalar usinas próximo de indústrias e áreas urbanas.
- h) Devido à segurança inerente, a operação deste reator pode ser totalmente automática, ou com um número mínimo de operadores.
- i) O circuito primário integrado reduz grandemente a possibilidade de um acidente de perda de refrigerante (LOCA).
- j) Abalos sísmicos não têm efeito sobre o combustível.
- k) O reator não sofre as consequências de um provável acidente de perda de refrigerante. Isto resulta em melhor aceitação pública e reduz o custo, pela eliminação do sistema de res-

friamento emergencial do núcleo.

- l) Não são necessários grandes prédios de contenção, pois sendo o sistema modular, fica eliminada a possibilidade de grande liberação de energia.
- m) O leito fluidizado possui alta taxa de transferência de calor, devido à grande área de transferência e grande turbulência. Conseqüentemente as temperaturas críticas são baixas.
- n) Não há necessidade da utilização de veneno queimável, resultando numa maior economia de neutrons.
- o) Pelo fato das pastilhas terem grande mobilidade no interior do reator, o combustível queima uniformemente.
- p) Em virtude do reator em tese poder operar com qualquer espectro de neutrons desejado, possibilita um melhor gerenciamento do combustível.
- q) Possibilidade do reator operar com ciclo misto com tório, com urânio natural e água pesada, ou com fluidos orgânicos.
- r) Em virtude do combustível ser composto por esferas que são facilmente manejáveis, o combustível queimado pode ser aplicado diretamente na irradiação de alimentos e grãos para armazenagem, ou em outra aplicação onde não é necessário o conhecimento exato da energia dos fótons.

Cálculo das densidades atômicas no Reator Nuclear
a Leito Fluidizado

Para o estudo de física de reatores é fundamental conhecer os materiais presentes no núcleo, bem como as suas densidades atômicas. Para grande parte dos estudos nesta área considera-se o reator como sendo homogêneo. No R.N.L.F., onde a porosidade pode ser variada, resultando conseqüentemente na variação das densidades atômicas dos elementos do núcleo, este estudo assume particular importância. O estudo em apreço visou justamente determinar as densidades atômicas (número de átomos/cm³) dos elementos constituintes do núcleo do R.N.L.F. em função dos parâmetros operacionais e de projeto.

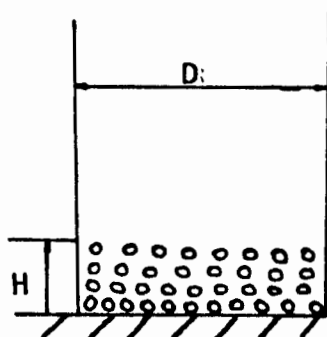


Figura 2.1-Esquema do núcleo

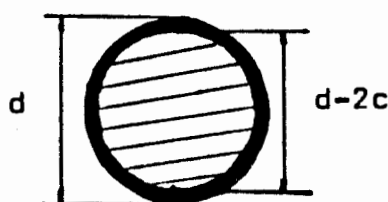


Figura 2.2-Esquema de uma esfera de combustível

Como a principal característica do R.N.L.F. é permitir a variação da porosidade, é fundamental que se faça sua relação com os demais parâmetros. Por definição porosidade é:

$$E = \frac{\text{Volume de água no núcleo}}{\text{Volume total do núcleo}}$$

resultando para o R.N.L.F.

$$E = 1 - \frac{2 \cdot n \cdot d^3}{3 \cdot D^2 \cdot H} \quad (2.1)$$

Nas esferas de combustível, a fração de volume do combustível na esfera total (combustível + revestimento) é:

$$Y = \frac{\text{Volume do material combustível na esfera}}{\text{Volume da esfera total}}$$

tendo para resultado

$$Y = \left(\frac{d-2c}{d} \right)^3 \quad (2.2)$$

Pode-se apartir destes resultados determinar a massa de combustível no núcleo. Considerando que a massa de combustível em um módulo do R.N.L.F. é dada pela expressão

$$M_{\text{comb.}} = \rho_{\text{mc}} \cdot n \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^3 \cdot Y \quad (2.3)$$

Relacionando-se a expressão (2.3) com a da porosidade (2.1), obtem-se:

$$E = 1 - \frac{4 \cdot M_{\text{comb.}}}{\rho_{\text{mc}} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot H \cdot Y} \quad (2.4)$$

Neste cálculo de densidades atômicas, os elementos que compõem o núcleo serão divididos em três grupos: combustível, revestimento e moderador.

Na determinação da densidade atômica do combustível, o ponto mais importante é a determinação da densidade do elemento físsil, N_{cf} . Lembrando que combustíveis são somente os isótopos de Urânio, Plutônio e Tório, e que material combustível é definido como sendo todo o material da pastilha (incluindo composto químico, liga ou mistura), mas não o revestimento e outros materiais estruturais.

Deve-se ter cuidado na determinação de N_{cf} , pois o enriquecimento é uma razão entre massas e não uma razão entre volumes ou raios nucleares. /12/

Conhecendo a densidade e o enriquecimento, N_{cf} vale:

$$N_{cf} = (N_a / M_{cf}) \cdot \rho_{cf} \cdot i \quad (2.5)$$

O valor de ρ_{cf} é determinado pelos valores da densidade do combustível, ρ_c , e pelo enriquecimento r de tal sorte que:

$$\rho_{cf} = r \cdot \rho_c = r \cdot f \cdot \rho_{mc} \quad (2.6)$$

onde, para o presente caso, o combustível é o dióxido de Urânio, sendo f dado pela expressão:

$$f = \frac{r \cdot M_{cf} + (1-r) \cdot M_{nf}}{r \cdot M_{cf} + (1-r) \cdot M_{nf} + M_{O_2}} \quad (2.7)$$

Combinando as equações (2.5) e (2.6) tem-se:

$$N_{cf} = (N_a/M_{cf}) \cdot r \cdot \rho_{mc} \cdot f \cdot i \quad (2.8)$$

Este valor é a densidade atômica do combustível físsil no material combustível. A densidade atômica do combustível no núcleo do R.N.L.F., quando este é considerado homogêneo, é:

$$N_5 = N_{cf} \cdot V_{mc} \quad (2.9)$$

onde

$$V_{mc} = (1-E) \cdot Y \quad (2.10)$$

então

$$N_5 = (1-E) \cdot Y \cdot (N_a/M_{cf}) \cdot r \cdot f \cdot \rho_{mc} \quad (2.9a)$$

De forma análoga pode-se determinar a densidade atômica do elemento não físsil, que é o U^{238} , na consideração de núcleo homogêneo. A fração em massa do combustível não físsil no material combustível é:

$$N_{nf} = (N_a/M_{nf}) \cdot (1-r) \cdot \rho_{mc} \cdot f \cdot i \quad (2.11)$$

e a densidade atômica deste isótopo no núcleo do R.N.L.F. é:

$$N_8 = N_{nf} \cdot V_{mc} \quad (2.12)$$

ou

$$N_8 = (1-E) \cdot Y \cdot (N_a/M_{nf}) \cdot (1-r) \cdot f \cdot \rho_{mc} \quad (2.12a)$$

A fração de massa do elemento não combustível, no material combustível, vale:

$$g = \frac{MO_2}{r \cdot M_{cf} + (1-r) \cdot M_{nf} + MO_2} \quad (2.13)$$

Com este valor pode-se determinar a densidade atômica do elemento não combustível, no material combustível, cuja expressão é:

$$N_{nc} = (N_a/MO_2) \cdot (\rho_{mc} \cdot g \cdot i) \quad (2.14)$$

A densidade atômica deste elemento no núcleo do R.N.L.F. é:

$$NO = N_{nc} \cdot V_{mc} \quad (2.15)$$

ou

$$NO = (N_a/MO_2) \cdot \rho_{mc} \cdot g \cdot i \cdot (1-E) \cdot Y \quad (2.15a)$$

O material escolhido para revestir as esferas de combustível foi o zircaloy, que apresenta baixa seção de choque de absorção de neutrons, além de boas características de resistência mecânica e à corrosão. O zircaloy é uma liga composta de zircônio, estanho, ferro e cromo. Apresenta-se na tabela 2.1 as frações em peso desses elementos na liga juntamente com outras características de interesse.

Elemento	%peso	ρ -g/cm ³	A
Zr	98,2	6,49	91,22
Sn	1,5	7,31	118,70
Fe	0,2	7,86	55,84
Cr	0,1	7,20	59,99

Tabela 2.1-Elementos constituintes do Zircaloy 4 /15/

Como o Zircaloy é uma liga metálica, ou seja, não existe combinação química entre os constituintes, a densidade atômica dos seus elementos na liga é dada pelas seguintes expressões:

Para o zircônio

$$NZr = (Na/MZr) \cdot \rho_{\text{zircaloy}} \cdot VZr \quad (2.16)$$

Deve-se observar que por não existir combinação química entre os constituintes da liga, usa-se a fração de volumes e não a de massas.

$$VZr = \frac{\frac{\% \text{ peso Zr}}{\rho_{Zr}}}{\frac{\% \text{ peso Zr}}{\rho_{Zr}} + \frac{\% \text{ peso Sn}}{\rho_{Sn}} + \frac{\% \text{ peso Fe}}{\rho_{Fe}} + \frac{\% \text{ peso Cr}}{\rho_{Cr}}} \quad (2.17)$$

Para o núcleo do R.N.L.F. quando considerado como homogêneo, tem-se:

$$NZr = (Na/MZr) \cdot \rho_{\text{zircaloy}} \cdot VZr \cdot (1-E) \cdot (1-Y) \quad (2.18)$$

Para o estanho

$$NSn = (Na/MSn) \cdot \rho_{\text{zircaloy}} \cdot VSn \cdot (1-E) \cdot (1-Y) \quad (2.19)$$

onde

$$VSn = \frac{\frac{\% \text{ peso Sn}}{\rho_{Sn}}}{\frac{\% \text{ peso Zr}}{\rho_{Zr}} + \frac{\% \text{ peso Sn}}{\rho_{Sn}} + \frac{\% \text{ peso Fe}}{\rho_{Fe}} + \frac{\% \text{ peso Cr}}{\rho_{Cr}}} \quad (2.20)$$

Para o ferro

$$N_{Fe} = (Na/M_{Fe}) \cdot \rho_{zircaloy} \cdot V_{Fe} \cdot (1-E) \cdot (1-Y) \quad (2.21)$$

onde

$$V_{Fe} = \frac{\frac{\% \text{ peso Fe}}{\rho_{Fe}}}{\frac{\% \text{ peso Zr}}{\rho_{Zr}} + \frac{\% \text{ peso Sn}}{\rho_{Sn}} + \frac{\% \text{ peso Fe}}{\rho_{Fe}} + \frac{\% \text{ peso Cr}}{\rho_{Cr}}} \quad (2.22)$$

Para o cromo

$$N_{Cr} = (Na/M_{Cr}) \cdot \rho_{zircaloy} \cdot V_{Cr} \cdot (1-E) \cdot (1-Y) \quad (2.23)$$

onde

$$V_{Cr} = \frac{\frac{\% \text{ peso Cr}}{\rho_{Cr}}}{\frac{\% \text{ peso Zr}}{\rho_{Zr}} + \frac{\% \text{ peso Sn}}{\rho_{Sn}} + \frac{\% \text{ peso Fe}}{\rho_{Fe}} + \frac{\% \text{ peso Cr}}{\rho_{Cr}}} \quad (2.24)$$

A princípio este reator será moderado e refrigerado por água leve. A determinação da densidade atômica do elementos do moderador é dada por:

$$N_H = (Na/M_{H_2}) \cdot \rho_{H_2O} \cdot \%H \cdot i \quad (2.25)$$

onde

$$\%H = \frac{M_{H_2}}{M_{H_2} + M_O} \quad (2.26)$$

Para o núcleo do R.N.L.F. considerado como homogêneo

$$N_H = (Na/M_{H_2}) \cdot \rho_{H_2O} \cdot \%H \cdot i \cdot E \quad (2.27)$$

De maneira análoga para o oxigênio

$$NO^* = (Na/MO) \cdot \rho_{H_2O} \cdot \%O \cdot E \quad (2.28)$$

onde

$$\%O = \frac{MO}{MH_2 + MO} \quad (2.29)$$

Deve-se observar que a densidade atômica do oxigênio no núcleo do R.N.L.F. é a soma das densidades atômicas desse elemento no material combustível e no moderador, ou seja:

$$NO_{\text{núcleo}} = NO + NO^*$$

Nomenclatura

D = diâmetro do tubo de fluidização

H = altura de fluidização

d = diâmetro da esfera de combustível com revestimento (esfera total)

c = espessura do revestimento

d-2c = diâmetro da esfera de material combustível

n = número de esferas de combustível

E = porosidade

Y = fração de volume de combustível na esfera total

M_{comb.} = massa de combustível em um módulo

ρ_{mc} = densidade do material combustível, 10,45 g/cm³

ρ_c = densidade do combustível

Na = número de avogadro, 0,60225.10²⁴ moléculas/g.mol

M_{cf} = massa molecular do combustível fóssil, 235,0439

M_{nf} = massa molecular do combustível não físsil, 238,0508
 ρ_{cf} = densidade do combustível físsil utilizado
 i = número de átomos por molécula de composto
 r = enriquecimento ou razão entre massas do combustível físsil no combustível total
 f = fração de massa do combustível no material combustível
 V_{mc} = fração de volume do material combustível no núcleo
 N_{cf} = densidade atômica do combustível físsil no núcleo
 N_{nf} = densidade atômica do combustível não físsil
 g = fração de massa do elemento não combustível no material combustível
 N_{nc} = densidade atômica do elemento não combustível
 MO_2 = massa molecular de oxigênio na molécula de combustível, 31,9888
 NO = densidade atômica do oxigênio no material combustível
 MZr = massa molecular do zircônio, Tabela 2.1
 $\rho_{zircaloy}$ = densidade da liga, 6,55 g/cm³
 VZr = fração de volume ocupada pelo zircônio no zircaloy
 NZr = densidade atômica do zircônio no núcleo
 MSn = massa molecular do estanho, Tabela 2.1
 VSn = fração de volume do estanho na liga
 NSn = densidade atômica do estanho no núcleo
 MFe = massa molecular do ferro, Tabela 2.1
 VFe = fração de volume do ferro na liga
 NFe = densidade atômica do ferro no núcleo
 MCr = massa molecular do cromo, Tabela 2.1
 VCr = fração de volume do cromo na liga
 NCr = densidade atômica do cromo no núcleo
 MH_2 = massa molecular do hidrogênio na água, 2,01733
 MO = massa molecular do oxigênio na água, 15,9944

$\%H$ = fração em massa do hidrogênio na molécula de água

NH = densidade atômica do hidrogênio no núcleo

$\%O$ = fração em massa do oxigênio na molécula de água

NO* = densidade atômica do oxigênio na água

NOnúcleo = densidade atômica do oxigênio no núcleo

Cálculo de Criticalidade para um Grupo de neutrons
aplicado ao Reator Nuclear a leito Fluidizado

3.1-Introdução

A solução em regime estacionário da equação da difusão fornece informações das dimensões críticas do reator, distribuição de fluxo e potência para dada composição de material e geometria. A equação da difusão pode ser resolvida analiticamente para reatores homogêneos que são geometricamente simples. No entanto, no detalhamento de projetos reais onde são consideradas as heterogeneidades do reator, é necessário que se utilize códigos computacionais para a solução desses problemas. Tendo em vista este fato, como primeira aproximação para o cálculo de criticalidade no R.N.L.F. utilizou-se o código ODOG./13/

Apesar dos valores calculados a partir deste código não terem sido levados em conta para definições diretas no projeto, foi interessante o seu uso para: fixação de conceitos físicos e matemáticos utilizados nos cálculos de criticalidade; aplicação desses conceitos e princípios no reator em questão; familiarização com o uso de códigos nucleares; desenvolvimento de experiência na elaboração de métodos de homogeneização.

A equação da difusão para um grupo de neutrons em regime estacionário, é matematicamente obtida através da expressão da conservação de neutrons, ou seja:

$$-\nabla \cdot D(\vec{r}) \nabla \phi(\vec{r}) + \Sigma_a(\vec{r}) \phi(\vec{r}) = \nu K \Sigma_f(\vec{r}) \phi(\vec{r}) \quad (3.1)$$

O primeiro termo dessa equação representa a quantidade de neutrons que foge do reator na unidade de volume e na unidade de tempo. O segundo termo à esquerda da equação, representa a taxa de neutrons térmicos que são absorvidos por núcleo por cm^3 . Estas duas taxas de perda de neutrons devem ser compensadas pela taxa de produção, representada pelo termo à direita da equação (3.1).

O raciocínio físico necessário para mostrar que K é realmente o fator de multiplicação é o seguinte: se $K > 1$, então o sistema é supercrítico, desde que a taxa de produção deve ser reduzida para que o balanço seja satisfeito. Se K é igual a um, então a produção é justamente igual a perda de neutrons e o reator é crítico. E como pode ser visto facilmente se $K < 1$ significará que as dimensões e composição escolhidas não produzirão uma configuração crítica. Ainda no que se refere ao parâmetro K podem ser feitas duas considerações. Uma considerando o reator com dimensões infinitas, K_{∞} , onde não se considera o termo de fuga da equação (3.1), caracterizando assim as propriedades do material utilizado no reator independentemente da geometria do núcleo. A outra, K_{efetivo} , que é calculado pela equação (3.1), onde somado às características do material sobrepoõe-se o efeito da geometria, ou seja, forma e dimensões do núcleo.

Para que a equação (3.1) seja resolvida são necessárias condições de contorno. No código Odog é imposta a existência de continuidade do fluxo de neutrons e da corrente normal à interface do material. Isto significa que se existe uma região "A" adjacente a uma região "B", na interface $\vec{r} = \vec{r}_0$

$$\phi_A(\bar{r}_0) = \phi_B(\bar{r}_0) \quad (3.2)$$

e

$$-D_A(\bar{r}_0) \frac{\partial \phi}{\partial n(\bar{r})} = -D_B(\bar{r}_0) \frac{\partial \phi}{\partial n(\bar{r}_0)} \quad (3.3)$$

onde $\frac{\partial \phi}{\partial n}$ indica a derivada normal ao fluxo de neutrons. Na fronteira do reator \bar{r}_b outra condição deve ser satisfeita, qual seja, o fluxo de neutrons deve se anular na distância extrapolada.

$$\phi(r_b + 0,71 \lambda_{tr} \bar{r}/r) = 0 \quad (3.4)$$

O fluxo na verdade não se anula, mas essa consideração permite que se obtenha bons resultados do fluxo no interior do reator. Outra condição a ser satisfeita é que o fluxo em qualquer lugar é finito e não negativo.

O código ODOG resolve a equação (3.1), submetida às condições (3.2), (3.3) e (3.4). Mais especificamente este código resolve numericamente a equação da difusão (3.1) em uma dimensão, para quatro regiões e para um grupo de neutrons. Resolve para as condições supracitadas, problemas com geometria esférica, cilíndrica e plana fornecendo o valor do fator de multiplicação para dada composição e configuração geométrica.

Os dados de entrada são: geometria, $D, \Sigma_a, \nu \Sigma_f$. Como resultado o programa fornece o valor de $K_{efetivo}$, fluxo normalizado, além de plotar o valor do fluxo normalizado em função da distância. /13/

3.2- Métodos de homogeneização

Os métodos de homogeneização descritos a seguir foram baseados num reator com 19 módulos cuja configuração esquemática, a partir de uma primeira concepção, é conforme a figura (3.1). As dimensões básicas do módulo do R.N.L.F. estão calculadas no apêndice A e valem:

Para a carcaça hexagonal

$$\begin{aligned} b_i &= 14,66 \text{ cm} \\ b_e &= 16,39 \text{ cm} \\ L &= 32,78 \text{ cm} \\ e &= 1,50 \text{ cm} \end{aligned}$$

Para o tubo de fluidização

$$\begin{aligned} D_i &= 25,0 \text{ cm} \\ D_e &= 25,4 \text{ cm} \\ t &= 0,2 \text{ cm} \end{aligned}$$

onde

b_i = lado interno da carcaça hexagonal

b_e = lado externo da carcaça hexagonal

D_i = diâmetro interno do tubo de fluidização


D_e = diâmetro externo do tubo de fluidização


e = espessura da carcaça


t = espessura do tubo de fluidização

conforme figura 3.2

Tendo em vista que o reator é feito em sistema modular, ou seja, as considerações geométricas e de composição material feitas para um módulo têm validade para todo o reator, considerando todos os módulos em idênticas condições, serão determinadas seções transversais de interesse em um módulo, a fim de facilitar o estudo de homogeneização.

 -Área livre do tubo de fluidização = 490,87 cm²
figura(3.3a)

 -Área ocupada pelo tubo de fluidização = 506,71 cm²
figura(3.3b)

 -Área interna da carcaça = 558,72 cm²

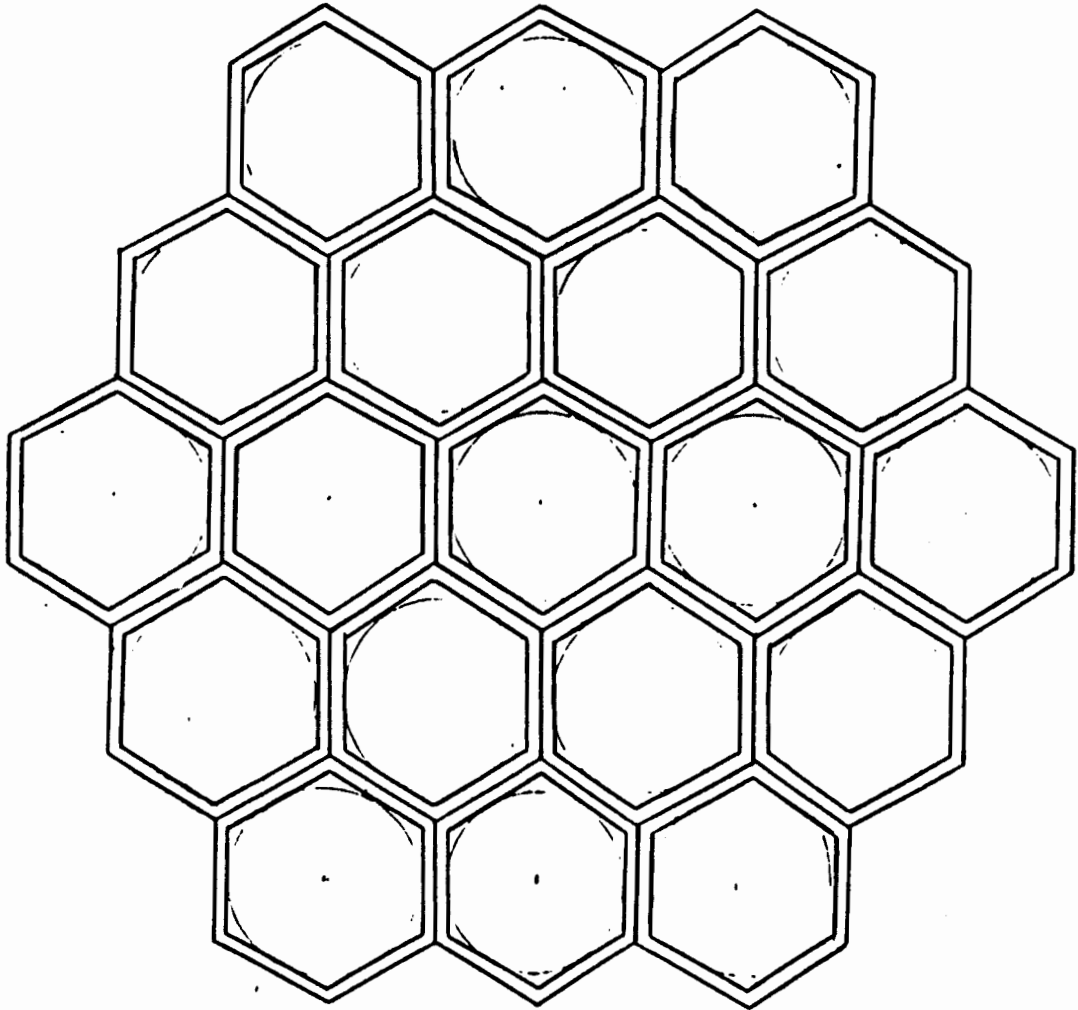
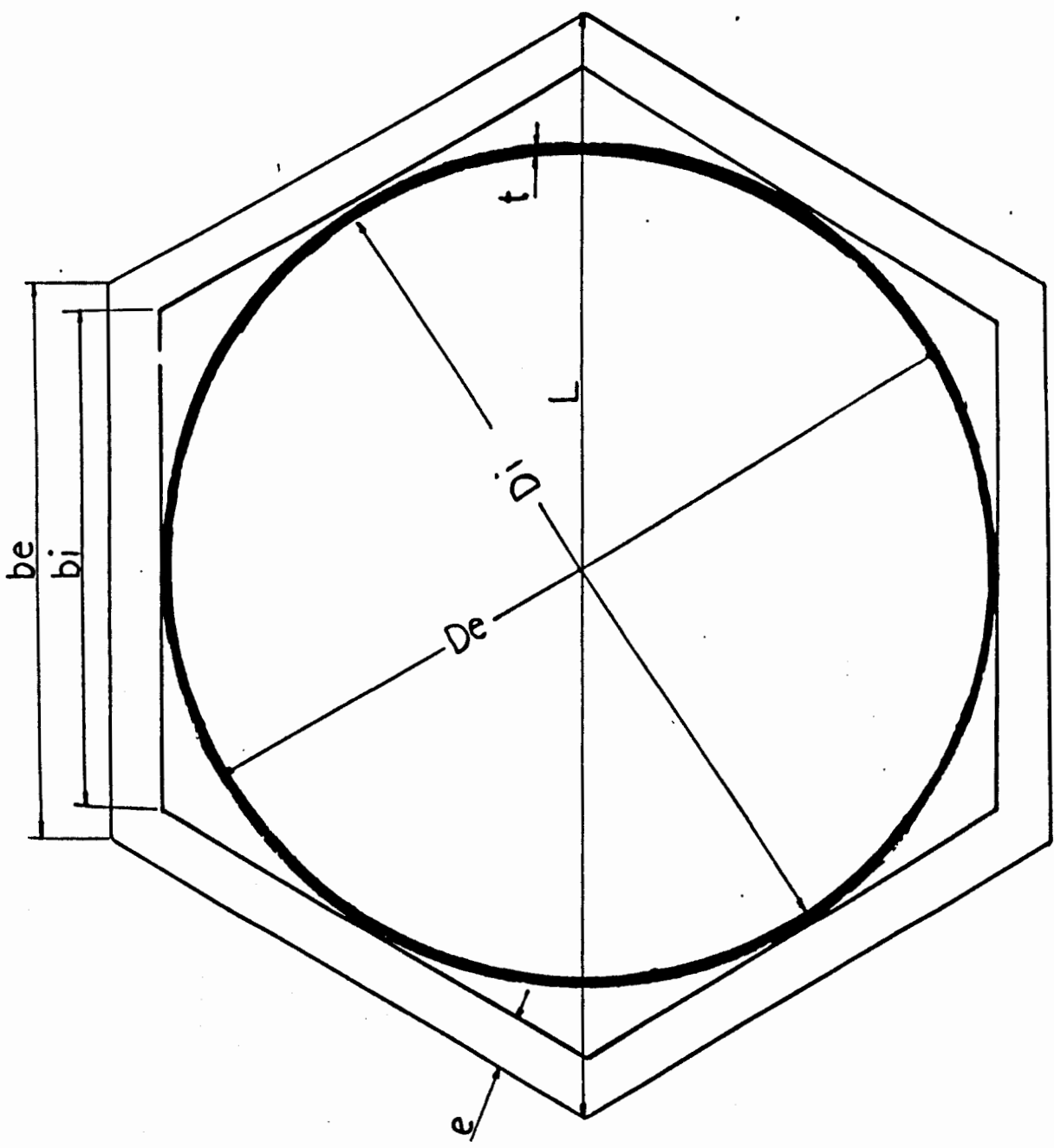


Figura 3.1-Vista esquemática em corte do R.N.L.F.

Figura 3.2-Corte-vista esquemática do R.N.L.F.



Características do módulo


Caraça hexagonal


- bi = 14,66 cm
- be = 16,39 cm
- L = 32,78 cm
- e = 1,50 cm

Tubo de fluidização

- Di = 25,0 cm
- De = 25,4 cm
- t = 0,2 cm

figura(3.3c)

 -Área livre da carcaça = 52,02 cm²
figura(3.3d)

 -Área total do módulo = 698,50 cm²
figura(3.3e)

Como o código ODOG permite um máximo de 4(quatro) regiões, foram elaborados dois métodos de homogeneização que estão descritos a seguir.

3.2.1-Método 1

Como a geometria que mais se adapta ao problema é a cilíndrica, todas as regiões foram desenvolvidas em cilindros concêntricos equivalentes. As quatro regiões consideradas nesse método são no reator conforme a figura 3.4 e para fins de entrada no código conforme a figura 3.5. Uma outra observação é que o termo "núcleo" utilizado a seguir, se refere ao material no interior do tubo de fluidização, ou seja, combustível, revestimento e moderador. O termo "anel de água" se refere a passagem de água entre o tubo de fluidização e a carcaça hexagonal descrito anteriormente como "área livre da carcaça".

-Região 1 - A região é composta de 7(sete) núcleos, um do módulo central e seis do primeiro anel, juntamente das regiões compartilhadas por eles, que são: 4(quatro) tubos de fluidização, 4(quatro) anéis de água e 4(quatro) carcaças.

$$\text{-Área 7 núcleos} = 490,87 \cdot 7 = 3436,09 \text{ cm}^2$$

$$\begin{aligned} \text{-Área 4 tubos de fluid.} &= (506,71 - 490,87) \cdot 4 \\ &= 63,36 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

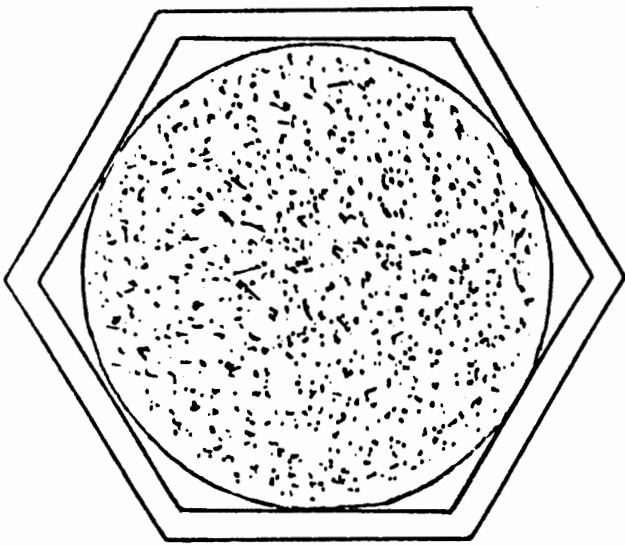


Figura 3.3a

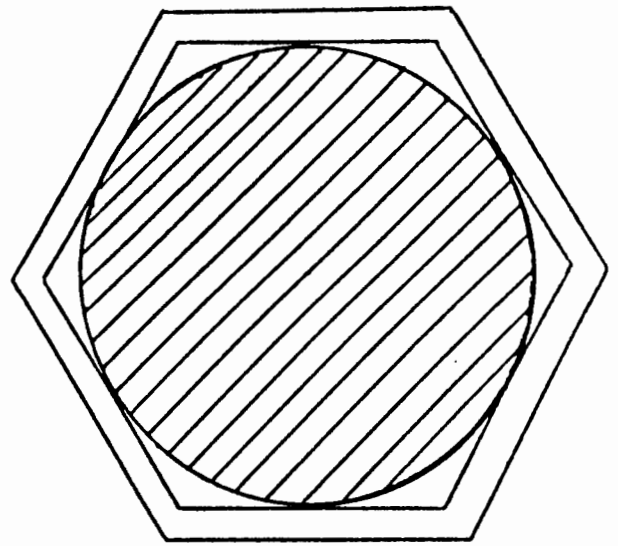


Figura 3.3b

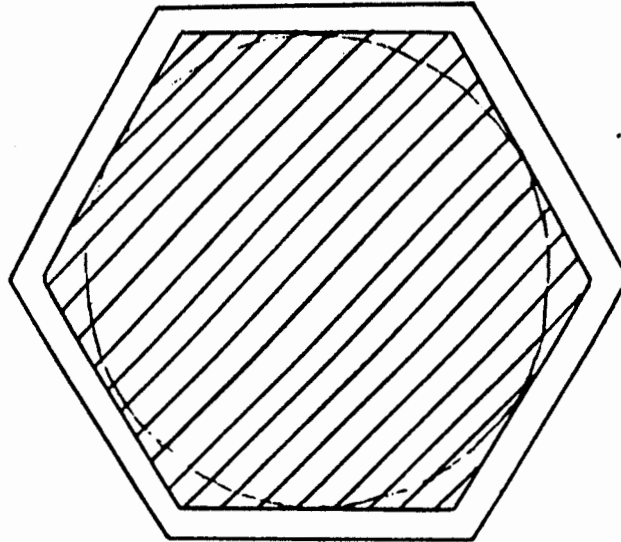


Figura 3.3c

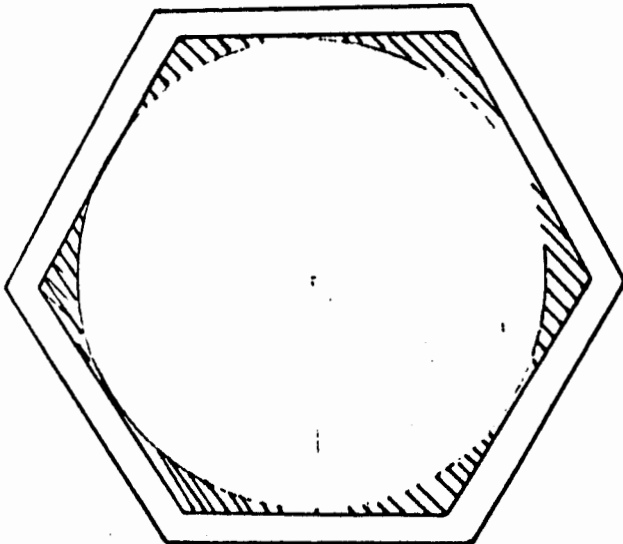


Figura 3.3d

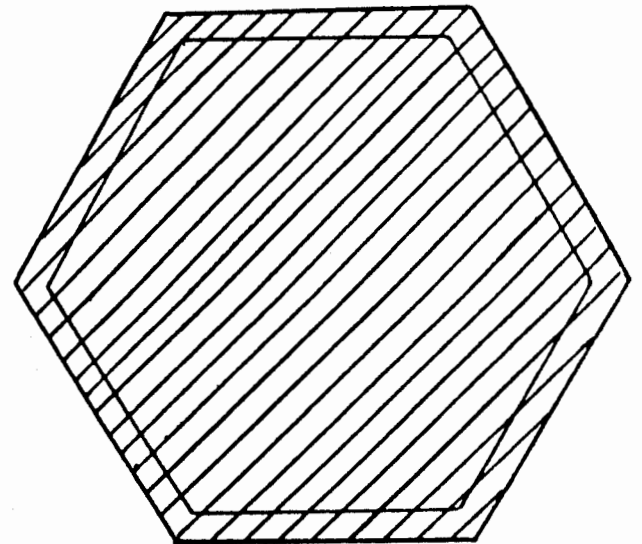


Figura 3.3e

Figura 3.3-Seções transversais de interesse no estudo de homogeneização

$$\text{-Área 4 anéis de água} = 52,02 \cdot 4 = 208,08 \text{ cm}^2$$

$$\text{-Área 4 carcaças} = (698,50 - 558,72) \cdot 4 = 559,12 \text{ cm}^2$$

$$\text{-Área da região 1} = 4266,61 \text{ cm}^2$$

$$\text{-R1} = \text{raio da região 1} = 36,85 \text{ cm}$$

-Região 2 - A região 2 é composta pelas porções que separam os núcleos dos módulos do primeiro anel dos núcleos do segundo anel, além das porções comuns entre os núcleos do segundo anel. Desta forma esta região conta com 9(nove) tubos de fluidização, 9(nove) anéis de água e 9(nove) carcaças.

$$R2 = 44,19 \text{ cm}$$

-Região 3 - A região 3 é composta pelos 12(doze) núcleos dos módulos que formam o anel exterior do reator.

$$R3 = 61,87 \text{ cm}$$

-Região 4 - A região 4 é composta pelas porções que limitam o reator externamente, ou seja, 6(seis) tubos de fluidização, 6(seis) anéis de água e 6(seis) carcaças.

$$R4 = 65,00 \text{ cm}$$

3.2.2-Método 2

As quatro regiões consideradas neste método são: no reator, conforme a figura 3.6 e para fins de entrada no código conforme a figura 3.7, sendo que todas as considerações feitas para o método 1 também valem aqui.



Região 1-Mistura homocênica de 7 núcleos +
 4 tubos de fluid. +
 4 anéis de água +
 4 carcaças



Região 2-Mistura homocênica de 9 tubos de f +
 9 anéis de água +
 9 carcaças



Região 3-Mistura homocênica de 12 núcleos



Região 4-Mistura homocênica de 6 tubos de f +
 6 anéis de água +
 6 carcaças

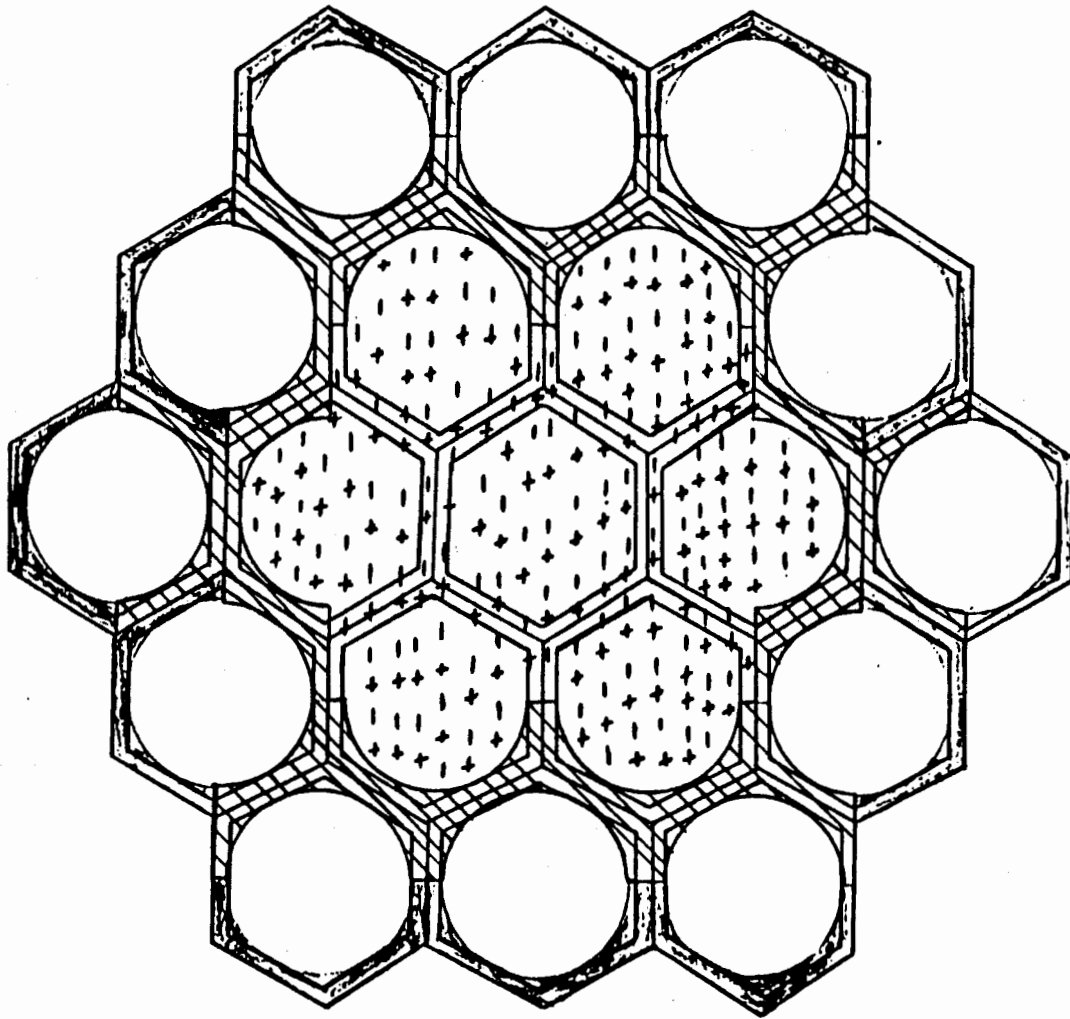


Figura 3.4-Esquema das regiões no R.N.L.F.-Método 1

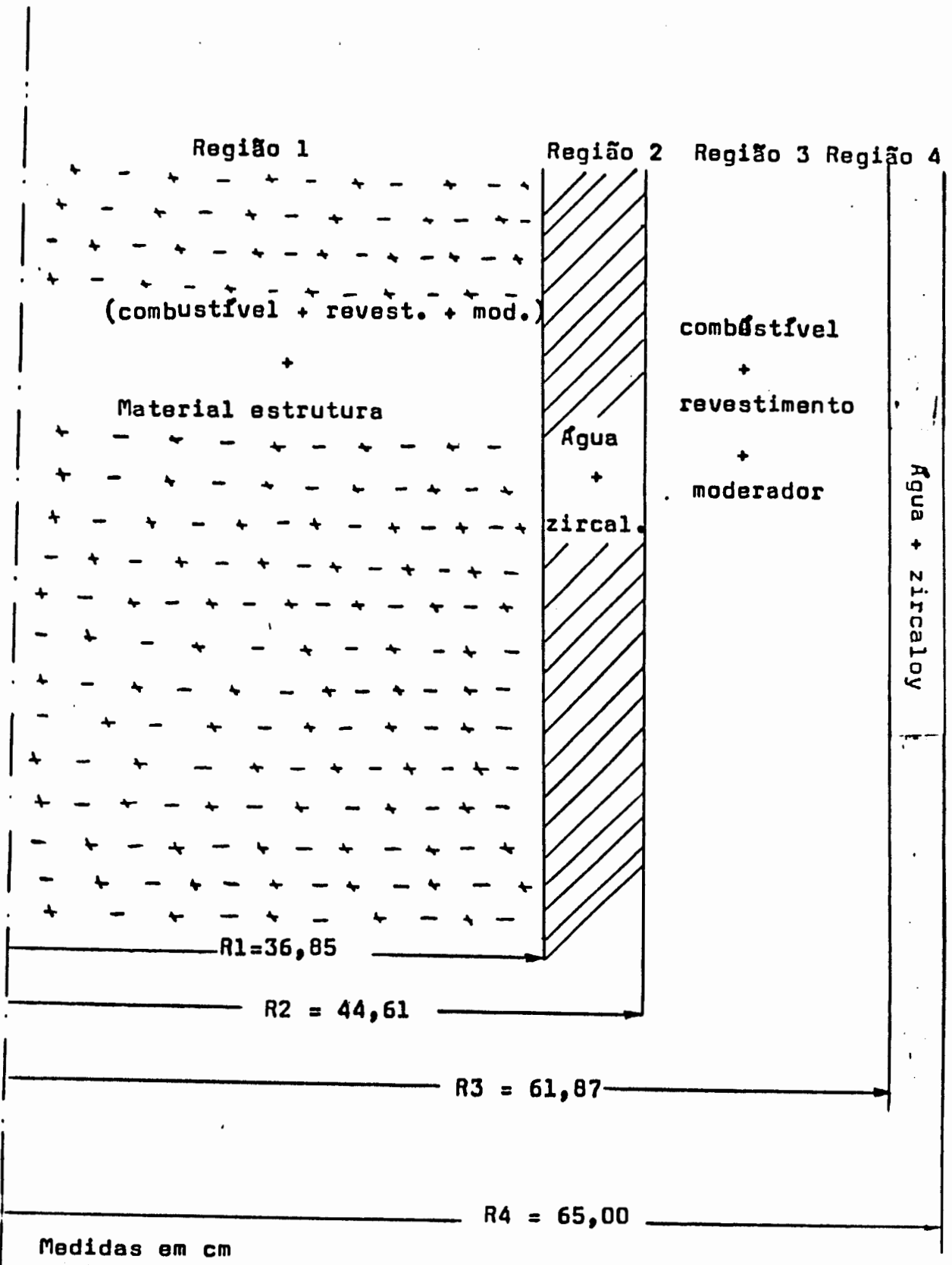


Figura 3.5-Esquema das regiões para entrada no código
 ODDG-Método 1

-Região 1 - A região 1 é composta pelo núcleo do módulo central do reator.

$$R1 = 12,50 \text{ cm}$$

-Região 2 - A região 2 é composta pelas porções entre o núcleo do módulo central e os núcleos do primeiro anel, bem como das porções entre os núcleos do primeiro anel. Sendo assim esta região compõe-se de 4(quatro) tubos de fluidização, 4(quatro) anéis de água e 4(quatro) carcaças.

$$R2 = 20,51 \text{ cm}$$

-Região 3 - A região 3 é composta pelos 6(seis) núcleos que formam o primeiro anel do reator.

$$R3 = 36,85 \text{ cm}$$

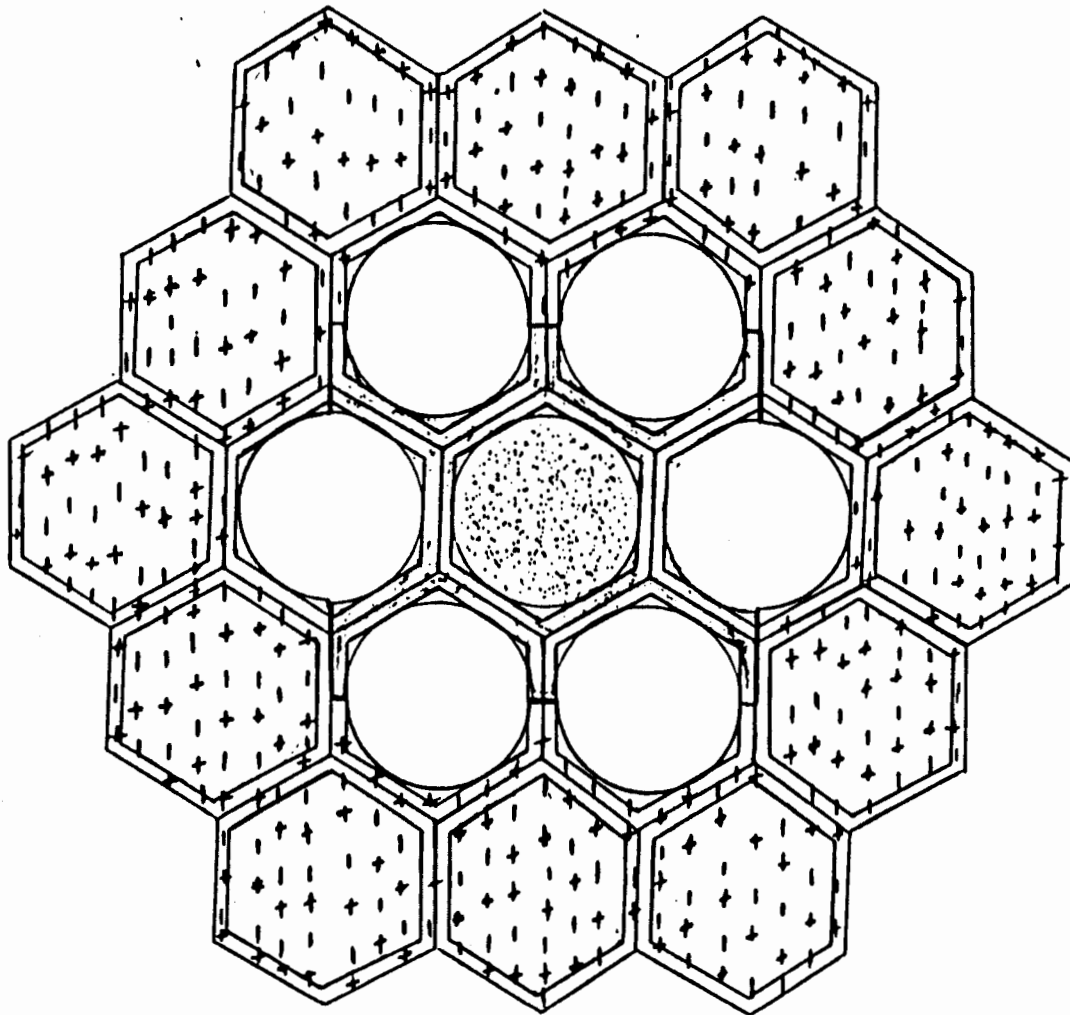
-Região 4 - A região 4 é a mistura homogênea das porções que separam os núcleos do primeiro anel dos do segundo anel, mais os 12(doze) módulos que compõem o segundo anel.


$$R4 = 65,00 \text{ cm}$$


3.3-Cálculo dos parâmetros de entrada do código


Lembrando a equação (3.1), que descreve o balanço de neutrons em regime estacionário, os parâmetros a serem calculados são: D , Σ_a e Σ_f

Os valores de Σ_a e Σ_f podem ser calculados pelas seguin-




Região 1-Mistura homogênea de 1 núcleo


Região 2-Mistura homogênea de 4 tubos de f. + 4 anéis de água + 4 carcaças


Região 3-Mistura homogênea de 6 núcleos



Região 4-Mistura homogênea de 12 núcleos + 15 tubos de fluid. + 15 anéis de água + 15 carcaças

Figura 3.6-Esquema das regiões no R.N.L.F.-Método 2

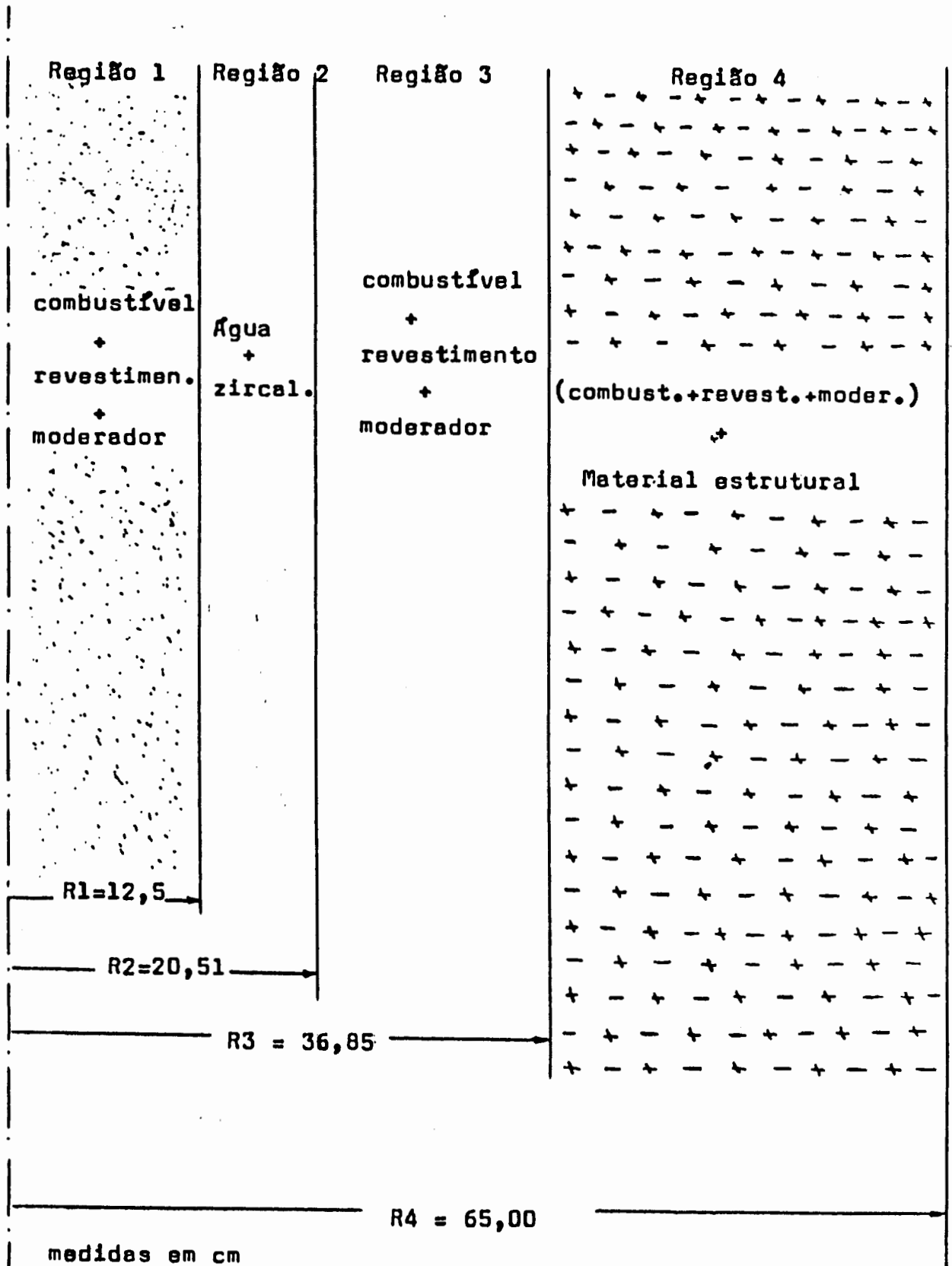


Figura 3.7-Esquema das regiões para entrada no código ODOG-Método 2

tes equações: /16/

$$\bar{\Sigma}_a = \sqrt{v}/2 \cdot g_a(T) \cdot (T_0/T)^{1/2} \cdot \Sigma_a(E_0) \quad (3.5)$$

$$\bar{\Sigma}_f = \sqrt{v}/2 \cdot g_f(T) \cdot (T_0/T)^{1/2} \cdot \Sigma_f(E_0) \quad (3.6)$$

onde

$g_a(T)$ = fator de correção para absorvedor do tipo não
 $1/v$ - Tabela 3.1

$g_f(T)$ = fator de correção para a reação de fissão
Tabela 3.1

$\Sigma(E_0)$ = seção de choque macroscópica a 0,0253 ev

T = temperaturas em graus Kelvin

Essas quantidades para misturas homogêneas são descritas por:

/17/

$$\Sigma_i = \sum N_i \cdot \sigma_i \quad (3.7)$$

Para o cálculo da constante de difusão usa-se: /17/

$$D = \lambda_{tr}/3 = 1/3 \Sigma_{tr} = 1/(\Sigma_t - \bar{v}_0 \Sigma_s) \cdot 3 \quad (3.8)$$

onde

$$\Sigma_t = \Sigma_a + \Sigma_s \quad (3.9)$$

$$\bar{v}_0 = 2/(3\lambda) \quad (3.10)$$

A combinação das equações supracitadas juntamente com as equações desenvolvidas no capítulo 2, para o cálculo das densidades atômicas (N_i), permite o cálculo dos parâmetros da equação

da difusão para entrada no código DDOG levando em consideração condições operacionais e de projeto para o R.N.L.F. . PA- o cálculo a seguir foi tomado um reator de 19 módulos (conforme a figura 3.1), com as seguintes características:

T °C	Cd		I		Xe ¹³⁵ Sm ¹⁴⁹ *		U ²³³		U ²³⁵		U ²³⁸		Pu ²⁴⁹	
	ε _a	ε _f	ε _a	ε _f	ε _a	ε _f	ε _a	ε _f	ε _a	ε _f	ε _a	ε _f	ε _a	ε _f
20	1,320	1,0192	1,1581	1,617	0,993	1,000	0,9780	0,9759	1,002	1,002	1,002	1,072	1,049	
100	1,599	1,035	1,210	1,887	0,9972	1,001	0,961	0,9581	1,003	1,003	1,003	1,161	1,115	
200	1,963	1,056	1,236	2,090	0,9973	1,003	0,9457	0,9411	1,005	1,005	1,005	1,339	1,253	
400	2,359	1,101	1,186	2,185	1,001	1,007	0,929	0,9208	1,008	1,008	1,008	1,891	1,69	
600	2,903	1,152	1,091	2,085	1,007	1,013	0,923	0,9108	1,012	1,012	1,012	2,532	2,204	
800	3,046	1,212	0,9887	1,925	1,015	1,020	0,918	0,9036	1,016	1,016	1,016	3,101	2,659	
1000	3,060	1,292	0,8358	1,757	1,023	1,028	0,9118	0,8956	1,020	1,020	1,020	3,535	3,038	

Tabela 3.1-Fatores de correção para núcleos que não seguem o comportamento 1/v. Baseada em C. H. Westcott, "Effective cross sections values for Well-moderated Thermal reactors spectra" AECL-1101, January 1962.

* Baseada em E. C. Smith, et al., Phys. Rev. 115, 1963 (1958)

<u>Combustível</u>	<u>Revestimento</u>	<u>Moderador</u>	<u>Tubo de fluidização</u>	<u>Carcaca hexagonal</u>
UO ₂ -3% $\rho_{mc} = 10,45$ g/cm^3 $M_{cf} = MU^{235} =$ 235,0439 $M_{mf} = MU^{238} =$ 238,0508 $M_{nc} = MO_2 =$ 31,9888	zircaloy (tab. 2.1) $\rho_1 = 6,55$ g/cm^3	H ₂ O $\rho_{H_2O} =$ (28°C) = 1 (290C) = ,73 (310C) = ,70 g/cm^3 MH = 1,008665 MO = 15,9944	zircaloy (tab. 2.1) $\rho_2 = 6,55$ g/cm^3	zircaloy (tab.2.1) $\rho_2 = 6,55$ g/cm^3

Tabela 3.2- Características do R.N.L.F.-19 módulos

De posse das condições acima,obtem-se as seguintes expressões para o cálculo das densidades atômicas:

a-Núcleo do reator

a.1-Material combustível (UO₂)

A densidade atômica do material combustível no núcleo do reator é obtida pelas equações(2.9a),(2.12a) e (2.15a)

$$N_5 = 7,0809.(1-E).Y.10^{20}$$

$$N_8 = 2,2606.(1-E).Y.10^{22}$$

$$N_O = 4,6627.(1-E).Y.10^{22}$$

onde

$$Y = ((d-2c)/d)^3$$

a.2-Revestimento (zircaloy)

A densidade atômica dos elementos do revestimento, no núcleo do R.N.L.F., é obtida pelas equações (2.18), (2.19), (2.21) e (2.23)

$$NZr = 4,2556 \cdot 10^{22} \cdot (1-E) \cdot (1-Y)$$

$$NSn = 4,4353 \cdot 10^{20} \cdot (1-E) \cdot (1-Y)$$

$$NFe = 1,1691 \cdot 10^{20} \cdot (1-E) \cdot (1-Y)$$

$$NCr = 5,9392 \cdot 10^{19} \cdot (1-E) \cdot (1-Y)$$

$$\text{com } VZr = 0,90409598 \quad - \quad VSn = 0,01334577 \quad - \quad VFe = 0,00165491 \\ VCr = 0,00090332$$

a.3-Moderador (água)

A densidade atômica dos elementos do moderador, no núcleo do R.N.L.F., é obtida pelas equações (2.27) e (2.28)

$$NH = 4,6912 \cdot 10^{22} \cdot E$$

$$NO = 2,3406 \cdot 10^{22} \cdot E$$

$$\text{com } \%H = 0,112009 \quad - \quad \%O = 0,8879991$$

b-Tubo de fluidização e carcaça hexagonal (zircaloy)

Neste caso o valor das densidades atômicas é constante e vale:

$$NZr = 4,2556 \cdot 10^{22}$$

$$NSn = 4,4353 \cdot 10^{20}$$

$$NFe = 1,1691 \cdot 10^{20}$$

$$NCr = 5,9392 \cdot 10^{19}$$

c-Anel de água

Neste caso os valores das densidades atômicas também são constantes e valem:

$$NH = 4,6812 \cdot 10^{22}$$

$$NO = 2,3406 \cdot 10^{22}$$

Para melhor comparar os métodos de homogeneização, foram idealizados dois casos onde se fez os cálculos para diversas condições operacionais, ou seja, desde a porosidade de colapso $E_0 = 0,4$ (leito não fluidizado) até a condição de fluidização $E = 0,9$ e com as seguintes condições de projeto.

	Caso 1	Caso 2
d	0,7 cm	0,8 cm
c	0,05 cm	0,05 cm
D	25,0 cm	25,0 cm
Ho	50,0 cm	50,0 cm
Y	0,62974	0,66992

Tabela 3.3-Condições de cálculo

Deve-se observar que nesse intervalo de diâmetros a porosidade de colapso não se altera.

Os valores das densidades atômicas calculadas para os dois casos estão nas Tabelas 3.4 e 3.5 a seguir.

Densidades atômicas dos elementos no núcleo considerado homogêneo-Caso 1

Tabela 3.4

Elemento	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
U ²³⁵	$2,6754 \cdot 10^{-4}$	$2,2295 \cdot 10^4$	$1,7836 \cdot 10^4$	$1,3377 \cdot 10^4$	$8,9180 \cdot 10^5$	$4,4590 \cdot 10^5$
U ²³⁸	$8,5410 \cdot 10^3$	$7,1175 \cdot 10^3$	$5,6940 \cdot 10^3$	$4,2709 \cdot 10^3$	$2,1657 \cdot 10^3$	$1,4235 \cdot 10^3$
O	$1,8169 \cdot 10^2$	$1,9041 \cdot 10^2$	$1,9913 \cdot 10^2$	$2,0725 \cdot 10^2$	$2,1657 \cdot 10^2$	$2,2529 \cdot 10^2$
H	$1,8721 \cdot 10^2$	$2,3401 \cdot 10^{-2}$	$2,8322 \cdot 10^2$	$3,2761 \cdot 10^2$	$3,7442 \cdot 10^2$	$4,2122 \cdot 10^2$
Zr	$9,4542 \cdot 10^{-3}$	$7,8785 \cdot 10^3$	$6,3028 \cdot 10^3$	$4,7271 \cdot 10^3$	$3,1514 \cdot 10^3$	$1,5757 \cdot 10^3$
Sn	$9,8538 \cdot 10^5$	$8,2115 \cdot 10^5$	$6,5692 \cdot 10^5$	$4,9269 \cdot 10^5$	$3,2846 \cdot 10^5$	$1,6423 \cdot 10^5$
Fe	$2,5967 \cdot 10^5$	$2,16401 \cdot 10^5$	$1,7312 \cdot 10^5$	$1,2984 \cdot 10^5$	$8,6562 \cdot 10^{-6}$	$4,3281 \cdot 10^6$
Cr	$1,3432 \cdot 10^5$	$1,1011 \cdot 10^5$	$8,8088 \cdot 10^6$	$6,6066 \cdot 10^6$	$4,4044 \cdot 10^6$	$2,2022 \cdot 10^6$

Valores tabelados $\times 10^{-24}$

Os valores para C incluem os oxigênios da água e do UO₂

Densidades atômicas dos elementos no núcleo considerado homogêneo - caso 2

E Elementos	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
U ²³⁵	2,8462.10 ⁴	2,3719.10 ⁴	1,8975.10 ⁴	1,4231.10 ⁴	9,4874.10 ⁵	4,7437.10 ⁵
U ²³⁸	9,0864.10 ³	7,5720.10 ³	6,0576.10 ³	4,5432.10 ³	3,0288.10 ³	1,5144.10 ³
O	3,2113.10 ²	3,2332.10 ²	3,2551.10 ²	3,2770.10 ²	3,2989.10 ²	3,3208.10 ²
H	1,8719.10 ²	2,3399.10 ²	2,8079.10 ²	3,2759.10 ²	3,7438.10 ²	4,2118.10 ²
Zr	8,4282.10 ³	7,0235.10 ³	5,6188.10 ³	4,2141.10 ³	2,8094.10 ³	1,4047.10 ³
Sn	8,7850.10 ⁵	7,3205.10 ⁵	5,8564.10 ⁵	4,3923.10 ⁵	2,9282.10 ⁵	1,4641.10 ⁵
Fe	2,3063.10 ⁵	1,9219.10 ⁵	1,5375.10 ⁵	1,1531.10 ⁵	7,6876.10 ⁶	3,8438.10 ⁶
Cr	1,1762.10 ⁵	9,8020.10 ⁶	7,5416.10 ⁶	5,8812.10 ⁶	3,9208.10 ⁶	1,9604.10 ⁶

Valores tabelados X 10⁻²⁴

Os valores para O incluem os oxigênios da água e do UO₂

Tablela 3.5

3.3.1.-Cálculo de D , Σ_a e $\gamma\Sigma_f$ para o núcleo do R.N.L.F.
(UO₂, zircaloy, água)

Para este cálculo as seções de choque microscópicas foram tomadas na energia de 2200 m/s e estão listadas na Tabela 3.6 . /12/

Elemento	$\Sigma_a \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$	$\Sigma_s \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$	A	(1 - \bar{u})
U ²³⁵	678,2 $\Sigma_f = 577,1$	15	235,0439	0,99716
U ²³⁸	7,68	4,18	238,0508	0,99720
O	0,0002	4,20	15,9944	0,95832
H	0,332	38	1,008665	0,33906
Zr	0,185	6,4	91,22	0,99269
Sn	0,630	4,0	118,69	0,99438
Fe	2,55	11	55,847	0,98806
Cr	3,10	4,8	59,996	0,98889

Tabela 3.6-Seções de choque microscópicas

Para efeito de cálculo, na determinação desses parâmetros, foi tomada a temperatura média de operação $T_m = 310^\circ \text{ C}$. Para essa temperatura tem-se: $g_a(310^\circ \text{ C}) \text{ U}^{235} = 0,9367$ - $g_f(310^\circ \text{ C}) \text{ U}^{235} = 0,9299$ - $g_a(310^\circ \text{ C}) \text{ U}^{238} = 1,0069$ com $T_0 = 293,15 \text{ K}$ e $T = 583,15 \text{ K}$.

Os resultados dos cálculos dos parâmetros, para os dois casos, estão apresentados nas Tabelas 3.7 e 3.8 .

Tabela 3.7-Caso 1

Elemento E	Parâmetro	U^{235}	U^{238}	O	H	Zr
0,4	Σ_a	0,10683	$4,1533 \cdot 10^2$	$2,2851 \cdot 10^6$	$3,9085 \cdot 10^3$	$1,0999 \cdot 10^3$
	$\nu \Sigma_f$	0,22571	-	-	-	-
0,5	$\Sigma_s(1-\bar{u})$	$4,0017 \cdot 10^3$	0,03560	$7,3129 \cdot 10^2$	0,24121	$6,0065 \cdot 10^2$
	Σ_a	0,08903	$3,4611 \cdot 10^2$	$2,3947 \cdot 10^6$	$4,8855 \cdot 10^3$	$9,1655 \cdot 10^4$
0,6	$\nu \Sigma_f$	0,18609	-	-	-	-
	$\Sigma_s(1-\bar{u})$	$3,3348 \cdot 10^3$	0,02967	$7,6639 \cdot 10^2$	0,30151	$5,0054 \cdot 10^2$
0,7	Σ_a	0,07122	0,027689	$2,5044 \cdot 10^6$	$5,9129 \cdot 10^3$	$7,3324 \cdot 10^4$
	$\nu \Sigma_f$	0,15048	-	-	-	-
0,8	$\Sigma_s(1-\bar{u})$	$2,6678 \cdot 10^3$	0,02372	0,08015	0,36491	$4,0043 \cdot 10^2$
	Σ_a	0,05342	0,02077	$2,6141 \cdot 10^6$	$6,8397 \cdot 10^3$	$5,4993 \cdot 10^4$
0,9	$\nu \Sigma_f$	0,11286	-	-	-	-
	$\Sigma_s(1-\bar{u})$	$2,0009 \cdot 10^3$	0,01780	0,08366	0,4221	$3,0032 \cdot 10^2$
0,8	Σ_a	0,03561	0,01384	$2,7238 \cdot 10^6$	$7,8169 \cdot 10^3$	$3,6662 \cdot 10^4$
	$\nu \Sigma_f$	0,075238	-	-	-	-
0,9	$\Sigma_s(1-\bar{u})$	$1,3339 \cdot 10^3$	0,01187	0,08717	0,48241	$2,0022 \cdot 10^2$
	Σ_a	0,01781	0,00692	$2,8334 \cdot 10^6$	$8,794 \cdot 10^3$	$1,8331 \cdot 10^4$
0,9	$\nu \Sigma_f$	0,037619	-	-	-	-
	$\Sigma_s(1-\bar{u})$	$6,6695 \cdot 10^{-4}$	0,00593	0,09068	0,54271	$1,0011 \cdot 10^{-2}$

Parâmetros da equação da difusão para o núcleo do R.N.L.F.

Tabela 3.7-Continuação

Elemento	Parâmetro	Sn	Fe	Cr	TOTAL NÚCLEO	D
0,4	Σa	$3,9038 \cdot 10^5$	$4,1642 \cdot 10^5$	$2,6184 \cdot 10^5$	0,15348	0,58663
	νZt	-	-	-	0,22571	
0,5	$\Sigma s (1-\bar{u}_0)$	$3,9194 \cdot 10^4$	$2,8224 \cdot 10^4$	$6,3757 \cdot 10^5$	0,41474	0,56368
	Σa	$3,2531 \cdot 10^5$	$3,4701 \cdot 10^5$	$2,1465 \cdot 10^5$	0,12953	
0,6	νZt	-	-	-	0,18909	0,53970
	$\Sigma s (1-\bar{u}_0)$	$3,2661 \cdot 10^4$	$2,3520 \cdot 10^4$	$5,2266 \cdot 10^5$	0,46182	
0,7	Σa	$2,6014 \cdot 10^5$	$2,7761 \cdot 10^5$	$1,7172 \cdot 10^5$	0,10563	0,52280
	νZt	-	-	-	0,15048	
0,8	$\Sigma s (1-\bar{u}_0)$	$2,6129 \cdot 10^4$	$1,8816 \cdot 10^4$	$4,1812 \cdot 10^5$	0,51199	0,50450
	Σa	$1,9519 \cdot 10^5$	$2,0820 \cdot 10^5$	$1,2879 \cdot 10^5$	0,081635	
0,9	νZt	-	-	-	0,11286	0,48744
	$\Sigma s (1-\bar{u}_0)$	$1,9597 \cdot 10^4$	$1,4112 \cdot 10^4$	$3,1359 \cdot 10^5$	0,55596	
0,8	Σa	$1,3013 \cdot 10^5$	$1,3881 \cdot 10^5$	$8,5860 \cdot 10^6$	0,057672	0,50450
	νZt	-	-	-	0,075233	
0,9	$\Sigma s (1-\bar{u}_0)$	$1,3065 \cdot 10^4$	$9,4081 \cdot 10^5$	$2,0906 \cdot 10^5$	0,60305	0,48744
	Σa	$6,5063 \cdot 10^6$	$6,9403 \cdot 10^6$	$4,2930 \cdot 10^6$	0,033728	
0,9	νZt	-	-	-	0,037619	0,48744
	$\Sigma s (1-\bar{u}_0)$	$6,5325 \cdot 10^{-5}$	$4,7011 \cdot 10^{-5}$	$1,0453 \cdot 10^{-5}$	0,65012	

Parâmetros da equação da difusão para o núcleo do R.N.L.F.

Tabela 3.8-Caso 2

Elemento	Parâmetro	U^{235}	U^{238}	H	O	Zr
0,4	$\Sigma \alpha$	0,1137	0,044185	0,003908	$4,0388 \cdot 10^6$	$9,8050 \cdot 10^4$
	$\nu \Sigma \lambda$	0,24012	-	-	-	-
0,5	$\Sigma s(1-\beta_0)$	$4,2572 \cdot 10^3$	0,037875	0,241183	0,12925	0,053546
	$\Sigma \alpha$	$9,4753 \cdot 10^2$	0,036821	0,004885	$4,0663 \cdot 10^6$	$8,1708 \cdot 10^4$
	$\nu \Sigma \lambda$	0,20011	-	-	-	-
	$\Sigma s(1-\beta_0)$	$3,5477 \cdot 10^3$	0,031582	0,301479	0,13013	0,04622
0,6	$\Sigma \alpha$	7,5802.10	0,029457	0,005862	$4,0932 \cdot 10^6$	$6,5267 \cdot 10^4$
	$\nu \Sigma \lambda$	0,16009	-	-	-	-
	$\Sigma s(1-\beta_0)$	$2,8382 \cdot 10^3$	0,025250	0,361775	0,13102	0,035597
	$\Sigma \alpha$	$5,6850 \cdot 10^2$	0,022093	0,006839	$4,1214 \cdot 10^6$	$4,9025 \cdot 10^4$
0,7	$\nu \Sigma \lambda$	0,12006	-	-	-	-
	$\Sigma s(1-\beta_0)$	$2,1286 \cdot 10^3$	0,018937	0,422293	0,13190	0,025773
	$\Sigma \alpha$	3,7901.10	0,014728	0,007216	$4,1490 \cdot 10^6$	$3,2683 \cdot 10^4$
	$\nu \Sigma \lambda$	0,08004	-	-	-	-
0,8	$\Sigma s(1-\beta_0)$	$1,4191 \cdot 10^3$	0,012625	0,482367	0,13278	0,017249
	$\Sigma \alpha$	$1,8950 \cdot 10^2$	0,007364	0,008793	$4,1769 \cdot 10^6$	$1,5342 \cdot 10^4$
	$\nu \Sigma \lambda$	0,04002	-	-	-	-
	$\Sigma s(1-\beta_0)$	7,0953.10	0,006312	0,542663	0,13366	0,008924

Parâmetros da equação da difusão para o núcleo do R.N.L.F.

Tabela 3.8-Continuação

Elemento	Parâmetro	Sn	Fe	Cr	TOTAL NÚCLEO	D
0,4	Σa	$3,4803 \cdot 10^5$	$3,6982 \cdot 10^5$	$2,2929 \cdot 10^5$	0,16287	0,52940
	$\nu \Sigma t$	-	-	-	0,24012	
	$\Sigma s(1-\bar{u}_0)$	$3,4943 \cdot 10^4$	$2,5066 \cdot 10^4$	$5,5830 \cdot 10^5$	0,46677	
0,5	Σa	$2,9002 \cdot 10^5$	$3,0818 \cdot 10^5$	$1,9108 \cdot 10^5$	0,13736	0,51341
	$\nu \Sigma t$	-	-	-	0,20011	
	$\Sigma s(1-\bar{u}_0)$	$2,9117 \cdot 10^4$	$2,0888 \cdot 10^4$	$4,6527 \cdot 10^5$	0,51189	
0,6	Σa	$2,3201 \cdot 10^5$	$2,4654 \cdot 10^5$	$1,5286 \cdot 10^5$	0,11184	0,49836
	$\nu \Sigma t$	-	-	-	0,16009	
	$\Sigma s(1-\bar{u}_0)$	$2,3294 \cdot 10^4$	$1,6711 \cdot 10^4$	$3,7222 \cdot 10^5$	0,55702	
0,7	Σa	$1,7401 \cdot 10^5$	$1,8490 \cdot 10^5$	$1,1465 \cdot 10^5$	0,08632	0,48402
	$\nu \Sigma t$	-	-	-	0,12006	
	$\Sigma s(1-\bar{u}_0)$	$1,7450 \cdot 10^4$	$1,2533 \cdot 10^4$	$2,7916 \cdot 10^5$	0,60236	
0,8	Σa	$1,1601 \cdot 10^5$	$1,2327 \cdot 10^5$	$7,6432 \cdot 10^6$	0,06081	0,47076
	$\nu \Sigma t$	-	-	-	0,08004	
	$\Sigma s(1-\bar{u}_0)$	$1,1647 \cdot 10^4$	$8,3554 \cdot 10^5$	$1,8611 \cdot 10^5$	0,64726	
0,9	Σa	$5,8003 \cdot 10^5$	$6,1637 \cdot 10^6$	$3,8216 \cdot 10^6$	0,035343	0,45772
	$\nu \Sigma t$	-	-	-	0,04002	
	$\Sigma s(1-\bar{u}_0)$	$5,8235 \cdot 10^4$	$4,1777 \cdot 10^5$	$9,3054 \cdot 10^{-6}$	0,69290	

Parâmetros da equação da difusão para o núcleo do R.N.L.F.

3.3.2-Cálculo de D e Σ_a para o tubo de fluidização e carcaça hexagonal (zircaloy)

Os valores calculados valem tanto para o caso 1 como para o caso 2. Usando os valores da tabela 3.6 para uma temperatura de 290°C (563,15K) obtém-se:

Elemento	N (at/cm ³)	Σ_{a1} (cm ⁻¹)	$\Sigma_c (1-\beta)$	D (m)
Zr	$4,2557 \cdot 10^{22}$	$5,0380 \cdot 10^{-3}$	0,27037	-
Sn	$4,4354 \cdot 10^{20}$	$1,7881 \cdot 10^{-4}$	$1,7642 \cdot 10^{-3}$	-
Fe	$1,1647 \cdot 10^{20}$	$1,9005 \cdot 10^{-4}$	$1,2659 \cdot 10^{-3}$	-
Cr	$5,9393 \cdot 10^{19}$	$1,1782 \cdot 10^{-4}$	$2,8192 \cdot 10^{-4}$	-
TOTAL	-	$5,5247 \cdot 10^{-3}$	0,27368	1,1939

Tabela 3.9-Parâmetros para o tubo de fluid. e carcaça hexagonal

3.3.3-Cálculo de D e Σ_a para o anel de água

Também nessa situação a temperatura considerada foi 290°C e os valores calculados valem para os dois casos.

Elemento	N	Σ_{a1}	$\Sigma_c (1-\beta)$	D
H2O	$2,3399 \cdot 10^{23}$	$9,9423 \cdot 10^{-3}$	2,3209	1,1939

Tabela 3.10-Parâmetros para o anel de água

3.4-Aplicação dos parâmetros nos métodos de homogeneização

3.4.1-Método 1

O método 1, conforme a descrição feita na seção 3.2.1, apresenta a seguinte composição percentual de materiais para as quatro regiões consideradas no cálculo:

Região componente	1	2	3	4
Núcleo (UO ₂ , H ₂ O, zircaloy)	80,5	0	100,0	0
tubo f. e carcaça (zircaloy)	14,625	75,0	0	75,0
anel de água	4,875	25,0	0	25,0

Tabela 3.11- Características das regiões - método 1

3.4.1.1-Caso 1

a-Região 1

Tabela 3.12

b-Região 2

Os parâmetros da região 2 podem ser obtidos pela aplicação dos percentuais da Tabela 3.11 nas Tabelas 3.9 e 3.10 . Os resultados estão apresentados na Tabela 3.13 .

c-Região 3

A partir da definição das regiões na Tabela 3.11, os parâmetros da região 3 são conforme a Tabela 3.7 (pág. 3.23)

d-Região 4

Tendo em vista as definições da Tabela 3.11

Tabela 3.12

Componente	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Tubo F. Carcapa (zirc.)	Σ_a	$8,0799 \cdot 10^{-4}$	$8,0799 \cdot 10^{-4}$	$8,0799 \cdot 10^{-4}$	$8,0799 \cdot 10^{-4}$	$8,0799 \cdot 10^{-4}$
	Σ_a (1- β_0)	0,040026	0,040026	0,040026	0,040026	0,040026
Anel água	Σ_a	$4,8469 \cdot 10^{-4}$	$4,8469 \cdot 10^{-4}$	$4,8469 \cdot 10^{-4}$	$4,8469 \cdot 10^{-4}$	$4,8469 \cdot 10^{-4}$
	Σ_a (1- β_0)	0,11314	0,11314	0,11314	0,11314	0,11314
Núcleo	Σ_a	0,12355	0,10427	0,08503	0,06572	0,04643
	Σ_a (1- β_0)	0,33387	0,37177	0,41215	0,44755	0,48546
Região 1	$\nu \Sigma_f$	0,18170	0,15141	0,12114	0,09890	0,06057
	Σ_a	0,12484	0,10556	0,086323	0,067013	0,047723
	Σ_a (1- β_0)	0,487086	0,524936	0,565316	0,600716	0,638626
	$\nu \Sigma_f$	0,54477	0,52868	0,51153	0,49920	0,48566
	$\nu \Sigma_f$	0,13170	0,15141	0,12114	0,09890	0,06057
						0,028443
						0,676516
						0,47285
						0,03028

Esta tabela é o resultado da aplicação da Tabela 3.11 nas Tabelas 3.7, 3.9 e 3.10 para a região 1

os parâmetros da região 4 são conforme a Tabela 3.13 .

Parâmetro Compon.	Σa	$\Sigma s(1-u)$	D
H2O	$2,4856 \cdot 10^3$	0,58023	-
zircaloy	$4,1435 \cdot 10^3$	0,20526	-
Região2/4	$6,6291 \cdot 10^3$	0,78549	0,42081

Tabela 3.13-Parâmetros das regiões 2 e 4-Método 1

3.4.1.2-Caso 2

a-Região 1

Conforme Tabela 3.14

b-Região 2

Com as mesmas considerações feitas para o caso 1, os resultados para essa região estão apresentados na Tabela 3.13

c-Região 3

A partir da definição das regiões na Tabela 3.11, os parâmetros dessa região são conforme a Tabela 3.8 (pág. 3.25).

d-Região 4

Pela aplicação dos resultados da Tabela 3.11 nas Tabelas 3.9 e 3.10, obtém-se os parâmetros da região 4, que são conforme a Tabela 3.13.

3.4.2-Método 2

O método 2 é conforme a descrição feita na seção

Tabela 3.14

E		0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Compon.	Σ_a	8,0799.10 ⁻⁴	8,0799.10 ⁻⁴	8,0799.10 ⁻⁴	8,0799.10 ⁻⁴	8,0799.10 ⁻⁴	8,0799.10 ⁻⁴
	Σ_c (i-c)	0,040026	0,040026	0,040026	0,040026	0,040026	0,040026
Anel de água	Σ_a	4,8469.10 ⁻⁴	4,8469.10 ⁻⁴	4,8964.10 ⁻⁴	4,8469.10 ⁻⁴	4,8469.10 ⁻⁴	4,8469.10 ⁻⁴
	Σ_c (i-c)	0,11314	0,11314	0,11314	0,11314	0,11314	0,11314
Núcleo	Σ_a	0,13111	0,11057	0,09003	0,06949	0,04395	0,02945
	Σ_c (i-c)	0,37575	0,41207	0,44840	0,48490	0,52104	0,55778
	$\nu \Sigma_f$	0,19330	0,16109	0,12887	0,09665	0,06443	0,03222
Região 1	Σ_a	0,13240	0,11186	9,1323.10 ⁻²	7,0783.10 ⁻²	5,0243.10 ⁻²	2,9743.10 ⁻²
	Σ_c (i-c)	0,52892	0,56524	0,60157	0,63807	0,67421	0,71095
1	ρ	0,50404	0,49230	0,48107	0,47024	0,46012	0,45003
	$\nu \Sigma_f$	0,19330	0,16109	0,12887	0,09665	0,06443	0,03222

Esta tabela é o resultado da aplicação da Tabela 3.11 nas Tabelas 3.8, 3.9 e 3.10 para a região 1

3.2.2 e apresenta a seguinte composição percentual de material para a várias regiões.

Região Compon.	1	2	3	4
Núcleo (UO ₂ , H ₂ O, zircaloy)	100,0	0	100,0	65,40
Tubo fluid carcaça (zircaloy)	0	75,0	0	25,95
Anel de água	0	25,0	0	8,65

Tabela 3.15- Características das regiões-Método 2

3.4.2.1-Caso 1

a-Região 1

Tendo em vista a Tabela 3.15 que define as regiões para o Método 2, os resultados para a região 1 são conforme os da Tabela 3.7 (pág. 3.23).

b-Região 2

Aplicando os resultados da Tabela 3.15, para a região 2, nas Tabelas 3.9 e 3.10, obtém-se os parâmetros dessa região como sendo os da Tabela 3.13 (pág. 3.30).

c-Região 3

Como pode ser visto na Tabela 3.15 a região 3 tem composição idêntica à região 1, portanto os seus parâmetros são conforme a Tabela 3.7 (pág. 3.23).

d-Região 4

Aplicando os resultados da Tabela 3.15 nas Tabelas 3.7, 3.9 e 3.10, obtém-se como parâmetros para a região 4 os da Tabela 3.16 a seguir.

3.4.2.2-Caso 2

Tabela 3.16

E		0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Compon.							
Tubo f. Carcaça (circ.)	Σ_a	$1,4337 \cdot 10^3$	$1,4337 \cdot 10^3$	$1,4337 \cdot 10^3$	$1,4337 \cdot 10^3$	$1,4337 \cdot 10^3$	$1,4337 \cdot 10^3$
	Σ_g	0,07102	0,07102	0,07102	0,07102	0,07102	0,07102
Anel de água	Σ_a	$8,6001 \cdot 10^4$	$8,6001 \cdot 10^4$	$8,6001 \cdot 10^4$	$8,6001 \cdot 10^4$	$8,6001 \cdot 10^4$	$8,6001 \cdot 10^4$
	Σ_g	0,20076	0,20076	0,20076	0,20076	0,20076	0,20076
Núcleo	Σ_a	0,10038	0,09471	0,06908	0,05339	0,03772	0,02206
	Σ_g	0,27124	0,30203	0,33484	0,36360	0,39439	0,42518
	$\nu \Sigma_f$	0,14761	0,12301	0,09841	0,08035	0,04921	0,02460
	Σ_a	0,10267	0,08700	0,07137	0,05568	0,04001	0,02435
Região 4	Σ_s	0,54302	0,57381	0,60662	0,63538	0,66617	0,69696
	$\nu \Sigma_f$	0,51624	0,50443	0,49165	0,48235	0,47202	0,46212
		0,14761	0,12301	0,09841	0,08035	0,04921	0,02460

Esta tabela é o resultado da aplicação da Tabela 3.15 nas Tabelas 3.7, 3.9 e 3.10 para a região 4

a-Região 1

Tendo em vista a Tabela 3.15, os resultados para essa região não conforme os da Tabela 3.8 (pág. 3.25).

b-Região 2

Aplicando os resultados da Tabela 3.15, referentes a essa região, nas Tabelas 3.9 e 3.10, obtém-se parâmetros conforme os da Tabela 3.13 (pág. 3.30).

c-Região 3

Como a região 3 tem a mesma composição da região 1, os seus parâmetros são conforme a Tabela 3.8 (pág. 3.25) .

d-Região 4

Aplicando os resultados da Tabela 3.15 nas Tabelas 3.8, 3.9 e 3.10, obtém-se os parâmetros dessa região os quais estão na Tabela 3.17 a seguir.

3.5-Saídas do código ODIG

Os valores do fator de multiplicação obtidos, bem como os gráficos de fluxo normalizado X distância fornecidos pelo código estão a seguir. Como a forma da curva fluxo X distância não varia dentro de um mesmo método, foram apresentados apenas dois exemplos de gráfico de saída do código, ou seja, um para o Método 1 e o outro para o Método 2.

Tabela 3.17

Compon.	E								
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9			
Tubo f. Carcaça (zirc.)	\bar{z}_a	$1,4737 \cdot 10^3$	$1,4737 \cdot 10^3$	$1,4737 \cdot 10^3$	$1,4737 \cdot 10^3$	$1,4737 \cdot 10^3$			
	\bar{z}_s (1- \bar{z}_s)	0,07102	0,07102	0,07102	0,07102	0,07102			
Anel de água	\bar{z}_a	$8,6001 \cdot 10^4$	$8,6001 \cdot 10^4$	$8,6001 \cdot 10^4$	$8,6001 \cdot 10^4$	$8,6001 \cdot 10^4$			
	\bar{z}_s (1- \bar{z}_s)	0,20076	0,20076	0,20076	0,20076	0,20076			
Núcleo	\bar{z}_a	0,10652	0,08983	0,07314	0,05545	0,03977			
	\bar{z}_s (1- \bar{z}_s)	0,30527	0,33478	0,36429	0,39394	0,42331			
Região 4	\bar{z}_a	0,15704	0,13087	0,10470	0,07852	0,05235			
	\bar{z}_s (1- \bar{z}_s)	0,10881	$9,2124 \cdot 10^2$	$7,5434 \cdot 10^2$	$5,8744 \cdot 10^2$	$4,2064 \cdot 10^2$			
	\bar{z}_a	0,57705	0,60656	0,63607	0,65572	0,69509			
	\bar{z}_s (1- \bar{z}_s)	0,48601	0,47709	0,46849	0,46011	0,45219			
	\bar{z}_a	0,15704	0,13987	0,10470	0,07852	0,05235			
	\bar{z}_s (1- \bar{z}_s)								
	\bar{z}_a								
	\bar{z}_s (1- \bar{z}_s)								

Esta tabela é o resultado da aplicação da Tabela 3.15 nas Tabelas 3.8, 3.9 e 3.10 para a região 4

E	Método 1		Método 2	
	Caso 1	Caso 2	Caso 1	Caso 2
0,4	1,4153	1,4242	1,4180	1,4271
0,5	1,3975	1,4070	1,4006	1,4102
0,6	1,3689	1,3798	1,3723	1,3834
0,7	1,3240	1,3343	1,3306	1,3384
0,8	1,2328	1,2487	1,2380	1,2537
0,9	1,0209	1,0442	1,0251	1,0489

Tabela 3.18-Valores de K-efetivo obtidos através do código ODDG

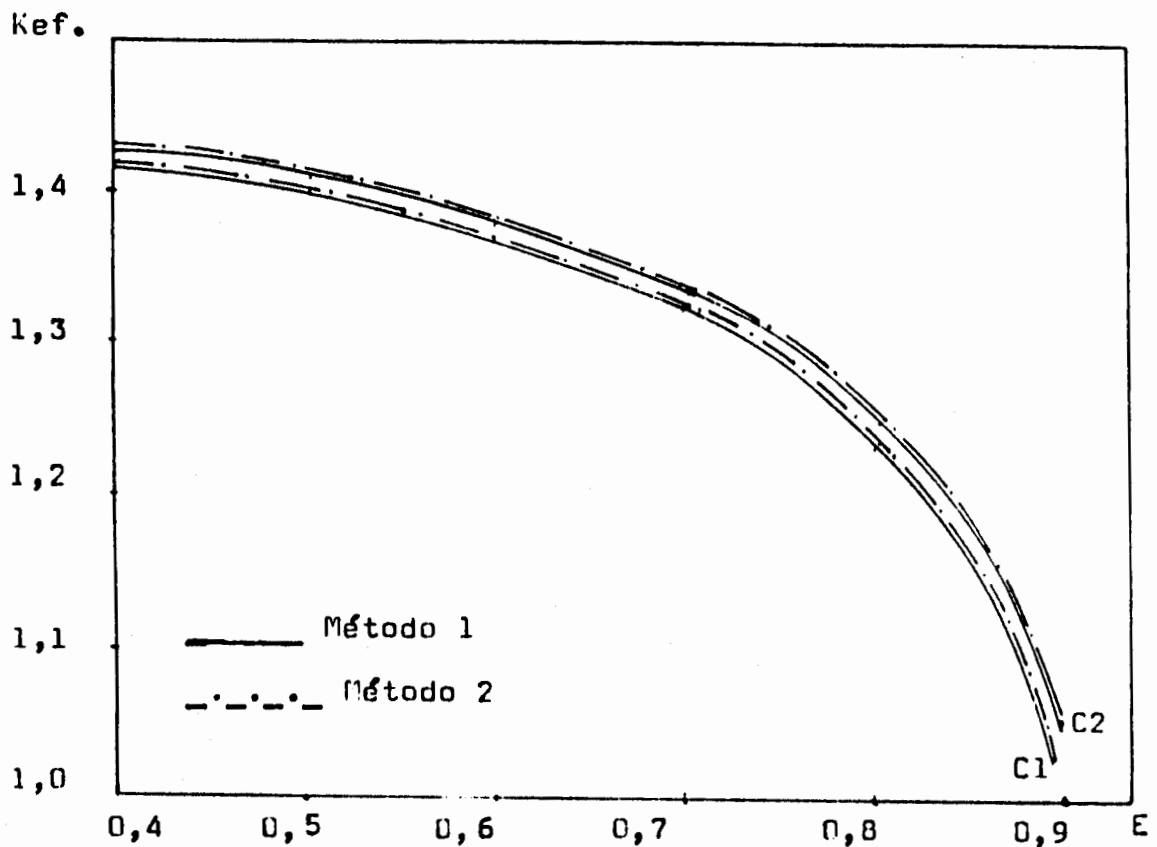


Gráfico 3.1-Valores de Kefetivo X E -código ODDG

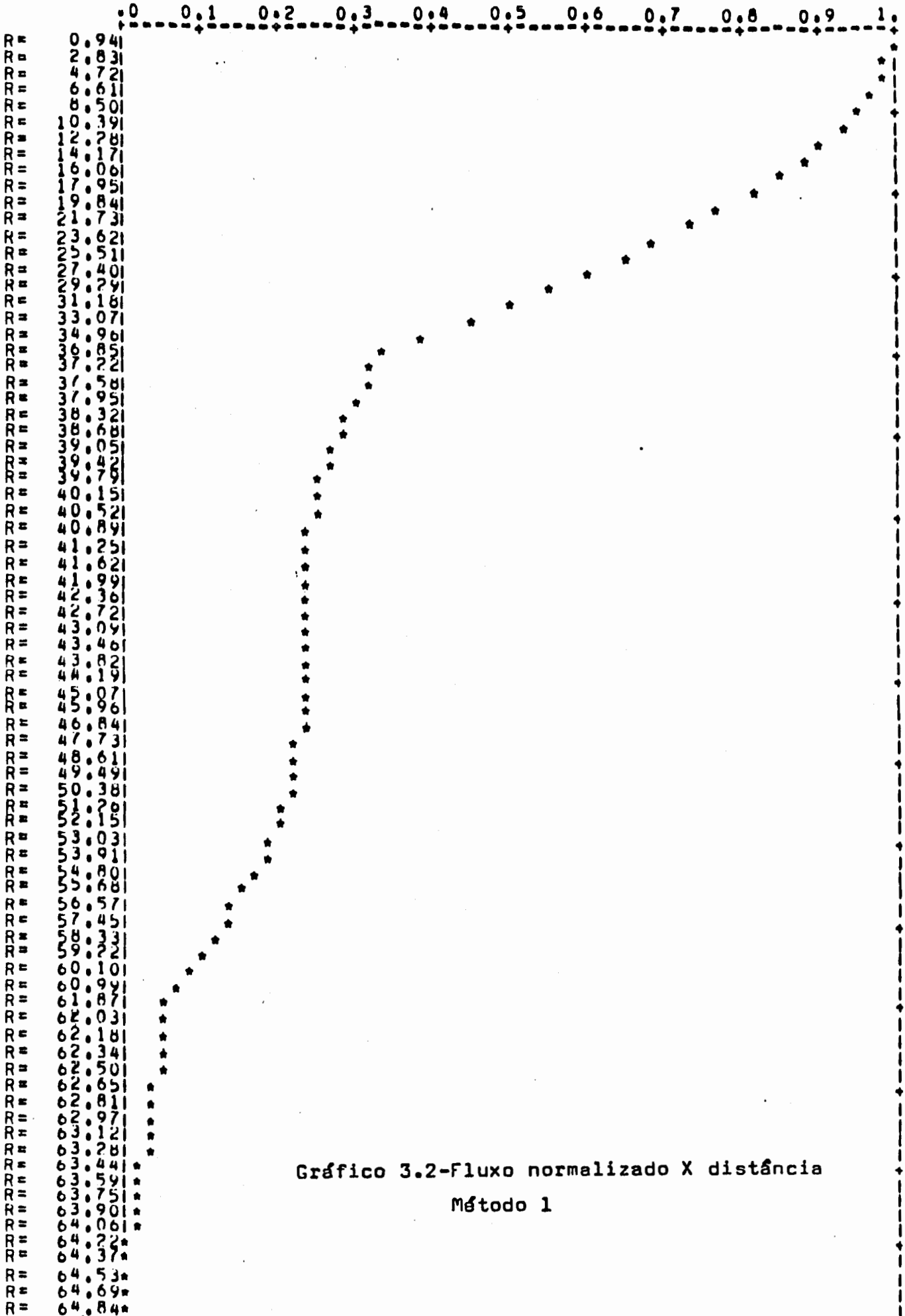


Gráfico 3.2-Fluxo normalizado X distância
Método 1

3.6-Conclusões

Como o código ODOG efetua os cálculos de criticalidade para apenas um grupo de neutrons e considerando que nos cálculos descritos anteriormente foram usadas seções de choque à energia de 0,0253 ev, torna-se portanto, não adequado o seu uso no presente caso, para a determinação do valor de Kefetivo, pois não foram levados em conta aspectos importantes tal como o da moderação. Entretanto, apesar dos valores em termos exatos não serem corretos, a utilização deste código oferece o comportamento correto do fluxo de neutrons nas várias regiões e para os diferentes métodos de homogeneização.

Convém notar que se os dados de entrada para o código ODOG fossem obtidos através da técnica de colapso de parâmetros (média ponderada em função do intervalo de energia), sendo estes calculados por um código baseado na teoria de multigrupo, tal como o LEOPARD, poder-se-ia considerar os valores de Kefetivo algo próximos da realidade, pois embutido nesses parâmetros estariam o efeito da moderação e das heterogeneidades do núcleo.

A partir dos resultados encontrados na seção 3.5 pode-se fazer algumas considerações:

Em relação aos métodos de homogeneização, vê-se que os valores de Kefetivo obtidos pelo método 2 foram maiores do que aqueles obtidos pelo método 1. Isto se deve ao fato que no método 2 considerou-se o núcleo central e os do primeiro anel sem serem homogeneizados com o tubo de fluidização, anel de ánuca e carcaça. Como esses núcleos estão em uma região de maior fluxo, a sua contribuição para os valores de Kefetivo é maior quando considerados separadamente, ou seja, não homogeneizados com o tubo de fluidização, anel de ánuca e carcaça. Conclui-se daí que

para estudos futuros, onde seja permitido um maior número de regiões é fisicamente mais realístico que se considere as regiões dos núcleos sempre separadamente.

Pode-se ver do acima exposto a grande importância dos métodos de homogeneização nos cálculos de criticalidade, pois apenas com um diferente tratamento de regiões compostas de materiais com baixas seções de choque, como o tubo de fluidização e a carcaça, introduziu-se consideráveis mudanças no valor de $K_{efetivo}$, como pode ser visto através da comparação dos resultados dos dois métodos.

Outra observação interessante é que devido à baixa absorção de neutrons nas regiões do tubo de fluidização, anel de água e carcaça, o fluxo de neutrons é praticamente constante nessas regiões, como pode ser visto no gráficos de saída do código.

C A P Í T U L O 4

Métodos de homogeneização para código do tipo "cell calculation" aplicados ao Reator Nuclear a Leito Fluidizado

4.1-Introdução

Como já foi discutido no capítulo 3, é de fundamental importância no estudo de física de reatores a determinação das seções de choque e demais parâmetros envolvidos no cálculo de criticalidade. No capítulo precedente verificou-se o procedimento de cálculo desses parâmetros nucleares, bem como o cálculo de criticalidade para o reator. Na verdade, os cálculos de seção de choque e parâmetros nucleares são feitos através de modelos mais complexos desenvolvidos ao longo desses anos, os quais são resolvidos com o auxílio de computadores. A conjugação desses modelos resultou em códigos nucleares comerciais utilizados largamente na indústria. Os parâmetros em alguns desses códigos são obtidos através da teoria de multigrupo, como sendo uma média em intervalos apropriados de energia de neutrons. Estes parâmetros servem de entrada para códigos que fazem cálculos multiregionais, multidimensionais utilizando a teoria de multigrupo, tratando as regiões circundadas por vazios ou superfícies refletoras. Estes códigos fornecem o valor do fator de multiplicação numa porção do núcleo ou no total do reator.

Um esquema de cálculo global para o reator pode ser:

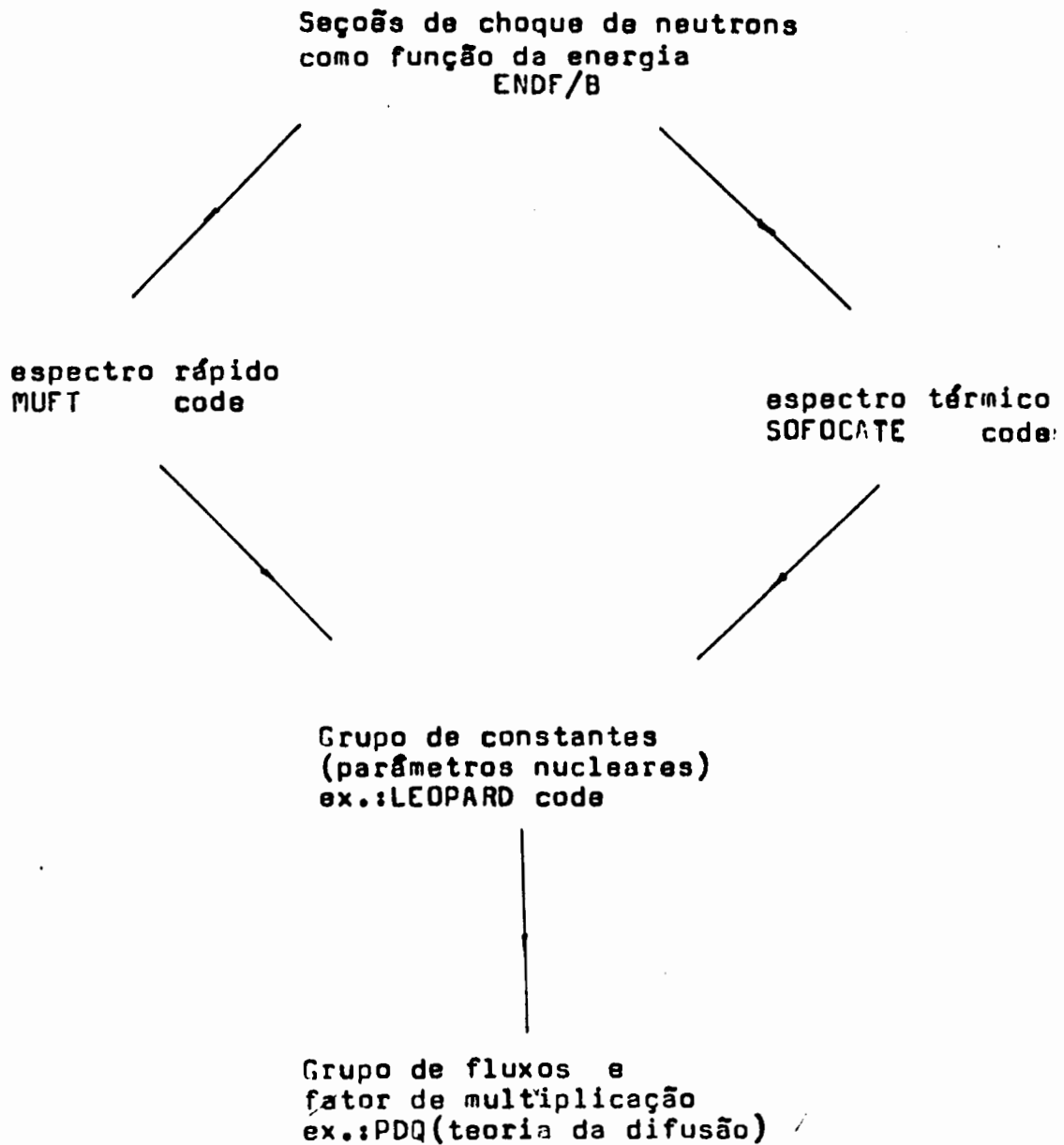


Figure 4.1-Sistema de códigos computacionais utilizados
no projeto de reatores

Neste estudo desenvolveu-se e comparou-se métodos de homogenização aplicados ao R.N.L.F., para o cálculo de parâmetros nucleares através do código LEOPARD.

4.2-0 código LEOPARD

O programa computacional LEOPARD (abreviação para Lifetime Evaluating Operations to the Analysis of Reactor Designs) é baseado no modelo Muft-Sofocate modificado por Arnold e Strawbridge/22/.

Muft é um código que descreve a moderação nos níveis de energia entre 10 Mev e 0,625 ev divididos em 54 grupos de energia. É usada a aproximação Greuling-Goertzel, que provê um tratamento mais adequado da moderação de neutrons em materiais de massa intermediária, quando comparada com os modelos da teoria da idade (materiais de grande massa) ou com o do hidrogênio (exato). No LEOPARD, juntamente a esse método, é usada a aproximação do tipo B_1 , que é similar à P_1 (desdobramento da equação de transporte de neutrons, para um grupo e em uma dimensão, em polinômios de Legendre), exeto por um fator gama, que nos casos de anisotropia linear oferece resultados bastante acurados. Afim de apurar, de maneira aproximada, os efeitos de fuga, a dependência espacial do fluxo é aproximada na forma de Fourier $\exp(iBx)$.

O código Sofocate, que calcula as seções de choque para os grupos designados como térmicos, descreve a termalização dos neutrons nos níveis de energia entre 0,625 ev e 0 ev divididos em 172 níveis de energia. Utiliza o espectro de distribuição de Maxwell-Boltzmann para os neutrons e o modelo de Wigner-Wilkins para o meio.

Ambos os modelos, Muft e Sofocate, fazem os cálculos para meios homogêneos. Consequentemente qualquer efeito dependente de heterogeneidades deve ser levado em conta pela modificação dos resultados homogêneos. O método sobre o qual se baseia o LEOPARD/22/ trata os efeitos das heterogeneidades no cálculo

do fator de utilização térmico, na absorção ressonante e no fator da fissão rápida. Outra particularidade do LEOPARD é que os fatores de desvantagem são dependentes da energia e o seu cálculo é inerente ao cálculo do espectro, conforme procedimento descrito na referência bibliográfica /22/.

Os cálculos de multigrupo Muft-Sofocate são ordinariamente editados para um pequeno grupo de constantes, sendo estas usadas nos códigos standard que se baseiam na teoria da difusão. No caso do LEOPARD onde são usados quatro grupos, tem-se: grupo1- 10Mev a 0,821Mev; grupo2- 821Kev a 5,53Kev; grupo3- 5530ev a 0,625ev; grupo4- 0,625ev a 0ev.

O LEOPARD calcula, independentemente de posição, o espectro neutrônico e opcionalmente a variação desse espectro com a queima de combustível. Este cálculo é feito, como já mencionado, pelo acoplamento dos modelos Muft-Sofocate e no caso de queima com as equações de depleção para as cadeias de nuclídeos mais importantes. As cadeias usadas no LEOPARD são:

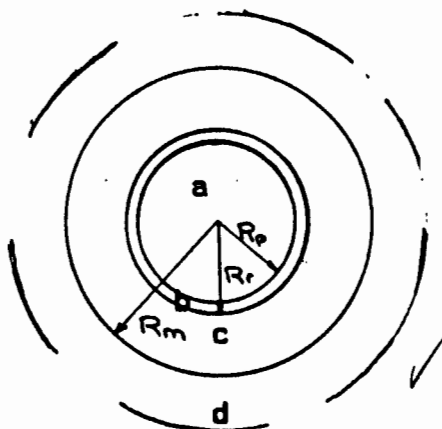
- (1) Tório 232 --- Urânio 236
- (2) Urânio 238 --- Plutônio 242
- (3) Promethium 149, Samário 149
- (4) Iodo 135, Xenônio 135
- (5) Pseudo-elemento que leva em consideração todos os outros produtos de fissão

O LEOPARD requer apenas dados básicos de entrada. A geometria, composições e temperaturas são fornecidas pelo usuário. O código corrige os dados de entrada pelas temperaturas, computa as densidades atômicas além de três seções de choque na região epitérmica (Σ_s para a pastilha de combustível, Σ_m para o revestimento e o moderador, Σ_a para a célula homogeneizada) a serem usadas no cálculo do espectro.

No que se refere a geometria, o LEOPARD assume que todo o reator é composto por um grande número de células combustíveis arranjadas entre elas em arranjo quadrado ou hexagonal. Cada uma dessas células unitárias contém uma barra cilíndrica de combustível, um revestimento metálico ao redor dessa barra e um moderador. Num reator verdadeiro esta geometria é adequada para uma grande massa de combustível, mas comumente uma percentagem considerável do núcleo é tomada por passagens de barras de controle, aberturas de água, estrutura do combustível, estruturas em geral e etc. O LEOPARD leva isto em conta através de uma região fictícia a ser descrita de forma inteiramente análoga à descrição de uma região real da célula unitária. O espectro calculado é dado na forma de uma célula unitária equivalente.

Somado às composições regionais discutidas abaixo, o usuário deve prover uma "non-lattice fraction", a qual é, por definição, a fração do núcleo que não é célula unitária.

Uma descrição típica de uma dessas células para o R.N.L.F. pode ser:



a-Pastilha de combustível ("pellet")-100% UO₂

b-Revestimento - 100% zircaloy 4

c-Moderador - 100% H₂O

d-Extra - 25% H₂O, 75% zircaloy 4

Figura 4.2-Esquema da célula unitária do código LEOPARD

4.3-Métodos de homogeinização

Afim de se obter uma melhor representação para o R.N.L.F. nos dados de entrada do código LEOPARD, foram desenvolvidos e comparados alguns métodos de homogeinização como descritos no seguimento desse texto. Esses métodos basearam-se no R.N.L.F. com as seguintes características:

número de módulos - 19 (R=65,0 cm)

combustível - UO₂ - 2%

temperaturas- 308° C ("resonance", pellet, revestimento, moderador)

pressão - 2320 psia

E	H	d	Re	He	B ²
0,4	70	2,57	67,57	75,15	0,00301
0,5	84	2,58	67,58	89,17	0,00251
0,6	105	2,55	67,55	110,10	0,00208
0,7	140	2,45	67,45	144,91	0,00174
0,8	210	2,15	67,15	214,28	0,00150
0,9	420	1,94	66,94	423,88	0,00134

Tabela 4.1-Buckling do R.N.L.F. para diferentes condições de fluidização (dimensões em cm)

com

$$B^2 = (2,4048/Re)^2 + (\pi/He)^2$$

Em todos os métodos existe um esquema da célula unitária em função do módulo do R.N.L.F., além do esquema da super-célula (considerando a região extra), apesar de que nos cálculos não foi considerada a "non-lattice fraction" pois o interesse não era se determinar os valores exatos dos parâmetros e sim seus comportamentos, sendo importante, conseqüentemente, a manutenção das mesmas condições entre os vários métodos afim de permitir a comparação entre eles.

4.3.1-Método 1

A primeira concepção de uma estrutura unitária que represente o R.N.L.F. para o código LEOPARD é sem dúvida considerar cada módulo como sendo uma célula. Desta forma a partir de um módulo do R.N.L.F. (conforme esquema da figura 3.2) e tendo em vista o esquema da célula unitária sobre a qual o código efetua os cálculos (conforme figura 4.2), considerou-se a região do material combustível, que daqui para diante será designada simplesmente como pellet, como sendo composta pelo material do interior do núcleo (esferas de UO_2 + zircaloy do revestimento + moderador). O tubo de fluidização como sendo a região do revestimento e a água entre o tubo de fluidização e a carcaça hexagonal como sendo a região do moderador. A região extra neste caso seria composta pela carcaça hexagonal.

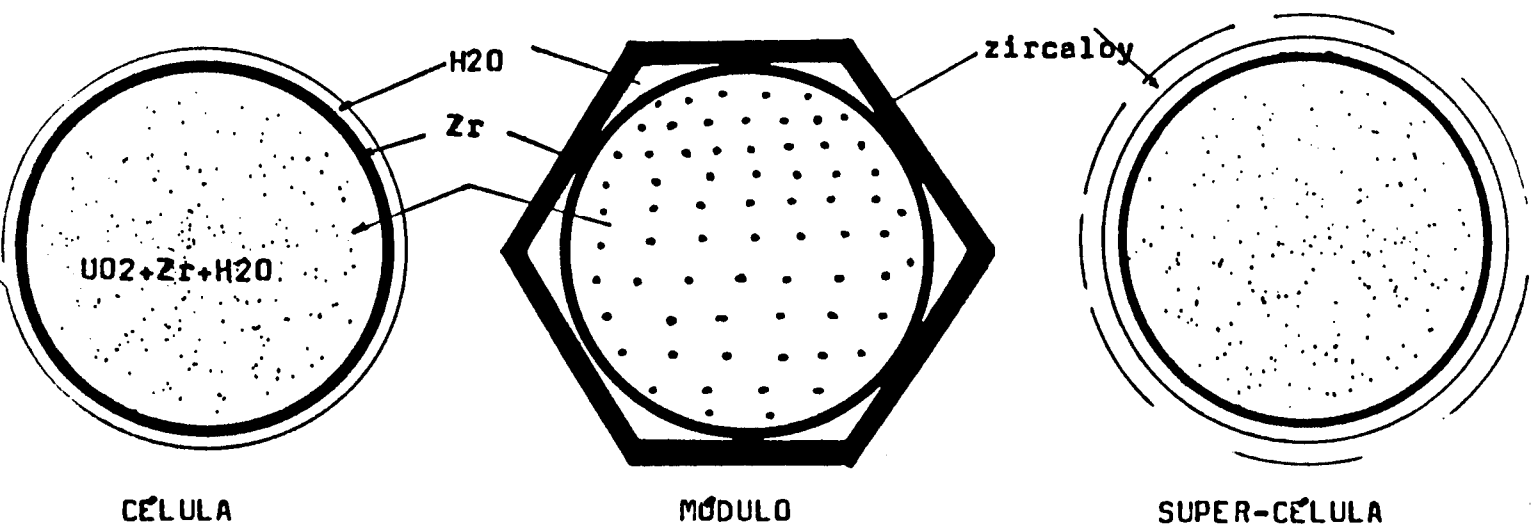


Figura 4.3-Modelo das células-Método 1

4.3.1.1-Determinação das frações de volume das regiões na célula(célula fria)

Recordando os resultados obtidos na seção 3.2 do capítulo anterior, as frações de volume para a célula unitária são:

$$FV_{\text{pellet}} = (\text{área livre do tubo de fluidiz.} \times H) / \text{área interna da carcaça.} \cdot H = 490,87 / 558,72 = 0,8786$$

$$FV_{\text{revest.}} = (\text{área ocupada pelo tubo de fluidiz.} - \text{área livre tubo de fluidiz.}) / \text{área interna da carcaça hexagonal} = (506,71 - 490,87) / 558,72 = 0,0283$$

$$FV_{\text{moderador}} = (\text{área interna carcaça hexag.} - \text{área ocupada tubo de fluidiz.}) / \text{área interna da carcaça hexagonal} = (558,72 - 506,71) / 558,72 = 0,0931$$

$$\text{Fração de volume do reator que não é célula unitária} = (698,50 - 558,72) / 698,50 = 0,200$$

4.3.1.2-Composição percentual das regiões

a-pellet

E	H2O	zircaloy	UO2
0,4	40,0	19,8	40,2
0,5	50,0	16,5	33,5
0,6	60,0	13,2	26,8
0,7	70,0	9,9	20,1
0,8	80,0	6,6	13,4
0,9	90,0	3,3	6,7

Tabela 4.2-Composição percentual-região do combustível

b-revestimento

100% zircaloy 4

c-moderador

100% H2O

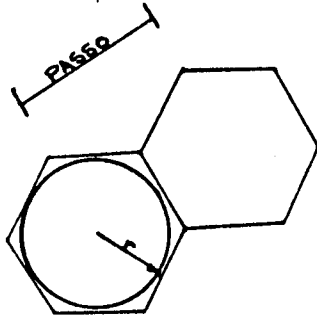
d-extra

100% zircaloy 4

4.3.1.3-Geometria

Conforme a figura 3.2 pode-se verificar que para este método: raio pellet=12,5 cm e raio do revestimento =12,7 cm.

É de fundamental importância nos cálculos dos parâmetros que as frações de volume entre pellet, revestimento e moderador sejam respeitadas. As frações de volume da pellet e do revestimento para os cálculos no LEOPARD são função dos seus raios, enquanto que a do moderador é função do passo entre uma célula e outra, e da sua disposição relativa, já que o código aceita arranjos do tipo quadrado e hexagonal. Para este método foi escolhido o arranjo hexagonal que tem como expressão:



Considerando que a área do hexágono com um círculo de raio r inscrito é dada por:

$$A_h = 6 \cdot r^2 \cdot \text{tang}30^\circ$$

Desdobrando este hexágono em um círculo de raio R , obtem-se:

$$R = \sqrt{(6/\pi) \cdot r^2 \cdot \text{tang}30^\circ} \quad (4.1)$$

Como $r = \text{passo}/2$, o raio da região do moderador vale:

$$R_m = 0,525 \cdot \text{passo} \quad (4.2)$$

Mas o que interessa, já que a variável de entrada no código é o passo, é relacionar esse valor com a fração de volume do moderador para que o problema seja bem representado. Como foi visto na seção 4.3.1.1

$FV_{\text{moderador}} = (\text{área interna da carcaça} - \text{área ocupada tubo de fluid.}) / \text{área interna carcaça}$

$$FV_{\text{moderador}} = \sqrt{\frac{1,5(\text{tang}30^\circ/\pi)\text{passo}^2 - R_{\text{revest.}}^2}{1,5 \text{ tang}30^\circ \cdot \text{passo}^2}}$$

$$\text{passo} = \sqrt{(3,6276 \cdot R_{\text{revest.}}^2) / (1 - FV_{\text{moderador}})} \quad (4.3)$$

Então para este método onde $R_{\text{revest.}} = 12,70$ cm e $FV_{\text{moderador}} = 0,0931$ o passo vale: $\text{Passo} = 25,4$ cm

4.3.2-Método 2

A exemplo de cálculos efetuados para reatores do tipo PWR, utilizando o código LEOPARD, onde a célula unitária é considerada como tendo sua região de combustível, composta por todo o combustível de um assembleie, reunido no centro deste na forma de uma barra cilíndrica, torna esta hipótese também atrativa para o R.N.L.F.. Desta forma a partir de um módulo básico do R.N.L.F. (conforme figura 3.2) e tendo em vista o esquema da célula unitária sobre o qual o código efetua os cálculos (conforme figura 4.2), considerou-se todo o combustível reunido no centro do módulo, na forma de uma única barra cilíndrica, como sendo a região pellet. A região do revestimento compõe-se do revestimento das esferas desenvolvido ao longo da barra cilíndrica. A região do moderador composta pela água do interior do núcleo. A carcaça hexagonal como sendo a região extra.

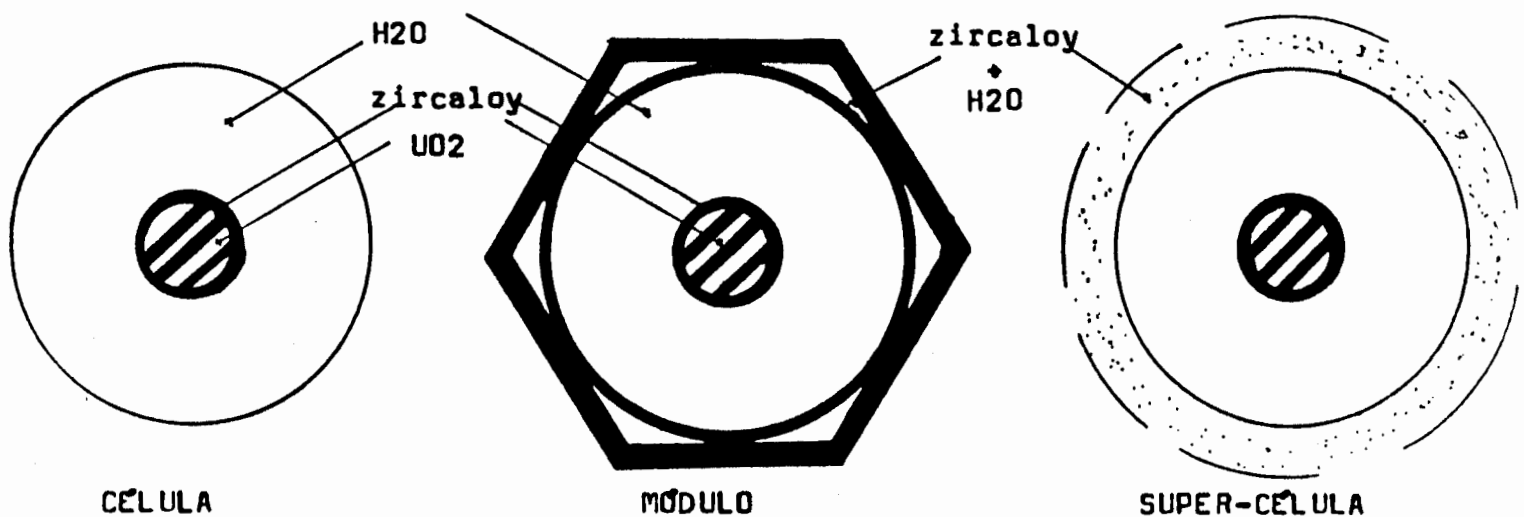


Figura 4.4-Modelo das células-Método 2

4.3.2.1-Determinação das frações de volume das regiões na célula(célula fria)

$$FV_{\text{pellet}} = (1-E) \left(\frac{d-2c}{d} \right)^3$$

$$FV_{\text{revest.}} = (1-E) \left(1 - \left(\frac{d-2c}{d} \right)^3 \right)$$

$$FV_{\text{moderador}} = E$$

E	pellet	revestimento	moderador
0,4	0,402	0,198	0,4
0,5	0,335	0,165	0,5
0,6	0,268	0,132	0,6
0,7	0,201	0,099	0,7
0,8	0,134	0,066	0,8
0,9	0,067	0,033	0,9

Tabela 4.3-Frações de volume das regiões-Método 2

4.3.2.2-Composição percentual das regiões

a-pellet	b-revestimento	c-moderador	d-extra
100% UO ₂	100% zircaloy	100% H ₂ O	75% zirc. 25% H ₂ O

4.3.2.3-Geometria

Lembrando as dimensões do módulo do R.N.L. F. conforme a figura 3.2 e tendo em mente os valores das composições volumétricas das várias regiões, pode-se determinar as dimensões da célula unitária para as diferentes condições de fluidização. Tomando-se uma altura de leito unitária, tem-se:

Área da região.H(=1) = Área transversal do núcleo.H.FV da região

ção

onde

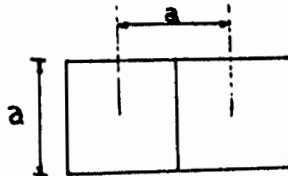
$$\text{área transversal do núcleo} = 490,87 \text{ cm}^2$$

E	Apellet	Arevestimento	Amoderador
0,4	197,33	97,19	196,35
0,5	164,44	80,99	245,44
0,6	131,55	64,80	294,52
0,7	98,66	48,60	343,61
0,8	65,78	32,40	392,70
0,9	32,89	16,20	441,78

Tabela 4.4-Área ocupada por cada região no módulo (cm^2)

$$\text{Raio da região} = \sqrt{\text{área da região}/\pi}$$

Para o caso específico da região do moderador, onde o raio é função do passo, torna-se necessário a determinação desse parâmetro para as várias condições de fluidização. Neste método foi escolhida a disposição de arranjo quadrado entre as células.



Ao se desdobrar a célula em um círculo equivalente de raio R tem-se:

$$\pi \cdot Rm^2 = a^2$$

$$\text{passo} = a = Rm \cdot \sqrt{\pi} \quad (4.4)$$

$$FV_{\text{moderador}} = \frac{\text{volume total célula} - \text{volume}(\text{pellet} + \text{revestimento})}{\text{Volume total célula}}$$

$$FV_{\text{moderador}} = 1 - ((R_{\text{revest.}})^2 / (\text{passo})^2)$$

$$\text{passo} = \sqrt{\pi \cdot (R_{\text{revest.}})^2 / (1 - FV_{\text{moderador}})} \quad (4.5)$$

Desta forma obtêm-se:

E	R _{pellet}	R _{revestimento}	passo
0,4	7,93	9,68	22,16
0,5	7,24	8,84	22,16
0,6	6,47	7,91	22,16
0,7	5,60	6,85	22,16
0,8	4,58	5,59	22,16
0,9	3,24	3,95	22,16

Tabela 4.5-Geometria da célula para entrada no código (cm)

4.3.3-Método 3

Afim de se ter uma unidade representativa do R.N.L.F. que permita cálculos mais detalhados, ou por outra, para possibilitar cálculos dentro de uma malha menor, partiu-se para o desenvolvimento de métodos de homogeneização onde se considerou barras hipotéticas no interior do núcleo. Outra motivação para o desenvolvimento de um método de cálculo detalhado é no que se refere ao estudo de possíveis não uniformidades no leito do R.N.L.F. .

Sendo assim a partir de um módulo do R.N.L.F. (conforme figura 3.2) e tendo em vista o esquema sobre o qual o código efetua os cálculos (esquema célula unitária-figura 4.2), considerou-se o núcleo com barras de combustível constituídas de colunas de esferas, com o intervalo entre elas preenchido por água, como sendo a região pellet. A região do revestimento cons-

tituida por uma mistura homogênea do material de revestimento das esferas e uma porção de água. A região do moderador composta pelo restante da água do núcleo e o tubo de fluidização juntamente com o anel de água e a carcaça hexagonal como a região extra.

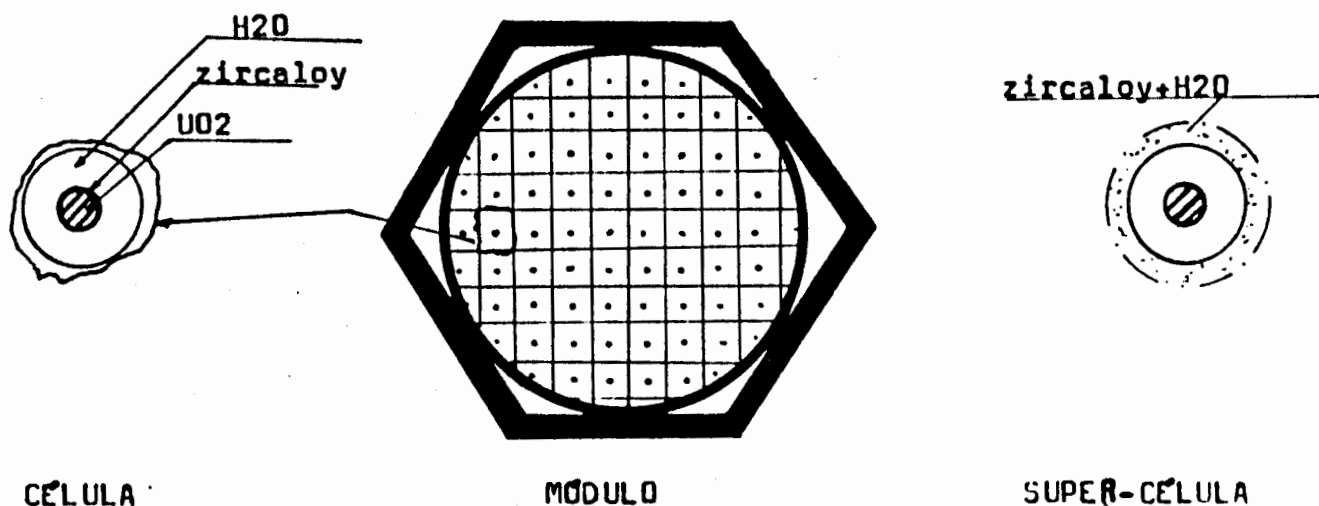
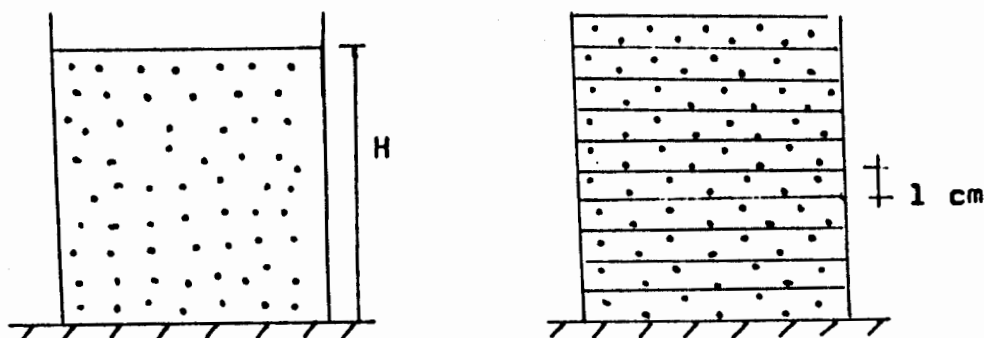


Figura 4.5-Modelo das células-Método 3

*Representação esquemática das células no módulo

4.3.3.1-Geometria

Partindo da consideração que o leito é homogêneo, ao se dividir o número total de esferas do interior do núcleo pela altura, obtém-se o número médio de esferas por unidade de altura correspondente a cada condição de fluidização.



Chamando de

n = número de esferas de combustível

H = altura do leito

A_N = área transversal do núcleo (490,87 cm²)

tem-se:

$I = n/H$ = número médio de esferas por seção transversal

$A_N/(n/H) = (A_N \cdot H)/n$ = área da célula unitária

Lembrando a equação (2.1)

$$E = 1 - (2 \cdot n \cdot d^3) / (3 \cdot D^2 \cdot H)$$

tem-se para $H=70$ cm; $E=0,4$; $d=0,8$ cm; $D=25,0$ cm o número de esferas é: $n=76904$ esferas

E	H	$I=n/H$	A_N/I	passo
0,4	70	1099	0,44625	0,67
0,5	84	916	0,53472	0,73
0,6	105	732	0,67059	0,82
0,7	140	549	0,89412	0,95
0,8	210	366	2,01176	1,16
0,9	420	183	2,68235	1,64

Tabela 4.6-Geometria das células para o método 3 (cm)

Neste caso

$$\text{passo} = A_N/I$$

4.3.3.2-Composição percentual das regiões

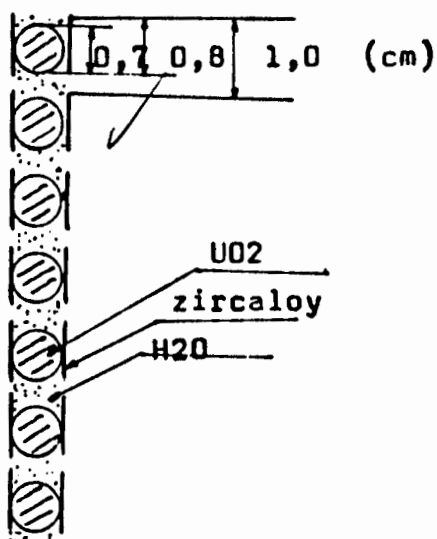


Figura 4.6-Modelo da barra de combustível

Chamando de d^* o diâmetro da esfera de UO_2 ($d^*=d-2c$
 $=0,7$ cm) tem-se:

a-pellet

FV de UO_2 = Volume da esfera de diâmetro d^* /volume do cilindro de diâmetro d^* e altura $=1,0$ cm = 46,9%

FV de H_2O = $100-46,9 = 53,1\%$

b-revestimento

FV de zircaloy = volume de zircaloy/volume total = 80,0%

FV de H_2O = $100 -$ FV de zircaloy = 20,0%

c-moderador

100% H_2O

d-extra

75% zircaloy , 25% H_2O

4.3.4. Método 4

Dentro da mesma linha do método anterior, considerou-se o combustível do interior do núcleo distribuído na forma de barras cilíndricas. Essas barras sendo compostas unicamente por UO_2 , revestidas de zircaloy, tendo o seu diâmetro igual ao diâmetro das esferas de combustível.

Desta forma a partir de um módulo básico do R.N.L. F. (conforme figura 3.2) e tendo em vista o esquema da célula unitária sobre o qual o código efetua os cálculos (conforme figura 4.2), considerou-se o combustível no interior do núcleo na forma de barras cilíndricas, de mesmo diâmetro das esferas de combustível, como sendo a região pellet. A região do revestimento composta pelo revestimento das esferas de combustível desenvolvido ao redor dessas barras. A água do interior do núcleo como sendo a região do moderador. O tubo de fluidização juntamente com o anel de água e a carcaça hexagonal como sendo a região extra.

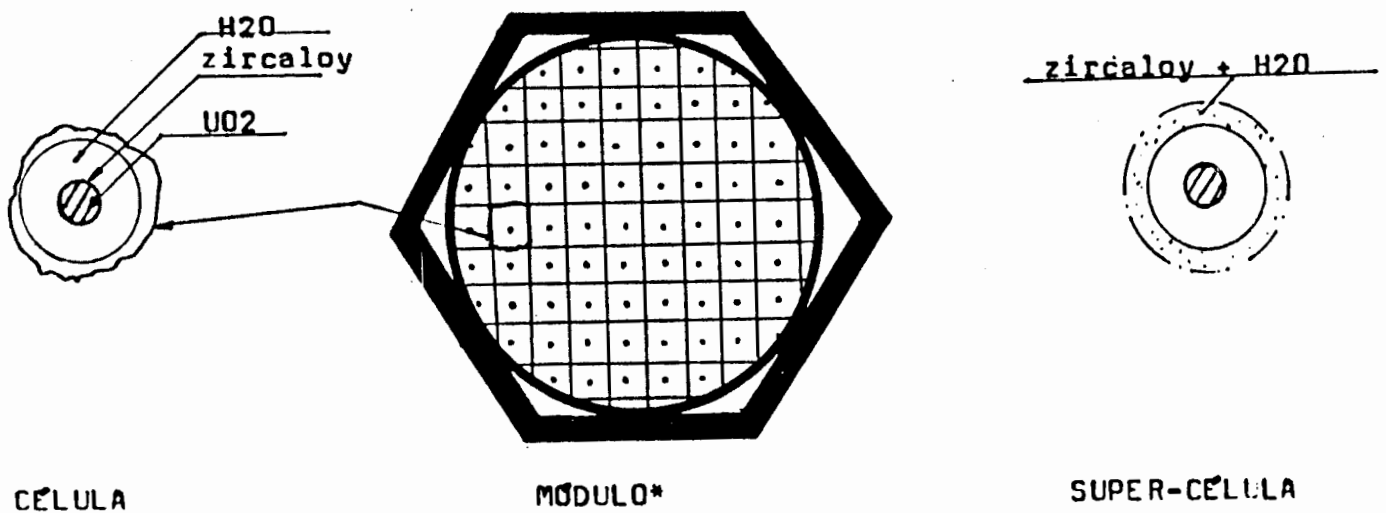


Figura 4.7-Modelo das células para o Método 4

*Representação esquemática da disposição das células no módulo

4.3.4.1-Determinação das frações de volume na célula (célula fria)

$$FV_{\text{pellet}} = (1-E) \cdot ((d-2c)/d)^3$$

$$FV_{\text{revest.}} = (1-E) \cdot (1 - ((d-2c)/d)^3)$$

$$FV_{\text{moderador}} = E$$

E	pellet	revestimento	moderador
0,4	0,402	0,198	0,4
0,5	0,335	0,165	0,5
0,6	0,268	0,132	0,6
0,7	0,201	0,099	0,7
0,8	0,134	0,066	0,8
0,9	0,067	0,033	0,9

Tabela 4.7-Frações de volume das regiões-Método 4

4.3.4.2-Composição percentual das regiões

a-pellet - 100% UO₂

b-revestimento - 100% zircaloy

c-moderador - 100% H₂O

d-extra - 75% zircaloy , 25% H₂O

4.3.4.3-Geometria

área da região.H = área do núcleo.FVregião.H

E	Apellet	Arevestimento	Soma A
0,4	197,33	97,19	294,52
0,5	164,44	80,99	245,43
0,6	131,55	64,80	196,35
0,7	98,66	48,60	147,26
0,8	65,78	32,40	98,18
0,9	32,89	16,20	48,89

Tabela 4.8-Área ocupada pelas regiões no módulo (cm²)

Área transversal de uma pastilha = $(0,7)^2 \cdot \pi/4 = 0,3848 \text{ cm}^2$

Área do núcleo de um módulo = 490,87 cm²

Apellet/Área trans. pastilha = N = número de barras de combustível

raio do moderador = $\sqrt{\text{Área do núcleo}/(N \cdot \pi)}$

passo(arranjo quadrado) = raio do moderador $\cdot \sqrt{\pi}$

E	N	A _N /N	Rmoderador	passo
0,4	513	0,95686	0,552	0,98
0,5	427	1,14958	0,605	1,07
0,6	342	1,43529	0,676	1,20
0,7	256	1,91746	0,781	1,38
0,8	171	2,87058	0,956	1,69
0,9	85	5,77494	1,356	2,40

Tabela 4.9-determinação do passo para o Método 4

4.3.5-Método 5

Ainda dentro da mesma linha dos métodos anteriores propôs-se que se partir de um módulo do R.N.L.F.(conforme figura 3.2) e tendo em vista o esquema da célula unitária sobre o qual o código efetua os cálculos (conforme figura 4.2) ,considere-

rou-se as esferas de combustível desenvolvidas na forma de barras cilíndricas de raio tal que a relação VOLUME/SUPERFÍCIE das barras fosse igual a mesma razão encontrada nas esferas de combustível. Neste caso o núcleo contém barras de UO₂ como a região pellet, o revestimento das esferas desenvolvido ao longo dessas barras como a região do revestimento, a água do interior do núcleo o como sendo a região do moderador e o tubo de fluidização juntamente com o anel de água e a carcaça hexagonal como sendo a região extra.

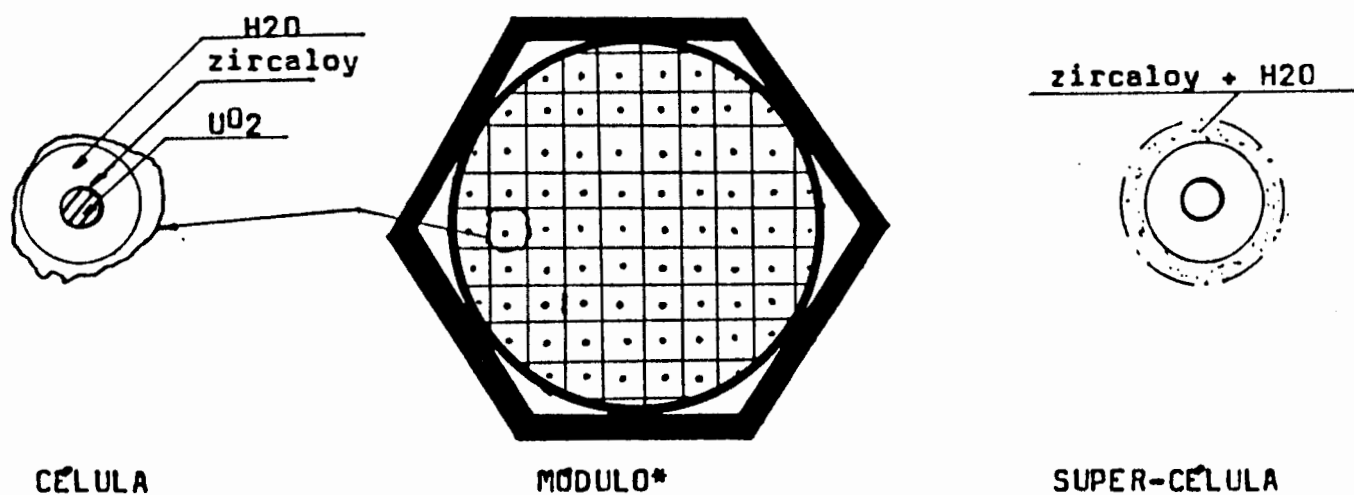


Figura 4.8-Modelo das células-Método 5

*Representação esquemática da disposição das células no módulo

4.3.5.1-Determinação das frações de volume das regiões na célula(célula fria)

$$FV_{\text{pellet}} = (1-E) \cdot \left(\frac{d-2c}{d}\right)^3$$

$$FV_{\text{revest.}} = (1-E) \cdot \left(1 - \left(\frac{d-2c}{d}\right)^3\right)$$

$$FV_{\text{moderador}} = E$$

ESCOLA DE ENGENHARIA
BIBLIOTECA

E	pellet	revestimento	moderador
0,4	0,402	0,198	0,4
0,5	0,335	0,165	0,5
0,6	0,268	0,132	0,6
0,7	0,201	0,099	0,7
0,8	0,134	0,066	0,8
0,9	0,067	0,033	0,9

Tabela 4.10-Frações de volume das regiões-Método 5

4.3.5.2-Composição percentual das regiões

a-pellet - 100% UO₂

b-revestimento - 100% zircaloy

c-moderador - 100% H₂O

d-extra - 75% zircaloy , 25% H₂O

4.3.5.3-Geometria

Considerando:

r = raio da esfera de combustível

R = raio da barra cilíndrica

n = número de esferas de combustível

N = número de barras cilíndricas

e fazendo a relação

$$(\text{volume/superfície})_{\text{esfera}} = (\text{volume/superfície})_{\text{barra}}$$

obtem-se:

$$R = (2/3) r$$

Determinado o raio do revestimento através das relações entre as frações de volume das regiões e utilizando o arranjo quadrado para o cálculo do passo, vem:

E	Rpellet	Rrevestimento	passo
0,4	0,233	0,285	0,652
0,5	0,233	0,285	0,715
0,6	0,233	0,285	0,800
0,7	0,233	0,285	0,920
0,8	0,233	0,285	1,130
0,9	0,233	0,285	1,600

Tabela 4.11-Geometria das células para o Método 5

4.4-Saídas do código LEOPARD

Para simplificar a comparação entre os diversos métodos foi escolhido o fator de multiplicação como termo comparativo, sendo apresentada uma tabela com esses valores juntamente com as suas curvas correspondentes. Ainda para uma maior economia, em alguns métodos, não foram rodados programas para todas as porosidades em estudo e sim, apenas o número suficiente para que se pudesse levar a cabo a análise.

Método	H/No	1,0	1,2	1,5	2,0	3,0	6,0
Método 1	E	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
	Kefetivo	1,094302	1,156098	1,184164	1,173301	1,097471	0,875671
Método 2	Kinfinito	1,34914	1,36325	1,35231	1,30871	1,20689	0,957978
	Kefetivo		0,929251	0,872510	0,7625324	0,6193292	
Método 3	Kinfinito		1,10603	1,00594	0,958518	0,710315	
	Kefetivo		0,960253	1,037068	1,081771	1,066306	
Método 4	Kinfinito		1,12775	1,17921	1,20210	1,16890	
	Kefetivo	0,397736	1,092046	1,0862234	1,127729	1,095767	0,8927278
Método 5	Kinfinito	1,09890	1,17696	1,23536	1,25376	1,20167	0,974761
	Kefetivo	0,86832490	0,9918853	1,069778	1,112148	1,095243	0,9950872
	Kinfinito	1,06651	1,16427	1,21709	1,23649	1,19017	0,977266

Tabela 4.12-Valores do fator de multiplicação a partir do código LECPARD

Kinfinito

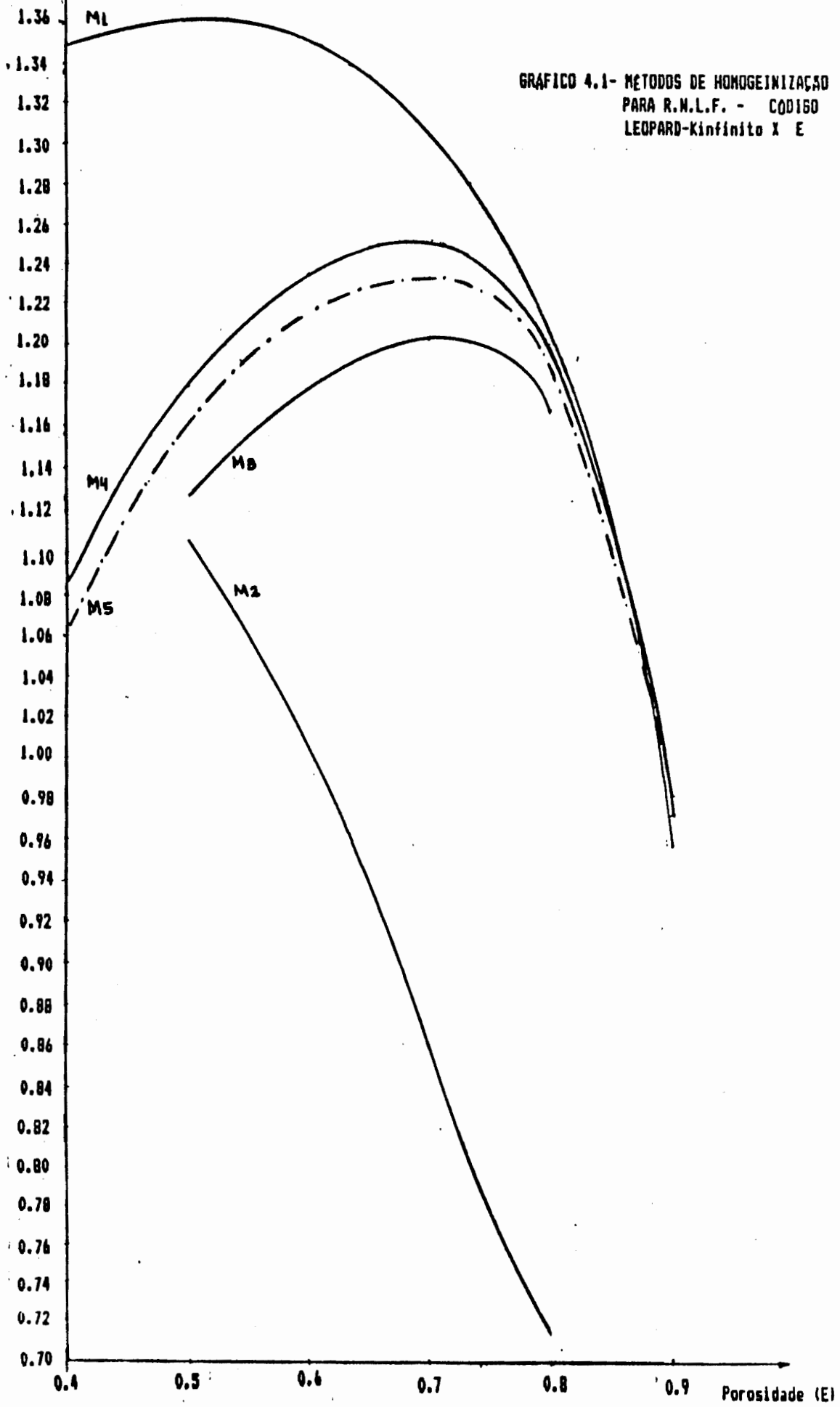


GRAFICO 4.1- METODOS DE HOMOGENEIZAÇÃO
PARA R.N.L.F. - COD160
LEOPARD-Kinfinito X E

4.5-Análise dos resultados

Pelos resultados disponíveis na literatura /23/, pode-se observar que no intervalo de valores da razão moderador/combustível compreendido entre 1,0 e 3,5, para um reator térmico moderado por água leve sem veneno, com valores de enriquecimento de combustível entre 2 e 3%, o valor do fator de multiplicação (K_{∞}) aumenta quando se percorre este intervalo no sentido dos valores crescentes, isto se devendo ao aumento de moderação.

Para o R.N.L.F. este intervalo de valores de razão de moderação corresponde ao intervalo de porosidades compreendido entre 0,4 e 0,7. Portanto, neste intervalo de porosidades, é esperado um aumento no fator de multiplicação, quando se parte da porosidade $\epsilon=0,4$ até se atingir a porosidade $\epsilon=0,7$.

Do acima exposto e pela observação dos resultados da seção precedente, pode-se verificar que os métodos 1 e 2 não seguiram a tendência de aumento do fator de multiplicação com o aumento da razão moderador/combustível no intervalo em questão, invalidando assim o seu uso para o cálculo de criticalidade no R.N.L.F. .

Tendo em vista essas mesmas considerações, os métodos 3, 4 e 5 apresentaram um comportamento coerente dos valores do fator de multiplicação em função da porosidade, tornando possível o seu uso para os cálculos de criticalidade no R.N.L.F. .

Apesar de não se ter dados experimentais para definir qual dos métodos é o mais representativo, pode-se tecer alguns comentários em função da definição de um desses métodos para o uso em cálculos futuros.

O Método 3 apesar de ter apresentado um comportamento coerente entre K_{∞} e E , possui diferenças na composição material das regiões da pellet e do revestimento em relação ao problema real, onde, devido à natureza do método, misturou-se uma quantidade de moderador a essas duas regiões, o que pode introduzir distorções e diminuir a acuracidade dos valores obtidos.

Os métodos 4 e 5 também seguiram a tendência correta entre K_{∞} e E e apresentaram valores bastante próximos. No entanto, para cálculos futuros, a escolha recaiu sobre o Método 5 por este respeitar a relação superfície/volume na região da pellet, a qual faz parte da expressão de cálculo da integral de ressonância do U^{238} , que é expressa por (forma geral):

$$I^{28} = C_1 + C_2 (A_f/M_f)$$

sendo

A_f - área superficial da barra

M_f - massa da barra (proporcional ao volume)

C_1, C_2 - constantes

Esta integral, do seu turno, é usada no cálculo da probabilidade de escape das ressonâncias do U^{238} , sendo este parâmetro o mais afetado pelo efeito das heterogeneidades presentes no núcleo, influenciando, conseqüentemente, com maior peso o fator de multiplicação. Outro aspecto positivo, é que o método não apresenta discrepâncias na composição material das regiões, em relação ao problema real.

C A P I T U L O 5

Influência de parâmetros operacionais e de projeto na criticalidade do R.N.L.F.

5.1-Introdução

Na definição de um projeto é de fundamental importância que se conheça a influência de cada parâmetro de interesse no contexto global desse projeto. Como o estudo geralmente é feito em áreas separadas, para uma definição final é necessário que se avalie e compare todos os aspectos a fim de se otimizar um parâmetro no projeto como um todo, muitas vezes até em detrimento de um aspecto em particular. Da mesma forma no R.N.L.F. a definição de um parâmetro no contexto geral do projeto, será um compromisso entre os aspectos neutrônico, hidráulico e térmico.

Neste capítulo se pretende apresentar valores indicativos, sob o ponto de vista neutrônico, dos principais parâmetros de interesse no R.N.L.F., para que numa análise futura ao confrontar-se esses valores com os obtidos nos estudos de Termo-hidráulica se possa, por meio de aproximações sucessivas, chegar ao que seria o projeto ótimo para este tipo de reator.

Tomando como base o método de homogeneização obtido no capítulo precedente, efetuar-se-á cálculos para aferir qual é a influência dos principais parâmetros de projeto sobre a criticalidade do R.N.L.F. .

Fundamentalmente os parâmetros de interesse são: enriquecimento, diâmetro da esfera de combustível, espessura do revestimento, espessura do tubo de fluidização, espessura da carcaça hexagonal

e altura de colapso do leito.

Desnecessário é comentar a importância do enriquecimento do combustível tanto no projeto básico como no que tange ao aspecto operacional.

No que se refere às esferas de combustível, na faixa de diâmetros de interesse para o R.N.L.F., a porosidade de colapso e conseqüentemente as porosidades operacionais permanecem inalteradas quando se varia o diâmetro da esfera, fazendo com que o estudo da influência deste parâmetro sobre a criticalidade seja importante, já que na medida em que se aumenta o diâmetro da esfera, mantendo a espessura do revestimento constante, diminui-se a razão Revestimento/Combustível presente no núcleo.

Quanto à espessura do revestimento, espessura do tubo de fluidização e espessura da carcaça hexagonal, devido a sua natureza passiva no interior do núcleo é lógico que quanto menor forem esses valores melhor é, quando se observa sob o ponto de vista neutrônico. Como as dimensões básicas do módulo do R.N.-L.F. foram determinadas por cálculos onde não foram levadas em conta uma série de considerações, tal como a corrosão entre outras, considerações essas que podem ou não alterar essas dimensões, verificar-se-á qual a influência do aumento das mesmas na criticalidade do R.N.L.F. .

O estudo de diferentes alturas de colapso se prende ao fato que este parâmetro é de interesse não só na operacionalidade do R.N.L.F., como também no projeto, pois a determinação dessa altura máxima determinará a altura máxima do módulo deste reator.

5.2-Condições gerais de cálculo

5.2.1-Cálculos

Os cálculos para verificar a influência dos parâmetros de interesse na criticalidade do R.N.L.F. foram baseados no código LEOPARD com o método de homogeneização desenvolvido no capítulo precedente. Em todos os casos foi tomado um reator com as seguintes características:

número de módulos = 19

combustível = dióxido de Urânio-UO₂

temperaturas = 308°C ("resonance", pellet, revestimento, moderador)

pressão = 2320 psia

"non-lattice peaking factor" = 1,0

buckling = com distâncias extrapoladas calculadas a partir dos valores obtidos no capítulo precedente

5.2.2-Caso padrão

O padrão de comparação para a verificação da influência dos vários parâmetros de interesse, constitui-se de um reator composto de módulos com as seguintes características.

Combustível	Revestimento	Moderador	Tubo de fluidização	Carga hexagonal
material-UO ₂ d = 0,7 cm	material-zircaloy 4 c = 0,05 cm	H ₂ O	material-zircaloy 4 Di=25,0 cm t = 0,2 cm	material-zircaloy 4 bi=14,66cm be=16,39cm L =32,78cm e = 1,50cm

Tabela 5.1- Características do R.N.L.F.- caso padrão

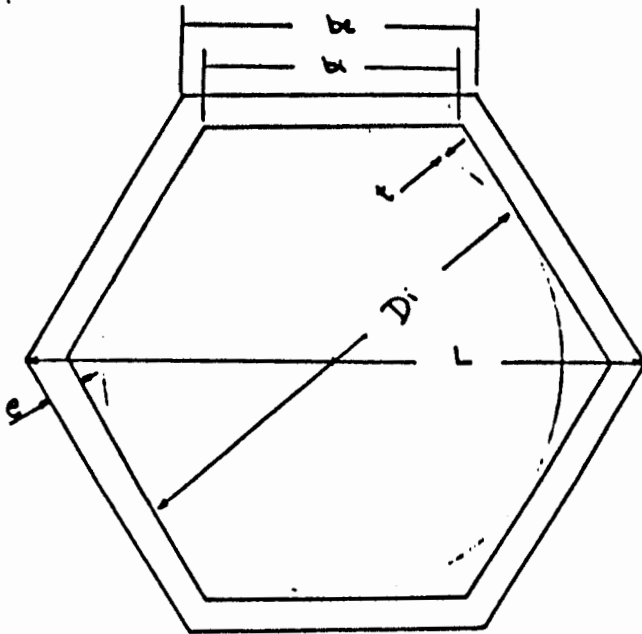


Figura 5.1a-Módulo do R.N.L.F.

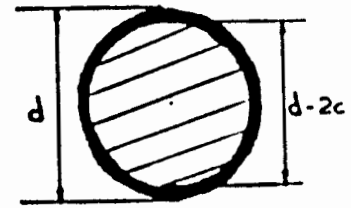


Figura 5.1b-Esfera de combustível

Figura 5.1- Características do módulo do R.N.L.F.
(conforme apêndice A)

Os cálculos se concentraram na faixa de porosidades previstas como operacionais, ou seja, aquelas em que um aumento na porosidade produz um aumento na reatividade.

A altura de colapso tomada como padrão para todos os casos é a de 70 cm.

5.3- Enriquecimento

Nos cálculos de verificação da influência do enriquecimento, procurou-se determinar um valor de enriquecimento que com segurança garantisse que na condição de leito em colapso para o caso padrão ($H_0=70$ cm), o valor de $K_{efetivo}$ não ultrapassasse a 0,95, seguindo as normas de segurança nucleares, assegurando assim, uma perfeita segurança contra a auto-criticalidade nessa condição de leito.

Como o R.N.L.F. será circundado por uma camada de material refletor, considerou-se para uma estimativa de cálculo, os efeitos produzidos pelo uso de refletores. Refletores são meios de baixa absorção e alta seção de choque de espalhamento de neutrons. Praticamente isto significa que muitos neutrons que iriam fugir do núcleo do reator são espalhados para o seu interior. O decréscimo da corrente líquida de neutrons que fogem do reator permite a redução das suas dimensões e consequentemente da massa de combustível.

A medida da efetividade de um refletor é uma quantidade, menor que 1,0, chamada "albedo". Esta é igual a razão entre a corrente de neutrons que sai e a corrente de neutrons que reentra no núcleo do reator. O albedo é maior que o menor comprimento de difusão na região térmica, L_r , do material refletor, e a maior espessura do refletor é aquela correspondente ao "refletor infinito". Este é um refletor, teoricamente de espessura infinita, mas praticamente como tendo a espessura igual ou maior que $2 L_r$. /12/

Como o efeito do uso de refletores significa, para efeito de cálculo, que se tem um núcleo maior que o real, para o caso de um reator cilíndrico, pode-se dizer que ao raio do núcleo foi acrescentada uma distância equivalente ao comprimento de difusão do refletor na região térmica, L_r . Portanto as dimensões do núcleo usadas para o cálculo são:

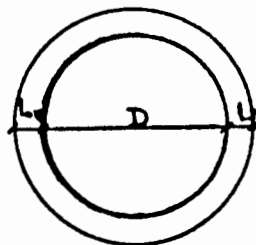


Figura 5.2-Esquema do núcleo do R.N.L.F. para o cálculo com refletor

como

$$D^* = D + 2Lr \quad (5.1)$$

e

$$B^2 = (\pi/R_0)^2 + (2,405/R^*)^2 \quad (5.2)$$

$$R_0 = H_0 + d \quad (5.3)$$

$$R^* = (D^*/2) + d \quad (5.4)$$

$$d = 0,71\lambda_{tr} \quad (5.5)$$

onde

D^* = diâmetro do reator (238,8 cm)

D = diâmetro do reator sem considerar o efeito do uso de refletor (130,0 cm)

Lr = comprimento de difusão do refletor na região térmica (para o grafite vale 54,4 cm) /12/

R_0 = altura extrapolada (75,15 cm)

R^* = raio do núcleo considerando o efeito do uso de refletores (119,4 cm)

d = distância extrapolada (2,575 cm)

então

	sem refletor	com refletor
B^2	0,00301	0,00214

Tomando como valor inicial de enriquecimento $r = 2,5\%$ e dando um decréscimo de $0,1\%$ em $0,1\%$,obtem-se:

r	2,5%	2,4%	2,3%	2,2%
Kefet.	0,9762509	0,9683781	0,9599897	0,9510331
K	1,14297	1,13429	1,12502	1,11510

Tabela 5.2-Valores de K para condição de colapso
-caso padrão

Portanto, o enriquecimento padrão para os demais cálculos, tendo em vista a Tabela 5.2 e as considerações anteriores será fixado em 2,2%.

Apesar de se ter fixado o valor de enriquecimento para os cálculos das seções seguintes, é necessário que se avalie o seu efeito na criticalidade do R.N.L.F. . Para tanto, foram rodados casos desde a condição de colapso $E_0=0,4$ até a condição de fluidização $e=0,9$ e para os valores de enriquecimento $r = 1,9\%, 2,2\%$ (caso padrão). e $2,5\%$.

Para os três casos foram rodadas as seguintes situações:

E	raio pellet	raio revest.	passo	H	B^2	"non-vol. f!"
0,4	0,233	0,285	0,652	70	0,00301	0,297
0,5	0,233	0,285	0,715	84	0,00251	0,297
0,6	0,233	0,285	0,800	105	0,00208	0,297
0,7	0,233	0,285	0,920	140	0,00174	0,297
0,8	0,233	0,285	1,130	210	0,00150	0,297
0,9	0,233	0,285	1,597	420	0,00134	0,297

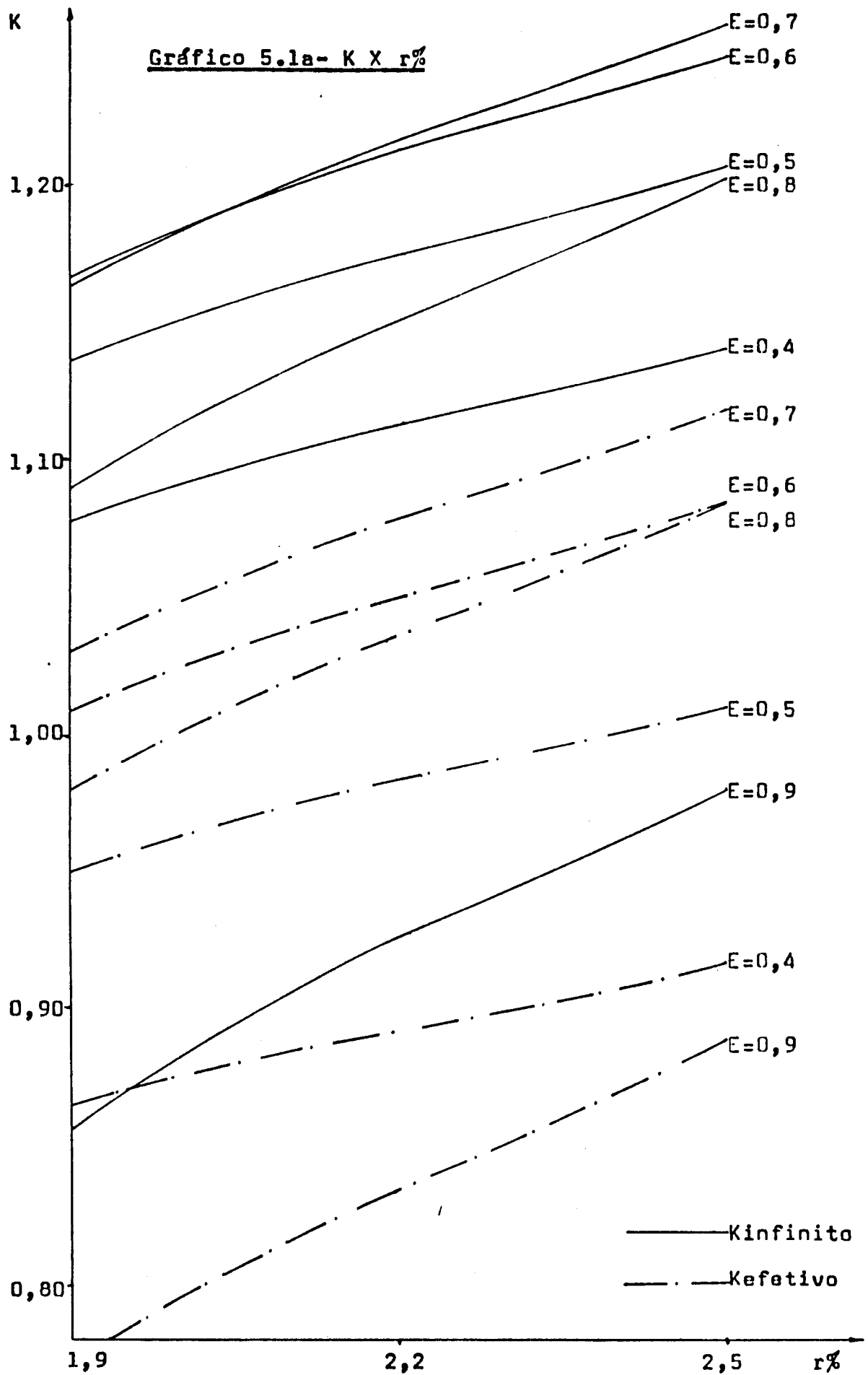
Tabela 5.3-Dados de entrada para o código LEOPARD (dimensões em cm)

Os resultados foram:

E	K	r = 1,9%	r = 2,2%	r = 2,5 %
0,4	Kefet.	0,8628812	0,8925383	0,9167645
	Kinf.	1,07850	1,11291	1,14076
0,5	Kefet.	0,9501212	0,9850586	1,013503
	Kinf.	1,13685	1,17627	1,20815
0,6	Kefet.	1,009748	1,050914	1,084567
	Kinf.	1,16821	1,21369	1,25068
0,7	Kefet.	1,030024	1,078277	1,1182124
	Kinf.	1,16331	1,21584	1,25906
0,8	Kefet.	0,9801461	1,036603	1,084133
	Kinf.	1,09105	1,15210	1,20332
0,9	Kefet.	0,7751632	0,8363191	0,8897905
	Kinf.	0,858678	0,925047	0,982901

Tabela 5.4-Saídas do código LEOPARD(reator sem refletor)

Esses resultados estão plotados no gráfico 5.1a a seguir.



E	Caso	$\Delta r\%$	$\Delta K_{eff}\%$	$\Delta K_{eff}/\Delta r (\%)$
0,4	r= 1,9%	-13,64	-3,09	-0,23
	r= 2,5%	+13,64	2,50	0,18
0,5	r= 1,9%	-13,64	-3,35	-0,25
	r= 2,5%	+13,64	2,71	0,20
0,6	r= 1,9%	-13,64	-3,75	-0,27
	r= 2,5%	+13,64	3,05	0,22
0,7	r= 1,9%	-13,64	-4,32	-0,32
	r= 2,5%	+13,64	3,55	0,26
0,8	r= 1,9%	-13,64	-5,30	-0,39
	r= 2,5%	+13,64	4,46	0,33
0,9	r= 1,9%	-13,64	-7,17	-0,53
	r= 2,5%	+13,64	6,25	0,46

Tabela 5.5-Influência da variação do enriquecimento do combustível, relativa ao caso padrão

-obs.-O sinal negativo na última coluna dessa tabela representa uma diminuição do valor de K com r

Para analisar a influência do enriquecimento sobre a criticalidade do R.N.L.F. é conveniente que se recorde a definição da faixa operacional para este reator. Entende-se por faixa operacional do R.N.L.F., aquele intervalo de porosidades onde um aumento dessa grandeza produz um aumento na reatividade. Para o R.N.L.F. tal como descrito no capítulo 1, a faixa operacional está prevista para ser entre as porosidades $E=0,5$ e $E=0,7$.

Pela análise dos resultados da Tabela 5.4 e gráfico 5.1, verifica-se que para o valor de enriquecimento $r= 1,9\%$ o máxi-

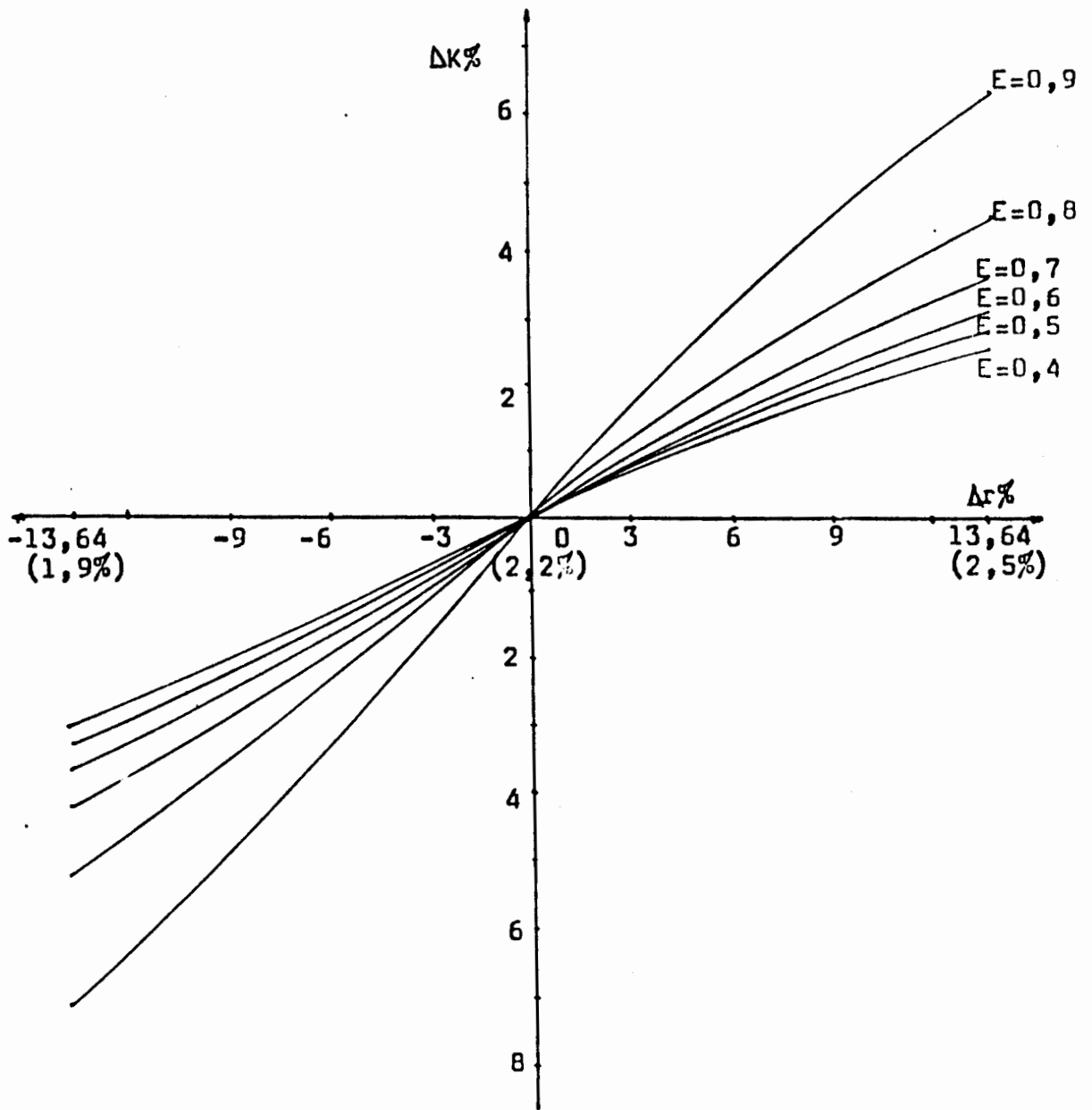


Gráfico 5.2-Variação % de K_{∞} X variação % de r , relativa ao caso padrão ($r = 2,2\%$)

no em termos de K_{∞} é atingido na porosidade $E=0,6$, fato que limitaria a faixa operacional até esse valor.

No entanto, quer se manter a faixa operacional entre os valores $E=0,5$ e $E=0,7$, garantindo assim um fluxo de refrigerante compatível com a potência que se pretende extrair do núcleo, além de assegurar uma maior reserva de reatividade. Para tanto, pode-se verificar pelo gráfico 5.1, que para manter a faixa ope-

racional nesse intervalo, o enriquecimento mínimo do combustível deve ser: acima de 2,05%.

Outra observação que pode ser feita, extrapolando os resultados do gráfico 5.1, é que se mantida a tendência das curvas K_{∞} X r para as porosidades de $E=0,7$ e $E=0,8$, o máximo da faixa operacional só se deslocará para a porosidade $E=0,8$ para valores de enriquecimento acima de 4%.

Ainda para o gráfico 5.1, ao analisar-se os valores de K_{efetivo} , verifica-se que estes seguiram o comportamento crescente para $r=1,9\%$ dentro da faixa operacional ($E=0,5$ a $E=0,7$). Isto se deve à variação do buckling do reator com a variação da porosidade, significando praticamente que quando se aumenta a porosidade, diminuindo conseqüentemente o buckling (vide tabela 5.3), diminui-se a fuga de neutrons do núcleo do reator, explicando dessa forma a diferença de comportamento entre K_{efetivo} e K_{∞} . Do acima exposto pode-se ver que o aumento da reatividade no R.N.L.F. é obtido pela variação da porosidade, com conseqüente variação da razão moderador/combustível, somado ao efeito de diminuição da fuga de neutrons pela variação do buckling, mantendo assim uma boa faixa de reatividade, suficiente para compensar a queima do combustível, produção de venenos etc.

Apesar da variação do valor de K não apresentar um comportamento uniforme com a variação de enriquecimento (vide Tabela 5.5 e gráficos 5.2 e 5.3), afim de que se possa estimar a influência desse parâmetro a nível de projeto, pode-se dizer que na faixa operacional e para o intervalo de enriquecimentos entre 1,9% e 2,5% tomando como padrão $r=2,2\%$, tem-se:

- a cada 1% de diminuição no valor de r, relativa ao caso padrão, produz uma diminuição de 0,28% no valor de K_{∞}
- a cada 1% de aumento no valor de r, relativo ao caso padrão

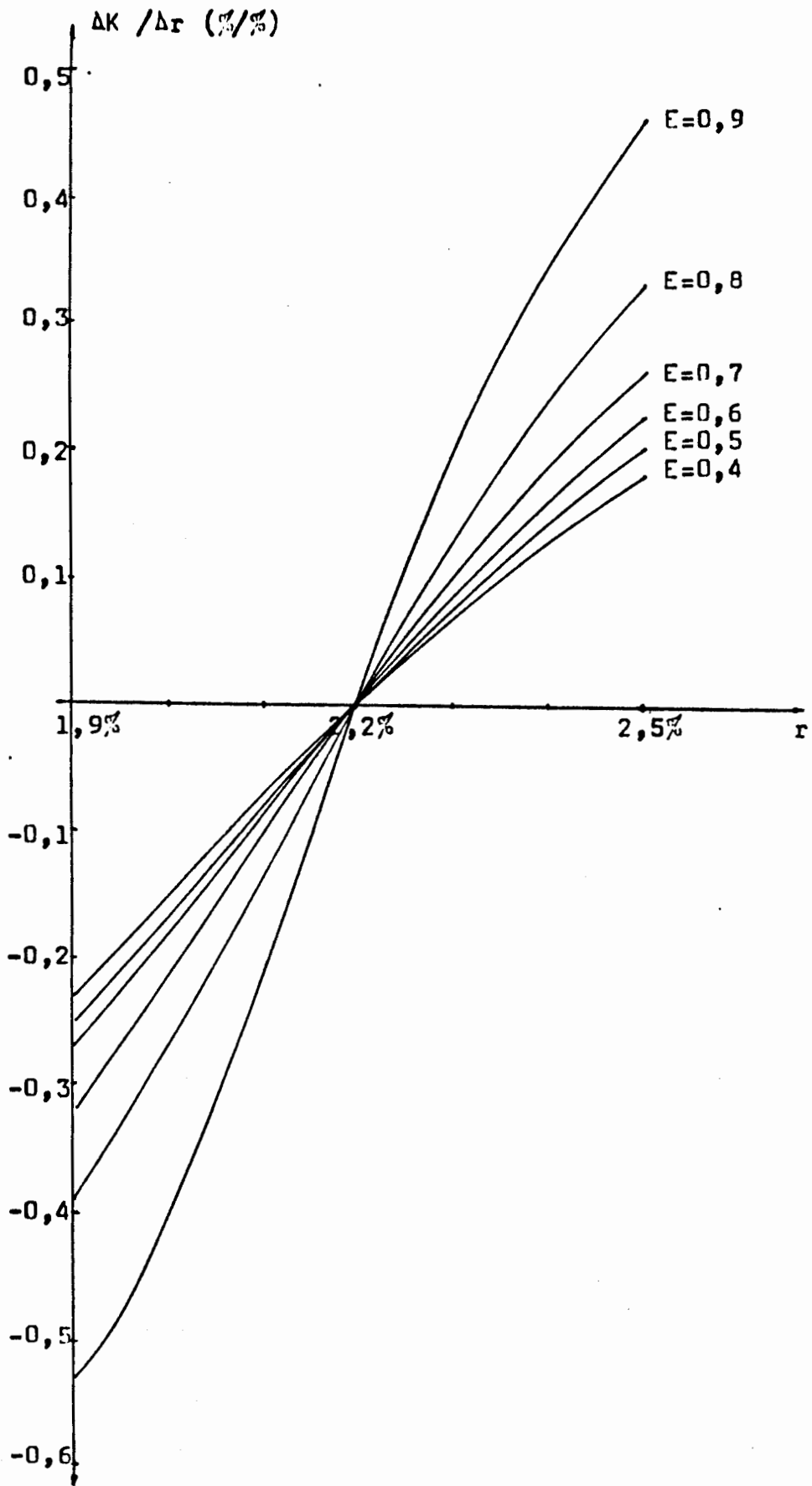


Gráfico 5.3-Influência da variação do enriquecimento no valor do fator de multiplicação

, produz um aumento de 0,23% no valor de K_{infinito} .

Caso se deseje o valor mais preciso desta variação, este pode ser tomado no gráfico 5.3 .

Esta mesma análise feita para os valores de K_{efetivo} apresenta praticamente os mesmos valores que foram encontrados para K_{infinito} .

5.4-Diâmetro da esfera de combustível

Como já foi comentado, na faixa de interesse de diâmetros para o R.N.L.F., a porosidade de colapso permanece inalterada quando se varia o diâmetro da esfera de combustível nessa faixa.

Afim de quantificar este estudo tomou-se as equações (2.1), (2.2) e (2.3), que têm como expressão, respectivamente:

$$E = 1 - \frac{2 \cdot n \cdot d^3}{3 \cdot D_i^2 \cdot H}$$

$$Y = \left(\frac{d-2c}{d} \right)^3$$

$$M_{\text{comb.}} = \rho_{\text{mc}} \cdot n \cdot \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{d}{2} \right)^3 \cdot Y$$

onde

E = porosidade, que na condição de colapso vale 0,4

H = altura do leito, que na condição de colapso é igual a 70 cm

d = diâmetro da esfera de combustível, que vale 0,8cm

D_i = diâmetro interno do tubo de fluidização = 25,0 cm

c = espessura do revestimento da esfera = 0,05 cm

ρ_{mc} = 10,45 g/cm³

n = número de esferas de combustível

$d-2c = d' =$ diâmetro da esfera de material combustível

Y = fração de volume do material combustível na esfera

Mantendo todos os outros parâmetros constantes e variando o diâmetro da esfera de dióxido de Urânio, d' , desde de o caso padrão $d=0,8$ cm até o diâmetro de $d=1,6$ cm, obtem-se:

d'	d	n	$Y\%$	K_{comb}	$\Delta d\%$	$\Delta Mc\%$	$\frac{\Delta Mc}{\Delta d} (t.)$
0,7	0,8	76.904	66,99	144,3	-	-	-
0,8	0,9	54.012	70,23	151,3	12,5	4,8	0,384
0,9	1,0	39.375	72,90	157,1	25,0	8,8	0,352
1,0	1,1	29.583	75,13	161,9	37,5	12,1	0,323
1,1	1,2	22.786	77,03	165,9	50,0	15,0	0,300
1,2	1,3	17.922	78,65	169,5	62,5	17,4	0,278
1,3	1,4	14.349	80,07	172,5	75,0	19,5	0,260
1,4	1,5	11.667	81,30	175,2	87,5	21,4	0,244
1,5	1,6	9.613	82,40	177,5	100,0	23,0	0,238

Tabela 5.6-Variação do diâmetro da esfera de combustível
(para $E_0=0,4$ e $H_0=70$ cm)

Como a faixa operacional do R.M.L.F. se situa entre as porosidades de $E=0,5$ e $E=0,7$, foram processados 4 casos nessa faixa, os quais estão apresentados na Tabela 5.7 .

Caso	E	raio pellet	raio reconst.	passo	H	B ²	"non-vol. fraction"
d = 0,8	0,5	0,233	0,285	0,715	84	0,00251	0,297
	0,6	0,233	0,285	0,800	105	0,00208	0,297
	0,7	0,233	0,285	0,920	140	0,00174	0,297
d = 1,0	0,5	0,300	0,351	0,880	84	0,00251	0,297
	0,6	0,300	0,351	0,984	105	0,00208	0,297
	0,7	0,300	0,351	1,136	140	0,00174	0,297
d = 1,4	0,5	0,433	0,484	1,213	84	0,00251	0,297
	0,6	0,433	0,484	1,356	105	0,00208	0,297
	0,7	0,433	0,484	1,566	140	0,00174	0,297
d = 1,6	0,5	0,500	0,551	1,381	84	0,00251	0,297
	0,6	0,500	0,551	1,544	105	0,00208	0,297
	0,7	0,500	0,551	1,783	140	0,00174	0,297

Tabela 5.7-Dados de entrada para o código LEOPARD (dimensões em cm)

Os resultados foram:

E	K	d=0,8 cm	d=1,0 cm	d=1,4 cm	d=1,6 cm
0,5	Kefetivo	0,9850506	0,9943944	1,008472	1,014272
	Kinfinito	1,1762700	1,18297	1,19526	1,20082
0,6	Kefetivo	1,050914	1,063549	1,079777	1,085736
	Kinfinito	1,21369	1,22506	1,24057	1,24650
0,7	Kefetivo	1,078277	1,094841	1,112913	1,118292
	Kinfinito	1,21584	1,23216	1,25026	1,25571

Tabela 5.8-Saídas do código LEOPARD (reator sem refletor)

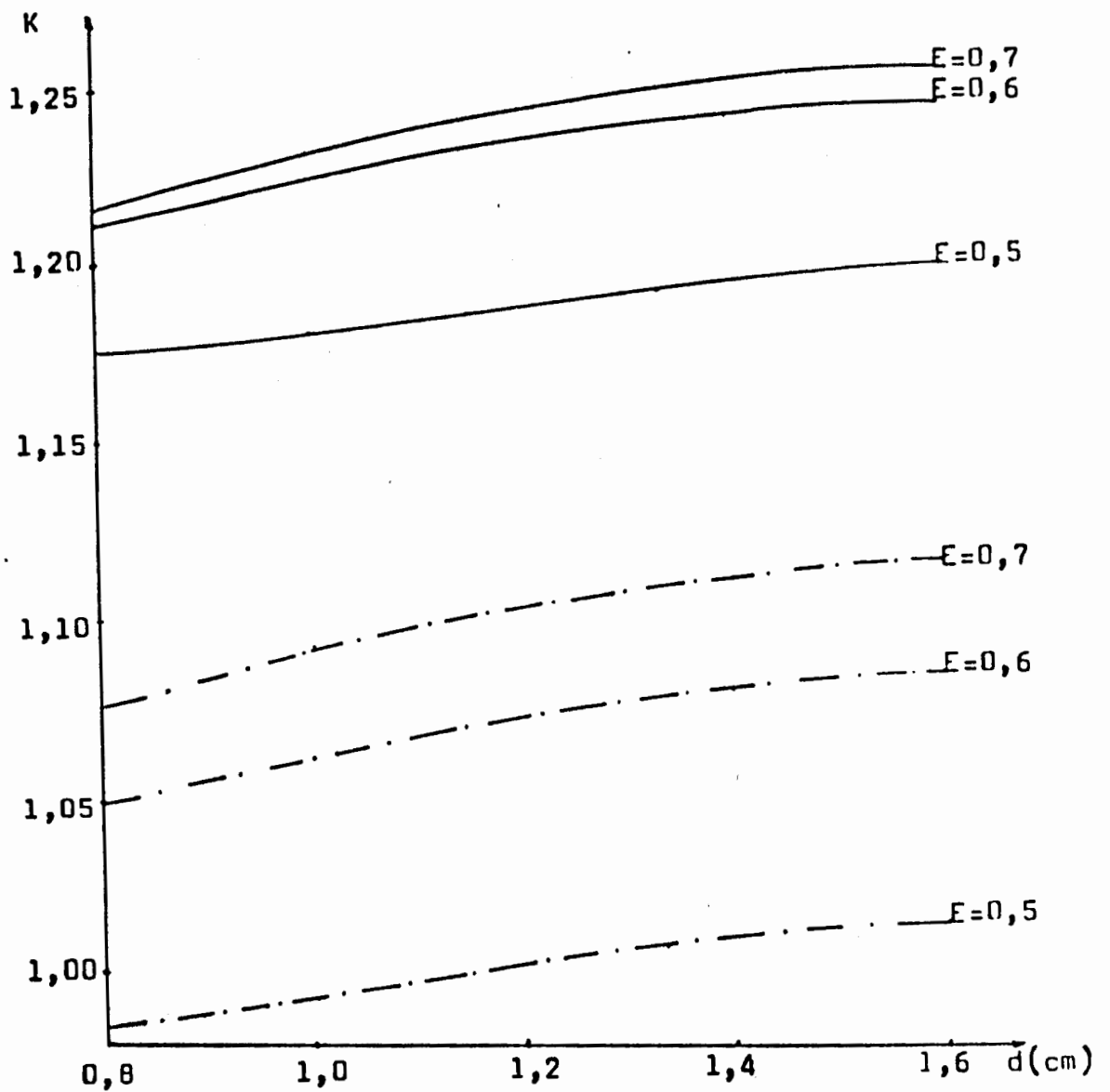


Gráfico 5.4- K x d

— · — Kefetivo
 ————— Kinfinito

E	Caso	$\Delta d, \%$	$\Delta K_{\infty} \%$	$\frac{\Delta K_{\infty}}{\Delta d} \%$	$\frac{\Delta \beta}{\Delta d} \%$
0,5	d=1,0	25,0	0,5696	0,0228	0,352
	d=1,4	75,0	1,6144	0,0215	0,260
	d=1,6	100,0	2,0871	0,0208	0,230
0,6	d=1,0	25,0	0,9368	0,0375	0,352
	d=1,4	75,0	2,2147	0,0295	0,260
	d=1,6	100,0	2,7033	0,0270	0,230
0,7	d=1,0	25,0	1,3423	0,0537	0,352
	d=1,4	75,0	2,8310	0,0377	0,260
	d=1,6	100,0	3,2792	0,0328	0,230

Tabela 5.9-Influência da variação do diâmetro da esfera de combustível na faixa operacional

Como era esperado a diminuição da razão Massa de revestimento/Massa de combustível no núcleo do R.N.L.F., devido ao aumento do diâmetro da esfera de material combustível, produziu um aumento no fator de multiplicação, na medida em que se observa desde o caso padrão até os casos com diâmetros maiores. (ver Tabela 5.8 e gráfico 5.4)

Pode-se observar no gráfico 5.4, o maior distanciamento que existe entre as curvas de $K_{efetivo}$ X porosidade em relação às curvas de $K_{infinito}$ X porosidade. Como comentado na seção precedente, no caso de $K_{efetivo}$ o aumento de reatividade é devido aos efeitos da variação da razão moderador/combustível somado à diminuição da fuga de neutrons, enquanto que o aumento de reatividade para $K_{infinito}$ é devido apenas à variação da razão moderador/combustível, explicando assim os diferentes distanciamentos.

Na Tabela 5.9 e gráficos 5.5 e 5.6, observa-se que a variação do Kinfinito X, variação do diâmetro da esfera não apresenta um comportamento uniforme, mas para uma orientação no projeto, pode-se dizer que:

-Quanto maior o diâmetro da esfera, na faixa estudada, tanto melhor é sob o ponto de vista desse estudo

-A cada 1% de aumento no diâmetro da esfera, acima do caso padrão, dentro da faixa operacional, produz um aumento médio do Kinfinito de:

faixa $\Delta d\%$	aumento% médio K_{∞}
0-25	0,0380
0-75	0,0297
0-100	0,0267

A análise acima concentrou-se nos resultados de Kinfinito, afim de se ter uma aplicação mais geral desse estudo, como por exemplo, para estimar a influência do parâmetro em questão para o R.N.L.F. com um número qualquer de módulos.

No entanto, deve-se considerar que a variação $\Delta K_{\infty}/\Delta d$, na faixa operacional, é menor que a variação $\Delta K_{efet.}/\Delta d$, sendo que para o R.N.L.F. com 19 módulos sem refletor, tem-se:

-A cada 1% de aumento no diâmetro da esfera de combustível, relativo ao caso padrão, na faixa operacional, produz um aumento médio em $K_{efet.}$ de:

faixa $\Delta d\%$	aumento% médio $K_{efet.}$
0-25	0,0491
0-75	0,0370
0-100	0,0333

Supondo que o menor R.N.L.F. seja o de 19 módulos, a colocação de um refletor nesse reator, ou o aumento do mesmo pela coloca-

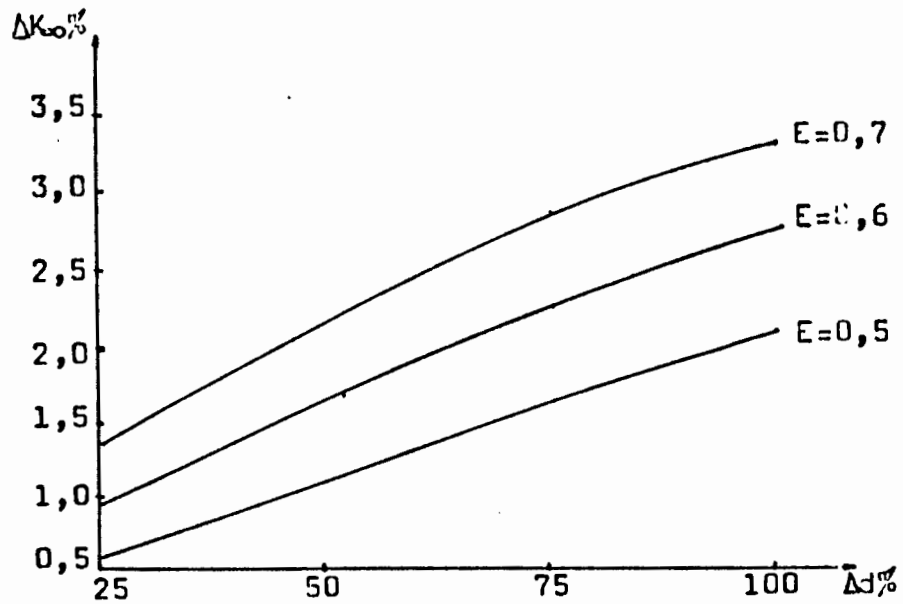


Gráfico 5.5-Variação % de Kinfinito X variação % de d

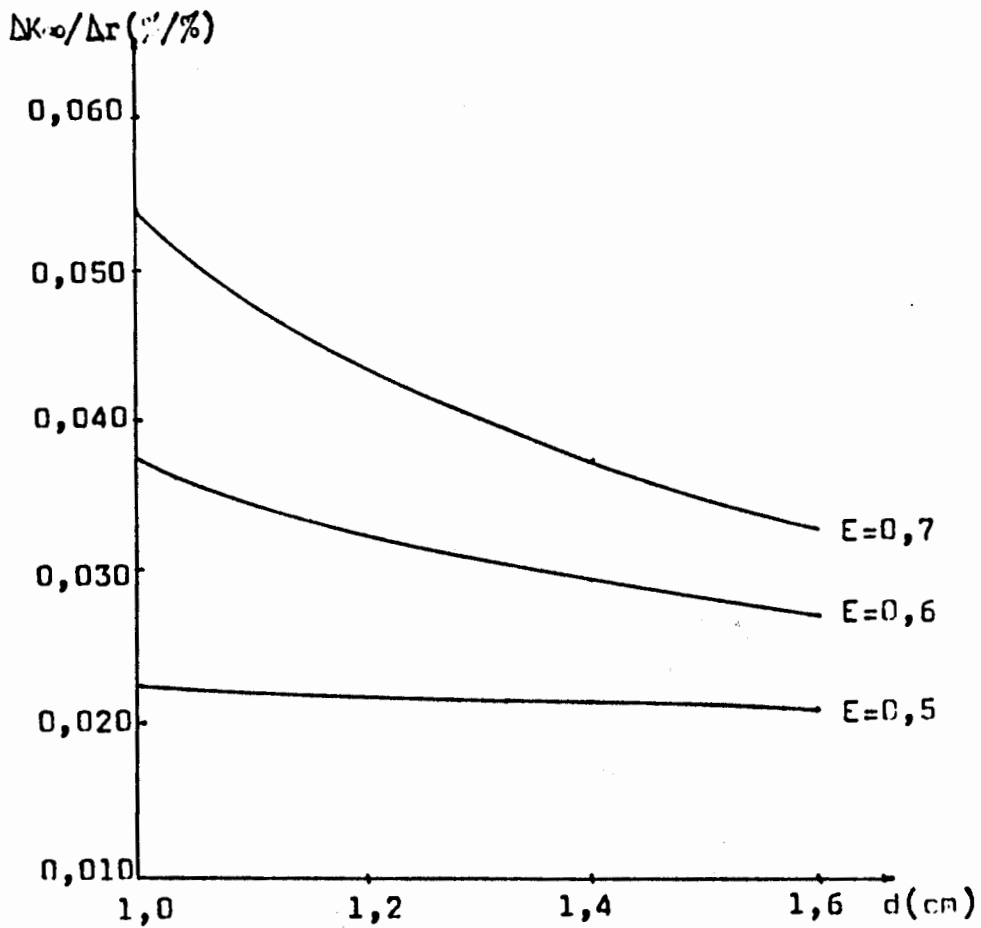


Gráfico 5.6-Influência da variação do diâmetro da esfera na criticalidade do R.N.L.F.

ção de um maior número de módulos terá como efeito a diminuição da fuga de neutrons do reator, aproximando os valores de K_{∞} e K_{efetivo} , e conseqüentemente, as razões $\Delta K_{\text{efetivo}}/\Delta d$ e $\Delta K_{\infty}/\Delta d$. Tendo em vista essas considerações, para efeito de orientação no projeto, pode-se dizer que para o R.N.L.F. que use refletor ou/e tenha um número de módulos maior que 19, a variação do K_{efetivo} com o diâmetro da esfera de combustível situa-se na faixa compreendida entre os valores de $\Delta K_{\infty}/\Delta d$ e $\Delta K_{\text{efetivo}}/\Delta d$ correspondente ao R.N.L.F. com 19 módulos sem refletor.

5.5-Espessura do revestimento

Como ainda não foram feitos estudos sobre o comportamento do revestimento das esferas de combustível quanto à erosão/corrosão, sob diversas condições operacionais, para determinar a sua espessura definitiva, procurou-se determinar a influência desse parâmetro na criticalidade do R.N.L.F., estudo este que servirá caso se verifique que a espessura, que no caso padrão vale $c=0,05$, tenha que sofrer alguma alteração.

Partindo do diâmetro básico da esfera de combustível, ou seja, $d=0,8\text{cm}$ (0,7 cm de UO_2 com 0,05 cm de zicaloy como revestimento), a espessura do revestimento terá um incremento de 0,01 cm até atingir o valor de 0,1 cm.

Utilizando as mesmas equações e considerações usadas na seção precedente, obtém-se:

d	c	n	Y%	M _{comb.} Kg UO ₂	Δc%	ΔM _{com} %	ΔM _{com} Δc
0,80	0,05	76.904	66,99	144,3	-	-	-
0,82	0,06	71.413	62,21	134,0	20,0	-7,1	-0,355
0,84	0,07	66.433	57,87	124,7	40,0	-13,6	-0,340
0,86	0,08	61.905	53,93	116,2	60,0	-19,5	-0,325
0,88	0,09	57.779	50,33	108,4	80,0	-24,9	-0,311
0,90	0,10	54.012	47,05	101,4	100,0	-29,8	-0,298

Tabela 5.10-Variação da espessura do revestimento da esfera de combustível (para E₀=0,4 e H₀=70 cm)

Tomando 4 situações da Tabela 5.10, na faixa operacional, obtem-se:

Caso	E	raio pellet	raio revest.	passo	H	B ²	"non-vol. fraction"
c	0,5	0,233	0,285	0,715	84	0,00251	0,297
	=	0,6	0,233	0,800	105	0,00208	0,297
	0,05	0,7	0,233	0,920	140	0,00174	0,297
c	0,5	0,233	0,296	0,742	84	0,00251	0,297
	=	0,6	0,233	0,829	105	0,00208	0,297
	0,06	0,7	0,233	0,958	140	0,00174	0,297
c	0,5	0,233	0,318	0,797	84	0,00251	0,297
	=	0,6	0,233	0,891	105	0,00208	0,297
	0,08	0,7	0,233	1,029	140	0,00174	0,297
c	0,5	0,233	0,340	0,852	84	0,00251	0,297
	=	0,6	0,233	0,953	105	0,00208	0,297
	1,0	0,7	0,233	1,100	140	0,00174	0,297

Tabela 5.11-Dados de entrada para o código LEOPARD (dimensões em cm)

Os resultados foram:

E	K	c=0,05 cm	c=0,06 cm	c=0,08 cm	c=0,10 cm
0,5	Kefetivo	0,9850586	0,9834655	0,9788940	0,9717166
	Kinfinito	1,17627	1,17854	1,18076	1,17919
0,6	Kefetivo	1,050914	1,046029	1,034589	1,02013
	Kinfinito	1,21369	1,21114	1,20352	1,19187
0,7	Kefetivo	1,078277	1,067969	1,045653	1,020751
	Kinfinito	1,21584	1,20646	1,18542	1,16102

Tabela 5.12-Saídas do código LEOPARD (reator sem refletor)

E	Caso	$\Delta c\%$	$\Delta K_0\%$	$\frac{\Delta K_0}{\Delta c} \%$	$\frac{\Delta M}{\Delta c} \%$
0,5	c=0,06	20,0	0,19	0,0095	-0,355
	c=0,08	60,0	0,38	0,0063	-0,325
	c=0,10	100,0	0,25	0,0025	-0,298
0,6	c=0,06	20,0	-0,21	-0,0105	-0,355
	c=0,08	60,0	-0,84	-0,0140	-0,325
	c=0,10	100,0	-1,80	-0,0180	-0,298
0,7	c=0,06	20,0	-0,77	-0,0385	-0,355
	c=0,08	60,0	-2,50	-0,0417	-0,325
	c=0,10	100,0	-4,51	-0,0451	-0,298

Tabela 5.13-Influência da variação da espessura do revestimento, relativa ao caso padrão

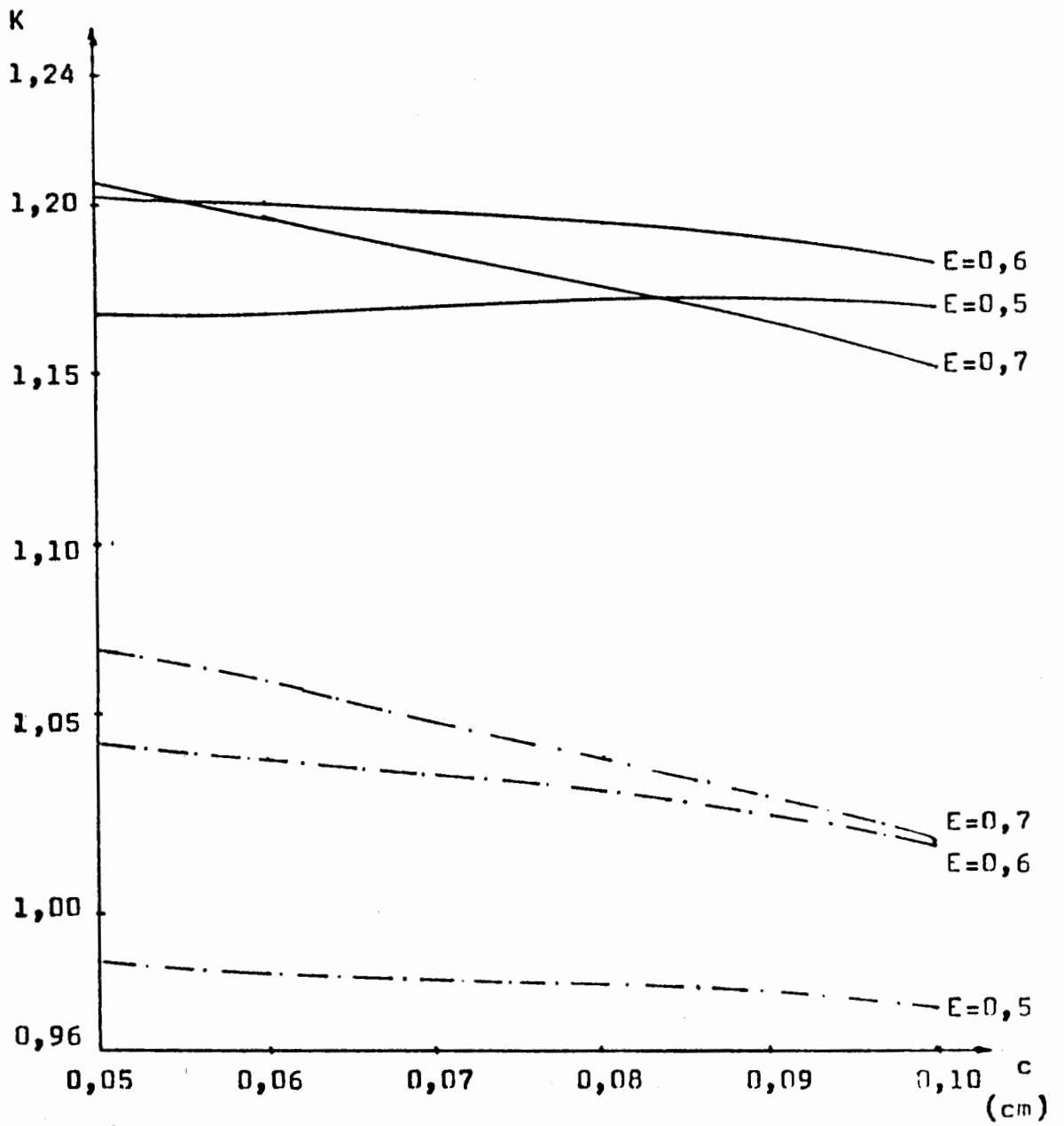


Gráfico 5.7- K X c

— · — Kefetivo
 — Kinfinito

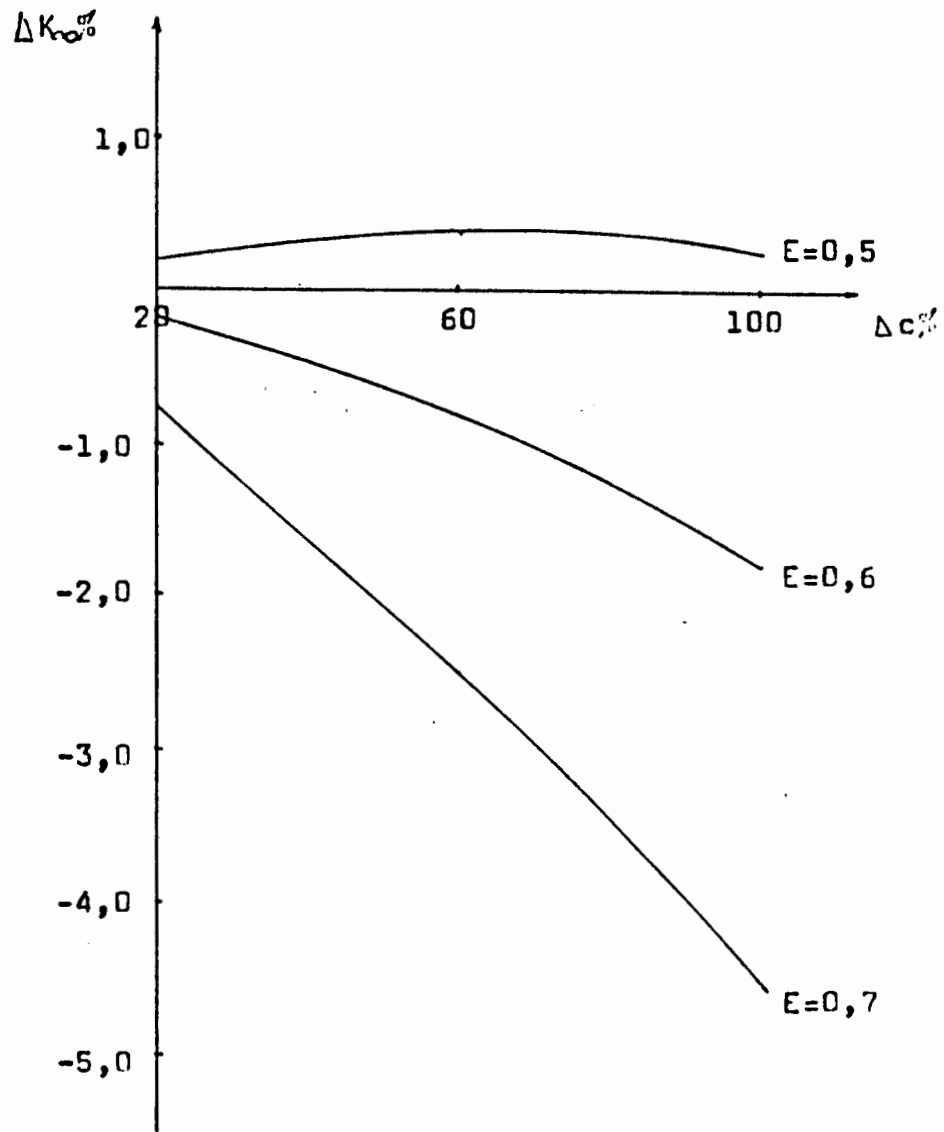


Gráfico 5.8-Variação % de K X variação % de c

Pelos valores apresentados nas Tabelas 5.12 e 5.13, e nos gráficos 5.7 e 5.8, pode-se fazer as seguintes considerações:

Observando-se os valores de K_{infinito} para os quatro casos, na condição de fluidização $E=0,5$, verifica-se que ocorre um acréscimo nesse parâmetro quando se passa do valor de espessura $c=0,05$ cm para valores maiores. O esperado era que o valor de K_{infinito} diminuísse, já que se introduziu uma maior quantidade de material passivo no núcleo, ao mesmo tempo em que se diminuiu a quantidade de combustível. Esta diferença de comportamento ocorreu pela modificação da razão VH_2O/VUO_2 , presente na célula, produzindo configurações com diferentes termos de moderação da que observado no caso padrão.

Para as outras condições de fluidização, o comportamento foi conforme o esperado, ou seja, houve uma diminuição do K_{infinito} com o aumento da espessura do revestimento.

Outro fato interessante, é que quando se observa a faixa operacional para as espessuras de revestimento $c=0,06$ cm, $c=0,08$ cm e $c=0,10$ cm, verifica-se que o valor máximo de K_{infinito} ocorre na porosidade $e=0,6$. Todavia, pelas mesmas considerações feitas na seção 5.3, quer se manter a faixa operacional entre os valores $E=0,5$ e $E=0,7$. Para isso, vê-se no gráfico 5.7, que a espessura máxima para o caso padrão deve ser abaixo de $c=0,054$. Caso tenha que se usar uma espessura acima de $0,054$ cm, afim de se manter a faixa operacional entre $E=0,5$ e $E=0,7$, pode-se sugerir as seguintes opções:

- a-aumentar o enriquecimento do combustível mantendo o diâmetro da esfera inalterado;
- b-manter o mesmo enriquecimento e aumentar o diâmetro da esfera, o que como foi visto no estudo anterior compensaria os efeitos do aumento da espessura do revestimento;

c-a combinação das duas opções anteriores.

A adoção de qualquer uma dessas opções alterará os valores de $\Delta K\%/ \Delta c\%$ (Tabela 5.7 e gráfico 5.8), portanto não tendo sentido apresentar-se os valores médios da influência desse parâmetro. Além disso a escolha de qualquer uma dessas opções deve ser precedida de estudos termo-hidráulicos e econômicos, já que na medida em que se aumenta o enriquecimento se encarece o combustível e ao se aumentar o diâmetro da esfera altera-se o comportamento termo-hidráulico do leito.

Como todas essas considerações estão ligadas ao estudo de erosão/corrosão do revestimento, o qual pode indicar a própria espessura $c=0,05$ cm, não se levou adiante este estudo, no entanto fornecendo-se os indicativos necessários para levar adiante o trabalho no caso de haver alguma alteração.

Sendo assim, para orientação no projeto, fica apenas o fato de que quanto menor a espessura, melhor é sob o ponto de vista neutrônico.

5.6-Espessura do tubo de fluidização

Como nos cálculos preliminares das dimensões básicas não se levou em consideração os efeitos da erosão/corrosão entre outros, apesar de ser considerada uma certa faixa de segurança, fez-se uma série de cálculos apresentando valores indicativos da influência da espessura do tubo de fluidização na criticalidade do R.M.L.F., dentro da faixa operacional, caso essa dimensão tenha que ser alterada.

Tendo em vista a figura 5.1a da seção 5.2.2, onde está representado o diâmetro interno do tubo de fluidização $D_i=25,0$ cm, considerou-se essa dimensão constante e variou-se a espessura do

tubo desde do $t=0,2$ cm até $t=0,4$ cm, tendo-se em mente que esse aumento de espessura produz um aumento nas dimensões da carga hexagonal, a qual teve a sua espessura mantida constante. Os casos para estudo foram:

t	Di	De	"non-v. f!"	t%	nvf%	$\frac{nvf\%}{t\%}$
0,20	25,0	25,4	29,7	-	-	-
0,30	25,0	25,6	30,7	50,0	3,37	0,067
0,35	25,0	25,7	31,2	75,0	5,05	0,067
0,40	25,0	25,8	31,7	100,0	6,73	0,067

Tabela 5.14-Variação da espessura do tubo de fluidização (dimensões em cm)

caso	E	raio pellet	raio revest.	passo	H	B ²	"non-vl _n fraction"
t = 0,20	0,5	0,233	0,285	0,715	84	0,00251	0,297
	0,6	0,233	0,285	0,800	105	0,00200	0,297
	0,7	0,233	0,285	0,920	140	0,00174	0,297
t = 0,30	0,5	0,233	0,285	0,715	84	0,00249	0,307
	0,6	0,233	0,285	0,800	105	0,00206	0,307
	0,7	0,233	0,285	0,920	140	0,00172	0,307
t = 0,35	0,5	0,233	0,285	0,715	84	0,00248	0,312
	0,6	0,233	0,285	0,800	105	0,00206	0,312
	0,7	0,233	0,285	0,920	140	0,00172	0,312
t = 0,40	0,5	0,233	0,285	0,715	84	0,00247	0,317
	0,6	0,233	0,285	0,800	105	0,00205	0,317
	0,7	0,233	0,285	0,920	140	0,00171	0,317

Tabela 5.15-Dados de entrada para o código LEOPARD (dimensões em cm)

E	K	t=0,20cm	t=0,30 cm	t=0,35 cm	t=0,40 cm
0,5	Kefetivo	0,9850506	0,9823562	0,9822375	0,9821138
	Kinfinito	1,17627	1,17374	1,17356	1,17337
0,6	Kefetivo	1,050914	1,048222	1,047008	1,046505
	Kinfinito	1,21369	1,21083	1,21009	1,20934
0,7	Kefetivo	1,078277	1,075464	1,073845	1,072949
	Kinfinito	1,21584	1,21256	1,21130	1,21002

Tabela 5.16-Saídas do código LEOPARD(reator, sem refletor)

E	Caso	$\Delta t\%$	$\Delta K_e\%$	$\frac{\Delta K_{\infty}}{\Delta t} \frac{\%}{\%}$	$\frac{\Delta \rho_{vf}}{\Delta t} \frac{\%}{\%}$
0,5	t=0,30	50,0	-0,215	-0,0043	0,067
	t=0,35	75,0	-0,230	-0,0031	0,067
	t=0,40	100,0	-0,246	-0,0025	0,067
0,6	t=0,30	50,0	-0,236	-0,0047	0,067
	t=0,35	75,0	-0,297	-0,0040	0,067
	t=0,40	100,0	-0,358	-0,0036	0,067
0,7	t=0,30	50,0	-0,270	-0,0054	0,067
	t=0,35	75,0	-0,373	-0,0050	0,067
	t=0,40	100,0	-0,479	-0,0048	0,067

Tabela 5.17-Influência da variação da espessura do tubo de fluidização, relativo ao caso padrão

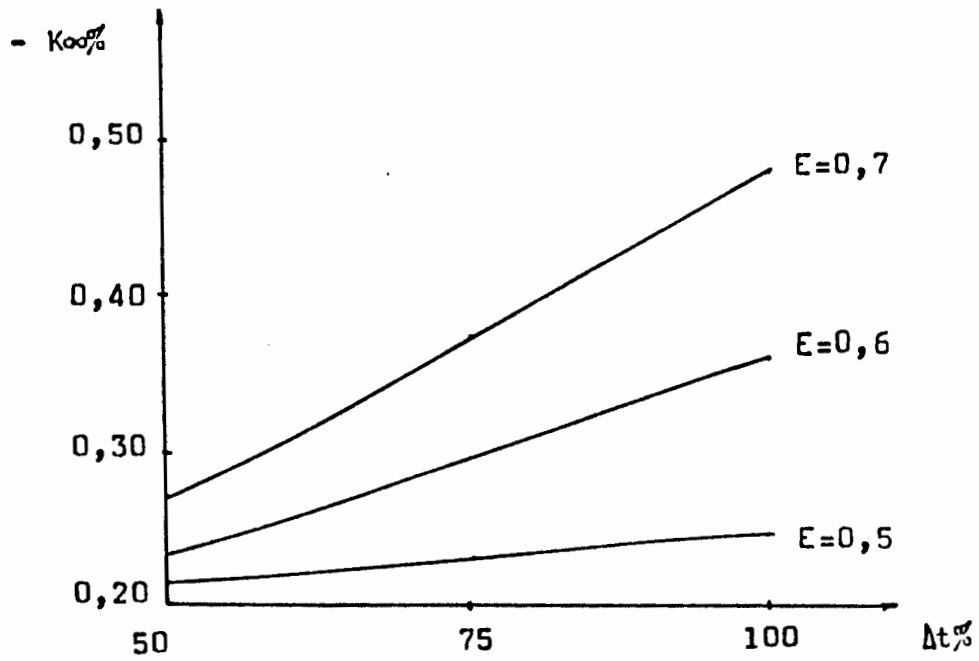


Gráfico 5.9- $\Delta K_{00}\%$ X $\Delta t\%$

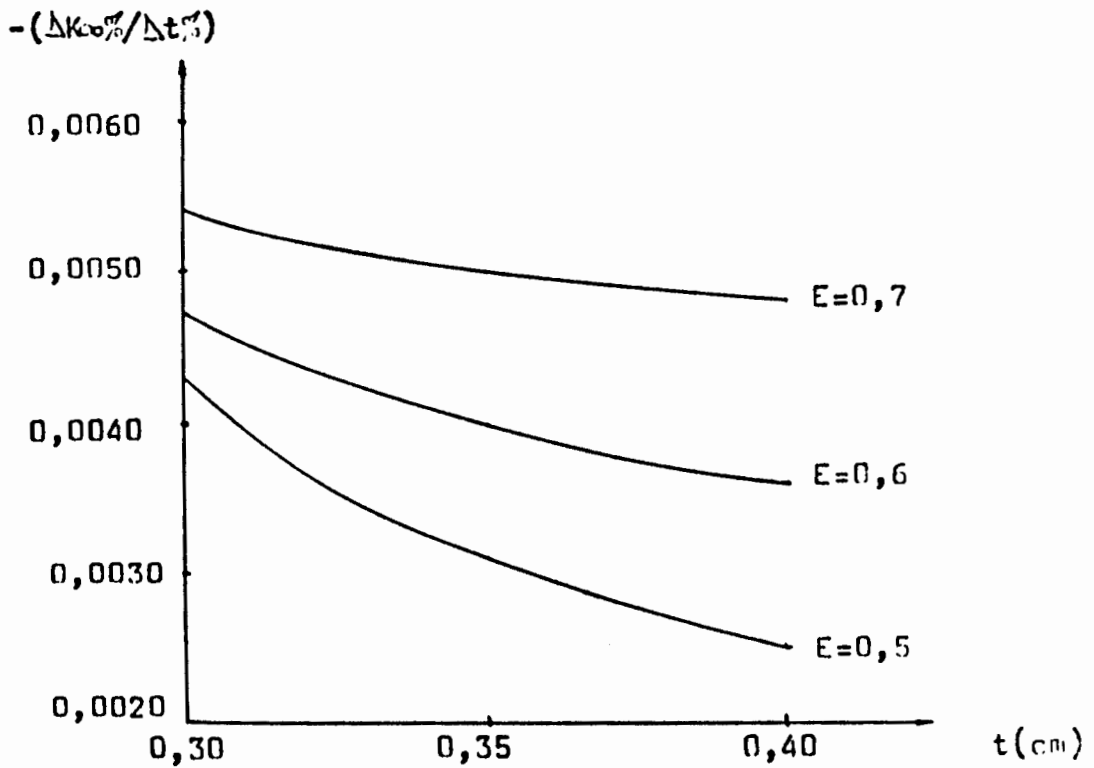


Gráfico 5.10-Influência da espessura do tubo de fluidização, relativo ao caso padrão

Como era esperado houve uma diminuição do valor de K_{∞} finito na medida em que se aumentou a espessura do tubo de fluidização, pela introdução de uma maior quantidade de material passivo no núcleo. Neste caso a faixa operacional não foi alterada pois a quantidade de material introduzido no núcleo, não modificou as características de composição e arranjo das células combustíveis.

Outra observação interessante é que a redução produzida no fator de multiplicação num mesmo caso, por exemplo $t=0,30\text{cm}$, foi crescente ao longo da faixa operacional, devendo-se basicamente ao aumento da razão Massa de material da estrutura do módulo/Massa de UO_2 . (Tabela 5.1 - Gráficos 5.9 e 5.10)

Para uma orientação no projeto pode-se dizer que:

- deve-se buscar o menor valor de espessura para o tubo de fluidização
- A cada 1% de aumento na espessura do tubo de fluidização, acima do caso padrão, dentro da faixa operacional, produz um decréscimo % médio em K_{∞} de:

faixa t%	decréscimo % médio K_{∞}
0-50	-0,0048
0-75	-0,0040
0-100	-0,0036

-Os decréscimos produzidos no valor de K_{efetivo} para o R.N.L.F. com 19 módulos, sem refletor, são da ordem de 16% maiores que os apresentados acima para K_{∞} .

5.7-Espessura da carcaça hexagonal

Tendo em vista as mesmas considerações da seção precedente

te, quanto a justificativa de realização desse estudo e mantendo a área interna da carcaça hexagonal constante, o que corresponderia dizer que a dimensão b_i da figura 5.1a da seção 5.2.2 permaneceu inalterada, variou-se a espessura dessa carcaça, o que corresponderia a um aumento da dimensão b_e com consequente aumento da área ocupada pelo módulo. Variando a espessura da carcaça hexagonal desde 1,5 cm até 4,0 cm, obtém-se:

e	b_e	área módulo	"non-v. fracti!"	$\Delta e\%$	$\Delta nvf\%$	$\frac{\Delta nvf\%}{\Delta e\%}$
1,5	16,39	698,50	29,7	-	-	-
2,0	16,97	748,56	34,4	33,33	15,02	0,475
2,5	17,55	800,35	38,7	66,67	30,30	0,454
3,0	18,13	853,87	42,5	100,00	43,10	0,431
3,5	18,71	909,12	46,0	133,33	54,88	0,412
4,0	19,28	966,10	49,2	166,67	65,66	0,394

Tabela 5.18-Variação da espessura da carcaça hexagonal (dimensões em cm)

Tomando 4 situações da Tabela 5.18, foram rodados os seguintes casos com o código LEOPARD:

Conforme Tabela 5.19 a seguir.

Caso	E	raio pellet	raio revest.	passo	H	B ²	"non-vol. fraction"
e	0,5	0,233	0,285	0,715	84	0,00251	0,297
	=	0,6	0,233	0,285	0,800	0,00208	0,297
	1,5	0,7	0,233	0,285	0,920	0,00174	0,297
e	0,5	0,233	0,285	0,715	84	0,00243	0,344
	=	0,6	0,233	0,285	0,800	0,00200	0,344
	2,0	0,7	0,233	0,285	0,920	0,00166	0,344
e	0,5	0,233	0,285	0,715	84	0,00228	0,425
	=	0,6	0,233	0,285	0,800	0,00186	0,425
	3,0	0,7	0,233	0,285	0,920	0,00152	0,425
e	0,5	0,233	0,285	0,715	84	0,00217	0,492
	=	0,6	0,233	0,285	0,800	0,00174	0,492
	4,0	0,7	0,233	0,285	0,920	0,00140	0,492

Tabela 5.19-Dados de entrada para o código LEOPARD (dimensões em cm)

Os resultados foram:

E	K	e=1,5 cm	e=2,0 cm	e=3,0 cm	e=4,0 cm
0,5	Kefetivo	0,9850536	0,9683777	0,9372332	0,9048604
	Kinfinito	1,17627	1,16176	1,13414	1,10662
0,6	Kefetivo	1,050914	1,034948	1,003906	0,9730154
	Kinfinito	1,21369	1,19830	1,16846	1,13877
0,7	Kefetivo	1,078277	1,062318	1,030861	0,9994971
	Kinfinito	1,21584	1,19903	1,16603	1,13321

Tabela 5.20-Saídas do código LEOPARD (reator sem refletor)

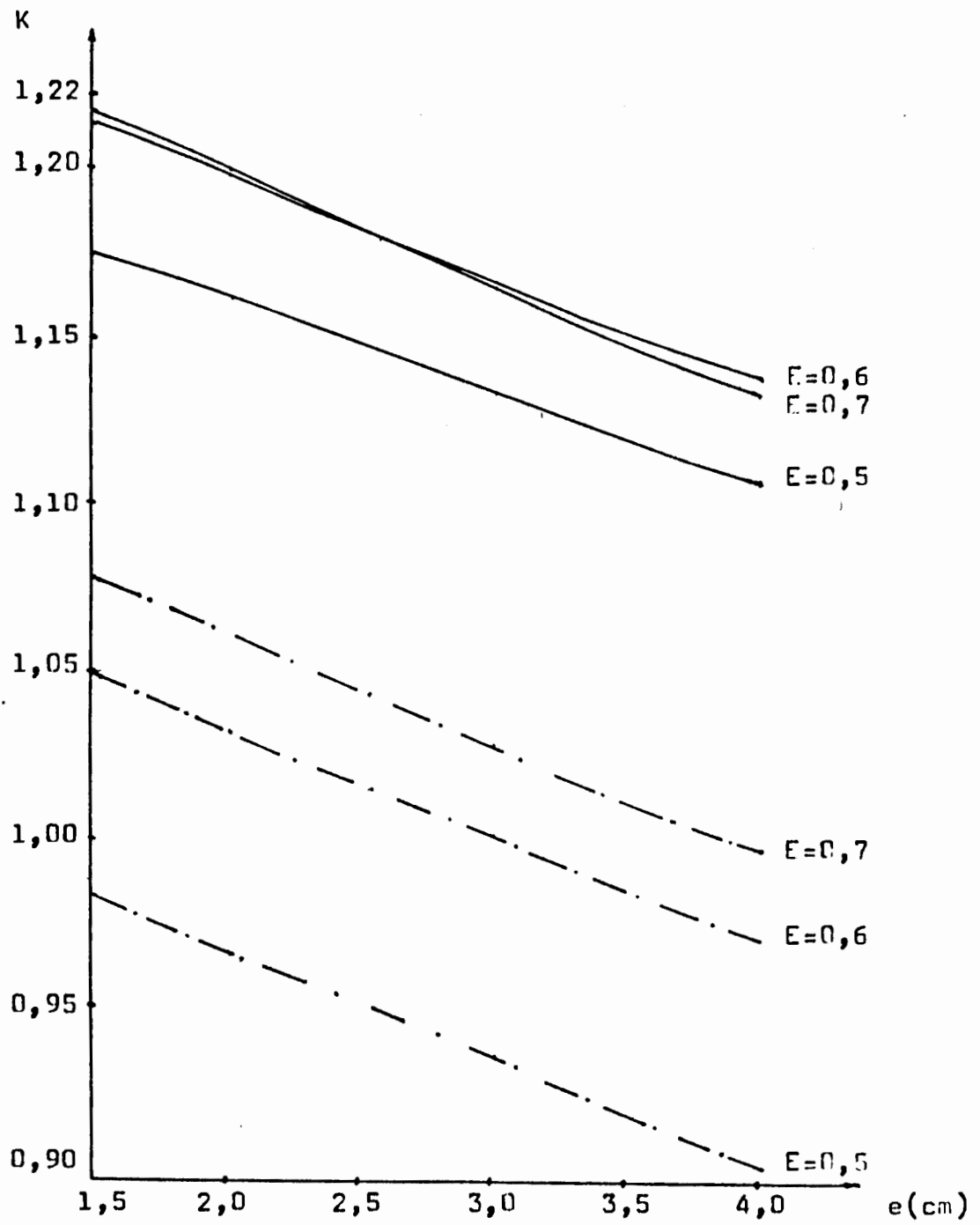


Gráfico 5.11- K X e

— · — Kefetivo
 ————— Kinfinito

E	Caso	$\Delta c, \%$	$\Delta \omega, \%$	$\frac{\Delta K_{eff}}{\Delta e, \%$	$\frac{\Delta n_{vf}}{\Delta e, \%$
0,5	e=2,0	33,33	-1,23	-0,037	0,475
	e=3,0	100,0	-3,50	-0,036	0,431
	e=4,0	166,67	-5,92	-0,036	0,394
0,6	e=2,0	33,33	-1,27	-0,038	0,475
	e=3,0	100,0	-3,73	-0,037	0,431
	e=4,0	166,67	-0,17	-0,037	0,394
0,7	e=2,0	33,33	-1,38	-0,041	0,475
	e=3,0	100,0	-4,10	-0,041	0,431
	e=4,0	166,67	-6,80	-0,041	0,394

Tabela 5.21-Influência da variação da espessura da carcaça hexagonal, relativa ao caso padrão

Como era esperado o aumento da quantidade de material passivo no núcleo do R.N.L.F. reduziu o valor do fator de multiplicação, quando se compara em mesmas condições de fluidização (vide Tabelas 5.20 e 5.21-gráfico 5.11), os casos e=2,0 ,3,0 e 4,0 cm, com o caso padrão que tem como espessura da carcaça hexagonal e=1,5 cm.

Observa-se que os casos com espessura e=1,5 cm e e=2,0 cm, a faixa operacional definida em termos de $K_{infinito}$ permanece inalterada, ou seja, atinge o valor máximo em $E=0,7$.

Para as espessuras e=3,0 cm e e=4,0 cm observa-se uma alteração no valor máximo da faixa operacional em função da porosidade, mas verifica-se que essa mesma faixa se definida em termos de $K_{efetivo}$ atinge o máximo à $E=0,7$, fato este que como comentado anteriormente, se deve ao aumento do buckling em con-

sequência do aumento da porosidade, reduzindo a fuga de neutrons do núcleo. Uma forma de explicar a alteração no comportamento do K_{∞} é que na condição padrão, 29,7% do volume do reator é ocupado por material estrutural, enquanto que no caso $e=3,0$ cm tem-se 42,5% e no caso $e=4,0$ cm tem-se 49,2%, sendo, portanto, praticamente metade do núcleo composto por material passivo sob o ponto de vista neutrônico.

Apesar de pouco provável (vide apêndice A), no caso hipotético de se ter que adotar uma espessura de carcaça da ordem de 3,0 a 4,0 cm, mantendo a faixa operacional entre $E=0,5$ e $E=0,7$, poderiam ser adotadas algumas soluções compensatórias como: aumento do diâmetro da esfera de combustível, aumento do enriquecimento, modificação das dimensões da região de fluidização, entre outras.

Para uma orientação no projeto pode-se dizer que:

- Quanto menor a espessura da carcaça hexagonal melhor é, sendo que o seu valor máximo, para o caso padrão, sem alterar a faixa operacional é $e=2,2$ cm (vide gráfico 5.11);
- A cada 1% de aumento na espessura da carcaça, produz uma redução de 0,038% no valor de K_{∞} ;
- Ter em mente que a redução produzida em K_{efetivo} é maior que a produzida em K_{∞} (para um reator com 19 módulos sem refletor é em torno de 20% maior).

5.8-Altura inicial do leito

No que se refere à altura máxima de colapso do leito é importante quantificar a sua influência, pois servirá na determinação das dimensões do reator. No caso de se denominar de H_0 a altura do leito em colapso e considerando que a porosidade de colapso para a faixa de diâmetros de interesse vale $E=0,4$, pode-

-se a partir da equação (2.1), determinar a seguinte relação:

$$(1-E_0)/(1-E) = H/H_0$$

então para o R.N.L.F. tem-se:

E	H/H ₀
0,4	1,0
0,5	1,2
0,6	1,5
0,7	2,0
0,8	3,0
0,9	6,0

Vendo-se daí que, por exemplo, se a faixa operacional for fixada entre $E=0,5$ e $E=0,7$ com $H_0=70$ cm, se teria o núcleo do R.N.L.F. com uma altura máxima de 140 cm, por outro lado, se a faixa operacional for limitada em $E=0,8$ a altura máxima do núcleo seria 210 cm e assim por diante

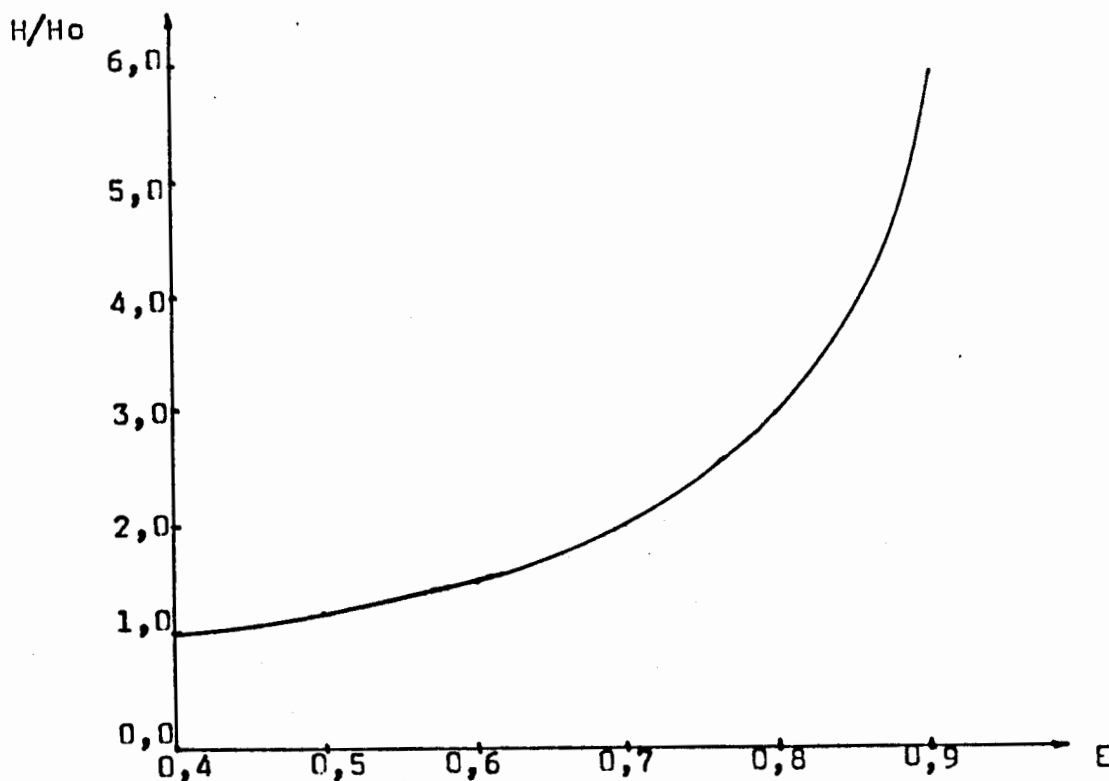


Gráfico 5.12- H/H₀ X E

Outro aspecto que torna relevante esse estudo, é quanto a massa de combustível presente no núcleo, que é função da altura de colapso do leito e determinará os períodos de troca de combustível queimado.

Foram consideradas três situações dentro da faixa operacional:

Caso	E	raio pellet	raio revest.	passo	H	B ²	"non-vol. fraction"
Ho = 70	0,5	0,233	0,285	0,715	84	0,00251	0,297
	0,6	0,233	0,285	0,800	105	0,00208	0,297
	0,7	0,233	0,285	0,920	140	0,00174	0,297
Ho = 50	0,5	0,233	0,285	0,715	60	0,00359	0,297
	0,6	0,233	0,285	0,800	75	0,00280	0,297
	0,7	0,233	0,285	0,920	100	0,00217	0,297
Ho = 100	0,5	0,233	0,285	0,715	120	0,00190	0,297
	0,6	0,233	0,285	0,800	150	0,00168	0,297
	0,7	0,233	0,285	0,920	200	0,00151	0,297

Tabela 5.22-Dados de entrada para o código LEOPARD (dimensões em cm)

E	K	Ho=70 cm	Ho=50 cm	Ho=100 cm
0,5	Kefetivo	0,9850586	0,9150726	1,020035
	Kinfinito	1,17627	1,17421	1,17743
0,6	Kefetivo	1,050914	1,001381	1,080006
	Kinfinito	1,21369	1,21270	1,21424
0,7	Kefetivo	1,078277	1,047657	1,095212
	Kinfinito	1,21584	1,21545	1,21605

Tabela 5.23-Saídas do código LEOPARD (reator sem refletor)

E	Caso	$\Delta H_0\%$	$\Delta K_{ef.}\%$	$\Delta \mu_{02}\%$	$\frac{\Delta K_{ef.}\%}{\Delta H_0\%}$	$\frac{\Delta \mu_{02}\%}{\Delta H_0\%}$
0,5	H ₀ =50	-28,57	-7,10	-28,57	-0,248	-1,0
	H ₀ =100	42,86	4,36	42,86	0,102	1,0
0,6	H ₀ =50	-28,57	-4,71	-28,57	-0,165	-1,0
	H ₀ =100	42,86	2,77	42,86	0,065	1,0
0,7	H ₀ =50	-28,57	-2,84	-28,57	0,099	-1,0
	H ₀ =100	42,86	1,57	42,86	0,037	1,0

Tabela 5.24-Influência da altura de colapso no fator de multiplicação, em relação ao caso padrão

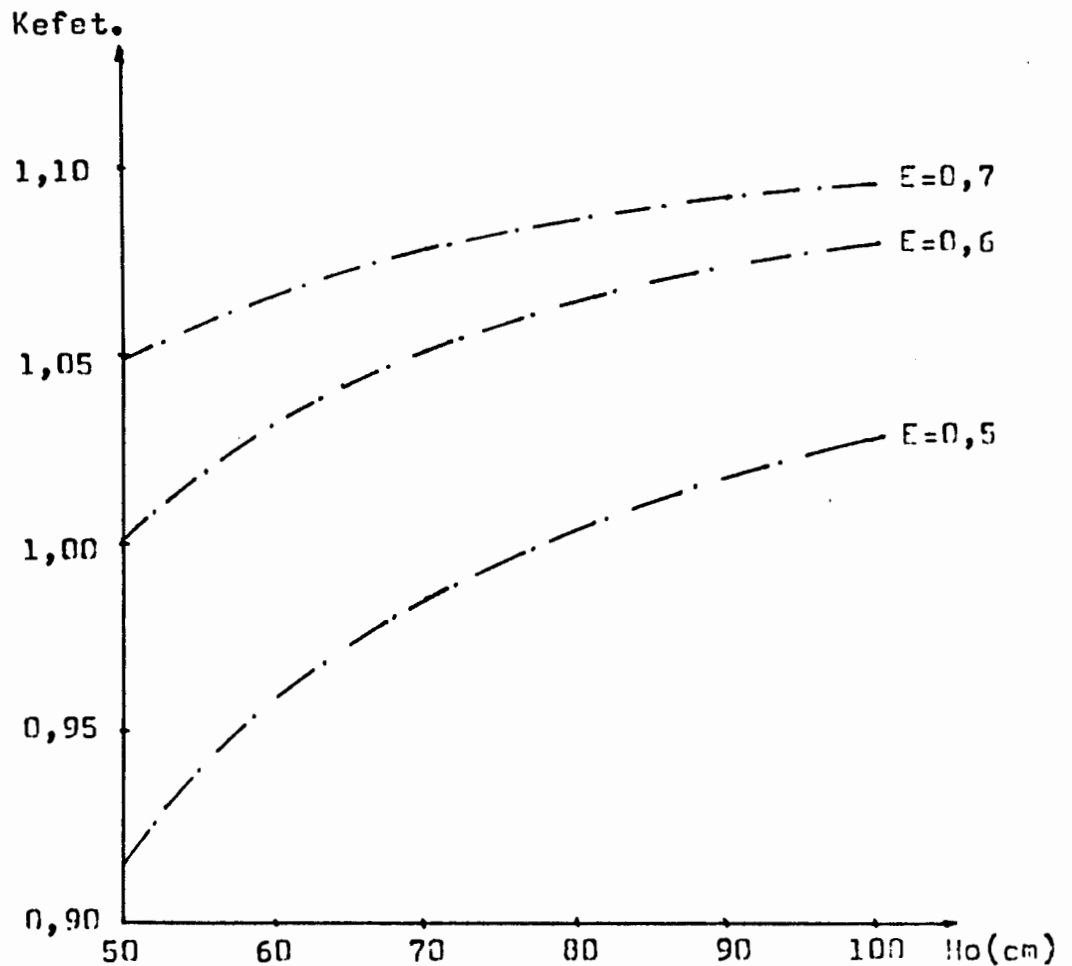


Gráfico 5.13-Kefetivo X altura de colapso

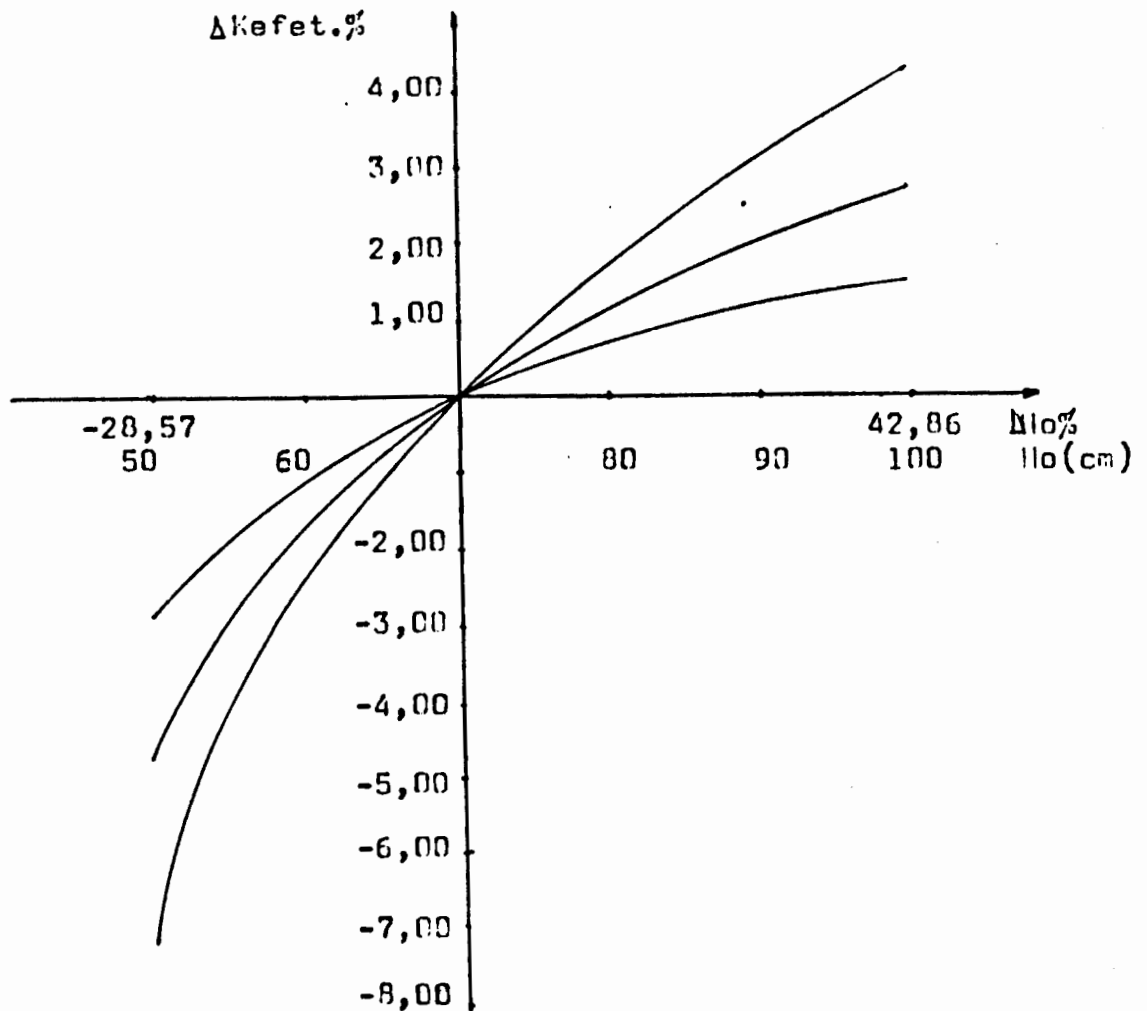


Gráfico 5.14- $\Delta K_{\text{efetivo}}\% \times \Delta H_0\%$

Vê-se pelos resultados da Tabela 5.24 e gráficos 5.13 e 5.14, que o decréscimo no valor do fator de multiplicação em função da altura de colapso, quando se tem uma altura menor que a do caso padrão, é maior que o acréscimo ocorrido no caso de se ter uma altura maior que a do caso padrão. Essa diferença pode ser melhor analisada através do termo de fuga obtido pelo balanço de neutrons nas várias situações, conforme tabela a seguir.

E	Caso	Fuga de neutrons	$\Delta Fuga\%$	$\Delta Ho\%$	$\frac{\Delta Fuga\%}{\Delta Ho\%}$
0,5	Ho=70	0,158416	-	-	-
	Ho=50	0,215241	35,87	-28,57	1,25
	Ho=100	0,123580	-21,99	42,86	-0,51
0,6	Ho=70	0,130688	-	-	-
	Ho=50	0,169899	30,00	-28,57	1,05
	Ho=100	0,107676	-17,61	42,86	-0,41
0,7	Ho=70	0,110374	-	-	-
	Ho=50	0,134727	22,06	-28,57	0,77
	Ho=100	0,0969098	-12,20	42,86	-0,28

Tabela 5.25-Influência da altura de colapso sob o aspecto de fuga de neutrons

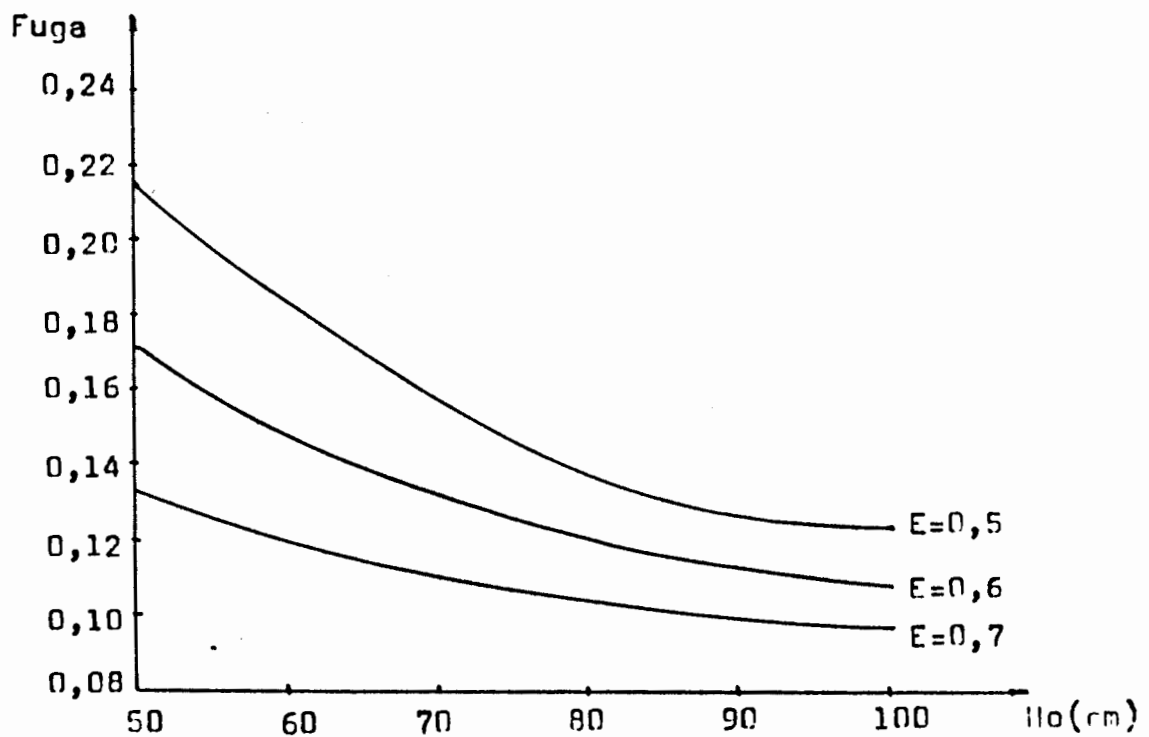


Gráfico 5.15-Fuga de neutrons X altura de colapso

A partir dos resultados da Tabela 5.25 e do gráfico 5.15 pode-se observar o comportamento do termo de fuga de neutrons em função da variação da altura de colapso. Para cada 1% de redução na altura de colapso, em relação ao caso padrão, na faixa operacional, tem-se um aumento médio de 1,02% no termo de fuga. Por outro lado, para cada 1% de aumento na altura de colapso, em relação ao caso padrão, na faixa operacional, tem-se uma redução média de 0,40% no valor do termo de fuga. Logicamente esses valores são válidos para os intervalos de altura de colapso entre 50-70 cm e 70-100 cm, respectivamente.

Considerando que para um cilindro a relação entre raio e altura que oferece menor razão superfície/volume é $R=H/2$ e ainda, para o R.N.L.F.:

altura de colapso	altura inicial faixa operac. (E=0,5)	altura final faixa operac (E=0,7)	altura média fluidização
50,0	60,0	120,0	90,0
70,0	84,0	140,0	112,0
100,0	120,0	200,0	160,0

Tabela 5.26-Alturas de leito na faixa operacional, para diferentes alturas de colapso (dimensões em cm)

No caso de se ter um reator com 19 módulos sem refletor, cujo diâmetro equivalente é 130,0 cm, vê-se que para a altura de colapso $H=50$ cm, que tem como altura média na faixa operacional $H=90,0$ cm, a relação superfície/volume se afasta do valor ideal, explicando assim o maior acréscimo no termo de fuga quando se reduz o valor da altura de colapso na faixa 70-50cm. Em contra-partida, a faixa de alturas de colapso entre 70 e 100 cm se aproxima do valor ideal da relação superfície/volume, sendo de-

sa forma a mais adequada, sob o ponto de vista neutrônico, para o R.N.L.F. com 19 módulos.

C A P Í T U L O 6

Sugestões para estudos futuros no desenvolvimento do R.N.L.F.

6.1-Queima de combustível

6.1.1-Introdução

As densidades atômicas dos vários isótopos presentes no núcleo do reator estão mudando continuamente devido aos processos nucleares, tais como a fissão, captura radioativa e decaimento.

É extremamente importante acompanhar a composição isotópica do núcleo durante a operação do reator, já que uma mudança nessa composição pode afetar o fator de multiplicação e a distribuição de potência. Certamente a previsão da depleção do combustível e a taxa de conversão são essenciais para a determinação da quantidade de combustível requerida para a operação. Além disso certos produtos de fissão são caracterizados por altas seções de choque de absorção e por isso podem afetar significativamente a reatividade do reator. Por exemplo, o Xe^{135} que tem a seção de choque de absorção com valor de $2,7 \cdot 10^6$ barns. Uma pequena quantidade desse produto de fissão pode afetar significativamente o fator de multiplicação do reator, desde que a sua acumulação tenderá a absorver neutrons da cadeia de reação.

A análise da variação da composição do núcleo é complicada pelo fato que a variação espacial e temporal na com-

posição isotópica depende do fluxo de neutrons, o qual por sua vez é função da composição do núcleo. Felizmente as variações na composição isotópica ocorrem relativamente devagar (em escala de tempo de horas, dias, ou mesmo meses) de forma que se pode sempre manter o reator em estado crítico pelo ajustamento dos elementos de controle./17/

No presente capítulo, sugere-se uma forma de encaminhar o estudo de avaliação da queima do combustível no R.N.L.F., através do uso do código LEOPARD.

6.1.2- Características termo-hidráulicas do R.N.L.F.

Estudos preliminares sob o ponto de vista termo-hidráulico/21/ demonstraram que a máxima potência que pode ser extraída do núcleo do R.N.L.F. não é limitada pelas temperaturas limites dos materiais, mas pelo fluxo máximo de refrigerante correspondente à porosidade de operação, devido-se isso ao alto coeficiente convectivo de transferência de calor e da grande superfície de troca térmica.

A taxa de queima de combustível é função da potência extraída do núcleo, sendo portanto necessário que se determine a potência máxima que pode ser extraída em cada condição de fluidização, dentro da faixa operacional do R.N.L.F. .

Como está se considerando o R.N.L.F. refrigerado e moderado por água leve, recomenda-se que as características termodinâmicas do seu ciclo térmico sejam tomadas como as mesmas do PWR, no que se refere à pressão de operação e ao diferencial de temperatura do refrigerante no núcleo, por serem estas as mais vantajosas para esse fluido. Sendo assim, se teria que:

pressão de operação = 158 bars

diferencial de temperatura = 35°C

(Tentreda=291°C e Tsaída=326°C)

Considerando o R.N.L.F. do caso padrão, conforme descrito na seção 5.2 do capítulo precedente e com a faixa operacional entre as porosidades $E=0,5$ e $E=0,7$, obtém-se que:

$$\text{Potência do reator} = n \cdot \rho \cdot v \cdot A \cdot C_p \cdot \Delta t \quad (6.1)$$

onde

n = número de módulos

ρ = densidade da água à temperatura média do intervalo ($\rho_{308^\circ\text{C}} = 0,71 \text{ g/cm}^3$)

v = velocidade do refrigerante

A = área transversal do núcleo de um módulo
($490,87 \text{ cm}^2$)

C_p = calor específico da água na temperatura média do refrigerante ($C_{p308^\circ\text{C}} = 5,48 \text{ Watt.seg/g } ^\circ\text{C}$)

t = diferencial de temperatura

E	H (cm)	Potência/ módulo (Mwt)	Potência-19 módulos (Mwt)	volume reator (cm^3)	Potência espec. (Watt/cm^3)
0,5	84	2,34	44,46	1114806	39,88
0,6	105	3,34	63,46	1393507	45,54
0,7	140	4,68	88,92	1858010	47,86

Tabela 6.1- Características termo-hidráulicas do R.N.L.F.

obs.: Os valores de fluxo de refrigerante foram obtidos experimentalmente a partir de módulos hidráulicos reduzidos

6.1.3-Avaliação da queima de combustível no R.N.L.F.

Com os valores do item anterior pode-se rodar vários casos de queima, dentro da faixa operacional, para intervalos de tempo determinados, como por exemplo: 1º-75 hrs, 2º-500 hrs, 3º-500 hrs, 4º-500 hrs, 5º-1000 hrs, 6º-1000 hrs, 7º-1000 hrs, a fim de se avaliar de maneira aproximada, o comportamento de queima de combustível dentro da faixa operacional ($k=0,5$ a $k=0,7$).

A próxima etapa desse estudo é sistematizar o cálculo de queima de combustível para o R.N.L.F., o que pode ser feito através de alterações no código LEOPARD. Para isso, supondo que o reator do estado crítico passe para sub-crítico, pela queima de combustível, toma-se a composição do núcleo nessa condição, ou seja, imediatamente após o reator ter abandonado a criticalidade. A partir daí promove-se um aumento na altura do leito com conseqüente variação na razão moderador/combustível. No código corresponderia a alterar a altura do reator, o buckling e o passo entre as células, fixando-se a priori um valor médio de potência específica gerada. Supondo que já se tenha informações do comportamento de queima, a partir do estudo proposto anteriormente, as quais estariam incluídas na rotina de cálculo do código na forma de incrementos a serem dados nessas variáveis, poderia se estabelecer um laço até que a condição de criticalidade fosse atingida novamente. Este processo poderia ser estendido até o período de troca do combustível, dotando assim o desenvolvimento deste conceito de reator com um instrumento eficiente de avaliação na gerência de combustível.

6.2-Não uniformidade do leito

6.2.1-Introdução

Uma questão de grande importância quanto à operabilidade do R.N.L.F. é o que se refere a não uniformidade do leito. Esta não uniformidade diz respeito à flutuações que possam ocorrer no leito, produzindo zonas com diferentes porosidades, alterando assim o valor do fator de multiplicação. Apesar de não se ter constatado nenhuma tendência para a formação de canais preferencias no leito, provavelmente em virtude das dimensões do módulo, deve-se avaliar os efeitos da não uniformidade na criticalidade do R.N.L.F. .

6.2.2-Procedimento para a avaliação

A avaliação dos efeitos da não uniformidade do leito do R.N.L.F. sobre a criticalidade, pode ser feita através do uso conjunto dos códigos ODOG e LEOPARD.

Em outros estudos, foram rodados casos com o código ODOG, onde os dados nucleares de entrada foram obtidos através da aplicação da técnica de colapso nas seções de choque do código LEOPARD. A comparação dos valores do fator de multiplicação obtidos pelos dois códigos, nesse estudo, apresentou grande grau de aproximação, considerando-se satisfatória o uso desta técnica no estudo dos efeitos da não uniformidade do leito.

Lembrando que o código ODOG efetua o cálculo global do reator, através da resolução numérica da equação da difusão, para uma dimensão, um grupo de neutrons e quatro regiões, o estudo dos efeitos da não uniformidade do leito pode ser levado a

cabo nas seguintes etapas:

1º) Rodar o código ODOG, com dados de entrada provenientes do colapso dos parâmetros de saída do código LEOPARD, considerando o reator com uma única região homogeneizada, para o R.N.L.F. na porosidade crítica. (situação não perturbada)

2º) Considerar alguns graus de não uniformidade, como por exemplo, 5%, 10%, 15%, 20% e 30%, verificando qual a porosidade que corresponde a cada um desses valores, gerando seções de choque através do código LEOPARD, aplicando posteriormente a técnica de colapso aos resultados obtidos, para a preparação dos dados de entrada a serem utilizados pelo código ODOG.

	5%	10%	15%	20%	30%
D					
Σa	Colapso dos dados de saída do código LEOPARD				
$\sqrt{\Sigma f}$					

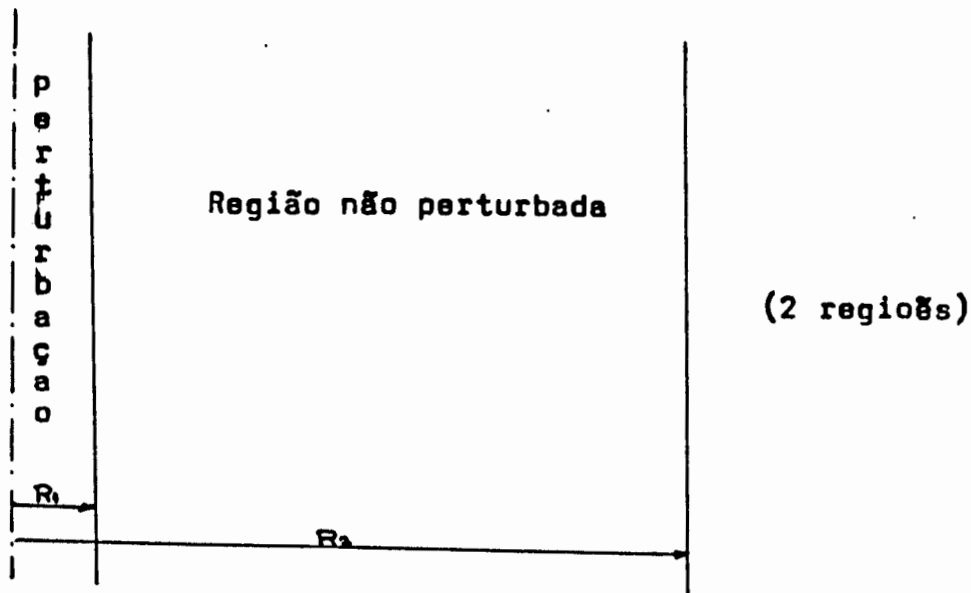
Tabela 6.2-Exemplos de situações de perturbação para a geração de dados a serem utilizados no código ODOG

3º) Determinar qual as porções de volume do reator que podem ser atingidas pela não uniformidade. Por exemplo 5%, 10% e 15%.

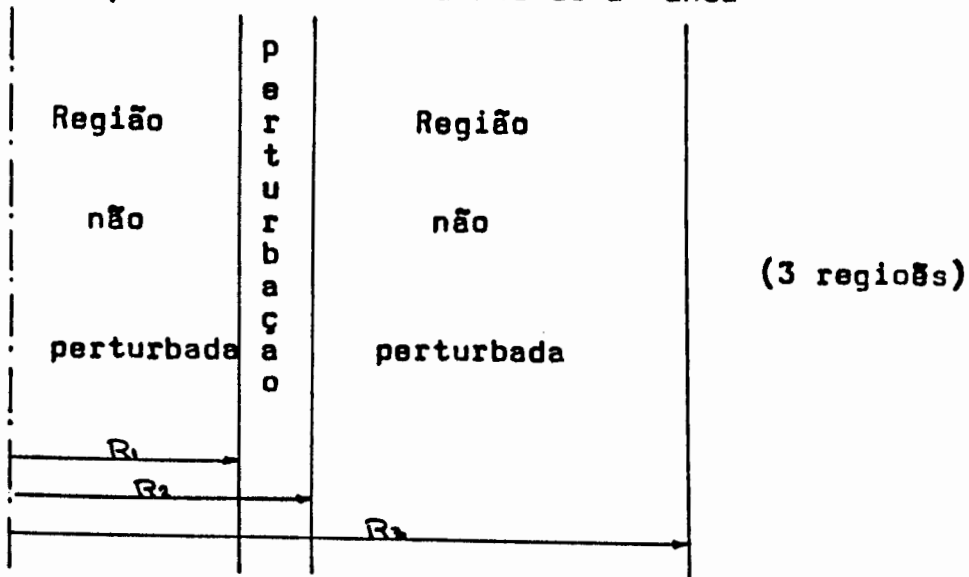
4º) Dispor as regiões perturbadas em várias posições do núcleo, usando o código ODOG com um maior número de regiões. Nesse caso as principais posições a serem consideradas são: módulo central, 1º anel de módulos, 2º anel de módulos (para um reator com 19 módulos)

Os esquemas de entrada para o código ODOG, no tocante à geometria, ficariam sendo:

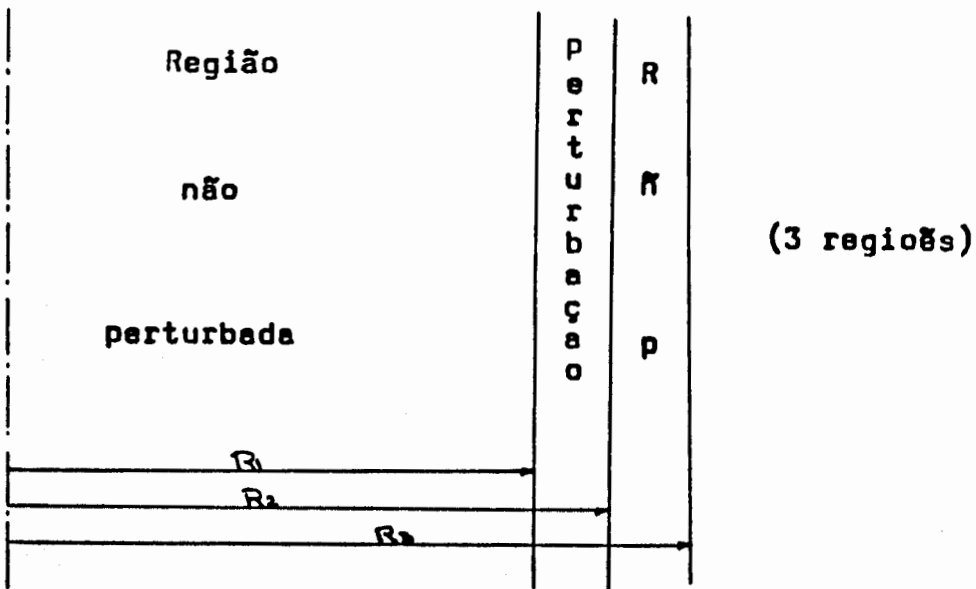
Zona perturbada no módulo central



Zona perturbada nos módulos do 1º anel



Zona de perturbação nos módulos do 2º anel



5º) Rodar os casos com o código ODOG, combinando as variações propostas nas etapas 1 e 2, submetidas aos esquemas da etapa 4. Como na etapa 4 existe uma posição de perturbação de maior influência, a partir da sua determinação, todos os outros cálculos podem ser feitos em função da mesma, considerando-se assim sempre a pior situação.

6º) Comparação dos resultados da etapa 5 com a condição original não perturbada, obtida na etapa 1.

7º) Análise dos resultados provenientes da comparação da etapa anterior, avaliando-se a variação do fator de multiplicação X posição da perturbação X grau de perturbação X porção do núcleo atingida.

A P E N D I C E A

Cálculo das dimensões básicas do módulo do R.N.L.F.

Para o cálculo das dimensões básicas do módulo do R.N.-L.F. levou-se em conta aspectos hidráulicos e de fabricação adotando-se como dimensão de partida o diâmetro interno do tubo de fluidização como sendo 25,0 cm. Sua espessura foi calculada pela teoria de Lamé e pela fórmula apresentada no Reactor Handbook para esta situação.

Deve-se levar em conta que a pressão a que está submetido este tubo é devido apenas à perda de carga entre um lado e o outro do mesmo. Como segurança, esta perda de carga, para efeito de cálculo, foi tomada como sendo de 15,0 Kg/cm², sendo esse valor maior do que o esperado.

Usando a Teoria de Lamé-tubo com livre deformação axial ($\sigma_z=0$), de material dúctil e com o critério de Saint-Venant-Grashoff, o dimensionamento é obtido através da "fórmula de Birnie"
/20/

$$Re = Ri \sqrt{\frac{(\sigma_e + (1-\nu) \cdot /pi/)}{(\sigma_e - (1+\nu) \cdot /pi/)}} \quad (A.1)$$

onde

Re = raio externo do tubo de fluidização

Ri = raio interno do tubo de fluidização

/pi/ = valor em módulo da pressão interna

Para o zircaloy 4 (material escolhido para o tubo de fluidização), tomando como segurança adicional, os valores de resistên

cia a uma temperatura de 500°C, tem-se: /14,15/

$$/pi/ = 15,0 \text{ Kgf/cm}^2$$

$$R_i = 12,50 \text{ cm}$$

$$\nu = 0,33$$

$$e = 2040,0 \text{ Kgf/cm}^2$$

resultando em

$$R_e = 12,59 \text{ cm}$$

com uma espessura de

$$t = 0,09 \text{ cm}$$

Usando a fórmula do Reactor Handbook /14/ e tomando os valores de resistência do zircaloy 4 a 500°C /14,15/, tem-se:

$$t = R_i \left[\left(\frac{ES+P}{ES-P} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (\text{A.2})$$

com

$$E = 0,9$$

$$S = 30\,000 \text{ psi}$$

$$P = 220 \text{ psi}$$

resultando em uma espessura de

$$t = 0,10227 \text{ cm}$$

Pelos resultados dos cálculos vê-se que a espessura do tubo de fluidização deve ser da ordem de 0,1 cm, mas como não foram levados em consideração os efeitos de erosão/corrosão, a espessura adotada fica sendo a de 0,2 cm. Desta forma tem-se que o diâmetro externo do tubo de fluidização vale 25,4 cm.

A carcaça hexagonal é tangente ao tubo de fluidização, portanto a sua área interna é dada pela fórmula:

$$A = 6.r^2.tang30^\circ \quad (A.3)$$

ou ainda por

$$A = 3/2 . b^2.cotang30^\circ \quad (A.4)$$

onde

r = raio do círculo inscrito no hexágono

b = lado do hexágono

Pelos resultados anteriores tem-se que $r = 12,70$ cm, fazendo com que o lado interno da carcaça hexagonal seja:

$$b_i = 14,66 \text{ cm}$$

O cálculo da espessura da carcaça hexagonal foi feito, para uma primeira aproximação, através das considerações de simetria, equilíbrio e efeito de concentração de tensões. O material é também o zircaloy 4 e as suas propriedades foram tomadas a 500°C . /15/

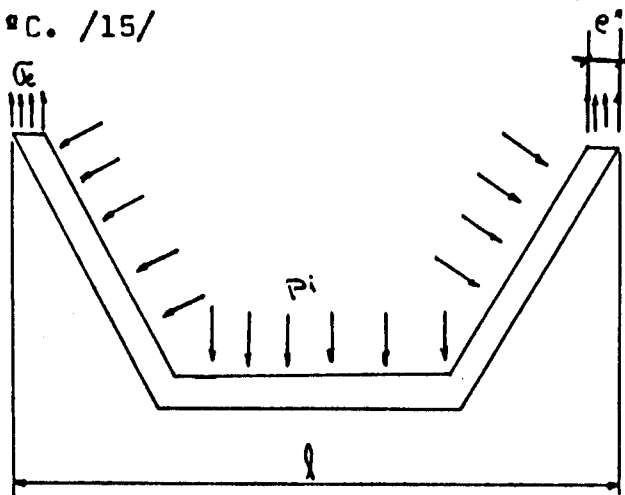


Figura A.1-Esquema usado para o cálculo da carcaça

onde

p_i = pressão interna a que está submetida a carcaça

σ_e = tensão resistente

e = espessura da carcaça hexagonal

l = dimensão projetada na direção das forças em equilíbrio

h = altura da carcaça

Fazendo o balanço de forças, tem-se:

$$p_i \cdot l \cdot h = 2 \cdot \sigma_e \cdot e^*$$

ou

$$e^* = (p_i \cdot l) / (2 \cdot \sigma_e) \quad (A.5)$$

levando em consideração o efeito de concentração de tensões, obtém-se:

$$e = e^* \cdot \beta = ((p_i \cdot l) / (2 \cdot \sigma_e)) \cdot \beta \quad (A.6)$$

onde

$$p_i = 2200 \text{ psi}$$

$$l = 29,3 \text{ cm}$$

$$\sigma_e = 30\,000 \text{ psi}$$

$$\beta = 1,4 \text{ (efeito de concentração de tensões)}$$

resultando como espessura para carcaça hexagonal o valor de

$$e \cong 1,5 \text{ cm}$$

Aplicando as fórmulas (A.3) e (A.4) tem-se para o lado externo da carcaça hexagonal o valor de:

$$b_e = 16,39 \text{ cm}$$

Também nesse cálculo não se levou em conta os efeitos devidos à erosão/corrosão. No entanto, também não se considerou que o módulo central, os módulos do primeiro anel e alguns dos lados dos módulos do segundo anel (para um reator de 19 módulos) , estão justapostos de tal maneira que a estrutura resistente desses módulos no reator pode ser considerada como a soma das espessuras das paredes dos módulos em contato, o que certamente diminuirá a quantidade de material passivo no interior do núcleo, tendo-se que eventualmente reforçar as paredes dos módulos que limitam externamente o reator.

BIBLIOGRAFIA

- /1/ SEFIDVASH,F., "A Fluidized-Bed Nuclear Reactor Concept" Nuclear Technology , Vol. 71 , pp 527-534, Dec. 1985.
- /2/ NUCLEONICS WEEK , August 4 , p.12 , 1983.
- /3/ WEIBERG,A. M., "Nuclear Safety and Public Acceptance" Nuclear News ,Vol. 25 , N. 13 , pp 54-58 , October 1982.
- /4/ DUFFY,J. Q.,"The Little Reactor Than Can the Bigger Reactor That May Be" Ascent , Vol. 3 , N. 1 , pp 22-26 , 1981.
- /5/ SEFIDVASH,F.,"Conceito de um Reator de Potência para o Brasil" Revista Brasileira de Tecnologia , Vol. II , pp 145-158, 1980.
- /6/ REUTLER,H. and LOHNERT,G. H.,"The Modular High-Temperature Reactor" Nuclear Technology ,Vol. 62 ,July 1983 , pp 20-30
- /7/ MCDONALDS,C. F.,SILDAY,F. A.,and SHENOY,A. S. , "The New HTGR Plant Concept Whith Ineherently Safe Features Aimed at Small Energy Users Needs" GA-AL6768 , May 1982.
- /8/ SCHMIDT,R.,"What Prospects for Constructing Small Reactors" Nuclear Engineering International ,pp 49-53 ,October 1982.
- /9/ TIREN,L.,"Safety Aspects of the Small and Medium Sized Nuclear Power Reactors" Report on Information Meeting Held in Conjunction With the 25th General Conference , Vienna 28 , 1981. Published by IAEA.
- /10/ EL-WAKIL,M. M.,"Nuclear Energy Conversion" The American Nuclear Society Publication , 1978.

- /11/ "LEOPARD CODE" WCAP-3269-25 , Westinghouse Electric Corpo.
1983.
- /12/ EL-WAKIL, M. M., "Nuclear Heat Transport" International
TextBook Company , 1971.
- /13/ "REACTOR STATICS" , RS-2 , Virginia Polytechnic and State
University.
- /14/ REACTOR HANDBOOK , Vol. IV , Engineering. Edited by Stuart
McLain and John H. Martens.
- /15/ REACTOR HANDBOOK , Vol. I , Materials. Edited by C. R.
Tipton, jr.
- /16/ LAMARSH, JOHN R., "Nuclear Reactor Theory" , Addison Wesley
Publishing Company, Inc.
- /17/ DUDERSTADT, JAMES J.; HAMILTON, LOUIS J., "Nuclear Reactor
Analisis" John Wiley & Sons, Inc. New York.
- /18/ SEFIDVASH, F., "A Nuclear Power Concept for Developing
Countries" Proceedings of the First Course on Nuclear
Physics and Reactors , Reactor Physics for Developing
Countries , ACIF-IAN , August 1983 , Bogotá , Colômbia.
- /19/ SEFIDVASH, F.; HAROON, M. R., "Preliminary Reactor Physics
Calculations of a Fluidized Bed Nuclear Reactor Concept"
AtomKernenergy/Kerntechnik , Vol. 35 , N. 3 , pp 191-195
1980.
- /20/ VIANA, A., "Resistência dos Materiais III" , Universidade
Federal do Rio Grande do Sul , 1979.

- /21/ SEFIDVASH,F., "Preliminary Thermal Design Calculation of the Fluidized Bed Nuclear Power Reactor" Atomkernenergy Kerntechnik , Vol. 41 , N. 1 , pp 45-49 , 1982.
- /22/ STRAWBRIGE,L. E.;BARRY,R. F.,"Criticality Calculations for Uniform Water-Moderated Lattices" Westinghouse Electric Corporation-WCAP-3269-25 , September 1963.
- /23/ General Description of Pressurized Water Reactors KraftWerk Union Publication. 1980.