

Estudo da Reatividade do Reator Nuclear a Leito Fluidizado

D I S S E R T A C A O

- - - - -

Apresentada ao Programa de Pos-Graduacao em Engenharia da Energia, Metalurgia e Materiais - PPGEEMM, como parte dos requisitos para a obtencao do Titulo de

Mestre em Engenharia

Area de Concentracao ENERGIA

por

Jorge E. Monroe Rammsy

Licenciado em Fisica

U.C.V. - CHILE

1 9 8 5

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

Orientador: Dr. Farhang Sefidvash

Universidade Federal de Rio Grande do Sul

Banca Examinadora: Dr. Farhang Sefidvash

Dr. Darcy Dillenburg

Dr. Alwin Elbern

MSc. Marco Tullio M. B. de Vilhena

Dr. Lirio Schaeffer

Eng. Metalurgico

Coordenador do PPGEEMM

## R E S U M O

- - - - -

Foi realizado um calculo neutronico do Reator Nuclear a Leito Fluidizado com 19 modulos, atraves do emprego dos codigos nucleares Leopard e Odog.

Foi estudado o comportamento do reator, calculando-se a reatividade em funcao de parametros em algumas situacoes operacionais e de acidente. Dentro destes estudos esta compreendida a analise do comportamento da reatividade quando ocorre variacao de temperatura, pressao e geracao de vapor no nucleo. Foi tambem realizado estudo da partida do reator.

Com a finalidade de estudar o prototipo do reator de pesquisa, foi estudado o comportamento de um modulo.

A B S T R A C T  
- - - - -

The reactor physics calculations of a 19 module Fluidized Bed Nuclear Reactor using Leopard & Odog codes are performed. The behavior of the reactor was studied by calculating the reactivity of the reactor as a function of the parameters governing the operational and accidental conditions of the reactor. The effects of temperature, pressure, and vapor generation in the core on the reactivity are calculated. Also the start up behavior of the reactor is analyzed. For the purpose of the study of a prototype research reactor, the calculations on a one module reactor have been performed.

A G R A D E C I M E N T O S  
- - - - -

Ao Dr. Farhang Sefidvash e ao chefe do Departamento de Engenharia Nuclear MSc. Marco Tullio M. B. de Vilhena pela orientacao recebida durante a execucao deste trabalho.

Ao Dr. Aldyr Mauricio ( CNEN - Brasil ) pelo auxilio financeiro dado a este trabalho.

Aos senhores Claudio Silva e Alvaro Covarrubia ( CCHEN - Chile ) pelo respaldo brindado frente a CNEN - Brasil.

Aos meus colegas Rosmeri, Jefferson, Lucia e Elaine, pela ajuda e estimulo recebidos durante este trabalho.

A minha esposa pela passiencia que teve durante a realizacao do meu trabalho.

""DE FORMA MUITO ESPECIAL A MEU AMIGO MARCO TULLIO DE VILHENA PELA FORCA MORAL, ESPIRITUAL E BONS CONSELHOS QUE BRINDOU-ME NOS MOMENTOS MAIS DIFICEIS DURANTE A EXECUCAO DO MEU CURSO DE MESTRE, JA QUE MINHA CONCLUSAO DO TRABALHO FOI DEVIDA A SEU APOIO DESINTERESADO"".

Ao pessoal do Departamento de Engenharia Nuclear da UFRGS.

.... Se diz que neste mundo um homem se realiza quando planta uma arvore, tem um filho e escreve um livro. Eu ja fiz tudo isso e nao encontrei a minha realizacao, ja que, so me sentirei realizado quando mostrar aos meus pais que a educacao que eles me deram nao tem sido mal aproveitada, e a minha felicidade e fazer a felicidade deles.

Aos meus pais

Juan e Adriana

## I N D I C E :

- - - - -

	Resumo .....	IV
	Abstract .....	V
	Indice de Tabelas, Graficos e Figura .....	XI
I	Introducao .....	1
II	CAPITULO I	
	REATOR NUCLEAR A LEITO FLUIDIZADO	
	1.1.- Descricao do Reator .....	3
	1.2.- Funcionamento do Reator .....	4
	1.3.- Controle do Reator .....	5
III	CAPITULO II	
	CODIGOS	
	2.1.- Codigo Leopard .....	10
	2.2.- Codigo Odog .....	16
IV	CAPITULO III	
	DADOS PARA CODIGO LEOPARD	
	3.1.- Reator Equivalente .....	22
V	CAPITULO IV	
	RESULTADOS	
	4.1.- Estudo da Reatividade do Reator Padrao a 20 °C .....	33
	4.2.- Reator Padrao de 19 Modulos .....	39

4.3.- Start-Up do Reator Padrao .....	48
4.4.- Reatividade em funcao da geracao de vapor .....	51
4.5.- Reatividade em funcao da Temperatura com pressao constante .....	57
4.6.- Reatividade em funcao da Pressao com temperatura constante .....	59
4.7.- Distribuicao do Fluxo de Neutrons no Reator Padrao	61
4.8.- Calculo de nao Uniformidade .....	63
4.9.- Estudos da Reatividade em um Modulo .....	65

## VI CAPITULO V

### ANALISES E DISCUSOES

5.1.- Reator Padrao com 19 modulos .....	76
5.2.- Reatividade em funcao da geracao de vapor .....	76
5.3.- Reatividade em funcao da Temperatura com pressao constante .....	77
5.4.- Reatividade em funcao da Pressao com temperatura constante .....	78
5.5.- Distribuicao do Fluxo de Neutrons no Reator Padrao	78
5.6.- Estudos da Reatividade em um Modulo .....	79
5.7.- Conclusoes .....	81

### APENDICE A

1.1.- Calculos Diversos .....	84
-------------------------------	----

### APENDICE B

1.1.- Entrada de Leopard .....	92
--------------------------------	----



1.2.- Entradas de Odog ..... 96

APENDICE D

1.1.- Colapso ..... 99

VII BIBLIOGRAFIA ..... 100

INDICE DE TABELAS E GRAFICOS

1.- TABELAS

1.1.- Valores de entrada para Codigo Leopard para o Reator Nuclear a Leito Fluidizado Padrao (3.1) .....	30
1.2.- Valores do buckling para um modulo do Reator Padrao (3.2) .....	31
1.3.- Valores de k efetivo e k infinito do codigo Odog para um enriquecimento de 2.5% (4.1) .....	33
1.4.- Valores de k efetivo e k infinito do codigo Odog para um enriquecimento de 2.6% (4.2) .....	34
1.5. Valores de k efetivo e k infinito do codigo Odog para um enriquecimento de 2.8% (4.3) .....	34
1.6.- Valores de k efetivo e k infinito do codigo Odog para um enriquecimento de 3% (4.4) .....	35
1.7.- Valores de k efetivo e k infinito do codigo Odog para um enriquecimento de 4% (4.5) .....	35
1.8.- Valores de k efetivo e k infinito do codigo Odog para um enriquecimento de 3% (4.7) .....	36
1.9.- Valores de k efetivo e k infinito do codigo Odog para um enriquecimento de 3.2% (4.8) .....	36
1.10.- Valores de k efetivo e k infinito do codigo Odog para um enriquecimento de 4% (4.9) .....	37
1.11.- Valores de k efetivo e k infinito do codigo Odog para enriquecimentos 3.1% e 4.2% (4.10) .....	37

1.12.- Valores de $k_{\text{efetivo}}$ e $k_{\text{infinito}}$ do código Odog para um enriquecimento de 4% (4.11) .....	38
1.13.- Valores de $k_{\text{efetivo}}$ e $k_{\text{infinito}}$ do código Odog para um enriquecimento de 4% (4.12) .....	38
1.14.- Valores de $k_{\text{efetivo}}$ e $k_{\text{infinito}}$ . Códigos: Leopard, Odog. Reator Padrao (4.13) .....	39
1.15.- Valores de $k_{\text{efetivo}}$ e $k_{\text{infinito}}$ . Código: Leopard. Reator Padrao a temperaturas de 20, 90 e 200 C. (4.14).....	42
1.16.- Valores de $k_{\text{efetivo}}$ e $k_{\text{infinito}}$ . Código: Odog. Reator Padrao a temperaturas de 20, 90 e 200 C. (4.15) .....	43
1.17.- Valores de $k_{\text{efetivo}}$ e $k_{\text{infinito}}$ do código Odog variando a altura inicial H com temperatura de 20 C e porosidade em 0.40 (4.16) .....	48
1.18.- Valores de $k_{\text{efetivo}}$ e $k_{\text{infinito}}$ do código Odog variando a altura inicial H com temperatura de 308 C e porosidade em 0.40 (4.17) .....	49
1.19.- Valores de $k_{\text{efetivo}}$ e $k_{\text{infinito}}$ em função da geração de vapor. Reator Padrao. Código: Leopard (4.18) .....	51
1.20.- Valores de $k_{\text{efetivo}}$ e $k_{\text{infinito}}$ em função da geração de vapor. Reator Padrao. Código: Odog (4.19).....	52
1.21.- Valores de $k_{\text{efetivo}}$ e $k_{\text{infinito}}$ em função da temperatura com pressão cte. Reator Padrao. Código: Odog (4.20).....	57
1.22.- Valores de $k_{\text{efetivo}}$ e $k_{\text{infinito}}$ em função da pressão	

com temperatura cte. Reator Padrao. Codigo: Odog (4.21) .....	59
1.23.- Distribuicao do fluxo de neutrons no Reator Padrao para as porosidades 0.4, 0.45 e 0.7 (4.22).....	61
1.24.- Valores de k efetivi e k infinito com nao uniformidade no nucleo, areas iguais (4.23) .....	64
1.25.- Valores de k efetivo e k infinito com nao uniformidade no nucleo, areas diferentes (4.24) .....	64
1.26.- Valores de k efetivo e k infinito para um modulo composto de esferas de UO <sub>2</sub> , enriquecimento 4%, revestimento e material estrutural de aluminio temperatura 50 C. Codigo: Odog (4.25).....	65
1.27.- Valores de k efetivo e k infinito para um modulo composto de esferas de UO <sub>2</sub> , enriquecimento 4%, revestimento de Zr e material estrutural de SS304 temperatura 50 C. Codigo: Odog (4.26) .....	67
1.28.- Valores de k efetivo e k infinito para um modulo composto de esferas de UO <sub>2</sub> , enriquecimento 4.4%, revestimento e material estrutural de Zr, temperatura 50 C. Codigo: Odog (4.27) .....	69
1.29.-, Valores de k efetivo e k infinito para um modulo composto de esferas de UO <sub>2</sub> , enriquecimento 4.4%, revestimento e material estrutural de Al, temperatura 50 C. Codigo: Odog (4.28) .....	71
1.30.- Valores de k efetivo e k infinito para um modulo composto de esferas de UO <sub>2</sub> , enriquecimento 5%,	

	revestimento de Al e material estrutural de SS304, temperatura 50 C. Codigo: Odog (4.29) .....	73
1.31.-	Valores de k infinito para o reator tipo PWR (4.20) ..	82
1.32.-	Valores de k efetivo e k infinito para o Reator Padrao composto de esferas de UO <sub>2</sub> , enriquecimento 4%, revestimento e material estrutural de Zr, temperatura 308 C. Codigo: Odog (A-1) .....	85
1.33.-	Valores de k efetivo e k infinito para o Reator composto de esferas de UO <sub>2</sub> , enriquecimento 4%, revestimento e material estrutural de SS304, tempera- tura 308 C. Codigo: Odog (A-2) .....	87
1.34.-	Valores de k efetivo e k infinito para o reator composto de esferas de UO <sub>2</sub> , enriquecimento 4%, revestimento de Zr e material estrutural de SS304, temperatura 308 C. Codigo: Odog (A-3) .....	89
1.35.-	Entrada de Leopard (B-1) .....	95
1.36.-	Entrada de Odog (B-2) .....	97

## 2.- GRAFICOS

-----

2.1.-	Variacao de k efetivo em funcao da porosidade para o Reator Padrao. Codigos: Leopard, Odog (4.1) .....	40
2.2.-	Variacao de k infinito em funcao da porosidade para o Reator Padrao. Codigos: Leopard, Odog (4.2) .....	41
2.3.-	Variacao de k efetivo em funcao da porosidade para o Reator Padrao com temperaturas de 20, 90 e 200 C.	

	Codigo: Leopard (4.3) .....	44
2.4.-	Variacao de k infinito em funcao da porosidade para o Reator Padrao com temperaturas de 20, 90 e 200 C.	
	Codigo: Leopard (4.4) .....	45
2.5.-	Variacao de k efetivo em funcao da porosidade para o Reator Padrao com temperaturas de 20, 90 e 200 C.	
	Codigo: Odog (4.5) .....	46
2.6.-	Variacao de k infinito em funcao da porosidade para o Reator Padrao com temperaturas de 20, 90 e 200 C.	
	Codigo: Odog (4.6) .....	47
2.7.-	Comportamento da reatividade do Reator em Start-up (4.7) .....	50
2.8.-	Variacao de k efetivo em funcao da geracao de vapor, para o Reator Padrao com porosidades de 0.4, 0.45 e 0.7	
	Codigo: Leopard (4.8) .....	53
2.9.-	Variacao de k infinito em funcao da geracao de vapor para o Reator Padrao com porosidades de 0.4, 0.45 e 0.7	
	Codigo: Leopard (4.9) .....	54
2.9.-	Variacao de k efetivo em funcao da geracao de vapor para o Reator Padrao com porosidades de 0.4, 0.45 e 0.7	
	Codigo: Odog (4.10) .....	55
2.10.-	Variacao de k infinito em funcao da geracao de vapor para o Reator Padrao com porosidades de 0.4, 0.45 e 0.7. Codigo: Odog (4.11) .....	56
2.11.-	Variacao de k efetivo e k infinito em funcao da temperatura com pressao cte e porosidade de 0.7 para o	

Reator Padrao. Codigo: Odog	(4.12)	.....	58
2.12.- Variacao de k efetivo e k infinito em funcao da pressao com temperatura cte e porosidade de 0.7 para o Reator Padrao. Codigo: Odog	(4.13)	.....	60
2.13.- Distribuicao do fluxo de neutrons para as porosidades 0.4, 0.45 e 0.7 para o Reator Padrao com dimencoes finitas	(4.14)	.....	62
2.14.- Variacao de k efetivo e k infinito em funcao da poro- sidade para um modulo composto de esferas de UO <sub>2</sub> , enriquecimento 4%, revestimento e material estrutural de Al com temperatura de 50 C. Codigo: Odog	(4.15)	...	66
2.15.- Variacao de k efetivo e k infinito em funcao da poro- sidade para um modulo composto de esferas de UO <sub>2</sub> , enriquecimento 4%, revestimento de Zr e material es- trutural de SS304 com temperatura de 50 C. Codigo Odog	(4.16)	.....	68
2.16.- Variacao de k efetivo e k infinito em funcao da poro- sidade para um modulo composto de esferas de UO <sub>2</sub> , enriquecimento de 4.4%, revestimento e material estru- tural de Zr com temperatura de 50 C. Codigo: Odog	(4.17)	.....	70
2.17.- Variacao de k efetivo e k infinito em funcao da poro- sidade para um modulo composto de esferas de UO <sub>2</sub> , enriquecimento de 4.4%, revestimento e material estru- tural de Al com temperatura de 50 C. Codigo: Odog	(4.18)	.....	72

2.18.-	Variacao de k efetivo e k infinito em funcao da porosidade para um modulo composto de esferas de UO <sub>2</sub> , enriquecimento de 5%, revestimento de Al e material estrutural de SS304 com temperatura de 50 C. Codigo Odog (4.19) .....	74
2.19.-	Variacao de k infinito de um reator PWR em funcao da razao de moderador VH <sub>2</sub> O/VUO <sub>2</sub> (KWU) (4.20) .....	82
2.20.-	Variacao de k efetivo e k infinito em funcao da porosidade para o Reator composto de esferas de UO <sub>2</sub> , enriquecimento de 4%, revestimento e material estrutural de Zr com temperatura de 308 C. Codigo: Odog (A-1) .....	86
2.21.-	Variacao de k efetivo e k infinito em funcao da porosidade para o Reator composto de esferas de UO <sub>2</sub> , enriquecimento de 4%, revestimento e material estrutural de SS304 com temperatura de 308 C. Codigo: Odog (A-2) .....	88
2.22.-	Variacao de k efetivo e k infinito em funcao da porosidade para o Reator composto de esferas de UO <sub>2</sub> , enriquecimento de 4%. revestimento de Zr e material estrutural de SS304 com temperatura de 308 C. Codigo: Odog (A-3) .....	90
3	FIGURAS -----	
3.1.-	Esquema de um modulo do Reator Nuclear a Leito Fluidizado fig(1.1) .....	7



3.2.-	Vista superior do Reator Nuclear a Leito Fluidizado	
	fig(1.2) .....	8
3.3.-	Geometria do reator e notacao fig(2.1) .....	19
3.4.-	Esfera e barra de combustivel com revestimento	
	fig(3.1) .....	23
3.5.-	Arranjo quadrangular das barras fig(3.2) .....	24
3.6.-	Corte transversal do modulo fig(3.3) .....	25
3.7.-	Corte longitudinal do modulo fig(3.4) .....	27

## I INTRODUCAO

-----

Se realizara um estudo neutronico de um novo reator nuclear baseado no conceito de leito fluidizado que e modular em conceito e de facil fabricacao tendo o elemento de combustivel esferico. (1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12)

O estudo sera dividido em cinco capitulos. No Capitulo I, se realizara uma descricao geral do reator, funcionamento e controle deste. No Capitulo II, se dara uma breve descricao dos codigos Leopard e Odog, usados nos calculos neutronicos deste reator. No Capitulo III, sera apresentado o metodo de calculo do reator equivalente, de uma geometria esferica para cilindrica para preparar os dados de entrada usados pelo Leopard. A equivalencia e feita considerando-se igualdade na razao superficie-volume entre estas geometrias. No Capitulo IV serao apresentados os resultados obtidos para diferentes situacoes. No Capitulo V, sera efetuadas analise do comportamento do reator em diversas situacoes com conclusoes e sugestoes, obtidas durante a execucao deste trabalho. No Apendice A, sera mostrado o comportamento do reator para diferentes enriquecimentos e diferentes materiais de revestimento, tubo e carcaca. No Apendice B, sera estudado o comportamento da reatividade do reator em condicao de nao uniformidade do leito. No Apendice C sera apresentada como e feita a entrada de dados para o codigo Leopard e Odog. No Apendice D sera apresentado como se feis o colapso dos dados do Leopard para uso no Odog. No apendice E se apresentam diversos calculos feitos para o reator padrao variando o enriquecimento.

## C A P I T U L O    I

### REATOR NUCLEAR A LEITO FLUIDIZADO

1.1 Descricao do  
Reator

1.2 Funcionamento do  
Reator

1.3 Controle do Reator

### 1.1.- Descriçao do Reator

-----

Este modulo pode ser dividido em um nucleo na sua parte superior e uma camara de combustivel na parte inferior. O nucleo e formado por um tubo de fluidizacão cilindrico de 25 cm de diametro interno, circundado por uma carcaca de forma hexagonal. A camara de combustivel e composta por um tubo de 10 cm de diametro interno, o qual esta no prolongamento do tubo de fluidizacão. Entre o tubo de fluidizacão e a carcaca hexagonal e por conseguinte, entre a camara de combustivel e a carcaca circular, que esta no prolongamento da carcaca hexagonal, forma-se um anel no qual a agua entra pela parte superior, penetrando apos na camara de combustivel por perfuracoes existentes na sua extremidade inferior. Na parte superior do reator existe uma tela que assegura o limite maximo da altura de leito fluidizado. Um anel de controle cilindrico, absorvedor de neutrons, esta conectado a esta tela. Dentro da camara de combustivel existe combustivel na forma de esferas de dióxido de uranio (UO<sub>2</sub>) levemente enriquecido, revestido com zircaloy e com diametro aproximado de 0.8 cm.

A alimentacão do combustivel e feita pelo centro do eixo oco do acionamento da tela limitadora. Na base inferior da camara de combustivel existe uma valvula acionada atraves de um sistema hidraulico que permite a retirada de combustivel do interior da camara para um reservatorio onde ficara permanentemente esfriado. A parte inferior do reator, ou seja, a carcaca, e

aterrada numa camada de grafite. Na parte superior do tubo de fluidizacão existe um gerador de vapor do tipo "shell and tube". O fluxo de refrigeração é feito através de uma bomba em circuito fechado.

A água fria entra na parte inferior, vai ao distribuidor, passa pelas perfurações, entra na câmara de combustível, sobe para o núcleo do reator absorvendo calor. Imediatamente, entra no gerador de vapor e transfere este calor. Após, retorna para a bomba descendo pelos anéis entre os tubos de fluidizacão e a carcaca do módulo.

No módulo existe um pressurizador para estabilizar a pressão e uma válvula de despressurização, que injeta vapor no condensador quando é necessário diminuir a pressão para permitir a abertura da válvula de descarga do combustível.

Em torno do reator existe um refletor de grafite e blindagem biológica. (13)

#### 1.2.- Funcionamento do Reator

Conforme cálculos preliminares, a variação na razão entre a quantidade de moderador e combustível resulta numa faixa de reatividade crescente num certo intervalo de porosidade, atingindo um valor máximo, e decrescendo posteriormente com o ulterior aumento na porosidade.

Baseado neste fato, o reator compensará a diminuição de reatividade, devido a queima de combustível e a produção de

venenos, através de um aumento de porosidade. A porosidade é controlada através do fluxo de refrigerante.

Como segurança adicional existe uma tela que serve como limitante de porosidade acima do valor desejado, ou seja, o máximo permitido.

No caso de um acidente de perda de refrigerante, ou qualquer outro tipo de acidente, ocorrerá um desligamento automático da bomba, com consequente precipitação do combustível do núcleo para a câmara de combustível onde, devido à configuração geométrica, o sistema se torna altamente subcrítico.

Se desejado, o combustível pode ser retirado através da válvula de descarga de combustível para um reservatório onde ficará permanentemente armazenado.

Outra alternativa seria, com injeção de água, alterar o nível do reservatório até cobrir a base do reator, fazendo com que o mesmo fique permanentemente esfriado. (13)

### 1.3.- Controle do Reator

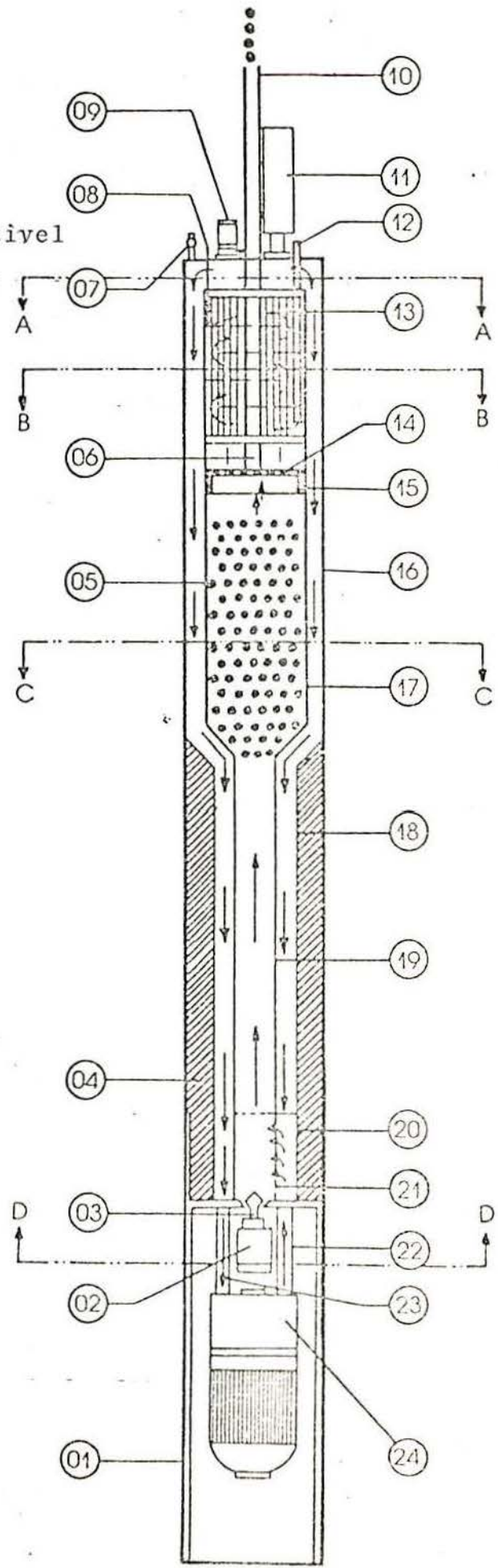
As quatro maiores áreas de decisão no controle do reator são: início do processo, operação em estado estacionário, parada e estado transiente.

Quando o reator começa a operar, o núcleo está a uma temperatura mais baixa que a temperatura de operação. Devido ao coeficiente negativo de temperatura, o reator deve alcançar a potência máxima através de sucessivos ajustes da velocidade do fluxo

refrigerante, com conseqüente alteraçao na porosidade, variando, desta maneira, a razão moderador combustível. Este ajuste implica em vários passos. Durante as condições normais de operação, pequenas flutuações de reatividade são controladas através da variação do fluxo de refrigerante no intervalo de compensação compreendido entre o nível superior do leito e a tela limitadora.

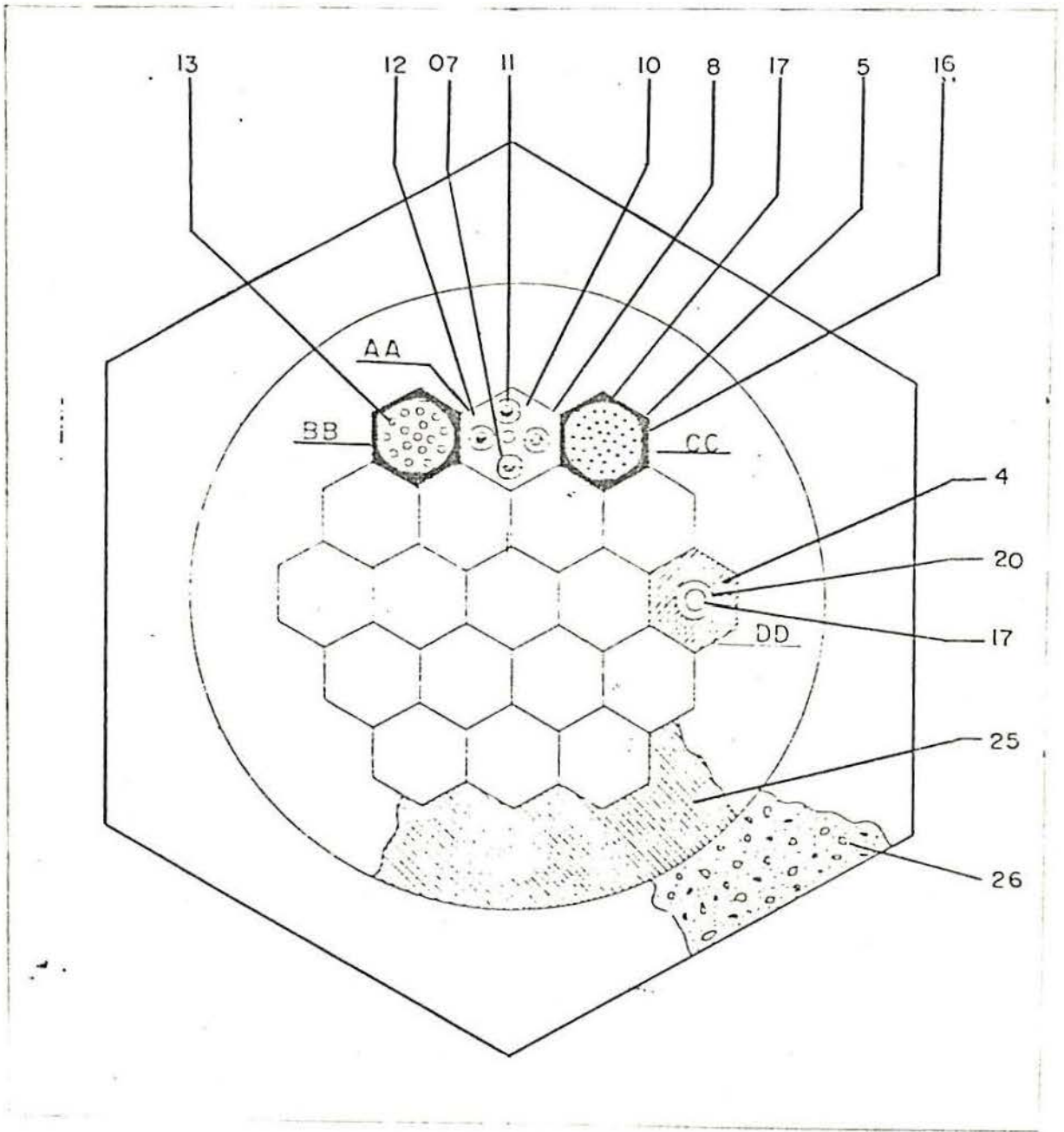
Para compensar os efeitos da queima do combustível, eleva-se o nível da tela limitadora e aumenta-se o fluxo de refrigeração. A parada do reator é facilmente obtida através do decréscimo da velocidade da bomba, causando diminuição da porosidade do núcleo. O leito em colapso é altamente subcrítico. (13)

- 01 Suporte estrutural
- 02 Acionador hidráulico
- 03 Válvula de descarga de combustível
- 04 Grafite
- 05 Núcleo do reator
- 06 Eixo oco da tela
- 07 Despressurizador
- 08 Saída de vapor
- 09 Conjunto acionador da tela
- 10 Alimentação de combustível
- 11 Pressurizador
- 12 Entrada de água
- 13 Gerador de vapor
- 14 Tela
- 15 Anel absorvente
- 16 Carcaça hexagonal
- 17 Tubo fluidização
- 18 Carcaça circular
- 19 Câmara de combustível
- 20 Distribuidor
- 21 Perfuração de entrada
- 22 Entrada de refrigerante
- 23 Saída de refrigerante
- 24 Bomba circuito primário
- 25 Refletor de grafite
- 26 Blindagem biológico



Figura(1.1) Esquema de um modulo do Reator Nuclear a Leito Fluidizado





Figura(1.2) Vista superior do Reator Nuclear a Leito Fluidizado

C A P I T U L O    I I

C O D I G O S

2.1.- Código Leopard

2.2.- Código Odog

## 2.1.- CODIGO LEOPARD

-----

O código Leopard(14,15) calcula as seções de choque equivalentes homogêneas de uma célula unitária heterogênea. O código pode ser usado para determinar as variações nas seções de choque como uma função da queima de combustível.

O código Leopard usa o código de neutrons rápidos MUFT e o código de neutrons termicos SOFOCATE para computar duas opções de saída (1 grupo termico + 1 grupo rapido) ou (1 grupo termico + 3 grupos rapidos) de seção de choque macroscópica.

CODIGO MUFT:Muft(16) resolve a equação de transporte de neutrons transformada por Fourier a 54 grupos expandida em harmônicos esféricos usando aproximação B para calcular as seções de choque de neutrons rápidos entre  $10\text{Mev}$  e  $0.625\text{ev}$  e colapsa-las para 1 ou 3 grupos. A faixa de energia de cada um dos três grupos é  $(10 \rightarrow 0.821)\text{Mev}$ ,  $(821 \rightarrow 5.53)\text{kev}$  e  $(5530 \rightarrow 0.625)\text{ev}$ . Na região de ressonância do Muft, os fatores de auto blindagem e absorvedores na ressonância são fornecidos para levar em consideração a depressão do fluxo na energia de ressonância. Os efeitos de heterogeneidade são incorporados nos cálculos do fator de utilização termica, de absorção por ressonância e fissão rápida. Na faixa de energia de ressonância, a única heterogeneidade importante é o efeito de conglomeração de absorvedores ressonantes a consequente redução na absorção. O fator de auto blindagem é aplicado para o cálculo de seções de choque de ressonância para considerar a redução na absorção. Em combustíveis levemente

enriquecidos, o unico isotopo para o qual a auto blindagem e importante e o U238. A concentracao de U235 e relativamente baixa e os calculos indicam que o fator de auto blindagem na ressonancia para o U235 pode ser alterado por um fator 2 com uma variacao desprezivel no fator de multiplicacao. Isto e devido ao fato de que tanto as taxa de fissao como absorcao variam no U235, enquanto que somente a taxa de absorcao varia no U238 com o fator de auto blindagem. Consequentemente todas as auto blindagens na ressonancia sao desprezadas, exeto no U238. No muft, o fator auto blindagem inclui o efeito Doppler desde que biblioteca de seccao de choque do Muft nao contem dependencia de temperatura. O calculo da absorcao na ressonancia e feita em tres passos: Primeiro a probabilidade de escape a ressonancia do U238 ( $p$ ) e calculada para o "lattice"; o fator de auto blindagem e obtido para o U238; finalmente, o fator auto-blindagem e usado para determinar o espectro Muft e constantes rapidas para poucos grupos colapsados.

As integrais de absorcao na ressonancia sao calculadas usando as aproximacoes "NARROW RESSONANCE" e "INFINITE-MASS", com parametros de ressonancia disponiveis em arquivos de dados.

Correcoes para o auto blindagem na ressonancia, efeito Dancoff e alargamento Doppler sao feitos com o uso do parametro "L-Factor". O "L-Factor" correto pode ser determinado rodando varios casos Muft ou procurando "L-Factor" ate que a integral de ressonancia para absorcao ou a probabilidade de escape a ressonancia para U238 coincida com o valor obtido de uma correlacao experimental

ou "benchmark". Essencialmente toda a fissão rápida no U238 ocorre na faixa de energia de 10 Mev a 0.821 mev.

CODIGO SOFOCATE: O código Sofocate calcula as constantes do grupo termico fazendo uma media sobre um espectro Wigner-Wilkins (17,18) usando 172 grupos de energia na faixa de 0 a 0.625ev. A celula unitaria e homogeneizada para cada um dos 172 grupos de energia usando o metodo Amoyal, Benoist e Horowitz (ABH) (19) para fornecer a seccao de choque macroscopica equivalente homogenea para o modelo de Wigner-Wilkins.

Leopard supoe que o conjunto de combustivel consiste em um grande arranjo de celulas de combustivel unitarias dispostas em geometria quadrada ou hexagonal.

A celula unitaria e aproximada como tres regioes concentricas correspondendo ao combustivel, revestimento e moderador. O vazio do combustivel, "gap" e homogeneizado com o revestimento. O efeito da porcao de nucleo que nao e representada pela celula unitaria de combustivel no reator e levado em consideracao pelo conceito de "SUPERCELULA" admitindo uma regioa ficticia extra que e definida e descrita de uma maneira inteiramente analoga a descricao das regioes "reais" na celula unitaria de combustivel. Calculos do espectro sao entao feitos numa celula unitaria "equivalente".

O modelo de Wigner-Wilkins, modelo de gas livre ou modelo de gas de protons, e um modelo aproximado para termalizacao de neutrons (17,18) o qual e a mais simples descricao da termalizacao de neutrons fornecendo resultados de suficiente precisao para uso

no projeto do reator, em cujo modelo o núcleo do reator é um gás de prótons ( $A=1$ ) em equilíbrio térmico a uma temperatura  $T$ . Assim o modelo ignora tanto ligações químicas quanto difração de nêutrons. Entretanto ele descreve "up scattering" e tem obtido repetidos sucessos para gerar espectros térmicos, úteis no projeto de reatores de água leve.

O parâmetro térmico mais significativo nos cálculos da criticidade é  $\eta_f$ , o número de nêutrons emitidos por absorção de nêutrons térmicos. Este  $\eta_f$  é calculado pela seguinte expressão:

$$\eta_f = \frac{\nu \sum_f^N}{\sum_a^N} = \frac{\nu \sum_f V_0 \phi_0}{\sum_{a0} V_0 \phi_0 + \sum_{a1} V_1 \phi_1 + \sum_{a2} V_2 \phi_2}$$

$$\eta_f = \frac{\nu \sum_{f0}}{\sum_{a0} + \sum_{a1} \frac{V_1 \phi_1}{V_0 \phi_0} + \sum_{a2} \frac{V_2 \phi_2}{V_0 \phi_0}}$$

onde  $\sum_{a1}$ ,  $V_1/V_0$ ,  $V_2/V_0$  e  $\phi$  são a seção de choque macroscópica, as frações de volume e o fluxo térmico no combustível (0), revestimento (1) e moderador (2). Nesta expressão, as seções de choque e os fatores de desvantagem ( $\phi_1/\phi_0$  e  $\phi_2/\phi_0$ ) são

dependentes da energia. Usando o metodo Greebler (20), os fatores de desvantagem sao calculados em todos os niveis de energia do Sofocate e estao inerentemente incluidos no calculo espectral. Subrotina BURN e uma subrotina que calcula a "Depressao" do combustivel e a variacao nas seccoes de choque em funcao da queima de material. Consequentemente e possivel obter um conjunto completo de seccoes de choque macroscopicas para um combustivel ao longo de seu tempo de vida no nucleo.

A variacao no espectro de neutrons com a queima de combustivel sao consideradas acoplando-se os metodos de solucao Sofocate e Muft com a solucao das equacoes de "depressao" de cadeias de decaimento de nuclideos.

Leopard computa a variacao na densidade numerica para isotopos de Th, U e Pu; Th-232, U-233, U-234, U-235, U-236, U-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241 e Pu-242. Uma solucao "exata" das cadeias do Th-232 e U-238 e usualmente baseada na solucao por Transformada de Laplace dos conjuntos de equacoes diferenciais. As densidades numericas iniciais de todos os elementos no reator e incluida diretamente. Esta conglomerata todos os produtos de fissao exceto I-135, Xe-135, Pr-149 e Sm-149 que sao aglomerados em um pseudo elemento. O pseudo elemento e produzido por fissao e as seccoes de choques tem dimensoes de barn/fissao.

Apos computar dados da seccao de choque e da taxa de reacao para uma celula cilindrica unitaria de combustivel, o codigo resolve as equacoes de queima de uranio e producao de plutonio

para obter uma nova composicao de combustivel apos especificado o intervalo de burnup (ou tempo). A sucessao de passos de burnup podem ser calculadas automaticamente, com o espectro de neutrons, seccoes de choques e taxas de reacao recalculadas a cada passo.

O codigo e util na geracao de seccoes de choque em funcao da "Depletion" para uso em calculos de difusao de poucos grupos para determinar a reatividade e as distribuicoes de potencia em funcao da vida do nucleo.

A fonte das seccoes de choque microscopicas vem de medidas experimentais e calculos teoricos de interacao de neutrons com os varios isotopos. Tais dados como existen na literatura foram bem estudados, interpretados, para sua validade e compilados para uso nos codigos nucleares no Evaluated Nuclear Data File/B ( ENDF/B, arquivo literario de dados ). Os dados do ENDF/B sao muito detalhados e complicados para uso direto no codigo Leopard, tipo multigrupo, para gerar seccoes de choque macroscopicas. Consequentemente, codigos intermediarios, como ETOM e ETOG, sao usados para gerar a biblioteca de seccoes de choque de multigrupo do Muft, enquanto que Flange II e para gerar a biblioteca de seccoes de choque para Sofocate.



## 2.2 CODIGO ODOG

-----

Codigo ODOG, (21) ( One Dimention - One Group ), e um programa criado pelo Instituto Politecnico de Virginia, EE.UU., para resolver a equacao de difusao , usando a teoria de difusao a uma dimensao e um grupo de neutrons em geometria plana, cilindrica ou esferica, calculando o coeficiente de multiplicacao para uma dada configuracao do reator, utilizando dados de entrada caracteristicos do reator como coeficiente de difusao, seccao de choque de absorcao e producao de neutrons. A solucao da equacao de difusao independente do tempo, fornece informacoes sobre o tamanho critico do reator, a distribuicao de fluxo de neutrons e potencia em um meio constituido de multiplas regioes.

O proposito basico deste codigo e a solucao numerica da equacao de difusao de neutrons a um grupo. A equacao de difusao de neutrons em estado estacionario no nucleo e:

$$-\nabla^2 D \phi(r) + \Sigma_a(r) \phi(r) = \frac{1}{k} \nu \Sigma_f(r) \phi(r) \quad (2.2.1)$$

O primeiro termo descreve a taxa de fuga de neutrons, enquanto que o segundo termo representa a taxa de absorcao de neutrons. O termo do lado direito da equacao 2.2.1 e a taxa de producao de neutrons ou fonte de neutrons. O termo de fuga da equacao acima depende da forma geometrica:

$$\nabla^2 \Phi(r) = \frac{1}{r^\alpha} \left\{ \frac{d}{dr} \left\{ r^\alpha \frac{d\Phi}{dr} \right\} \right\} \quad (2.2.2)$$

onde os seguintes valores de  $\alpha$  indicam o sistema de coordenadas a usar

$\alpha = 0$  plana

$\alpha = 1$  cilíndrica

$\alpha = 2$  esféricas

Da equação acima concluímos que se  $k > 1$ , então o sistema é super crítico, portanto a produção de neutrons deve ser reduzida para que o balanço de neutrons seja o adequado, se  $k = 1$ , então, a produção é igual a perda de neutrons e o reator é crítico, e se  $k < 1$ , o sistema é sub-crítico, portanto, a produção de neutrons deve ser aumentada para que o balanço de neutrons seja adequado. As condições de contorno usadas são a continuidade do fluxo, e corrente de neutrons na interface. Na fronteira do reator considera-se que o fluxo de neutrons se anula na distância extrapolada. O fluxo de neutrons é sempre considerado não negativo e finito no reator.

O buckling material é um parâmetro que depende da composição do meio. O buckling geométrico por outro lado é definido como o menor autovalor do problema  $\nabla^2 \Phi + B^2 \Phi = 0$ , com  $\Phi(\alpha) = 0$ . A condição de criticalidade é descrita como uma igualdade do buckling material e o buckling geométrico.

O fator de multiplicação  $k$  da equação 2.2.1 é determinado por método iterativo sendo que em cada iteração a equação 2.2.1 é

integrada e discretizada pelo metodo das diferencas finitas resultando num sistema linear com matriz tridiagonal que e resolvido pelo algoritmo de Thomas.

O codigo realiza uma correcao de fuga de neutrons nas direcoes Y e Z que sao consideradas no buckling geometrico, aumentando a taxa de absorcao do valor  $DB^2$ .

O programa Odog resolve problemas em qualquer uma das tres geometrias: plana, cilindricas e esfericas. A figura(2.1) indica algumas das notacoes usadas na definicao das regioes. Podem existir M ( $M \leq 5$ ) regioes diferentes sendo que as distancias sao medidas desde a origem ( $r = 0$ ).

As sequencias de passos ou operacoes que o programa faz sao as seguintes

#### 1.- Especificacao da geometria do reator

- (i) NN=2 reator esferico
- (ii) NN=1 reator cilindrico
- (iii) NN=0 reator em geometria plana

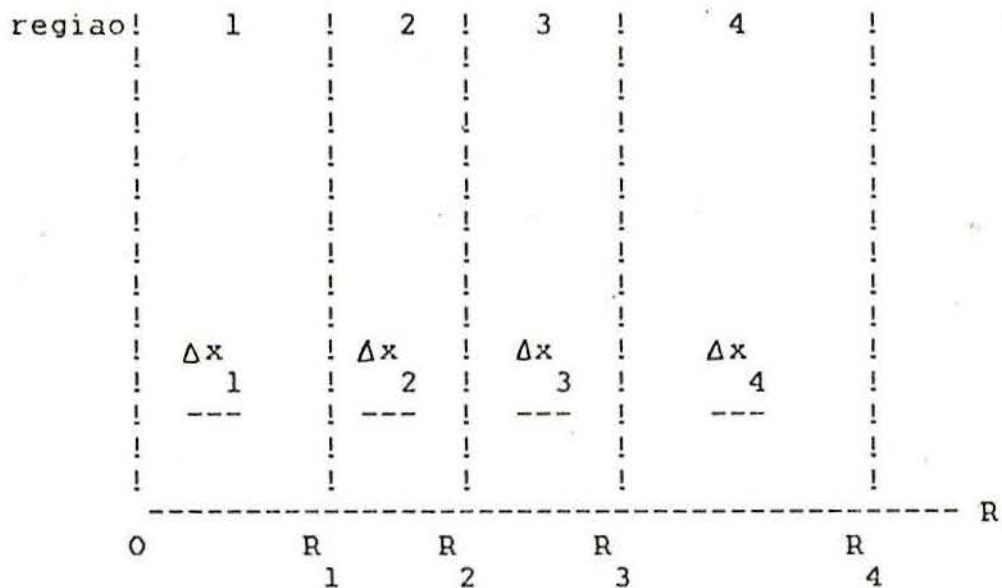


figura (2.1) Geometria do reator e notação

2.- Cálculo do número de intervalos em cada subregião

$N_1$  = Número de intervalos na região 1

$$= \frac{R_1}{\Delta x_1} + 1$$

e em geral

$$N_i = \left( \frac{R_i - R_{i-1}}{\Delta x_i} \right) + 1 \quad 2 \leq i \leq M$$

3.- Devido a que a primeira região tem uma estrutura de malha altamente diferente das outras regiões (o primeiro ponto da malha está em  $\frac{1}{2} \Delta x_1$ ), foi necessário calcular as propriedades desta região separadamente.

4.- A constante de multiplicação é calculada por método iterativo sendo que em cada iteração o fluxo é calculado

resolvendose um sistema linear utilizando o algoritmo de Thomas.

5.- O fluxo correspondente ao valor de  $k$  e calculado e plotado em cada ponto da malha.

C A P I T U L O    I I I

D A D O S   P A R A   C O D I G O   L E O P A R D

3.1 Reator Equivalente

ESCOLA DE ENGENHARIA  
BIBLIOTECA

### 3.1 Reator Equivalente

-----

Todos os calculos foram feitos com os codigos Leopard e Odog os quais, foram explicados no capitulo anterior. O codigo Leopard calcula parametros tais como, coeficiente de difusao e seccoes de choque, para 4 grupos de neutrons que sao colapsados posteriormente (vide apendice D) para 1 grupo e usadas no codigo odog. O codigo Leopard faz os calculos sobre uma celula de combustivel de geometria cilindrica com 3 ou 4 regioes e todos os dados de entrada usados pelo codigo Leopard sao obtidos da celula cilindrica equivalente a ser determinada. Como em nosso caso temos celulas de combustivel esfericas nao se pode realizar o calculo em forma direta. Para poder gerar os dados de entrada usados pelo codigo Leopard no caso do Reator Nuclear a Leito Fluidizado, teve que ser feita a equivalencia de uma celula de combustivel esferico com a cilindrica, para permitir o uso do Leopard.

Para poder determinar-se as dimensoes da celula equivalente, procedeu-se da seguinte maneira, ou seja fez-se igualdade entre razoes volume/area da superficie entre geometria esferica e cilindrica: (1)

$$\frac{4 \pi (d'/2)^2}{3} = \frac{2 \pi (D'/2) h}{\pi (D'/2)^2 h} \quad (3.1.1)$$

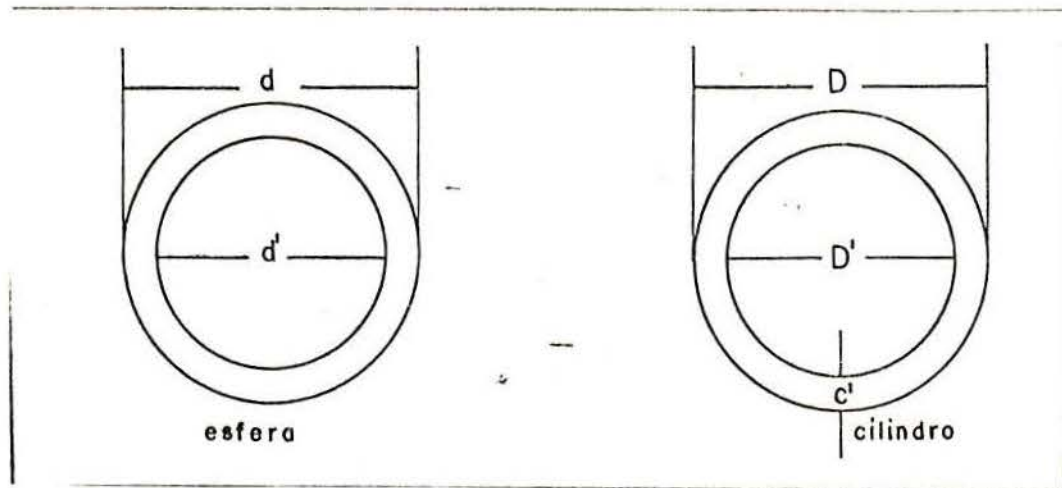


Figura (3.1) Esfera e barra de combustível com revestimento

simplificando (3.1.1) resulta

$$D' = \frac{2}{3} d' \quad (3.1.2)$$

Para o cálculo do revestimento da barra de combustível fez-se a seguinte igualdade entre razões de volume revestimento/volume combustível entre geometria esférica e cilíndrica:

$$\frac{\frac{4 \pi (d^3 - d'^3)}{3}}{\frac{4 \pi d'^3}{3}} = \frac{\frac{\pi (D^2 - D'^2) h}{2}}{\frac{\pi (D')^2 h}{2}} \quad (3.1.3)$$

que simplificando resulta

$$c' = \frac{1}{3} \left( d - d' \sqrt{\frac{d'}{d}} \right) \quad (3.1.4)$$

sendo  $c' = (D - D')/2$



O calculo do PASSO, que e a distancia entre centros de duas celulas adjacentes, e feito supondo-se que as barras estao dispostas em forma quadrangular

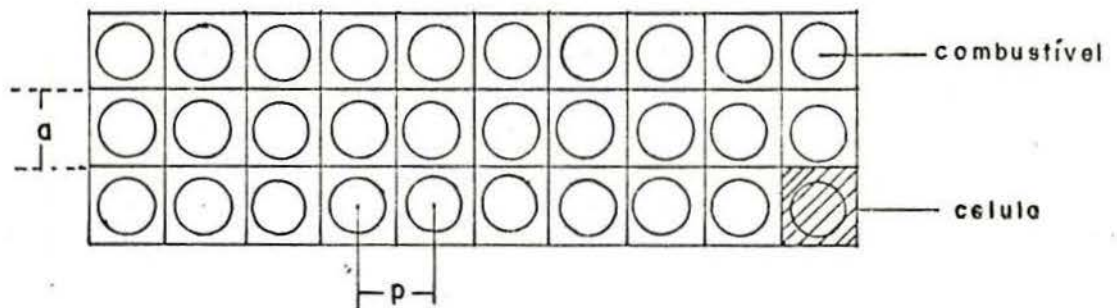


Figura (3.2) Arranjo Quadrangular das barras. p = Passo

No leito fluidizado a porosidade e definida como razao entre volume de agua e volume total que consideramos igual a fracao de agua sobre o volume total da celula ou seja:

$$\epsilon = \frac{a^2 h - \pi (D/2)^2 h}{a^2 h} \quad (3.1.5)$$

Entao o passo equivalente a e

$$a = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{\pi}{1 - \epsilon}} \quad (3.1.6)$$

No caso em que as barras estiverem disposta em forma hexagonal, procedendo de maneira analoga obtemos a seguinte expressao para o Passo:

$$p = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\pi}{1 - \epsilon}} \quad (3.1.7)$$

Necessita-se calcular os volumes do tubo, da carcaca e da agua, para obter-se os percentuais destes em relacao ao modulo. Estes calculos correspondem ao percentual de Zr e H2O na regioao extra, usado pelo codigo Leopard. Para tal definimos

$V_t$  = Volume do tubo de espessura  $t$

$V_h$  = volume do prisma hexagonal de espessura  $t$

$V_{H2O}$  = volume de H2O no modulo

$V_{h_{in}}$  = volume interno do prisma hexagonal de raio  $b/2 + t$

$V_{t_{ex}}$  = volume externo do tubo de raio  $b/2 + t$

$V_{total}$  = volume total do modulo

sendo o volume do prisma hexagonal  $V_{hex} = 6r^2 h \tan(\pi/6)$  e o vo-

lume do cilindro  $V_{cil} = \pi r^2 h$

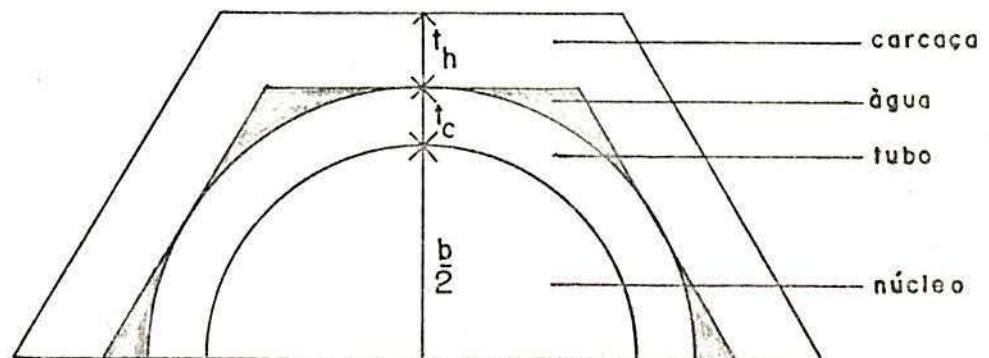


Figura (3.3) Corte transversal do modulo

Para figura (3.3) obtemos as seguintes expressões de volume

$$V_h = \frac{6}{\sqrt{3}} h \left( \frac{t^2}{h} + b \frac{t}{h} + 2 \frac{t}{c} \frac{t}{h} \right) \quad (3.1.8)$$

$$V_{h \text{ in}} = \frac{6}{\sqrt{3}} h \left( \frac{b}{2} + \frac{t}{c} \right)^2 \quad (3.1.9)$$

$$V_t = \pi \left( \frac{t^2}{c} + b \frac{t}{c} \right) h \quad (3.1.10)$$

$$V_{t \text{ ex}} = \pi h \left( \frac{b}{2} + \frac{t}{c} \right)^2 \quad (3.1.11)$$

$$V_{H2O} = \left( \frac{6}{\sqrt{3}} - \pi \right) \left( \frac{b}{2} + \frac{t}{c} \right)^2 h \quad (3.1.12)$$

$$V_{\text{total}} = \frac{6}{\sqrt{3}} h \left( \frac{b}{2} + \frac{t}{c} + \frac{t}{h} \right)^2 \quad (3.1.13)$$

Destas expressões de volume obtemos:

$$\text{Percentual extra Zr-2} = \frac{V_t + V_h}{V_{\text{total}}} \quad (3.1.14)$$

$$\text{Percentual extra H}_2\text{O} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{total}}} \quad (3.1.15)$$

Para as seguintes dimensoes do modulo,  $b = 25$  cm,  $t_c = 0.5$  cm, e  $t_h = 0.5$  cm, os volumes serao:

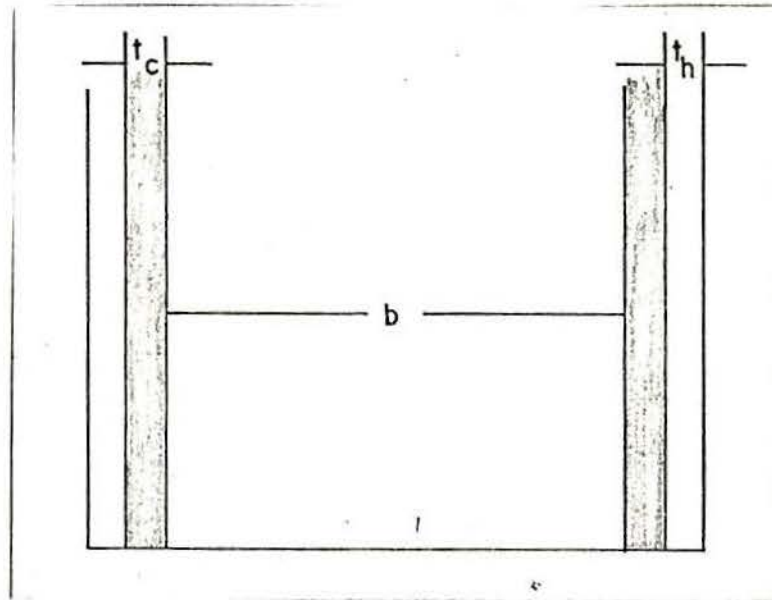


Figura (3.4) Corte longitudinal do modulo sobre a apotema do hexagono

$$\begin{aligned} V_t &= 40.055 h \text{ cm}^3 & V_h &= 45.899 h \text{ cm}^3 \\ v_{\text{H}_2\text{O}} &= 54.504 h \text{ cm}^3 & V_{\text{total}} &= 631.332 h \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

A altura do leito e calculada mediante a equacao

$$\frac{H}{H_0} = \frac{(1-\epsilon)}{(1-\epsilon_0)} \quad (3.1.16)$$

$H = 70$  cm e a altura de colapso que corresponde a uma porosidade  $\epsilon_0$

de  $\epsilon = 0.40$

O cálculo do número de esferas  $N$  no núcleo do Reator Nuclear a Leito Fluidizado é dado pela relação

$$N = \frac{\text{volume total de combustível}}{\text{volume de cada esfera}}$$

Sabendo-se que a porosidade  $\epsilon$  e a razão volumétrica de moderador dentro do tubo,  $1-\epsilon$  será a razão volumétrica de combustível dentro do tubo. Logo o volume total de combustível será igual ao produto de  $(1-\epsilon)$  pelo volume interno do tubo e conseqüentemente  $N$  será dados por

$$N = \frac{3(1-\epsilon)b^2 h}{2d^3} \quad (3.1.17)$$

Cumpra observar que os volumes de urânio, moderador, revestimento, extra (volume de tubo, volume do prisma hexagonal e volume da água) e o número de esferas existente no módulo foram calculados considerando-se uma altura inicial  $H = 70$  cm e a porosidade  $\epsilon = 0.4$ , ou seja

numero de esferas	$N = 76.940,29$ esferas	
vol. urânio	$V_{UO_2} = 13.811,57$	cm <sup>3</sup>
vol. revestimento	$V_{rev} = 6.805,12$	cm <sup>3</sup>
vol. moderador	$V_{mod} = 477.063$	cm <sup>3</sup>
- vol. tubo	$V_t = 2.803,87$	cm <sup>3</sup>
Vol. ! <! vol. hexagono	$V_h = 3.212,93$	cm <sup>3</sup>
extra ! - vol. água	$V_{H_2O} = 3.815,28$	cm <sup>3</sup>

Percentual extra de Zr = 0.1361

Percentual extra de H<sub>2</sub>O = 0.0863

O raio usado para calcular o valor do buckling foi obtido sabe-se que a area total do hexagono externo e  $631.332 \text{ cm}^2$  e que no nosso reator existem 19 modulos, logo a area do reator sera  $(19 * 631.332 \text{ cm}^2) = 11995.308 \text{ cm}^2$ . Se igualarmos este valor com a area de um circulo resulta para R:

$$R = 61.79 \text{ cm.}$$

Para um modulo temos que a area total e  $631.332 \text{ cm}^2$ . Esta area total e igualada a area de um circulo, resultando para R:

$$R = 14.176 \text{ cm}$$

A partir destes dados podemos calcular o buckling geometrico do Reator Nuclear a Leito Fluidizado para os dois raios equivalentes acima citados:

$$B = (2.4048/R')^2 + (\pi/H')^2 \quad (3.1.18)$$

Na tabela (3.1) sao apresentados os dados de entrada para aplicacao doCodigo Leopard ao reator, e na tabela (3.2) sao apresentados os valores buckling em funcao da altura para o uso no Codigo Odog.

Tabela (3.1)

Valores de entradas para código Leopard  
para o Reator Nuclear a Leito Fluidizado

ε	o	Buckling T C	raio total pellet	raio total	Passo	% Zr-2	% H2O	H cm	P psi
.40	308	.003145	.233	.281	.6446	61.19	38.80	70.0	2320
.45	308	.002883	.233	.281	.6730	61.19	38.80	76.3	2320
.50	308	.002640	.233	.281	.7060	61.19	38.80	84.0	2320
.55	308	.002418	.233	.281	.7440	61.19	38.80	93.3	2320
.60	308	.002215	.233	.281	.7890	61.19	38.80	105.0	2320
.65	308	.002034	.233	.281	.8440	61.19	38.80	120.0	2320
.70	308	.001874	.233	.281	.9110	61.19	38.80	140.0	2320
.75	308	.001739	.233	.281	.9980	61.19	38.80	168.0	2320
.80	308	.001596	.233	.281	1.1160	61.19	38.80	210.0	2320
.90	308	.001480	.233	.281	1.5790	61.19	38.80	420.0	2320

raio total= raio do pellet + revestimento (0.5 mm de espessura)

raio do reator= 61.79 cm

Tabela (3.2)

Valores do buckling para um modulo do reator padrao  
 Enriquecimento = 2.2%, Temp= 308 °C

Codigo: Odog

$\epsilon$	H	H'	$\frac{B^2}{H'}$
0.40	70.00	75.11	1.749E-3
0.45	76.30	81.40	1.489E-3
0.50	84.00	89.08	1.243E-3
0.55	93.30	98.33	1.020E-3
0.60	105.00	109.97	0.816E-3
0.65	120.00	124.87	0.632E-3
0.70	140.00	144.77	0.470E-3
0.75	168.00	172.58	0.331E-3
0.80	210.00	214.40	0.214E-3
0.90	420.00	423.79	0.549E-4

Raio do modulo R= 14.176 cm

Altura inicial ou colapso H = 70.00 cm

Distancia extrapolada = d

$$H' = H + 2d$$

$$\frac{B^2}{H'} = \left(\frac{\pi}{H'}\right)^2$$



## C A P I T U L O    I V

### RESULTADOS

- 4.1.- Comportamento da Reatividade de com diversos enriquecimento
- 4.2.- Reator Padrao de 19 modulos
- 4.3.- Start-Up do Reator
- 4.4.- Reatividade em funcao da geracao de vapor
- 4.5.- Reatividade em funcao da temperatura com pressao cte
- 4.6.- Reatividade em funcao da pressao com temperatura cte
- 4.7.- Distribuicao do fluxo de neutrons no Reator Padrao
- 4.8.- Estudo de nao Uniformidade
- 4.9.- Estudo da reatividade em um modulo

4.1.- Estudo da Reatividade do Reator Padrao a 20 °C

-----

Foi realizado um estudo quando o reator começa a funcionar a uma temperatura de 20 °C variando o enriquecimento, com tubo e carcaca de aco SS304 e revestimento de zircaloy, ja que num comeco quando o reator padrao e ligado o k efetivo toma valores iniciaes maiores a 0.95 o que nao e permitido pelos organismos internacionais. Para isto, se usarem os enriquecimentos de 2.5%, 2.6%, 2.8%, 2.9%, 3.0%, 4.0% do uraneo para obter um k efetivo menor a 0.95 resultando os seguintes valores para k efetivo e k infinito, mostrados na tabelas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5.

tabela (4.1)

Valores de  $k_e$  e  $k_{\infty}$   
 enriquecimento: 2.5%

$\epsilon$	$k_e$	$k_{\infty}$
.40	0.9328	1.0224
.45	0.9510	1.0224
.50	0.9604	1.0209
.55	0.9599	1.0082
.60	0.9486	0.9859

Tabela (4.2)

valores de  $k_e$  e  $k_{oo}$

enriquecimento: 2.6%

$\epsilon$	$k_e$	$k_{oo}$
.40	0.9490	1.0350
.45	0.9669	1.0255
.50	0.9762	1.0349
.55	0.9758	1.0228
.60	0.9647	1.0012

Tabela (4.3)

Valores de  $k_e$  e  $k_{oo}$

enriquecimento: 2.8%

$\epsilon$	$k_e$	$k_{oo}$
.40	0.9706	1.0583
.45	0.9901	1.0633
.50	1.0009	1.0609
.55	1.0020	1.0501
.60	0.9924	1.0298

Tabela (4.4).

Valores de  $k_e$  e  $k_{oo}$ 

enriquecimento: 3%

$\epsilon$	$k_e$	$k_{oo}$
.40	0.9740	1.1035
.42	0.9690	1.1016

Tabela (4.5)

Valores de  $k_e$  e  $k_{oo}$ 

enriquecimento: 4%

$\epsilon$	$k_e$	$k_{oo}$
.40	1.0665	1.1613

Realizou-se o estudo para o reator composto de um revestimento de zircaloy e material de aco SS304 a uma temperatura de 308 ° C, para os enriquecimentos 3%, 3.2%, 4% cujos resultados sao apresentados nas tabelas 4.7, 4.8, 4.9.

Tabela (4.7)

Valores de  $k_e$  e  $k_{oo}$   
 enriquecimento: 3%

$\epsilon$	$k_e$	$k_{oo}$
.40	0.8874	1.0018
.55	0.9548	1.0239
.60	0.9601	1.0155

Tabela (4.8)

Valores de  $k_e$  e  $k_{oo}$   
 enriquecimento: 3.2%

$\epsilon$	$k_e$	$k_{oo}$
.40	0.9037	1.0198
.55	0.9750	1.0453
.60	0.9818	1.0383

Tabela(4.9)

Valores de  $k_e$  e  $k_{oo}$ 

enriquecimento: 4%

$\epsilon$	$k_e$	$k_{oo}$
.40	0.9573	1.0787
.50	1.0209	1.1100
.60	1.0537	1.1136
.70	1.0401	1.0747
.80	0.9459	0.9609
.90	0.6891	0.6890

Realizou-se o estudo da reatividade para o reator quando esta composto de revestimento e material estrutural de zircaloy com um enriquecimento de 4% e uma temperatura de 308 C; Tabela(4-11) O mesmo estudo se fez para um modulo do reator variando a temperatura para 50 C e enriquecimento para 3.1% e 4.2%; Tabela (E-10).

Tabela(4.10)

Valores de  $k_e$  e  $k_{oo}$ 

$\epsilon$	ENR %	$k_e$	$k_{oo}$
.40	3.1	0.7580	0.9469
.70	4.2	1.0810	1.1546

Tabela(4.11)

Valores de  $k_e$  e  $k_{oo}$   
enriquecimento:4%

$\epsilon$	$k_e$	$k_{oo}$
.40	1.0646	1.2116
.50	1.1759	1.2883
.60	1.2683	1.3477
.70	1.3316	1.3810
.80	1.3374	1.3614
.90	1.1799	1.1860

Realizou-se o estudo da reatividade do reator quando esta composto de revestimento e material estrutural de aco SS304, a uma temperatura de 308<sup>o</sup> C e um enriquecimento de 4%. Tabela 4-12

Tabela(4.12)

Valores de  $k_e$  e  $k_{oo}$   
enriquecimento:4%

$\epsilon$	$k_e$	$k_{oo}$
.40	0.8616	0.9629
.50	0.9156	0.9904
.60	0.9447	0.9955
.70	0.9359	0.9657
.80	0.8597	0.8727
.90	0.6373	0.6400

#### 4.2.- Reator Padrao de 19 Modulos

O Reator Padrao e composto de esferas de UO<sub>2</sub> enriquecidas de 2.2% a uma temperatura media de 308° C, revestimento (0.5 mm de espessura) e material estrutural ( tubo e carcaca ) de zircaloy, alem de um refletor de 120 cm de grafite. A table 4.13 e os graficos 4.1 e 4.2 mostram o comportamento da reatividade neste reator.

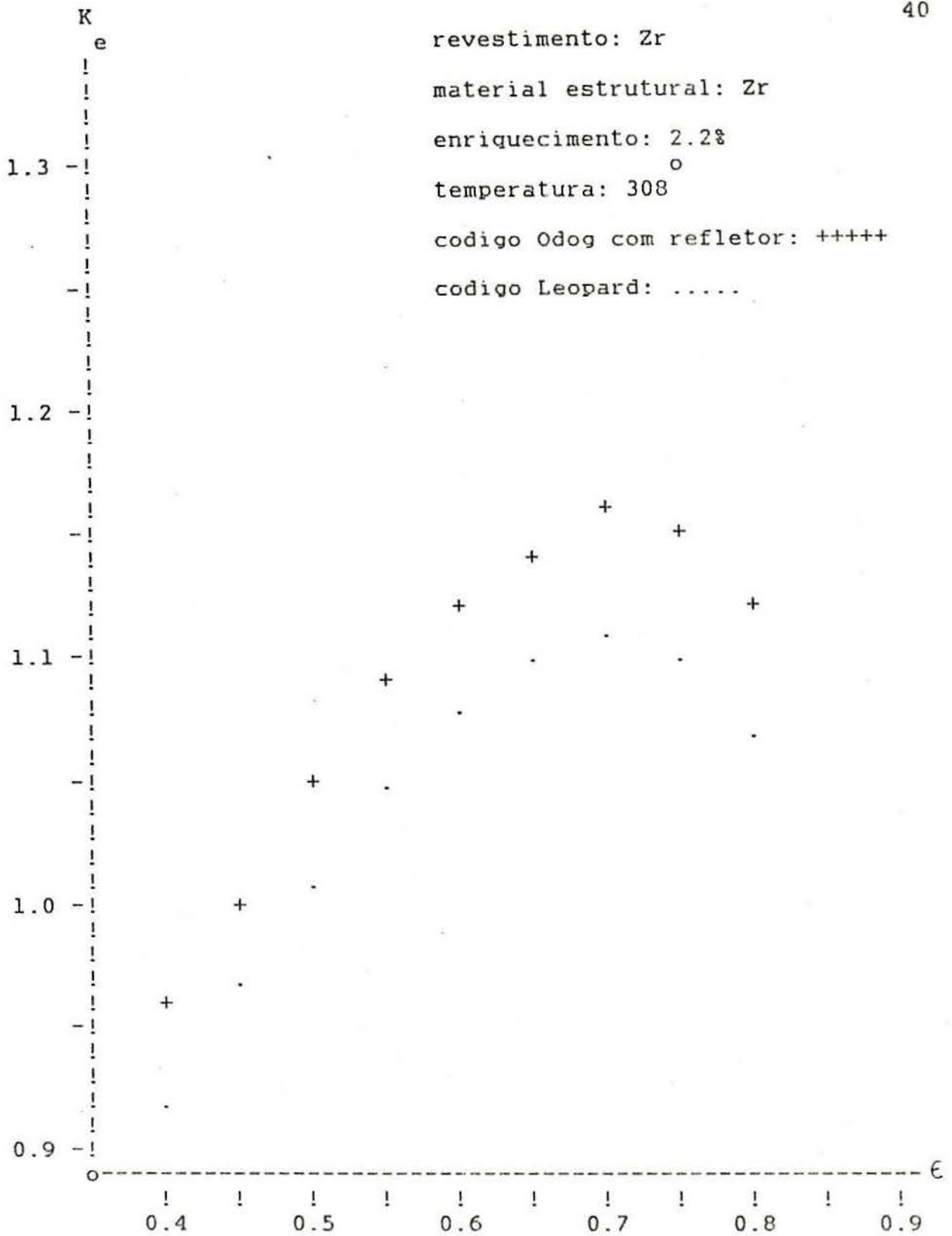
Tabela (4.13)

Valores de k efetivo e k infinito. Codigos: Leopard, Odog

ε	LEOPARD		O D O G	
	k <sub>e</sub>	k <sub>oo</sub>	k <sub>e</sub>	k <sub>oo</sub>
0.40	0.9223	1.1358	0.9600	1.0992
0.45	0.9694	1.1695	1.0075	1.1301
0.50	1.0114	1.1983	1.0562	1.1618
0.55	1.0470	1.2210	1.0916	1.1816
0.60	1.0756	1.2372	1.1267	1.2009
0.65	1.0954	1.2453	1.1496	1.2089
0.70	1.1037	1.2426	1.1606	1.2062
0.75	1.0963	1.2249	1.1555	1.1884
0.80	1.0681	1.1845	1.1264	1.1480
0.90	0.8685	0.9623	0.9225	0.9277

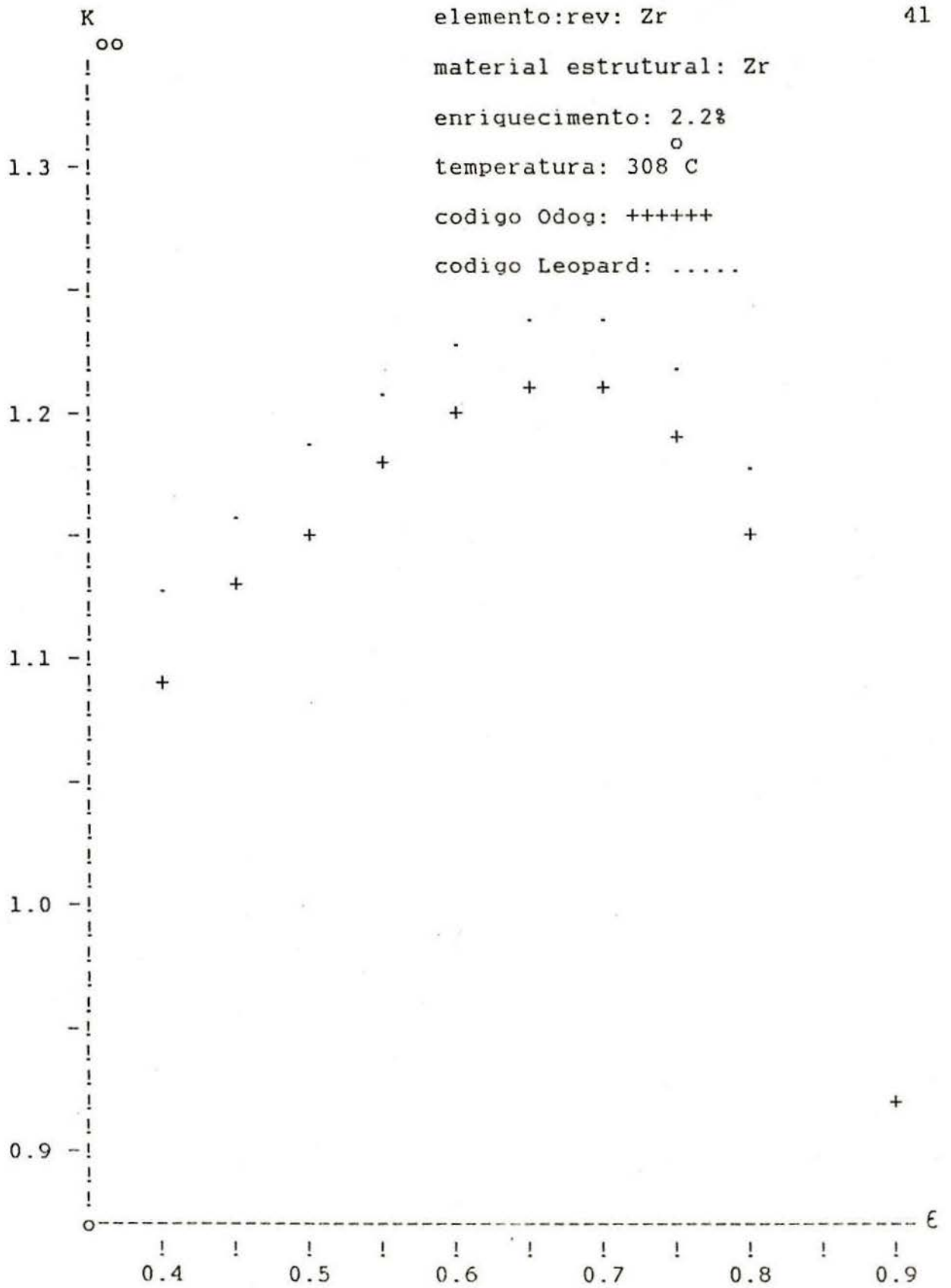
Reator com refletor, com uma espesura do refletor de 120 cm. Os raios sao:  $R_1 = 61.79 \text{ cm}$ ,  $R_2 = R_1 + 120 \text{ cm}$





Grafico(4.1) Variacao de k efetivo em funcao da porosidade para o reator padrao.

elemento:rev: Zr  
material estrutural: Zr  
enriquecimento: 2.2%  
temperatura: 308 C  
codigo Odog: ++++++  
codigo Leopard: .....



Grafico(4.2) Variacao de k infinito em funcao da porosidade

As tabelas 4.14, 4.15 e os graficos 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 mostram o comportamento da reatividade do reator padrao quando este comeca a funcionar, analisando-se as temperatura de 20<sup>o</sup>, 90<sup>o</sup> e 200<sup>o</sup> C.

Tabela (4.14)

Valores de  $k_e$ ,  $k_{oo}$

codigos: Leopard

$\epsilon$	Temp = 20 <sup>o</sup> C		Temp = 90 <sup>o</sup> C		Temp = 200 <sup>o</sup> C	
	$k_e$	$k_{oo}$	$k_e$	$k_{oo}$	$k_e$	$k_{oo}$
0.40	1.0638	1.2257	1.0462	1.2145	1.0032	1.1869
0.45	1.1007	1.2483	1.0856	1.2382	1.0455	1.2142
0.50	1.1317	1.2645	1.1178	1.2556	1.0815	1.2356
0.55	1.1542	1.2733	1.1417	1.2659	1.1097	1.2503
0.60	1.1673	1.2737	1.1564	1.2680	1.1296	1.2574
0.65	1.1690	1.2638	1.1601	1.2600	1.1391	1.2551
0.70	1.1568	1.2410	1.1501	1.2393	1.1358	1.2407
0.75	1.1255	1.1999	1.1215	1.2008	1.1147	1.2094
0.80	1.0690	1.1328	1.0681	1.1366	1.0702	1.1534
0.90	0.8065	0.8508	0.8128	0.8614	0.8340	0.8960

Reator com refletor, com uma espessura do refletor de 120 cm. Os raios sao:  $R_1 = 61.79$  cm,  $R_2 = R_1 + 120$  cm

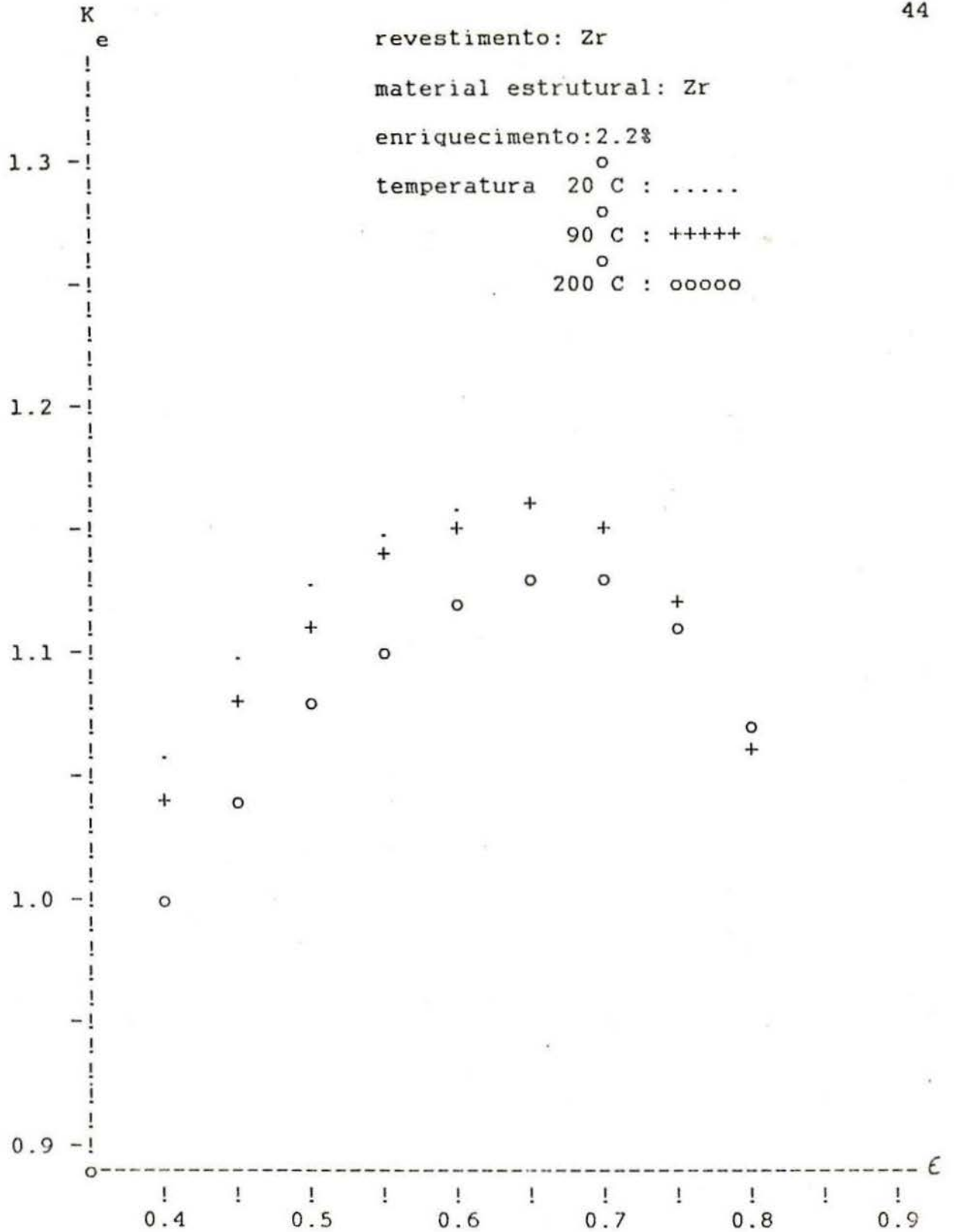
Tabela (4.15)

Valores de  $k_e$ ,  $k_{oo}$ 

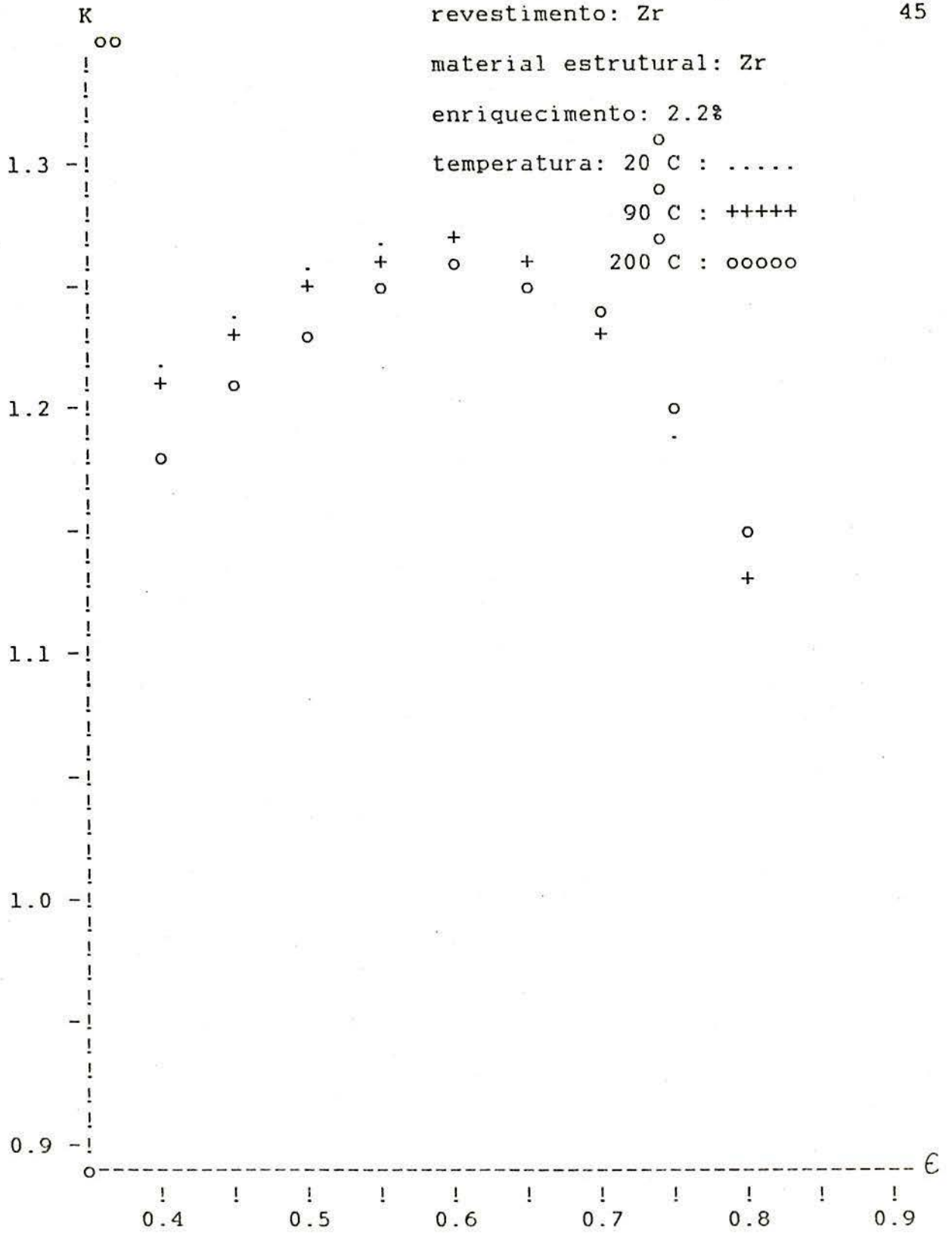
codigos: Odog

$\epsilon$	Temp = 20 °C		Temp = 90 °C		Temp = 200 °C	
	$k_e$	$k_{oo}$	$k_e$	$k_{oo}$	$k_e$	$k_{oo}$
0.40	1.0889	1.1970	1.0737	1.1848	1.0344	1.1547
0.45	1.1285	1.2204	1.1144	1.2092	1.0784	1.1825
0.50	1.1605	1.2373	1.1478	1.2274	1.1162	1.2045
0.55	1.1839	1.2467	1.1728	1.2382	1.1461	1.2196
0.60	1.1978	1.2478	1.1885	1.2409	1.1676	1.2270
0.65	1.2000	1.2385	1.1929	1.2334	1.1785	1.2250
0.70	1.1879	1.2163	1.1833	1.2133	1.1761	1.2110
0.75	1.1564	1.1759	1.1546	1.1753	1.1554	1.1801
0.80	1.0975	1.1097	1.0989	1.1119	1.1089	1.1246
0.90	0.8292	0.8317	0.8378	0.8405	0.8671	0.8706

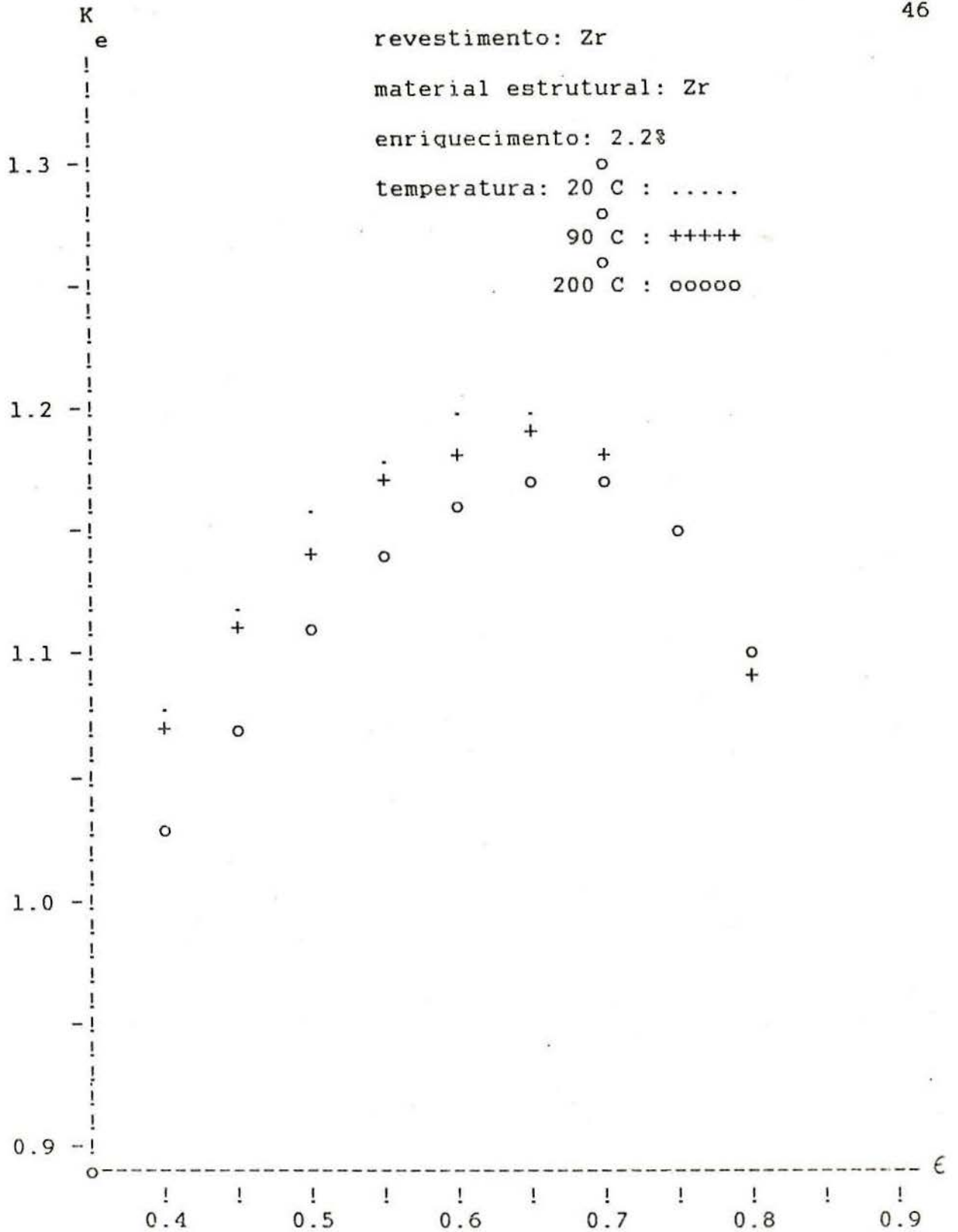
Reator com refletor, com uma espessura do refletor de 120 cm. Os raios são:  $R_1 = 61.79$  cm,  $R_2 = R_1 + 120$  cm



Grafico(4.3) Variacao de k efetivo em funcao da porosidade para o reator, ( codigo Leopard )



Grafico(4.4) Variacao de k infinito em funcao da porosidade para o reator ( codigo Leopard )



Grafico(4.5) Variacao de k efetivo em funcao da porosidade para o reator, ( codigo Odog duas regioes )

revestimento: Zr

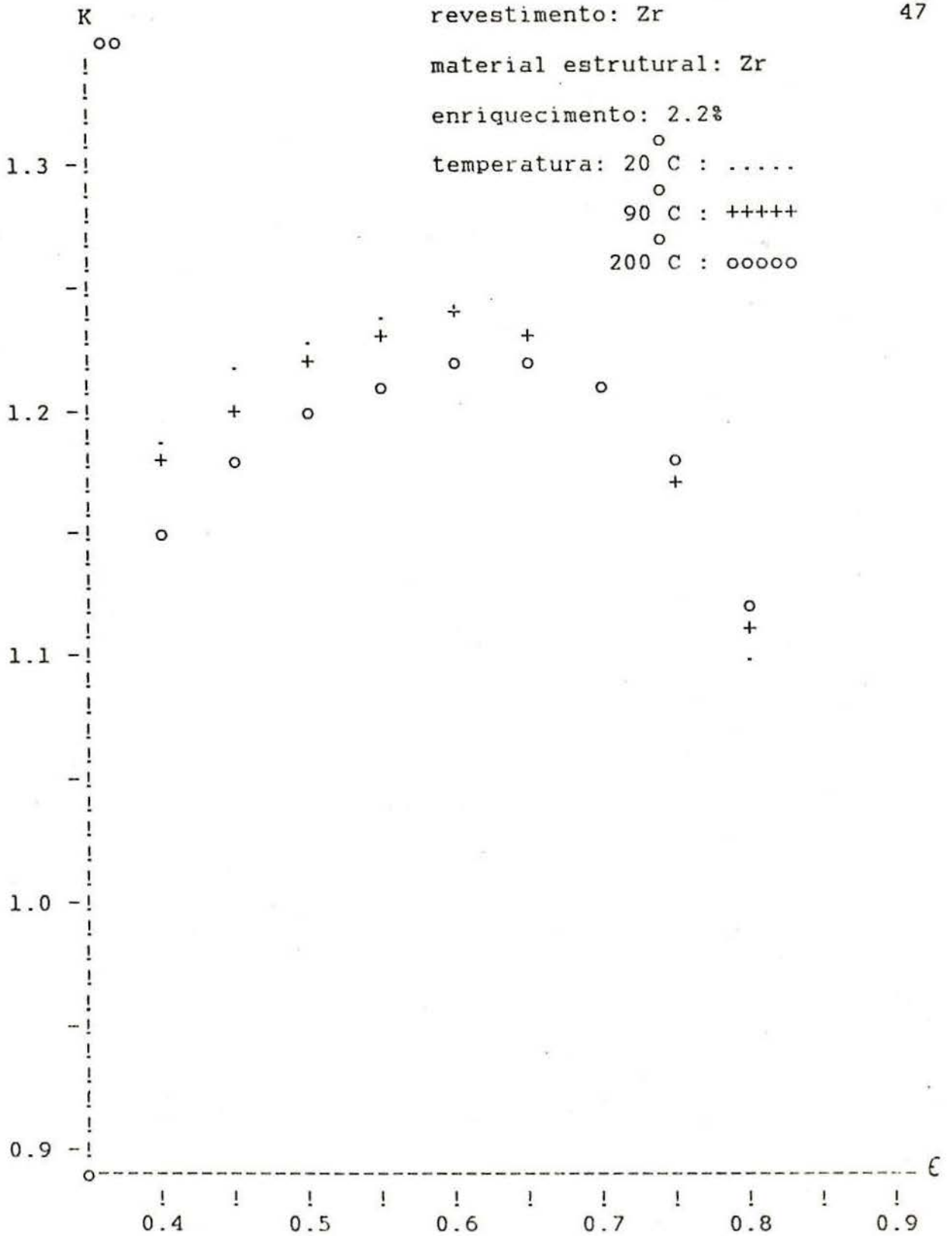
material estrutural: Zr

enriquecimento: 2.2%

temperatura: 20 C : .....

90 C : +++++

200 C : ooooo



Grafico(4.6) Variacao de k infinito em funcao da porosidade para o reator ( codigo Odog duas regioes )



#### 4.3.- Start-up do Reator

Realizuo-se o estudo de Start-up, quando o reator e ligado. Para esto se fez duas curvas de reatividade do reator variando a altura inicial do leito para duas temperaturas diferentes 20 e 308 °C, com um enriquecimento de 2.2% e uma porosidade de 0.40. Se feiz isto ja que quando o reator comeca a funcionar este nao deve atinguir uma reatividade maior que 0.95, ja que ele seria critico quando e desligado. Os resultados obtidos sao apresentados na tabela 4.16, 4.17 e no grafico 4.7.

Tabela (4.16)

Valores de  $k_e$  e  $k_{oo}$  com a altura inicial do leito  $H_o$   
 Temperatura: 20 °C

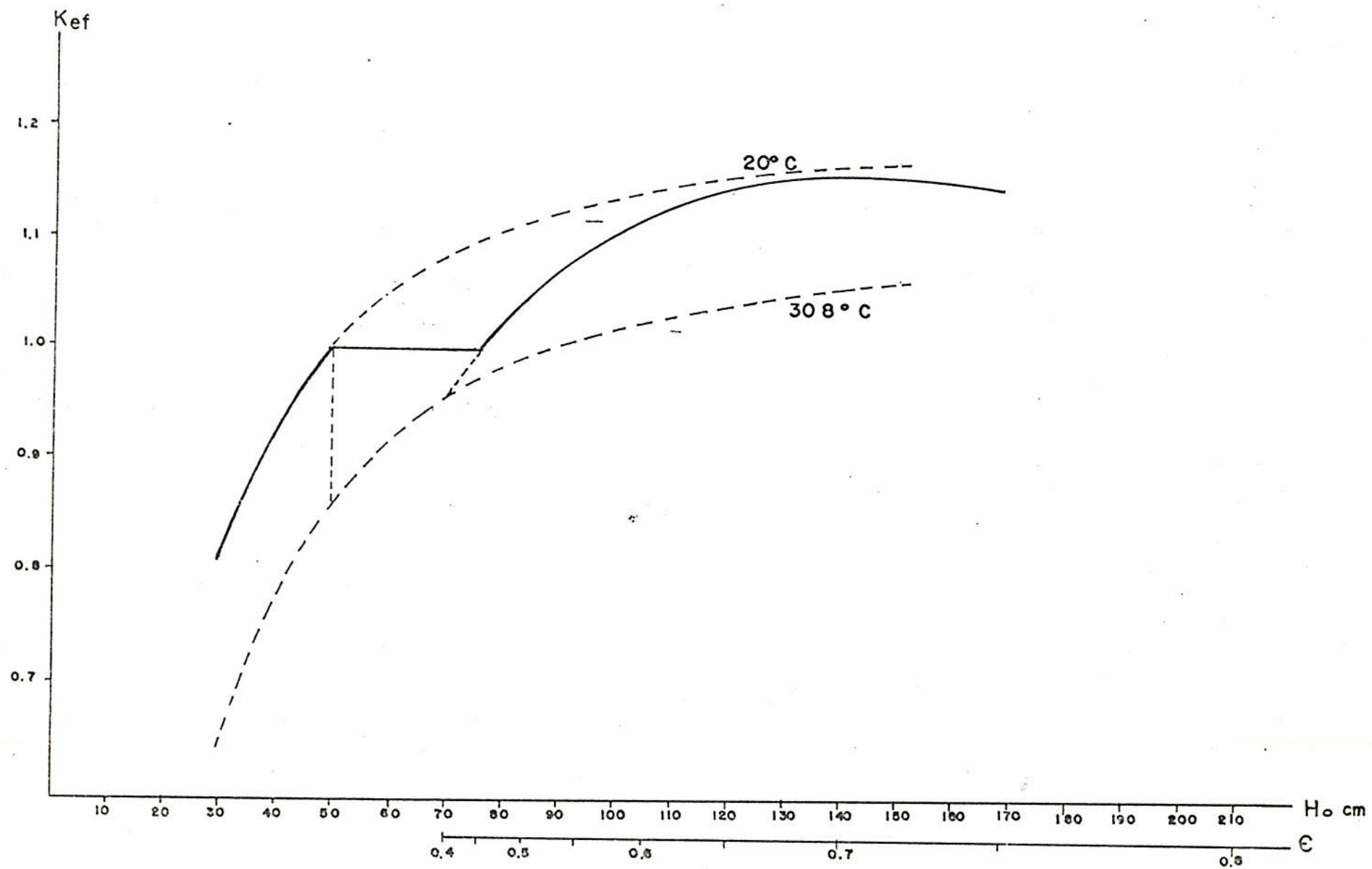
$H_o$	ENR %	$\epsilon$	$k_e$	$k_{oo}$
150	2.2	0.4	1.1701	1.2000
120	2.2	0.4	1.1547	1.1989
100	2.2	0.4	1.1386	1.1989
70	2.2	0.4	1.0889	1.1970
60	2.2	0.4	1.0579	1.1957
50	2.2	0.4	1.0120	1.1936
40	2.2	0.4	0.9398	1.1901
30	2.2	0.4	0.8190	1.1832

Tabela (4.17)

Valores de  $k_e$  e  $k_{oo}$  com a altura inicial do leite  $H_o$

Temperatura: 308 °C

$H_o$	ENR &	$\epsilon$	$k_e$	$k_{oo}$
150	2.2	0.4	1.0655	1.1046
120	2.2	0.4	1.0449	1.1028
100	2.2	0.4	1.0243	1.1027
70	2.2	0.4	0.9606	1.0992
60	2.2	0.4	0.9220	1.0969
50	2.2	0.4	0.8661	1.0932
40	2.2	0.4	0.7813	1.0870
30	2.2	0.4	0.6478	1.0748



Gráfico(4.7) Reatividade do reator em start-up

#### 4.4.- Reatividade em funcao da Geracao de Vapor

Estudo-se a variacao da reatividade como funcao da geracao de vapor no reator padrao no estado supercritico, critico e subcritico representados pela porosidade 0.7, 0.45 e 0.4 respectivamente, cujos resultados estao representados nas tabelas 4.18 e 4.19 e pelos graficos 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11.

Tabela (4.18)

Valores de  $k_e$ ,  $k_{oo}$

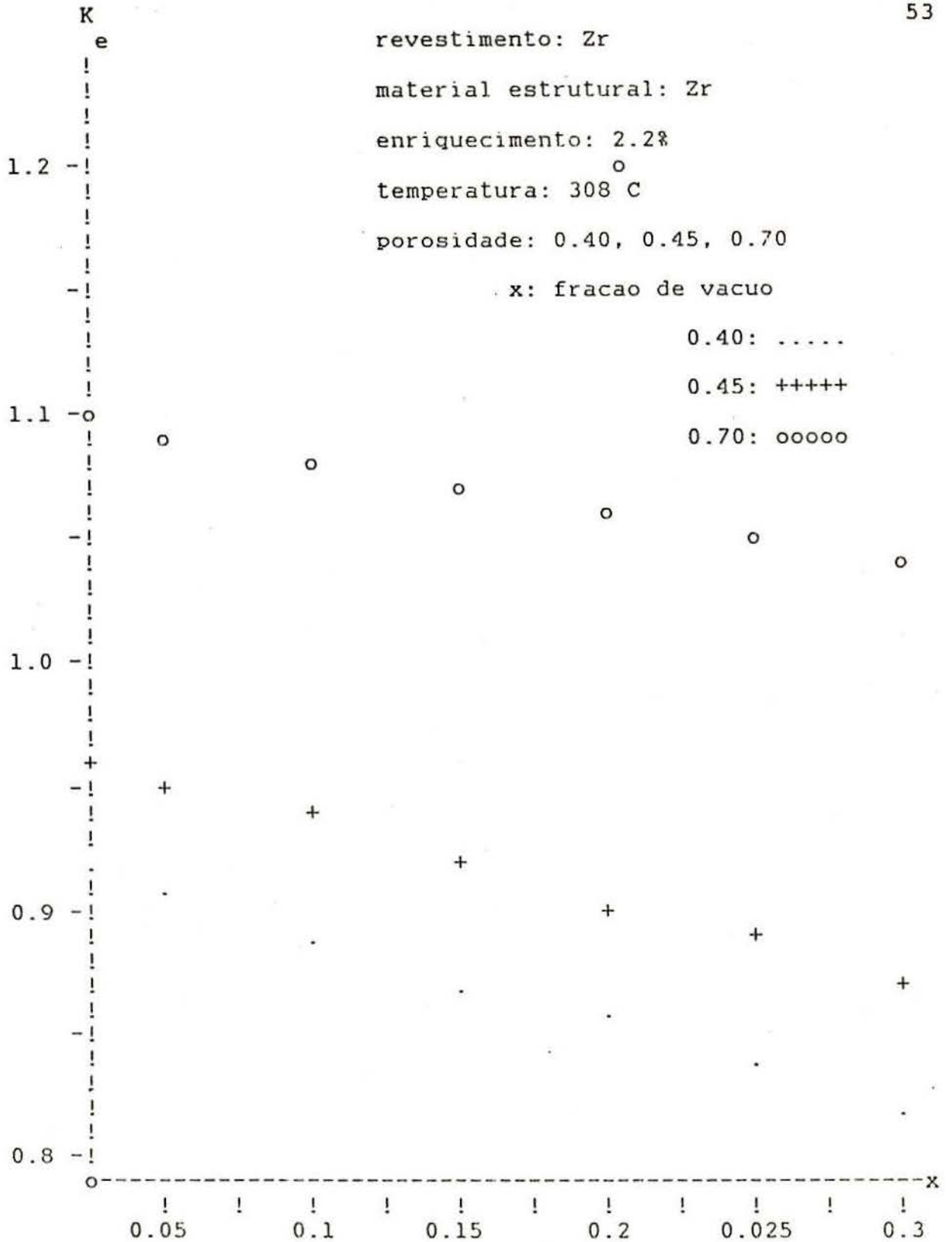
codigos: Leopard

void x	$\epsilon = 0.4$		$\epsilon = 0.45$		$\epsilon = 0.70$	
	$k_e$	$k_{oo}$	$k_e$	$k_{oo}$	$k_e$	$k_{oo}$
0.00	0.9223	1.1358	0.9694	1.1695	1.1037	1.2426
0.05	0.9080	1.1273	0.9554	1.1618	1.0967	1.2432
0.10	0.8930	1.1181	0.9407	1.1535	1.0885	1.2433
0.15	0.8771	1.1084	0.9249	1.1446	1.0791	1.2428
0.20	0.8604	1.0980	0.9083	1.1349	1.0684	1.2417
0.25	0.8430	1.0870	0.8905	1.1245	1.0561	1.2398
0.30	0.8242	1.0749	0.8716	1.1132	1.0421	1.2372
0.40	0.7839	1.0482	0.8301	1.0877	1.0079	1.2289

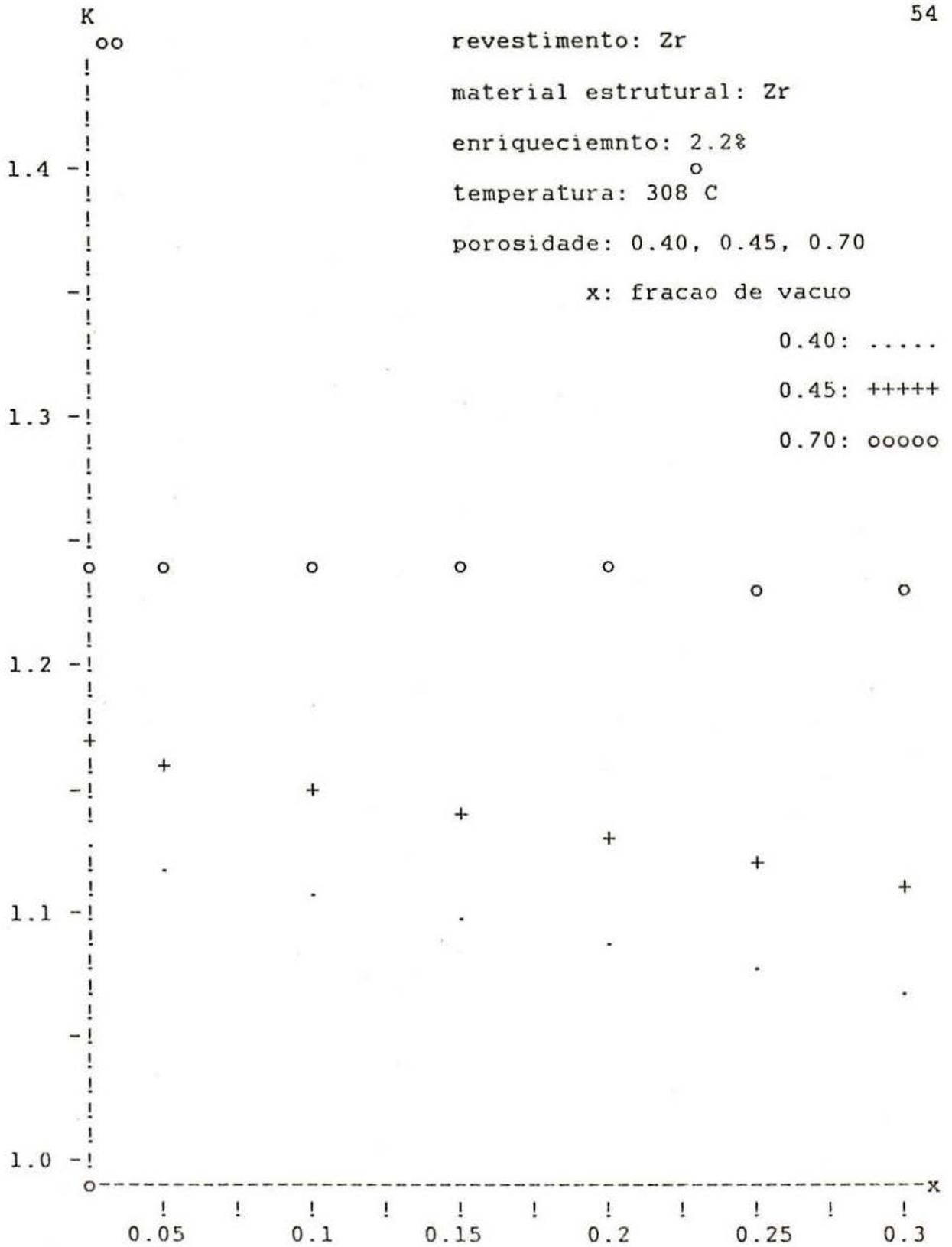
Tabela (4.19)  
 Valores de  $k_e$ ,  $k_{oo}$   
 codigos: Odog

void x	$\epsilon = 0.4$		$\epsilon = 0.45$		$\epsilon = 0.70$	
	$k_e$	$k_{oo}$	$k_e$	$k_{oo}$	$k_e$	$k_{oo}$
0.00	0.9606	1.0992	1.0109	1.1329	1.1606	1.2062
0.05	0.9478	1.0899	0.9987	1.1244	1.1575	1.2054
0.10	0.9342	1.0800	0.9858	1.1151	1.1535	1.2041
0.15	0.9199	1.0694	0.9719	1.1052	1.1488	1.2020
0.20	0.9047	1.0582	0.9572	1.0946	1.1430	1.1993
0.25	0.8889	1.0464	0.9415	1.0832	1.1362	1.1957
0.30	0.8718	1.0334	0.9247	1.0708	1.1280	1.1910
0.40	0.8347	1.0051	0.8876	1.0431	1.1073	1.1782

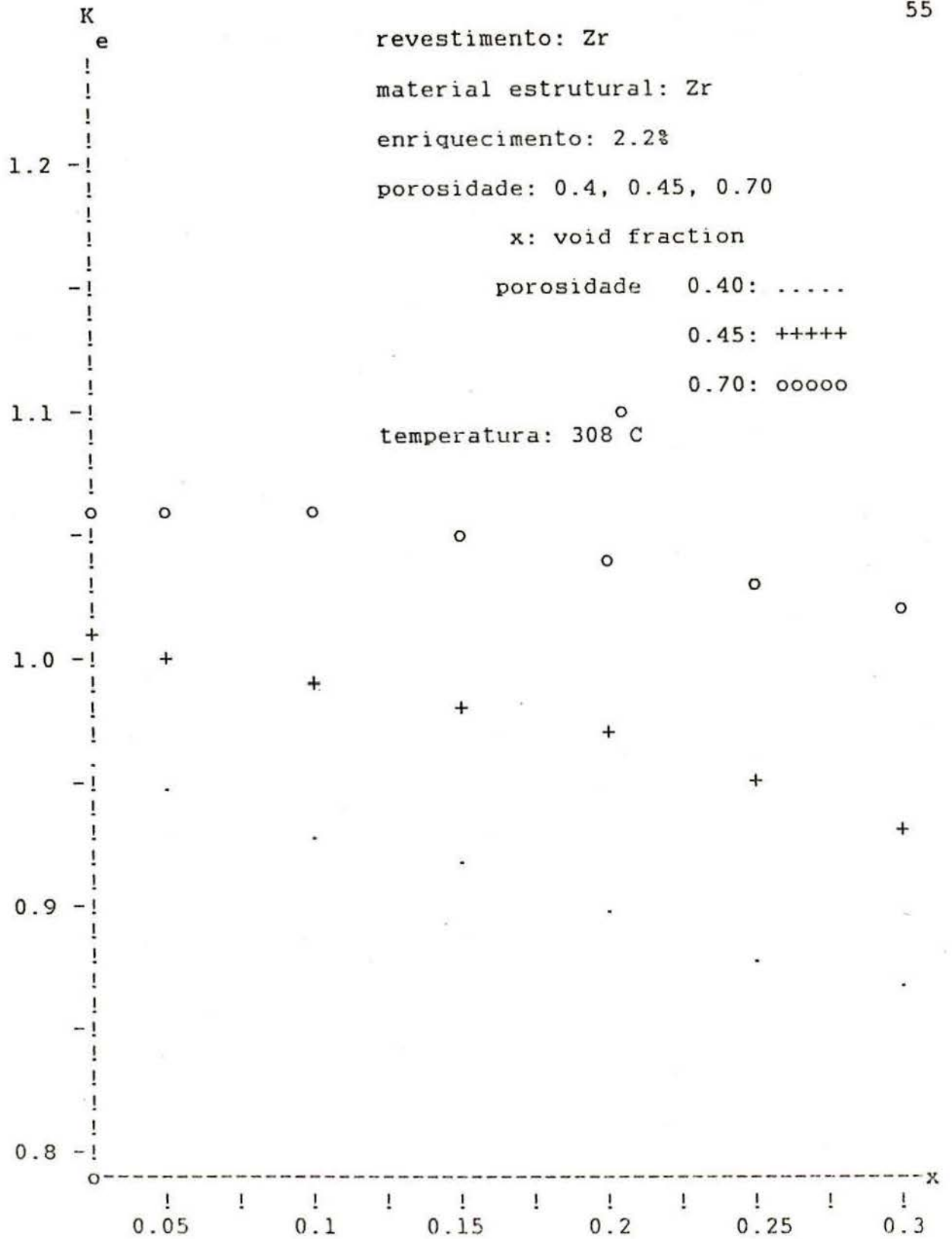
Reator com refletor, com uma espessura do refletor de  
 120 cm. Os raios são:  $R_1 = 61.79$  cm e  $R_2 = R_1 + 120$  cm



Grafico(4.8) Variacao de k efetivo em funcao da geracao de vapor, para o reator padrao, ( codigo Leopard )

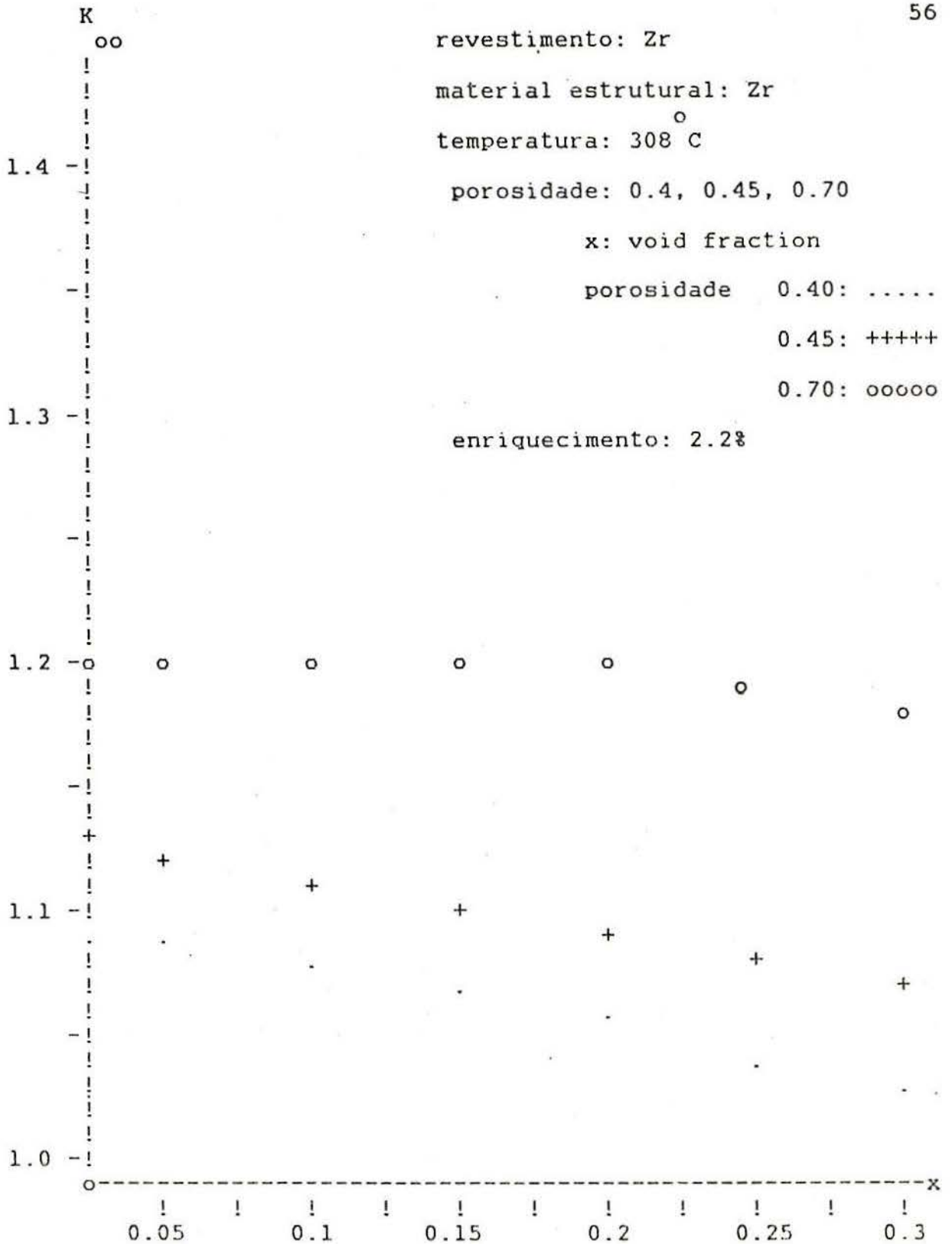


Grafico(4.9) Variacao de k infinito em funcao da geracao de vapor, para o reator padrao, ( codigo Leopard )



Grafico(4.10) Variacao de k efetivo em funcao da geracao de vapor, para o reator padrao; ( codigo Odog )





Grafico(4.11) Variacao de k infinito en funcao da geracao de vapor, para o reator padrao, ( codigo Odog )

4.5.- Reatividade em funcao da Temperatura com Pressao cte  
 -----

Estudo-se a variacao da reatividade como funcao da variacao de temperatura para quatro temperaturas diferentes a uma pressao constantes de 2320 psi, no reator padrao, sendo os resultados apresentados na tabela 4.20 e no grafico 4.12.

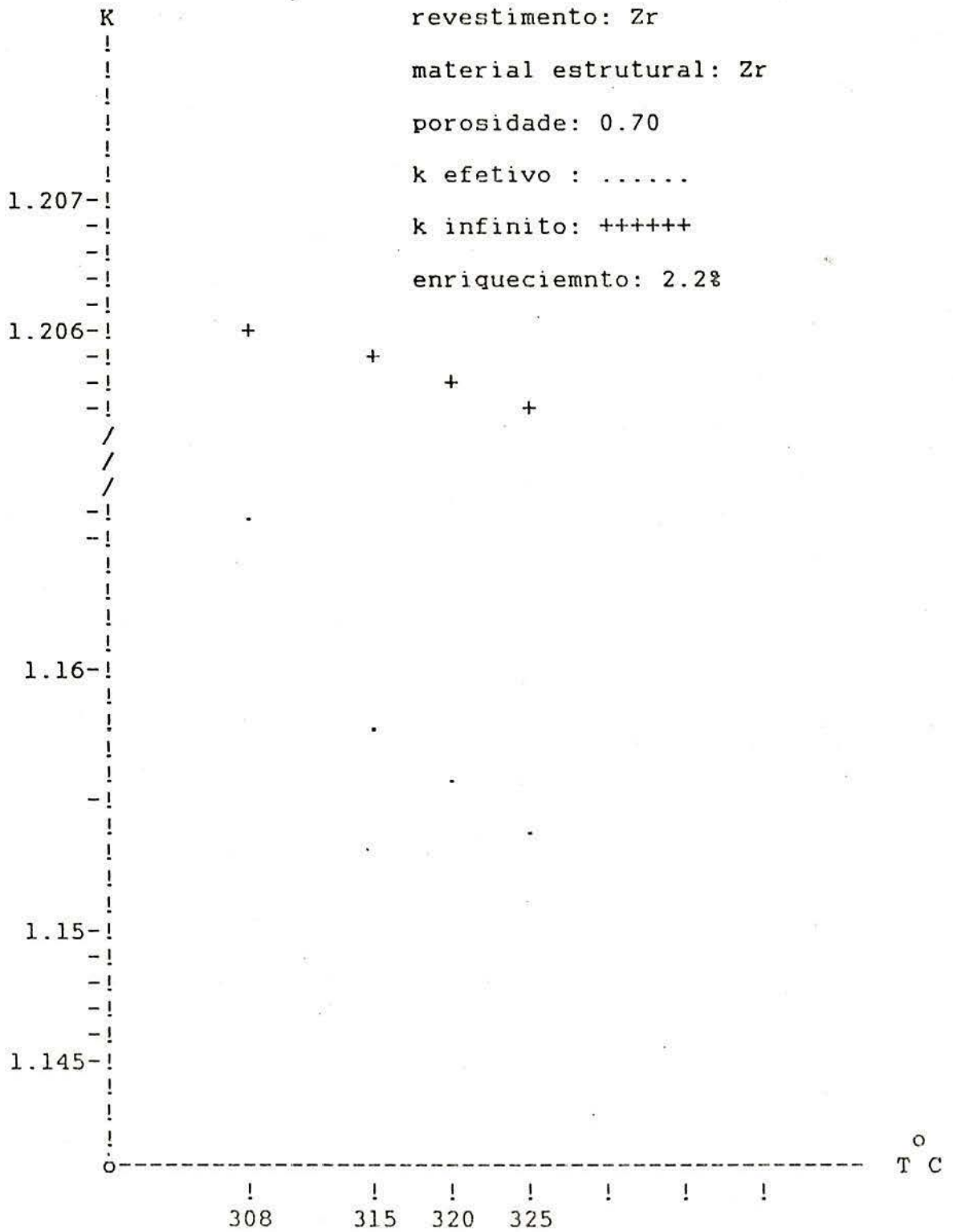
tabela (4.20)

valores de  $k_e$  e  $k_{oo}$

codigo: Odog

T C	$k_e$	$k_{oo}$
308	1.1606	1.2062
315	1.1584	1.2052
320	1.1566	1.2044
325	1.1545	1.2035

Reator com refletor, com uma espessura do refletor de 120 cm. Os raios sao  $R_1 = 61.79$  cm e  $R_2 = R_1 + 120$  cm.



Grafico(4.12) Variacao de kef. e kinf em funcao da temperatura a pressao cte em 2320 psi , para reator padrao. Codigo Odog.

4.6.- Reatividade em funcao da Pressao com Temperatura cte.  
 -----

Estudou-se a variacao da reatividade como funcao de quatro pressoes diferentes a uma temperatura constante de 308 C, no reator padrao. Os resultados estao apresentados abaixo na tabela 4.21 e no grafico 4.13.

tabela(4.21

valores de  $k_e$  ,  $k_{\infty}$

codigo: Odog

P psi	$k_e$	$k_{\infty}$
2320	1.1606	1.2062
2360	1.1606	1.2062
2400	1.1607	1.2062
2440	1.1607	1.2062

Reator com refletor, com uma espessura do refletor de 120 cm. Os raios sao:  $R_1 = 61.79$  cm ,  $R_2 = R_1 + 120$  cm.

elementos: rev:Zr, M.Est:Zr

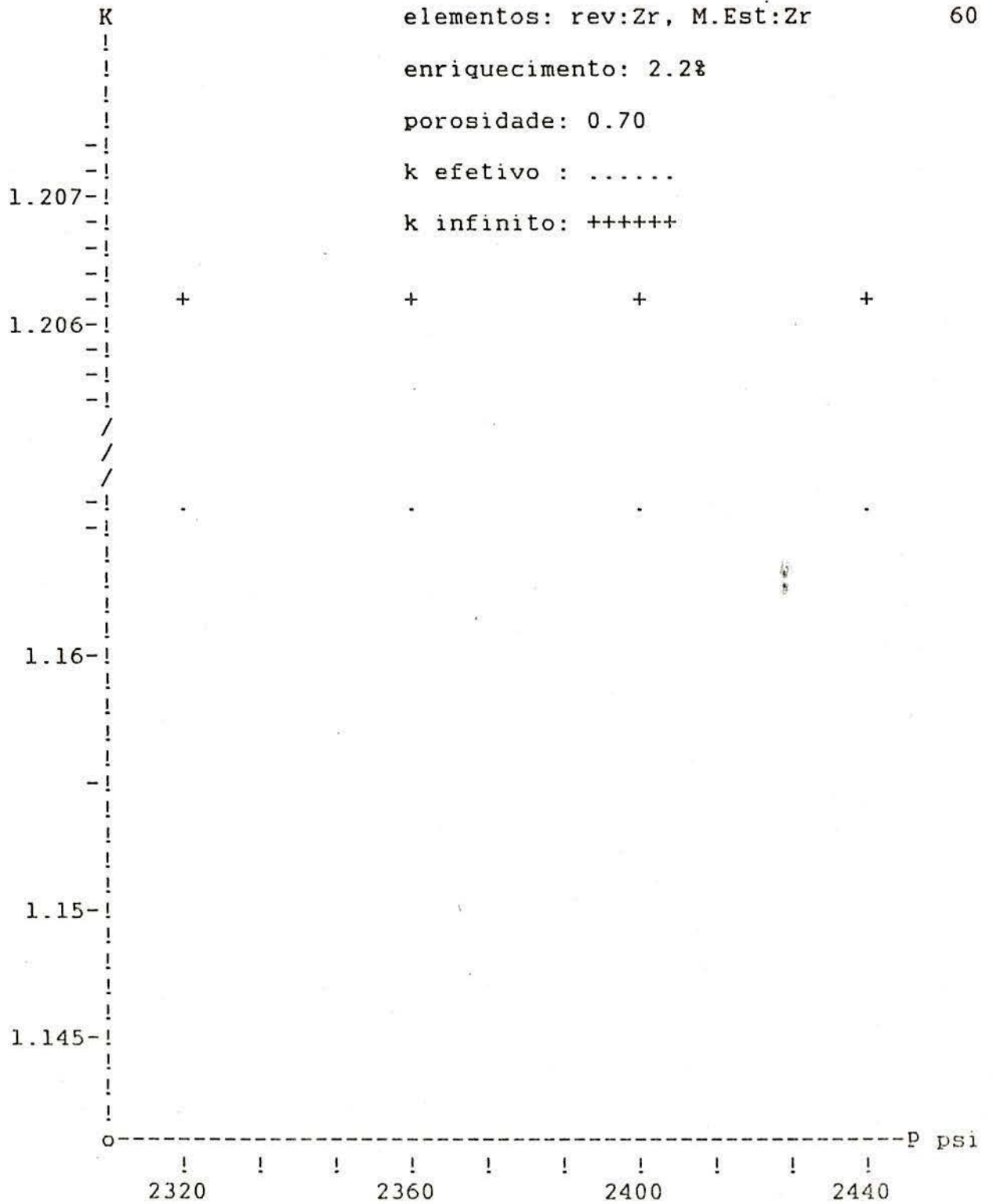
60

enriquecimento: 2.2%

porosidade: 0.70

k efetivo : .....

k infinito: ++++++



Grafico(4.13) Variacao de kef. e kinf em funcao da pressao a temperatura cte em 308 C , para reator padrao.  
Codigo Odog.

#### 4.7.- Distribuicao do Fluxo de neutrons no Reator Padrao

Mostrou-se a distribuicao do fluxo para o reator padrao nos estados supercriticos, critico, subcritico, representadas pelas porosidades de 0.70, 0.45 e 0.40 respectivamente, quando o buckling geometrico e diferente de zero. Os calculos foram feitos pelo codigo Odog e os resultados obtidos estao na tabela 4.22 e no grafico 4.14.

Tabela (4.22)

Distribuicao do fluxo de neutrons

$\epsilon = 0.4$		$\epsilon = 0.45$		$\epsilon = 0.7$	
$\phi$	Raio	$\phi$	Raio	$\phi$	Raio
1.0000	1.58	1.0000	1.58	1.0000	1.58
0.9824	10.00	0.9848	10.00	0.9816	10.00
0.9424	20.00	0.9498	20.00	0.9413	20.00
0.8666	30.00	0.8908	30.00	0.8786	30.00
0.7530	40.00	0.8041	40.00	0.7952	40.00
0.6317	50.00	0.6683	50.00	0.6834	50.00
0.4763	60.00	0.5007	60.00	0.5468	60.00
0.2916	70.00	0.3177	70.00	0.4004	70.00
0.1702	80.00	0.1994	80.00	0.2801	80.00
0.1027	90.00	0.1198	90.00	0.2038	90.00
0.0570	100.00	0.0690	100.00	0.1499	100.00
0.0358	110.00	0.0359	110.00	0.1158	110.00
0.0138	120.00	0.0304	120.00	0.0791	120.00

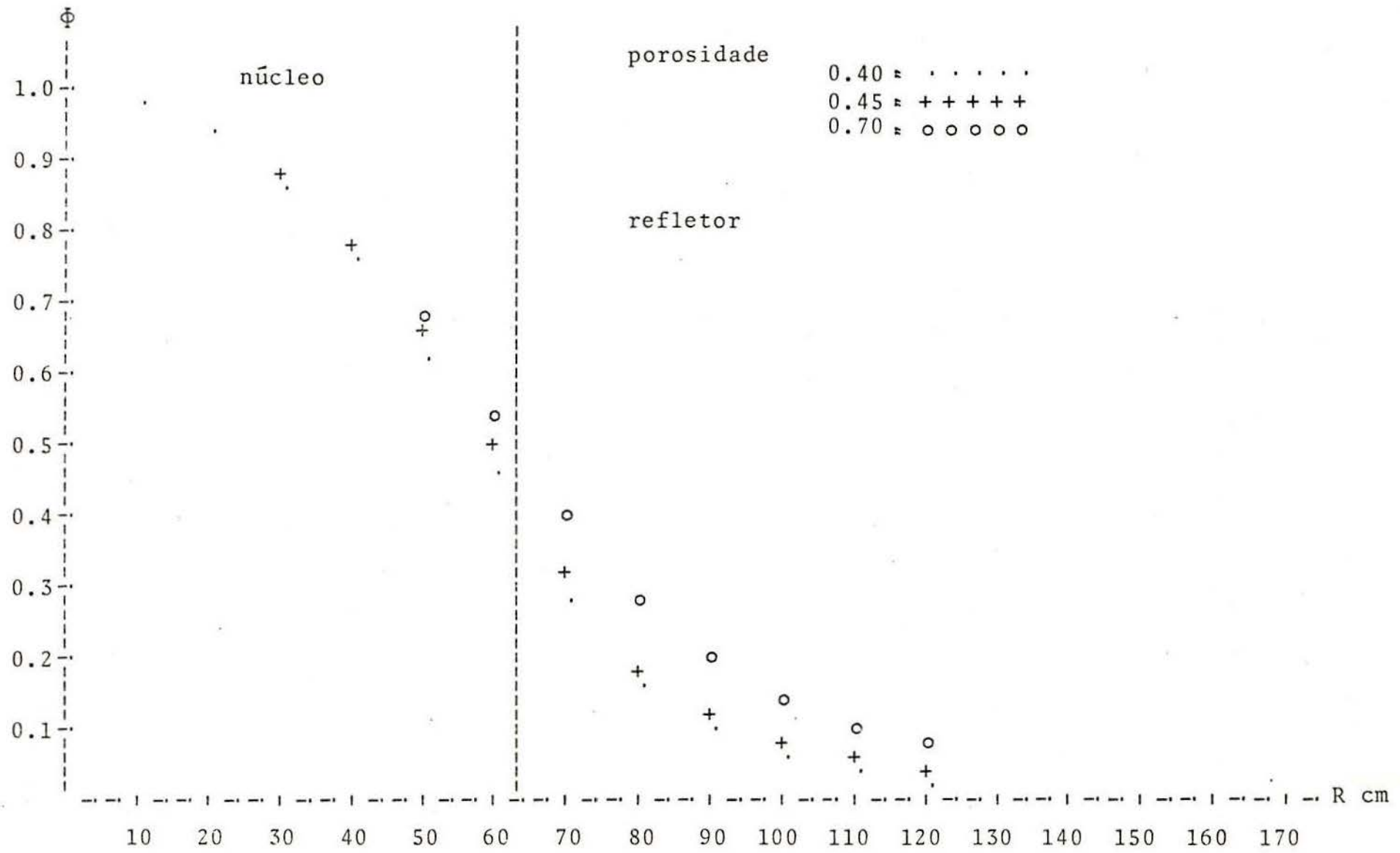


Grafico (4.14) Distribuição do fluxo de neutrons

#### 4.8.- Calculo de nao Uniformidade no Reator Padrao

Dividiu-se o reator em tres regioes no nucleo e uma regio no refletor.

B.1.- Todas as areas no nucleo sao iguais

B.2.- O raio do nucleo foi dividido por tres.

	RAIOS cm				AREAS cm <sup>2</sup>			
	R 1	R 2	R 3	R 4	A 1	A 2	A 3	A 4
B.1!	35.6	50.4	61.7	181.7	3997.3	3997.3	3997.3	91827.5
B.2!	20.5	41.1	61.7	181.7	1332.6	3998.2	6663.8	103822.1

Como se precisa calcular o valor do buckling do reator em funcao da altura do leito, no caso de aplicacao do codigo Odog, tem-se calculado uma altura media no nucleo ou seja sabendo-se que para uma  $\epsilon=0.45$  a altura e  $H=76.36$  cm e para uma  $\epsilon=0.50$  a altura e  $H=84$  cm, obtem-se que a altura media do reator para as tres regioes e  $H=78.9$  cm, onde considerando-se a distancia extrapolada resulta  $H'=84.03$ cm. Com este ultimo valor de  $H'$ , obteve-se um valor para o buckling de



$$\frac{B^2}{H'} = 0.1397E-2$$

usado pelo código Odog. Resultando os valores de  $k_e$  e  $k_{oo}$  mostrados nas tabelas (4.23) e (4.24).

Tabela (4.23)

Áreas iguais nas regiões

porosidade nas regiões				
$\epsilon, R=1$	$\epsilon, R=2$	$\epsilon, R=3$	$k_e$	$k_{oo}$
0.45	0.45	0.45	1.0075	1.0992
0.50	0.45	0.45	1.1355	1.1501
0.45	0.50	0.45	1.1333	1.1482
0.45	0.45	0.50	1.1309	1.1460

Tabela (4.24)

Áreas diferentes nas regiões

porosidade nas regiões				
$\epsilon, R=1$	$\epsilon, R=2$	$\epsilon, R=3$	$k_e$	$k_{oo}$
0.45	0.45	0.45	1.0075	1.0992
0.50	0.45	0.45	1.1257	1.1398
0.45	0.50	0.45	1.1314	1.1455
0.45	0.45	0.50	1.1318	1.1475

#### 4.9.- Estudo da reatividade em um Modulo

-----

- Modulo composto de esferas de UO<sub>2</sub> com enriquecimento de 4%, revestimento e material estrutural de aluminio a uma temperatura de 50 C. cujos resultados estao representados na tabela 4.25 e pelo grafico 4.17.

Tabela (4.25)

Valores de  $k_e$  ,  $k_{oo}$

codigos: 0dog

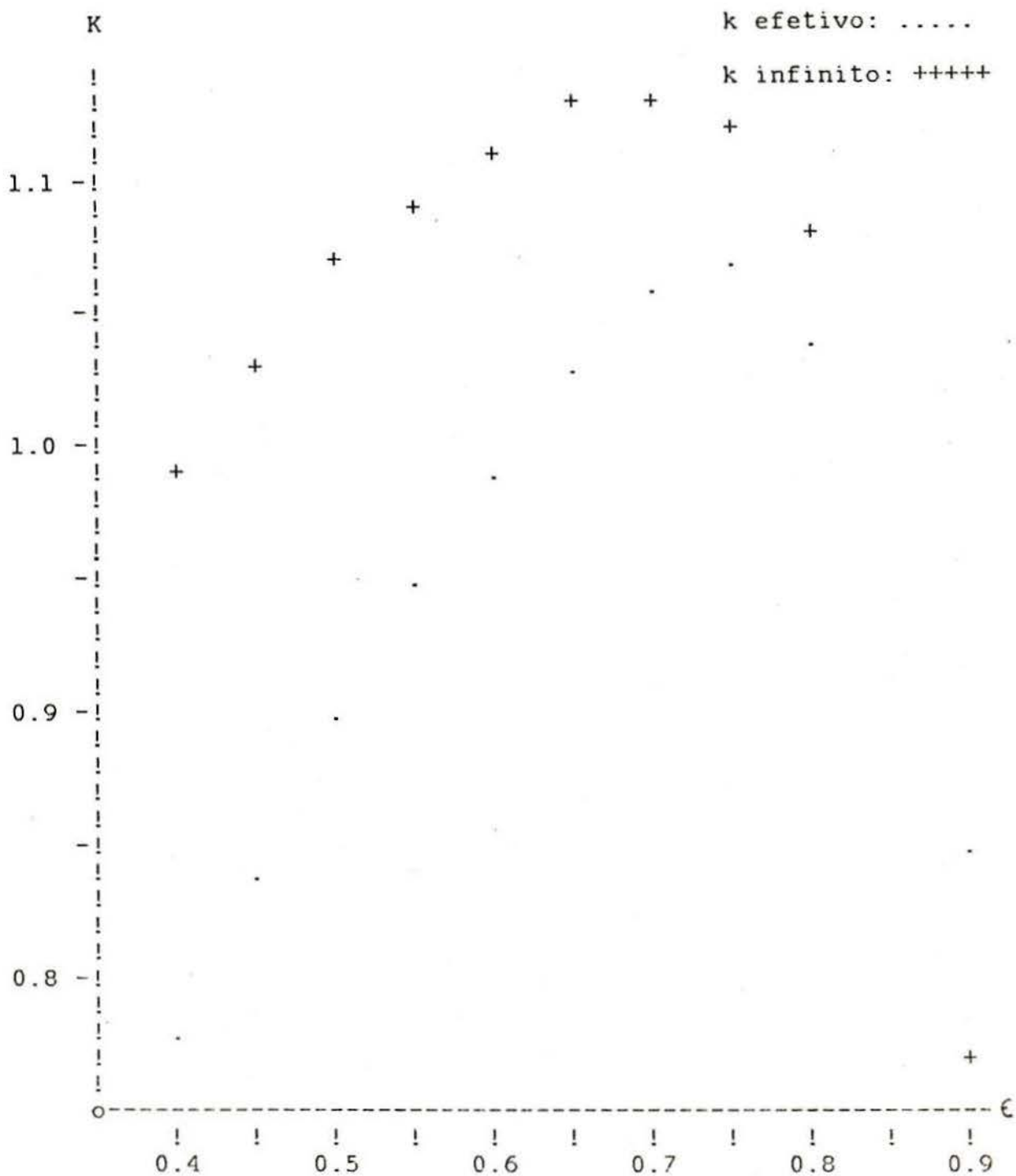
$\epsilon$	$k_e$	$k_{oo}$
0.40	0.7870	0.9972
0.45	0.8473	1.0352
0.50	0.9045	1.0706
0.55	0.9561	1.0996
0.60	0.9971	1.1230
0.65	1.0370	1.1353
0.70	1.0604	1.1371
0.75	1.0665	1.1227
0.80	1.0470	1.0844
0.90	0.8556	0.8646

Reator com refletor, com uma espessura do refletor de 120 cm. Os raios sao:  $R_1 = 14.176$  cm ,  $R_2 = R_1 + 120$  cm.

elemento: rev:Al, M.Est:Al 66

enriquecimento: 4%

temperatura: 50 C



Grafico(4.15) Variacao de kef. e kinf em funcao da porosidade para um modulo do reator

- Modulo composto de esferas de UO<sub>2</sub> com enriquecimento de 4%, revestimento de zircaloy e material estrutural de aco 304 a uma temperatura de 50 ° C, cujos resultados estao representados na na tabela 4.26 e pelo grafico 4.16.

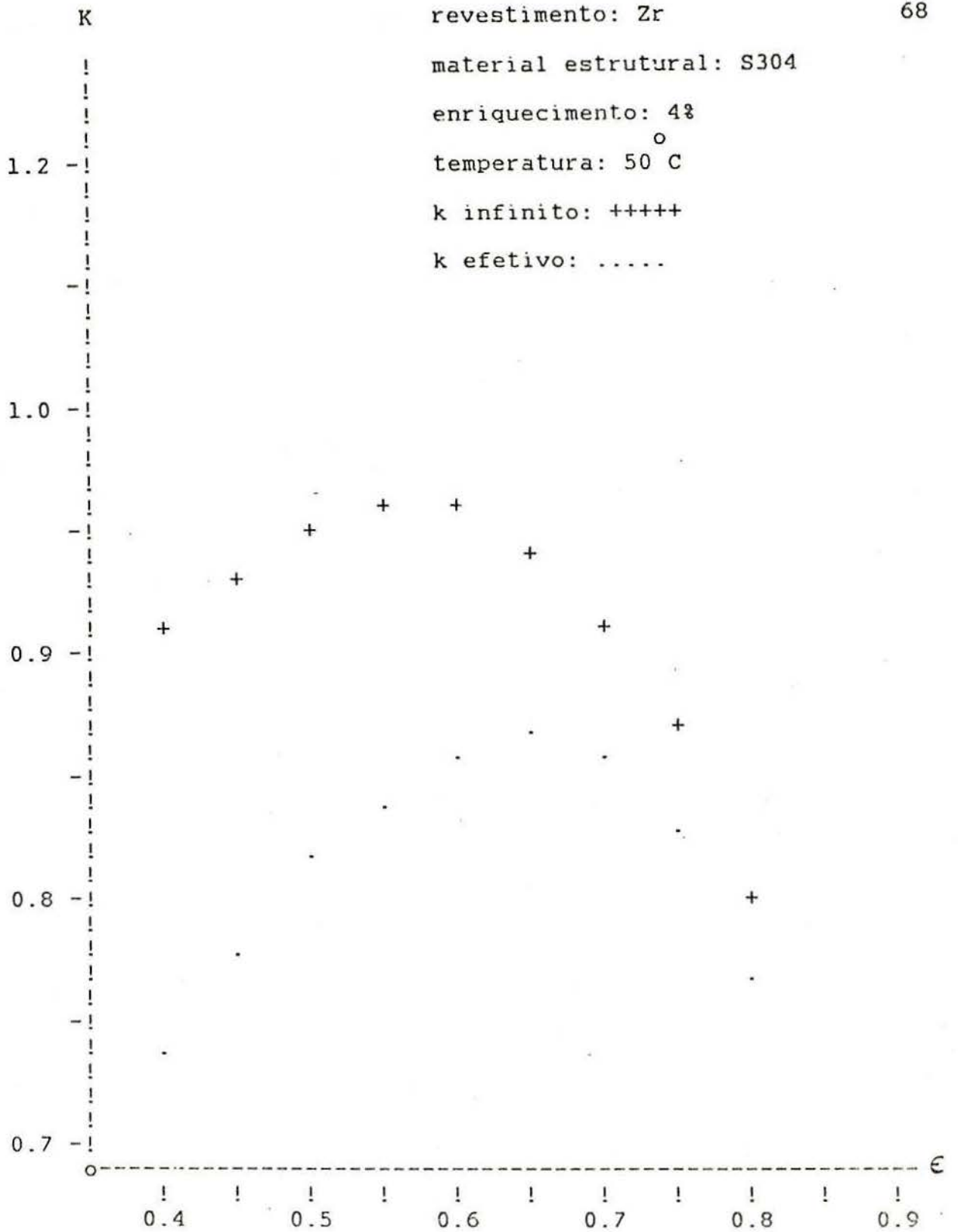
Tabela (4.26)

Valores de  $k_e$  ,  $k_{oo}$

codigos: Odog

$\epsilon$	$k_e$	$k_{oo}$
0.40	0.7452	0.9133
0.45	0.7858	0.9344
0.50	0.8204	0.9493
0.55	0.8473	0.9566
0.60	0.8646	0.9546
0.65	0.8706	0.9420
0.70	0.8618	0.9157
0.75	0.8334	0.8712
0.80	0.7789	0.8027
0.90	0.5454	0.5500

Reator com refletor, com uma espessura do refletor de 120 cm. Os raios sao:  $R_1 = 14.176$  cm ,  $R_2 = R_1 + 120$  cm.



Grafico(4.16) Variacao de ke. e kinf. em funcao da porosidade para um modulo do reator

- Modulo composto de esferas de UO<sub>2</sub> com enriquecimento de 4.4%, revestimento e material estrutural de zircaloy a uma temperatura de 50 ° C, cujos resultados estao representados na tabela 4.27 e pelo grafico 4.17.

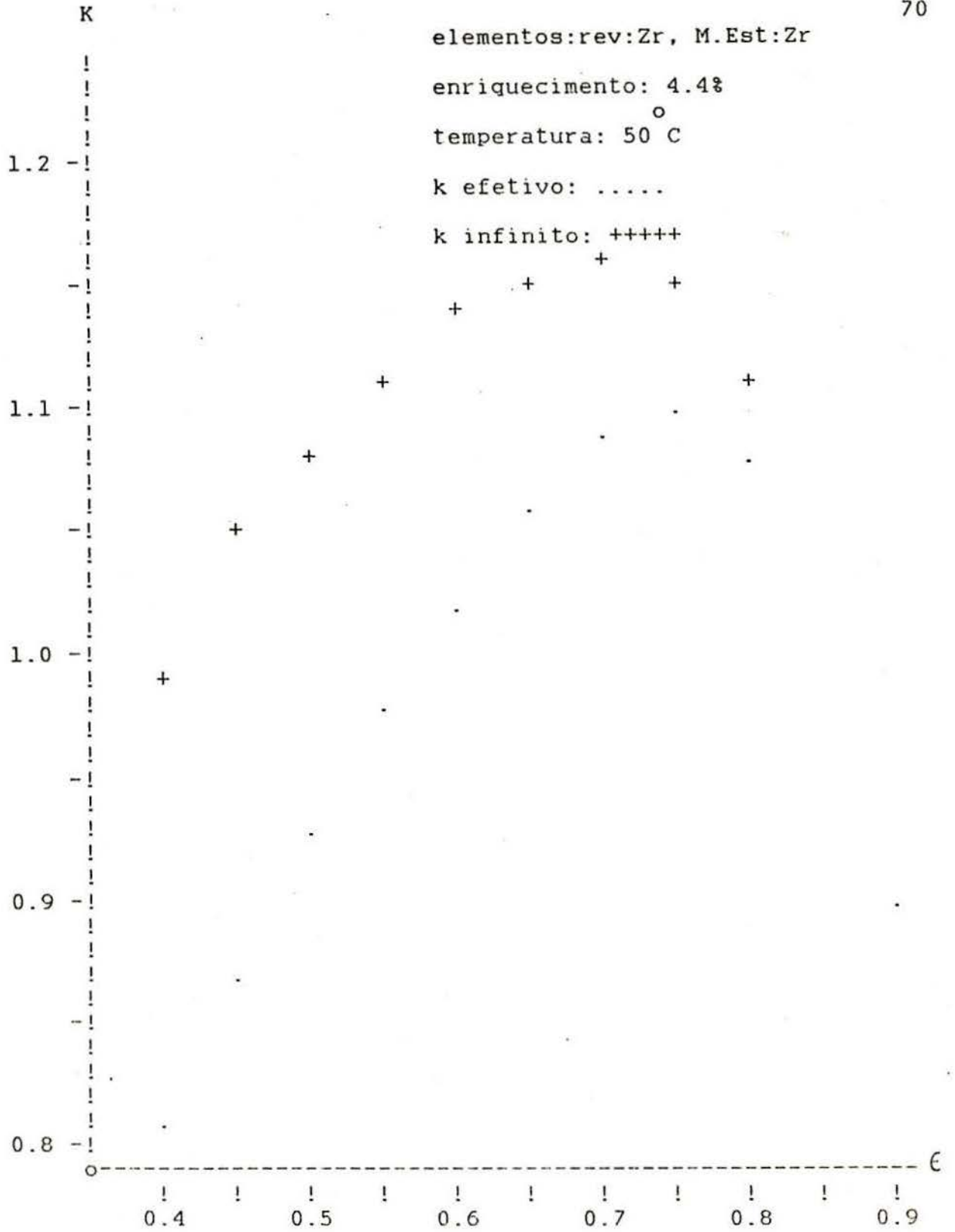
Tabela (4.27)

Valores de  $k_e$  ,  $k_{oo}$

codigos: Odog

$\epsilon$	$k_e$	$k_{oo}$
0.40	0.8115	1.0076
0.45	0.8725	1.0492
0.50	0.9304	1.0869
0.55	0.9828	1.1188
0.60	1.0290	1.1440
0.65	1.0666	1.1609
0.70	1.0923	1.1663
0.75	1.1014	1.1560
0.80	1.0856	1.1223
0.90	0.9018	0.9108

Reator com refletor, com uma espessura do refletor de 120 cm. Os raios sao:  $R_1 = 14.176$  cm ,  $R_2 = R_1 + 120$  cm.



Grafico(4.17) Variacao de  $k_{ef}$ . e  $k$  infinito em funcao da porosidade para um modulo do reator

- Modulo composto de esferas de UO<sub>2</sub> com enriquecimento de 4.4%, revestimento e material estrutural de aluminio a uma temperatura de 50° C, cujos resultados estao representados na tabela 4.28 e pelo grafico 4.18.

Tabela (4.28)

Valores de  $k_e$  ,  $k_{oo}$

codigos: Odog

$\epsilon$	$k_e$	$k_{oo}$
0.40	0.8014	1.0135
0.45	0.8626	1.0529
0.50	0.9211	1.0887
0.55	0.9741	1.1189
0.60	1.0208	1.1427
0.65	1.0587	1.1581
0.70	1.0845	1.1620
0.75	1.0933	1.1502
0.80	1.0767	1.1147
0.90	0.8904	0.8996

Reator com refletor, com uma espessura do refletor de 120 cm. Os raios sao:  $R_1 = 14.176$  cm ,  $R_2 = R_1 + 120$  cm.



elemento: rev:Al, M.Est:Al

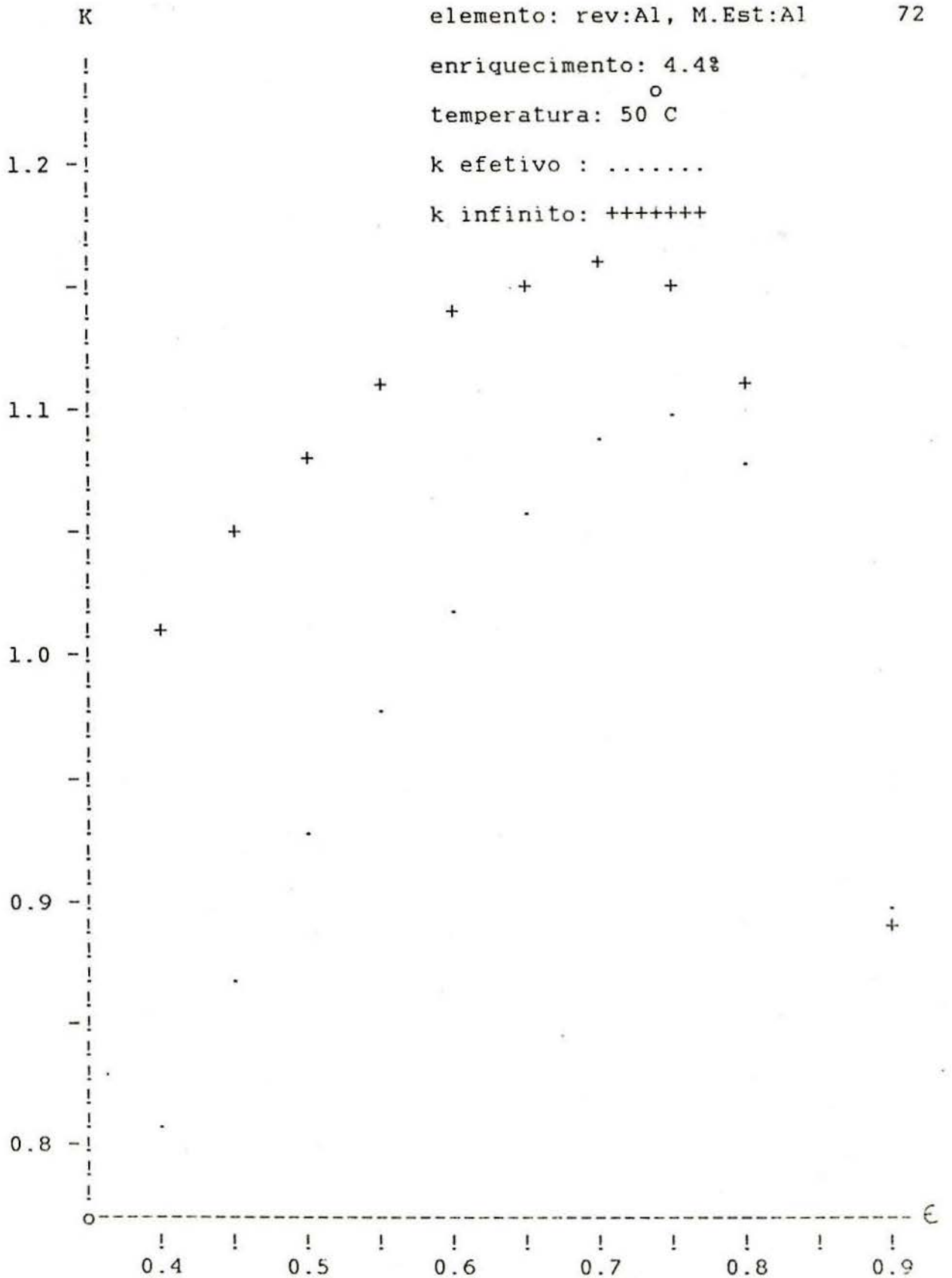
72

enriquecimento: 4.4%

temperatura: 50 C

k efetivo : .....

k infinito: +++++++



Grafico(4.18) Variacao de ke. e kinf. em funcao da porosidade

- Modulo composto de esferas de UO<sub>2</sub> com enriquecimento de 5%, revestimento de aluminio e material estrutural de aco 304 a uma temperatura de 50 ° C, cujos resultados estao representados na tabela 4.29 e pelo grafico 4.19.

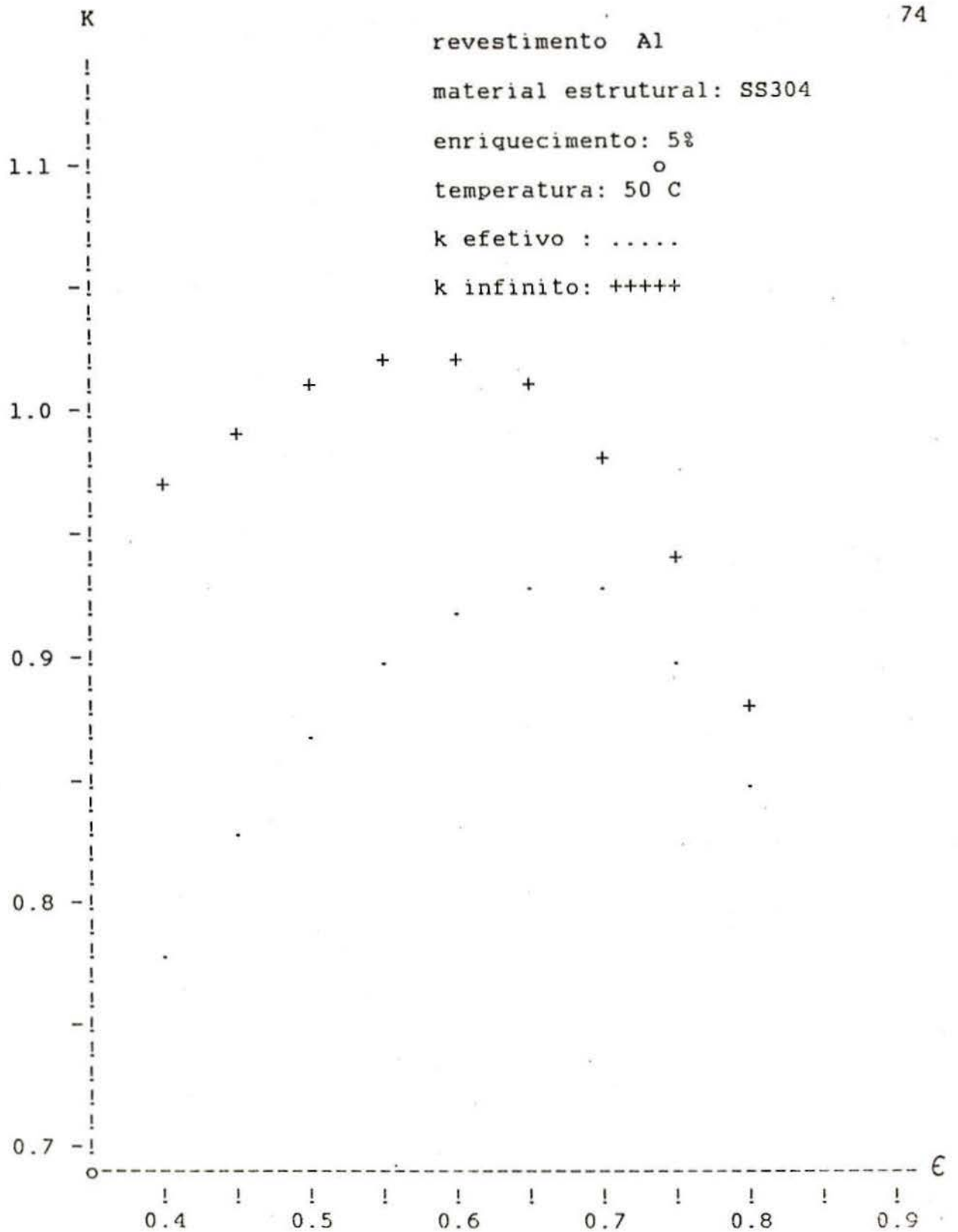
Tabela (4.29)

Valores de  $k_e$  ,  $k_{oo}$

codigos: Odog

$\epsilon$	$k_e$	$k_{oo}$
0.40	0.7892	0.9713
0.45	0.8330	0.9935
0.50	0.8716	1.0104
0.55	0.9027	1.0203
0.60	0.9249	1.0218
0.65	0.9356	1.0216
0.70	0.9317	0.9899
0.75	0.9078	0.9489
0.80	0.8566	0.8826
0.90	0.6171	0.6223

Reator com refletor, com uma espessura do refletor de 120 cm. Os raios sao:  $R_1 = 14.176$  cm ,  $R_2 = R_1 + 120$  cm.



Grafico(4.19) Variacao de  $k_{ef}$ . e  $k_{inf}$  em funcao da porosidade  
 para um modulo do reator

## C A P I T U L O   V

### ANALISES E DISCUSOES

- 5.1.- Reator padrao de 19 modulos
  - 5.2.- Reatividade em funcao da geracao de vapor
  - 5.3.- Reatividade em funcao da temperatura a pressao cte
  - 5.4.- Reatividade em funcao da Pressao com temperatura cte
  - 5.5.- Distribuicao do fluxo de neutrons no Reator Padrao
  - 5.6.- Estudos da reatividade em um modulo
  - 5.7.- Conclusoes e Sugestoes
-

### 5.1.- Reator Padrao de 19 Modulos

-----

Se observarmos o grafico(4.1) observamos como  $k$  efetivo varia com a porosidade. Este comportamento deve-se ao fato que a medida que a porosidade aumenta, aumenta a moderacao e termalizacao de neutrons consequentemente aumenta a reatividade do reator ate atingir a reatividade maxima onde a termalizacao e maxima. Posterior aumento de porosidade ocorrera diminuicao da reatividade devido a absorcao de neutrons pelo moderador.

Existe uma diferenca entre a reatividade de um reator com refletor e um nu, pois o refletor, espalha neutrons diminuindo a fuga de neutrons do nucleo.

Se analisamos o reator padrao no comeco de funcionamento nos graficos(4.3, 4.4, 4.5, 4.6), nas temperatura de 20, 90 e 200 ° C , observamos como a reatividade diminui com o aumento da temperatura. Isto se deve simultaneamente a diminuicao na densidade da agua com o aumento da temperatura, ao efeito Doppler e ao efeito de temperatura no espectro.

### 5.2.- Reatividade em funcao da geracao de vapor a temperatura e ----- pressao constante. -----

Estes estudos foram realizados para relacionar o comportamento da reatividade com a geracao de vapor devido a situacoes indesejaveis como por exemplo a ocorrencia de um acidente no qual a

bomba hidraulica deixe de fazer a circulacao de agua dentro do nucleo, provocando a formacao de vapor.

Para calcular este efeito foi modificada a densidade do moderador atraves de manipulacao do "void fraction" na regio do moderador no Leopard.

Os graficos (4.8,4.9,4.10,4.11) mostram o comportamento de k efetivo e k infinito em funcao do "void fraction".

Usando o codigo Odog observamos como a reatividade decresce com o aumento do "void fraction", definido como:

$$x = \frac{\text{volume de vapor}}{\text{volume de vapor} + \text{volume de agua}}$$

Esta diminuicao da reatividade e devido a uma diminuicao na moderacao de neutrons, provocada pela diminuicao da densidade de nucleos no void.

### 5.3.- Reatividade em funcao da Temperatura a Pressao constante

Analizamos o caso em que a porosidade e 0.70, ja que neste caso existe a mais alta supercriticalidade do reator padrao.

O grafico (4.12) mostra o comportamento de k efetivo e k infinito em funcao da temperatura. Podemos observar que a reatividade diminui de 1.1606 a 1.1545 no caso de k efetivo e de 1.2062 a 1.2035 no caso de k infinito com o aumento da temperatura de 308 °C a 325 °C ou seja um aumento de um  $\Delta T = 2.22\%$

na temperatura implica uma diminuicao de um  $\Delta k_e = 0.18\%$  no  $k_e$  efetivo e uma diminuicao de um  $\Delta k_{\infty} = 0.08\%$  no  $k_{\infty}$  infinito. As razoes deste comportamento sao a reducao na densidade de nucleos do moderador, ao efeito Doppler e efeito espectral. Analisou-se este caso na suposicao de que o sistema de refrigeracao sofra uma falha e o nucleo comece a aquecer.

#### 5.4.- Reatividade em funcao da Pressao a temperatura constante

No grafico (4.13) observa-se que tanto  $k_e$  efetivo como  $k_{\infty}$  infinito se mantem aproximadamente constantes com a variacao da pressao de 2320 psi a 2440 psi, ou seja um aumento  $\Delta p = 3.33\%$  na pressao implica um aumento de  $\Delta k_e = 8.6E-3\%$  sendo que  $k_{\infty}$  nao apresenta variacao.

Este fato e esperado, ja que a variacao de pressao exerce pouca influencia no moderador, pois as densidades dos liquidos sao relativamente insensiveis a estas variacoes.

Logo, grandes aumentos ou diminuicoes na pressao provocam apenas pequenas mudancas na reatividade.

#### 5.5.- Distribuicao do fluxo de neutrons no Reator Padrao.

Se observamos no grafico (4.14) que no centro do reator devido a simetria o fluxo de neutrons e maximo.

No calculo do fluxo pelo Odog, os parametros como  $D, \Sigma_a, \nu \Sigma_f$  usados sao obtidos pelo colapso dos parametros gerados pelo

Leopard com 3 grupos rapidos e 1 grupo termico.

No grafico (4.14) se observa que a medida que aumenta a porosidade, aumenta o valor do fluxo. Isto pode ser explicado sabendo-se que o fluxo na direcao z e cossenoidal. Portanto um aumento da porosidade implica um aumento de H consequentemente um aumento do fluxo ( $\cos \pi z/H$ ), e tambem efeito de menor moderacao.

#### 5.6.- Estudos da Reatividade em um Modulo

Foram trealizados estudos de um modulo para ver qual e o comportamento deste em diferentes situacoes com a finalidade de estudo do comportamento de um reator de pesquisa.

Serao analisados as seguintes situacoes:

- 1.- Revestimento, tubo e carcaca de aluminio, e enriquecimento de 4%. grafico (4.15) e tabela(4.25)
- 2.- Revestimento de zircaloy com carcaca e tubo de aco SS304 com enriquecimento de 4%. Grafico (4.16) e tabela (4.26)
- 3.- Revestimento, tubo e carcaca de zircaloy, com enriquesimento de 4.4%. grafico (4.17) e tabela (4.27).
- 4.- Revestimento, tubo e carcaca de aluminio, com enriquecimento de 4.4%. grafico (4.18) e tabela (4.28).
- 5.- Revestimento de aluminio, tubo e carcaca de aco SS304, com enriquecimento de 5%. Grafico (4.19) e tabela (4.29)

Todos os casos anteriores foram analisados a uma temperatura de



50 C. Notou-se que todas as curvas tem o mesmo comportamento que as do reator padrao.

No primeiro caso observamos que a curva e quasi igual a do reator padrao, com pequenas diferencias, por exemplo o ponto de maxima reatividade do aluminio e menor que do zircaloy devido ao fato que as seccoes de choque do aluminio tem uma diferenca de 53.3% com a do zircaloy.

$$\sum_a (\text{aluminio}) = 0.015 \text{ cm}^{-1} \quad \sum_a (\text{zircaloy}) = 0.008 \text{ cm}^{-1}$$

O pico da reatividade para reator padrao ocorre para uma porosidade de 0.70 enquanto que para um modulo e de 0.75 devido a fuga de neutrons ser maior para um modulo.

No segundo caso com revestimento de Zr a carcaca e tubo de aco (SS304) com enriquecimento de 4%, e no quinto caso revestimento de Al a carcaca e tubo de aco, com enriquecimento de 4.4%.

graficos (4.16, 4.19) e tabela (4.26, 4.29). Observamos que nos 2 e 5 a reatividade e menor que no caso 1, devido a alta absorcao de aco ( $\sum_a \cong 0.175 \text{ cm}^{-1}$ ) em relacao ao aluminio ( $\sum_a = 0.015 \text{ cm}^{-1}$ ) e zircaloy ( $\sum_a = 0.008 \text{ cm}^{-1}$ ), o reator e subcritico necessitando aumento do enriquecimento para atingir criticalidade. (29)

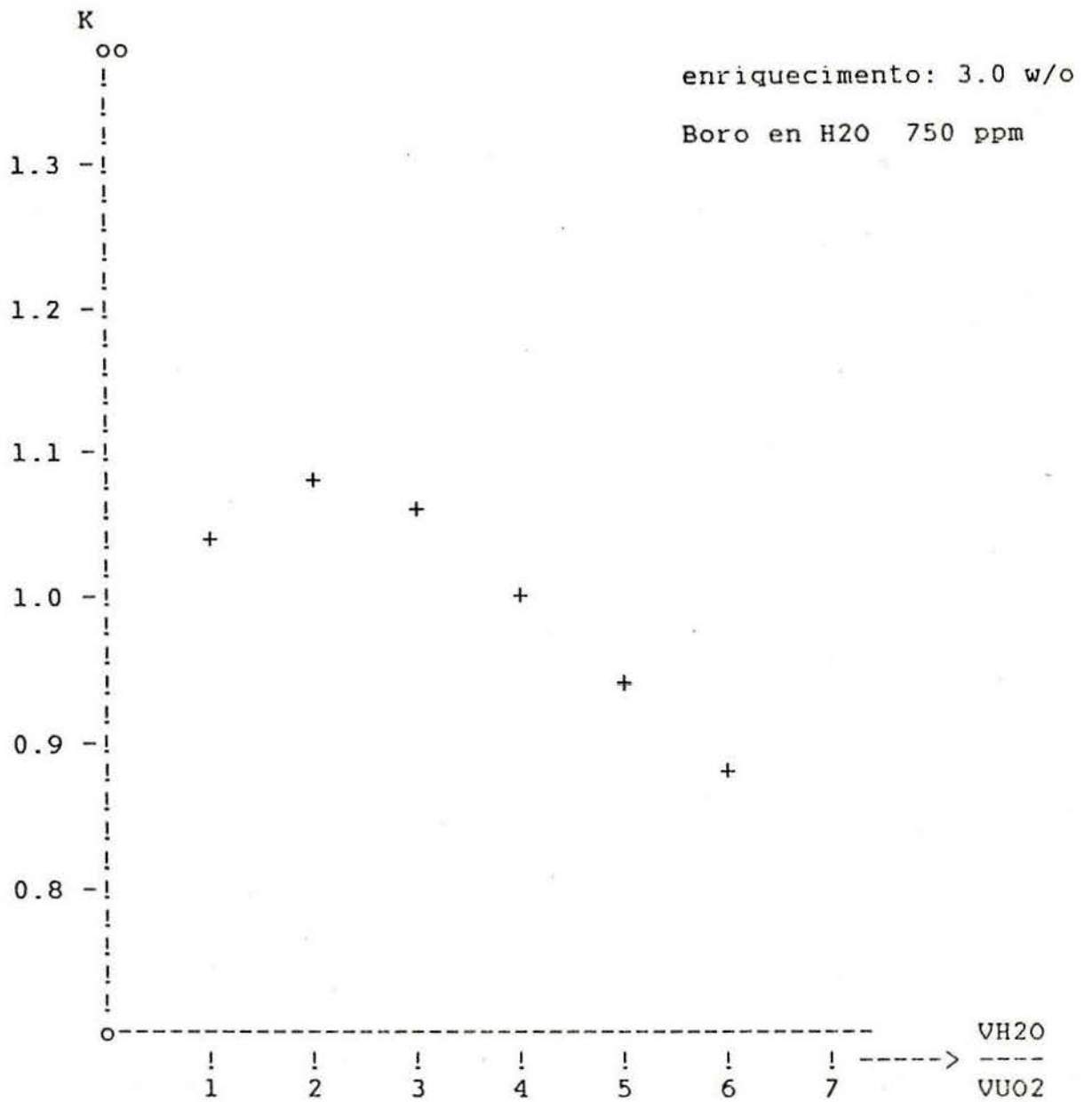
No terceiro caso com revestimento, carcaca e tubo de zircaloy e no quarto caso com revestimento, carcaca e tubo de aluminio, ambos com enriquecimento de 4%. Graficos (4.17, 4.18) e tabelas (4.27, 4.28). Vemos que ambas curvas tem praticamente o mesmo

comportamento, exceto por pequena diferença nos valores de  $k$  infinito e  $k$  efetivo. Isto é devido a pequenas diferenças existentes entre seções de choque de ambos elementos, podendo-se fabricar um módulo do reator com revestimento de alumínio o qual diminuiria o custo do reator.

#### 5.7.- Conclusões

Ao compararmos este reator com os reatores convencionais vemos que as curvas de  $k$  efetivo e  $k$  infinito tem quase o mesmo comportamento gráfico (4.20), e (4.1).

O aspecto interessante e importante deste conceito de reator é a segurança inerente quando é projetado com reatividade máxima e é crítico. Qualquer incidente ou acidente de qualquer natureza que cause aumento ou diminuição da porosidade provoca redução da reatividade tornando o reator subcrítico.



Figura(4.20) k infinito de PWR em funcao da razao de moderador  
 $VH2O/VUO2$ . (KWU)

A P E N D I C E    A  
- - - - -

1.1.- Calculos diversos.

---

## 1.1 Calculos Diversos

Neste apendice sao apresentados os resultados de calculos para as seguintes situacoes para o reator padrao:

- 1.- Revestimento, tubo e carcaca de zircaloy a uma temperatura de 308 °C com enriquecimento de 4%. tabela e grafico A-1.
- 2.- Revestimento, tubo e carcaca de aco (SS304) a uma temperatura de 308 °C com enriquecimento de 4%. Tabela e grafico A-2.
- 3.- Revestimento de zircaloy, tubo e carcaca de aco (SS304) a uma temperatura de 308 °C com enriquecimento de 4%. Tabela e grafico A-3.

Tabela (A-1)

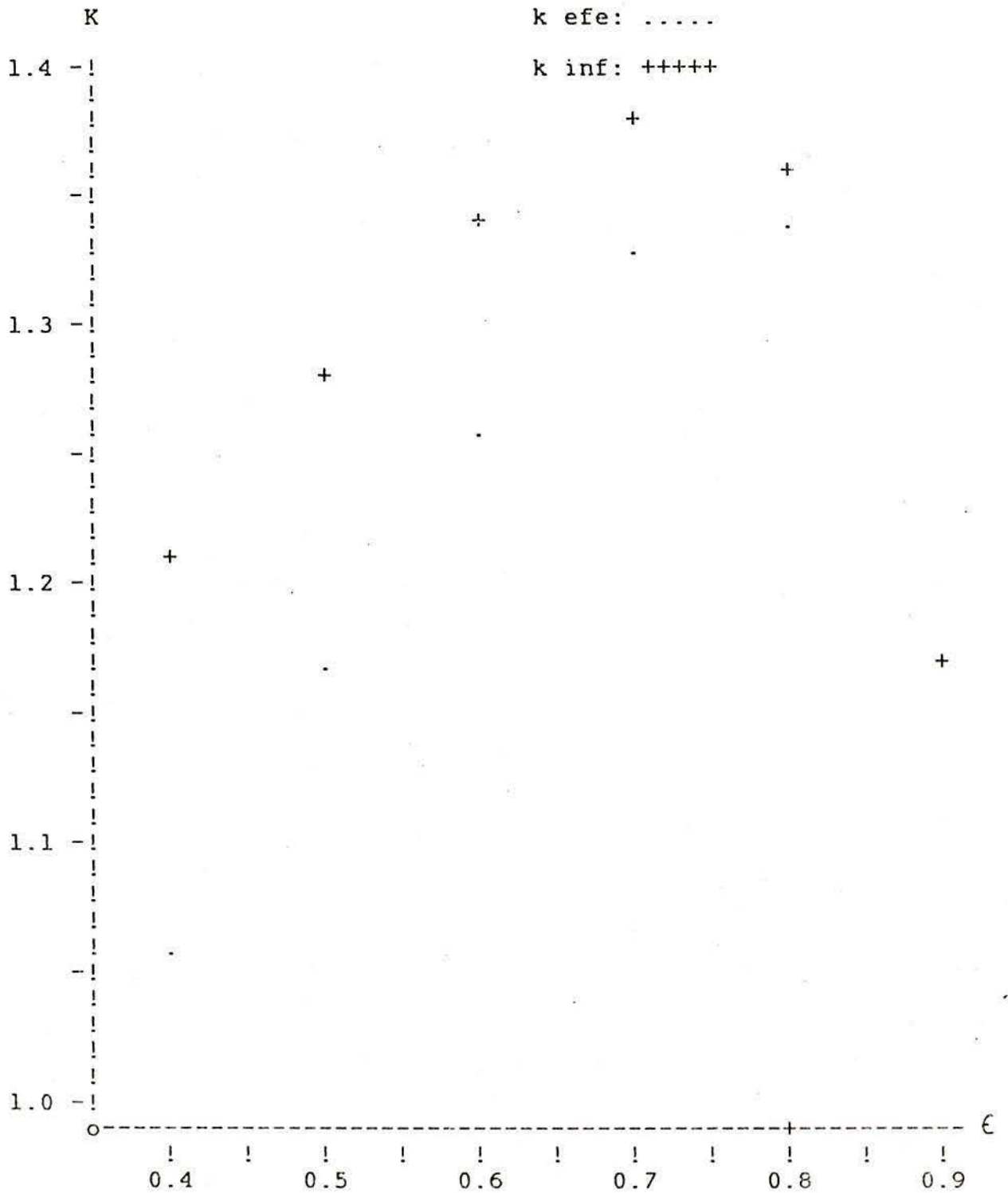
Valores de  $k_e$  ,  $k_{oo}$ 

codigos: Leopard, Odog

$\epsilon$	LEOPARD		O D O G	
	$k_e$	$k_{oo}$	$k_e$	$k_{oo}$
0.40	1.0219	1.2479	1.0646	1.2116
0.50	1.1260	1.3247	1.1759	1.2883
0.60	1.2107	1.3843	1.2683	1.3477
0.70	1.2665	1.4181	1.3316	1.3810
0.80	1.2687	1.3995	1.3374	1.3614
0.90	1.1119	1.2249	1.1799	1.1860

Codigo ODOG tem duas regioes, com uma espesura do refletor de 120 cm. Os raios sao:  $R_1 = 61.79 \text{ cm}$  ,  $R_2 = R_1 + 120 \text{ cm}$

tempe: 308 C; enriq: 4%



Grafico(A-1) Variacao de kef. e kinf. em funcao da porosidade para um modulo do reator

Tabela (A-2)

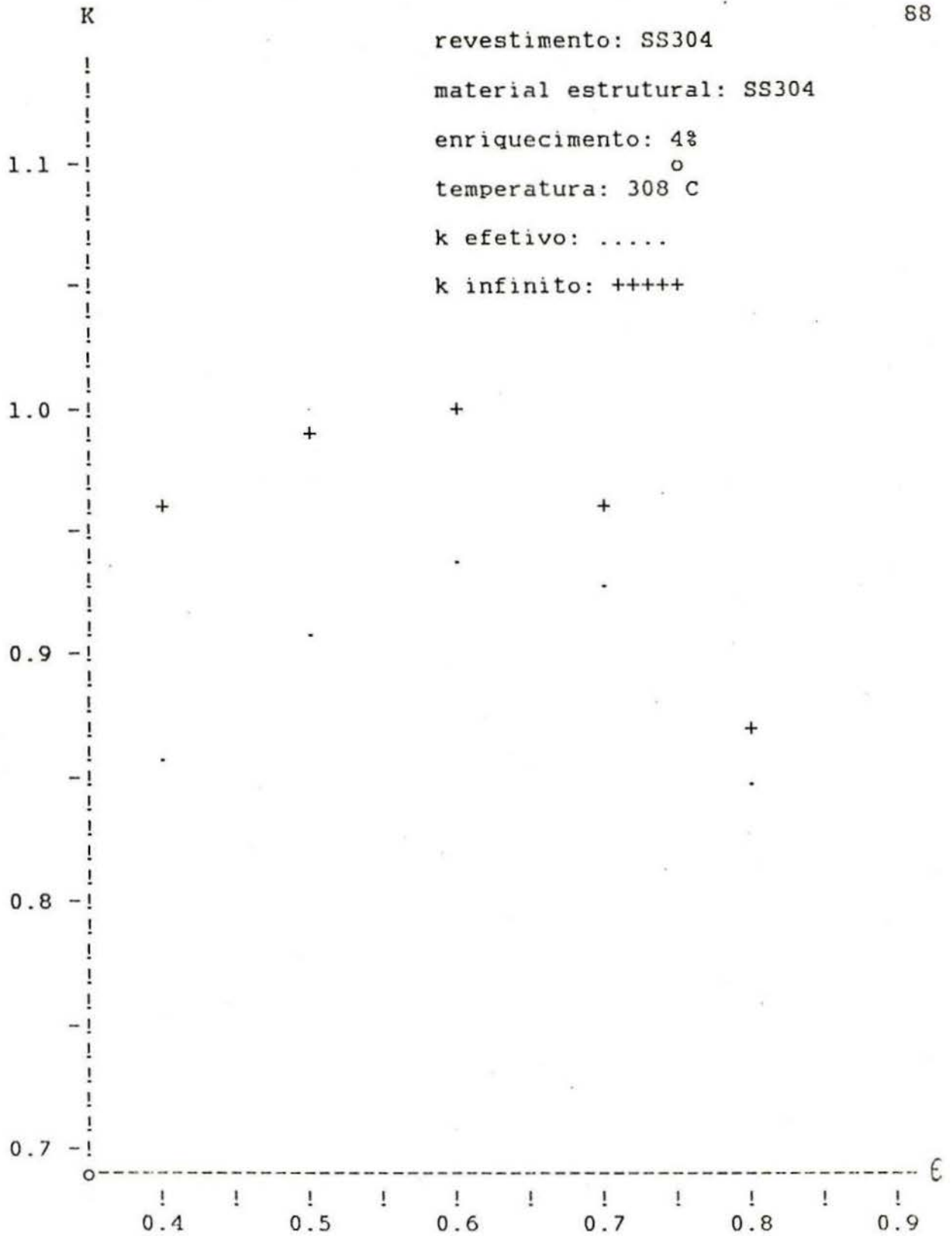
Valores de  $k_e$  ,  $k_{oo}$

codigos: Leopard, Odog

$\epsilon$	LEOPARD		O D O G	
	$k_e$	$k_{oo}$	$k_e$	$k_{oo}$
0.40	0.8359	0.9858	0.8616	0.9629
0.50	0.8853	1.0134	0.9156	0.9904
0.60	0.9101	1.0181	0.9447	0.9955
0.70	0.8980	0.9876	0.9359	0.9657
0.80	0.8223	0.8928	0.8597	0.8727
0.90	0.6059	0.6557	0.6373	0.6400

Codigo ODOG tem duas regioes, com uma espesura do refletor de 120 cm. Os raios sao:  $R_1 = 61.79$  cm ,  $R_2 = R_1 + 120$  cm





Grafico(A-2) Variacao de kef. e kinf. em funcao da porosidade para o reator.

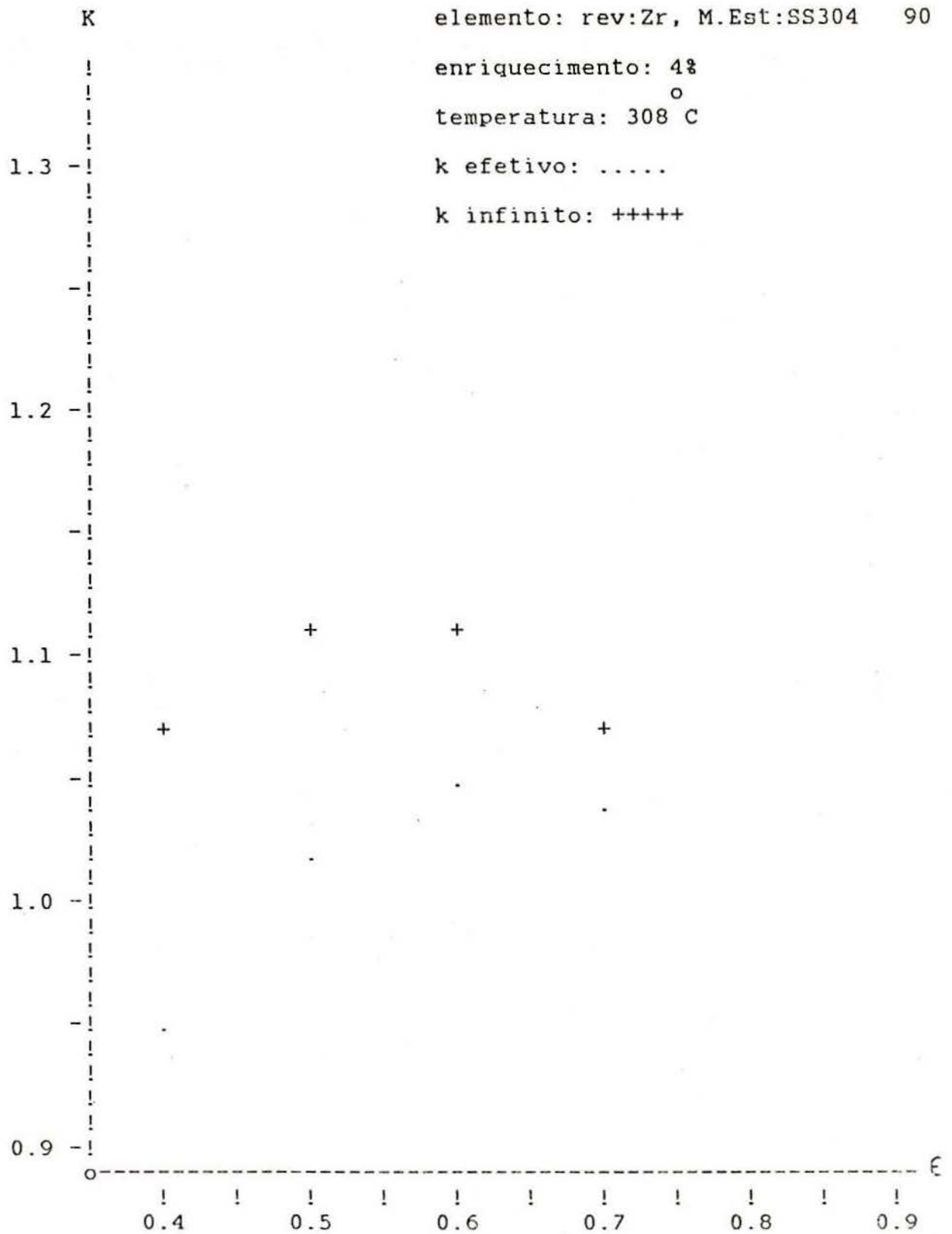
Tabela (A-3)

Valores de  $k_e$  ,  $k_{oo}$

codigos: Leopard, Odog

$\epsilon$	LEOPARD		O D O G	
	$k_e$	$k_{oo}$	$k_e$	$k_{oo}$
0.40	0.9245	1.1071	0.9573	1.0787
0.50	0.9832	1.1379	1.0209	1.1100
0.60	1.0117	1.1405	1.0537	1.1136
0.70	0.9953	1.1002	1.0401	1.0747
0.80	0.9031	0.9838	0.9459	0.9609
0.90	0.6516	0.7064	0.6861	0.6890

Codigo ODOG tem duas regioes, com uma espesura do refletor de 120 cm. Os raios sao:  $R_1 = 61.79$  cm ,  $R_2 = R_1 + 120$  cm



Grafico(A-3) Variacao de  $k_e$  e  $k_{inf}$ . em funcao da porosidade  
 para um modulo do Reator.

A P E N D I C E B  
- - - - -

1.1.- Entradas de Leopard

1.2.- Entradas de Odog

1.1.- Entradas de Leopard

A entrada de Leopard consiste em: Na primeira linha ou cartao vai o titulo do caso a estudar da coluna 1 ate 72. Na segunda linha tem varias opcoes que sao:

a.- Change case	0
Reference case	1*
o	
b.- Temperatura in F	0
o	
Temperatura in R	1
o	
Temperatura in K	2
o	
Temperatura in C	3*
c.- Lengths in centimeters	0*
Lengths in inches	1
d.- Square cell	0*
Hexagonal cell	1
e.- Search for L-238	0*
Use input L-238	1
f.- Dimensions are hot	0
Dimensions are cold	1*
g.- Sigma rem. fitted for element	1* for hydrogen
h.- Don't punch CANDLE library	0*
Punch CANDLE LIBRARY	1
i.- Include $\sum_{a,r}^{3,28}$ in library	0*
Don't include $\sum_{a,r}^{3,28}$ in library	1
j.- Don't punch CANDLE thermal data	0*

Punch MND CANDLE thermal data	1
Punch conv. CANDLE thermal data	2
k.- Punch FAB-2 data for material	0*
l.- Punch AIM-5 data for material	0*
m.- 2-group MND	0*
2-group conventional model	1
4-group MND	2
4-group conventional model	3
n.- No lifetime steps	0*
Some lifetime steps	1
o.- Bypass FAB Doppler fitting	0*
Save data for FAB fitting	1
Perform FAB fitting	2
p.- Bypass CNCR Doppler Fitting	0*
Save data for CNCR fitting	1
Perform CNCR fitting	
q.- Penalty for nonuniform burnup	+1
2	
r.- B critically search	0
m	
No search	-2
Thermal poison search	-1

Todos os valores acompanhados de \* foram usados no nosso caso, elas vao de tres em tres colunas.

Na terceira linha vem especificados os elementos que compoe o nucleo, da seguinte maneira: Nas primeiras 12 colunas vao o numero do elemento, nas segundas 12 colunas vao o percentual de

elemento no pellet, nas terceiras 12 colunas vao o percentual do elemento do revestimento, nas quartas 12 colunas vao o percentual do elemento do moderador e nas quintas 12 colunas vao o percentual do elemento na regio extra. Para indicar o fim de dados de esta parte se coloca a continuacao nas primeiras 12 colunas o valor 777.

A continuacao, com a mesma distribuicao anterior se coloca o numero do elemento enriquecedor, nas segundas 12 colunas vao o percentual de enriquecimento acompanhado de: + (atoms fraction) e -(weight fraction). Para indicar o fim dos dados se coloca o valor 777, nas primeiras 12 colunas. Naseccao que segui vem de 12 em 12 colunas os seguintes dados: temperatura de ressonancia, temperatura do pellet, temperatura do revestimento, temperatura do moderador, o valor buckling e non-lattice peakins factor (0 ou 1). Naproxima linha vao de 12 em 12 colunas os valores de: raio do pellet, raio do pellet + revestimento, o passo, potencia (100%→1.0), altura, non-lattice fraction. Na proxima linha vao de 12 em 12 colunas os valores de: pressao de H2O, pressao D2O, densidade de UO2 (g/cc ou %), densidade de PuO2 (g/cc ou %), densidade de ThO2 (g/cc ou %).

Tabela ( B-1 )

Valores de entrada para o código Leopard

1	E=.4 ENR= 4.0 REATOR NUCLEAR A LEITO FLUIDIZADO																					
2	1	3	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2	0	0		
3				99					1.0													
4				100												1.0				.388		
5				3							1.0											
6				304																	.6119	
7				777																		
8				18																		-.040
9				777																		
10		20.						20.		20.				20.						.003145		1.0
11		.233						.281		.6446				1.0						70.00		.2224
12		2320								.96												

Exemplo usado para o caso quando, revestimento é de zircaloy e o material estrutural é de aço SS-304 com um 4.0% de enriquecimento.



## 1.2.- Entrada de Odog

A entrada de dados no código Odog consiste em: primeira linha número de regiões formato I2, geometria do reatores NN= 2, 1, 0 para geometria esférica, cilíndrica e plana, formato I2, critério de convergência do autovalor formato E 8.1. Na segunda linha vão as distâncias das regiões. São medidas desde o origem formato F10.3.

Na terceira linha vão os coeficientes de difusão de cada região formato F10.3. Na terceira linha vão as seções de choque de absorção de cada região em formato F10.3. Na quinta linha vão a produção de neutrons de cada região em formato F10.3. Na sexta linha vai o valor buckling que depende da geometria em formato F10.3 e na sétima linha vão os símbolos + - \* (branco) 1 nas primeiras 5 colunas. este cartão é necessário para realizar o gráfico do fluxo como uma função do raio.

Tabela ( B-2 )

Valores de entrada para o código Odog

---

1	4 1	0.1E-2			
2		20.59	41.19	61.79	181.79
3		.120600E+1.	.120600E+1.	.120200E+1.	8400
4		.174300E-1.	.174300E-1.	.183500E-1.	.170430E-3
5		.200500E-1.	.200500E-1.	.216000E-1.	00 E+0
6				.139700E-2	
7	<del>+</del>	1			

---

Exemplo usado para o caso quando, o núcleo está com uma não uniformidade

A P E N D I C E C  
- - - - -

1.1.- Colapso

### 1.1.- Colapso

Como o código Leopard gera os parâmetros  $D$ ,  $\sum_a$ ,  $\sqrt{\sum_f}$ ,  $\Phi$  para quatro grupos e o código Odog usa os parâmetros de  $D$ ,  $\sum_a$ , e  $\sqrt{\sum_f}$  para um grupo, precisou-se colapsar os dados do Leopard para gerar os dados usados por Odog. Para isto calcularom-se os parâmetros mediados com o fluxo, usando as seguintes equações

$$\bar{D} = \frac{\sum_i^N D_i \Phi_i}{\sum_i^N \Phi_i} \quad \bar{\sum}_a = \frac{\sum_i^N \sum_{ai} \Phi_i}{\sum_i^N \Phi_i}$$

$$\sqrt{\bar{\sum}_f} = \frac{\sum_i^N \sqrt{\sum_{fi}} \Phi_i}{\sum_i^N \Phi_i}$$

Este método é conhecido como técnica de condensação de constantes, que reduz os  $N$  grupos a poucos grupos; método usado na Teoria de Multigrupo.

VII BIBLIOGRAFIA

- 1.- Sefidvash, F. " A Fluidized Bed Nuclear Reactor Concept" Nuclear Technology (1985)
- 2.- Sefidvash, F. " A Nuclear Power Reator Concept for Iran," Iran. J. Sci. Technol., 7,147 (1970).
- 3.- Sefidvash, F and M.R. Harron, "Preliminary Reactor Physics Calculations of a Fluized Bed Nuclear Reactor Concept," Atomkernergie/ Kerntechnik, 35, 3 (1980).
- 4.- Sefidvash, F."A Nuclear Reactor Concept for Brazil," Rev. Bras. Tecnol., 11, 145 (1980).
- 5.- Sefidvash, F."Preliminary Thermal Design Calculations of the Fluidized Bed Nuclear Power Reactor,"Atomkernenergie / Kerntechnik, 41,45 (1982)
- 6.- Sefidvash, F. "International Cooperation Through Reactor Design and Development - An Invitation,"SMR/93-11-10, International Center for Theoretical Physics (1982).
- 7.- Sefidvash, F. " Loss of Coolant Accident in the Fluidized Bed Nuclear Power Reactor," Atomkernenergie/Kerntechnik, 42,2,124 (1983).
- 8.- Sefidvash, F. "Heat Transfer in a Fluidized bed Nuclear Power Reactor," Proc. I Congresso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia, La Plata, Argentina, October 31 November 4, 1982.
- 9.- Sefidvash, F."Physics and Thermal and Hydraulics of the Fluidized Bed Nuclear Power Reactor," Proc.III Encontro Na-

- tional de Fisica de Reactores - Centrecom, Italia, Rio de Janeiro, Brazil, December 12-14, 1982.
- 10.-M.R.Haroon and F. Sefidvash, "Reactor Physics Study of Organic Moderated Fluidized Bed Nuclear Reactor," J.Nat.Sci. Math., 24, I, 129 (1984).
  - 11.-Sefidvash, F. "A Nuclear Power Reactor Concept for Developing Countries," Proc. Ist.Int. Course on Reactor Physics for Developing Countries, Bogota, Colombia, 1983, World Publishing Company, Singapore (1983).
  - 12.-Sefidvash, F. "A Small Safe Nuclear Power Reactor," Proc.III Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro, Brazil, October 1984.
  - 13.-Reator Nuclear a Leito Fluidizado - Fluidized Bed Reactor, Catalogo Tecnico, 1985.
  - 14.-Strawbridge L.E. and Barry R.F "Criticality Calculations for Uniform Water-Moderated Lattice". Nuclear Science & Engineering 23,58-73 (1965)
  - 15.-Barry, R.F. "A Spectrum Dependent Non-Spatial Depletion Code for The IBM - 7094". USAEC Report WCAP - 3269 - 26
  - 16.-Leslie, D.C. "The Equation Solved by The Muft - 4 Program" AEEW - M139, 1961
  - 17.-Wigner and Wilkins, AECD - 2275 (1944)
  - 18.-Amster and Suarez "The Calculation of Thermal Constants Averaged over a Wigner - Wilkins flux Spectrum", Sofocate, WAPD - TM (1957)
  - 19.-Amoyal, Benoist, & Horowitz "New Method of Determining The

- Thermal Utilization Factor for a Unit Cell". Journal of Nuclear Energy 6:79 (1957)
- 20.-Greebler, etal. "Nuclear Science & Engineering 6,128 (1959)
- 21.-Ronald J. Omega "The Numerical Solution of One Group Neutrons Diffusion Equation"
- 22.- John R. Lamarsh. " Nuclear Reactor Theory " edicao (1966)
- 23.- Rafael Caro. " Fisica de Reactores Nucleares " (1976)
- 24.- F. Goded E. y V. Serradell G. " Teoria de Reactores y Elementos de Ingenieria Nuclear " tercera edicao (1975)
- 25.- Eugene Butkov. " Mathematic Physics " (1968)
- 26.- G.I. Bell & S. Glasstone. " Nuclear Reactor Thoery " (1970)
- 27.- James J. Duderstadt, Louis J. Hamilton "Nuclear Reactor Analysis" (1976)
- 28.- M.M. El-Wakil "Nuclear Heat Transport" (1971)
- 29.- C.R. Tipton, JR., " Reactor Handbook of Materials", Battelle Memorial Institute - Second Edition 1960.