



**CNEN/SP**

**ipen** Instituto de Pesquisas  
Energéticas e Nucleares

AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE  
DE SÃO PAULO

**MEDIDA DE DISTRIBUIÇÃO DA DENSIDADE DE POTÊNCIA  
RELATIVA DO NÚCLEO DO REATOR IPEN/MB-01,  
PELA TÉCNICA DE VARREDURA GAMA  
DA VARETA COMBUSTÍVEL.**

**ALVARO LUIZ GUIMARÃES CARNEIRO**

Dissertação apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do Grau de Mestre  
em Ciências na Área de Reatores Nucleares  
de Potência e Tecnologia do Combustível  
Nuclear.

**Orientador:**

**Dr. Adimir dos Santos**

**São Paulo**

**1996**

*Aos meus pais Álvaro e Dulce,  
minha esposa Janete e minha filha Luiza,  
e a minha irmã Céia.*

**Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares**  
**Autarquia associada à Universidade de São Paulo**

**MEDIDA DE DISTRIBUIÇÃO DA DENSIDADE DE POTÊNCIA  
RELATIVA DO NÚCLEO DO REATOR IPEN/MB-01,  
PELA TÉCNICA DE VARREDURA GAMA  
DA VARETA COMBUSTÍVEL.**

**Alvaro Luiz Guimarães Carneiro**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos  
para obtenção do grau de Mestre em Ciências na  
Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia  
do Combustível Nuclear.

Orientador:  
Dr. Adimir dos Santos

**São Paulo**

**1996**



## **AGRADECIMENTOS**

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Comissão Nacional de Energia Nuclear (IPEN/CNEN-SP), pelo fornecimento das instalações, equipamentos e pelos cursos de Pós-Graduação oferecidos.

Ao Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, pelo fornecimento das instalações e equipamenmtos.

Ao Prof. Dr. Adimir dos Santos, pela orientação segura, pelo incentivo, amizade e auxílio no desenvolvimenmtto e elaboração desse trabalho.

Aos colegas da Divisão de Física de Reatores especialmente ao Dr.Paulo Rogério Pinto Coelho pelo apoio na parte experimental e a MSc.Leda Cristina Cabelo Bernardes Fanaro pelo levantamento dos cálculos teóricos.

Aos colegas do Reator IPEN/MB-01, MSc.Rinaldo Fuga, Cesar Luiz Veneziani, Ademir das Dores Peres e em especial ao Rogério Jerez e Anselmo Ferreira Miranda pelo apoio no desenvolvimento experimental.

Ao amigo e colega Gelson Toshio Otani, um agradecimento especial pelo auxílio e assessoria no desenvolvimento dos programas computacionais para processamento dos dados.

A todos enfim que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

# ***“MEDIDA DE DISTRIBUIÇÃO DA DENSIDADE DE POTÊNCIA RELATIVA DO NÚCLEO DO REATOR IPEN/MB-01, PELA TÉCNICA DE VARREDURA GAMA DA VARETA COMBUSTÍVEL”***

**ALVARO LUIZ GUIMARÃES CARNEIRO**

## **RESUMO**

Este trabalho apresenta uma metodologia de medida para determinação da distribuição axial e radial da densidade de potência relativa do núcleo do Reator IPEN/MB-01, pela varredura gama da vareta combustível.

A metodologia baseia-se na proporcionalidade entre a atividade gama emitida pelo decaimento radioativo dos produtos de fissão da vareta combustível e a densidade de potência. A técnica de varredura consiste em medir a radiação gama com energia superior a 0,6 MeV ao longo da região ativa do combustível, traçando um perfil de distribuição. Os resultados experimentais servirão como padrões para qualificação da metodologia de cálculo estabelecendo margens de desvio de métodos computacionais utilizados em cálculos de parâmetros nucleares no IPEN. Os resultados calculados comparados aos resultados medidos experimentalmente mostraram concordâncias satisfatórias.

***“MEASUREMENT OF THE RELATIVE POWER DENSITY  
DISTRIBUTION OF THE IPEN/MB-01 REACTOR, USING A FUEL  
ROD GAMMA SCANNING TECHNIQUE”***

**ALVARO LUIZ GUIMARÃES CARNEIRO**

**ABSTRACT**

This work presents a measurement methodology for determination of radial and axial relative power density distribution of the IPEN/MB-01 Reactor core by means of the fuel rod gamma scanning. The methodology is based on the proportionality between gamma activity emitted by the radioactive decay of the fission products and power density. The scanning technique consists of counting gamma radiation above 0,6 MeV along the active area of the fuel rod, getting a distribution profile. The experimental results will be used as a benchmark for qualification and to establish possible deviations for the calculational methodology currently used at IPEN. The comparison of the calculated and measured results showed good agreement.

**SUMÁRIO**

**CAPÍTULO 1: CONSIDERAÇÕES GERAIS**

1.1.INTRODUÇÃO..... 02

1.2.HISTÓRICO..... 04

1.3.OBJETIVO DO TRABALHO..... 06

1.4.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 1..... 07

**CAPÍTULO 2: TRANSMUTAÇÃO E ANÁLISE DE ESPECTROMETRIA**

2.1.INTRODUÇÃO..... 10

2.2.ESPECTROMETRIA VIA CÓDIGO ORIGEN..... 13

2.3.ESPECTROMETRIA EXPERIMENTAL..... 16

2.4.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 2..... 18

**CAPÍTULO 3: PROGRAMA EXPERIMENTAL**

3.1.INTRODUÇÃO..... 20

3.2. BANCADA EXPERIMENTAL..... 21

3.2.1.SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO E INDICAÇÃO  
DE POSICIONAMENTO DA VARETA COMBUSTÍVEL..... 21

3.2.2. COLIMADORES E BLINDAGENS..... 23

3.2.3.INSTRUMENTAÇÃO NUCLEAR..... 26

3.2.4.VARETA COMBUSTÍVEL..... 28

3.3.PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL..... 31

3.3.1.PROCEDIMENTO DE OPERAÇÃO..... 31

3.3.2.PROCEDIMENTO DE MEDIDA DO DECAIMENTO RADIOATIVO..... 32

3.3.3.PROCEDIMENTO DE VARREDURA DA VARETA COMBUSTÍVEL..... 33

3.4.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 3..... 34

**CAPÍTULO 4: RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

4.1.INTRODUÇÃO..... 36

4.2.LEVANTAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS.....37

4.2.1.MEDIDAS DO DECAIMENTO RADIOATIVO..... 37

4.2.2.MEDIDAS DA DENSIDADE DE POTÊNCIA RELATIVA..... 41

4.3.AVALIAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS..... 60

4.3.1.ANÁLISE DA CONSISTÊNCIA DA CORREÇÃO DO DECAIMENTO.....60

4.3.2.TESTE DE REPRODUTIBILIDADE DAS MEDIDAS EXPERIMENTAIS..... 62

4.4.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 4.....64

**CAPÍTULO 5: ANÁLISE DE INCERTEZA**

5.1.INTRODUÇÃO..... 66

5.2.CÁLCULO DA INCERTEZA DAS MEDIDAS EXPERIMENTAIS..... 67

5.3.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 5..... 71

**CAPÍTULO 6: RESULTADOS CALCULADOS**

6.1.INTRODUÇÃO..... 73

6.2.LEVANTAMENTO DOS DADOS VIA CÓDIGO CITATION..... 75

6.3.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 6..... 76

**CAPÍTULO 7: ANÁLISE COMPARATIVA**

7.1.INTRODUÇÃO..... 78

7.2.RESULTADOS COMPARATIVOS CALCULADOS X EXPERIMENTAIS.....80

7.2.1.DISTRIBUIÇÃO AXIAL DA DENSIDADE DE POTÊNCIA RELATIVA..... 80

7.2.2.DISTRIBUIÇÃO RADIAL DA DENSIDADE DE POTÊNCIA RELATIVA..... 98



**CAPÍTULO 8: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

8.1.CONCLUSÕES.....100

8.2.RECOMENDAÇÕES.....101

**APÊNDICE A**

A.1.PROCESSAMENTO DE DADOS.....103

A.2.DESCRICÃO SIMPLIFICADA DOS PROGRAMAS.....105

A.3.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO APÊNDICE A.....106

**APÊNDICE B**

APÊNDICE B1: Programa I - “DEC”.....108

APÊNDICE B2: Programa II - “DECM”.....110

APÊNDICE B3: Programa IV - “DESF”.....113

APÊNDICE B4: Programa V - “TABS2”.....124

APÊNDICE B5: Programa VI - “CITDD3”.....129

APÊNDICE B6: Programa VII - “CITTABX2”.....131

**ÍNDICE DE TABELAS**

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 : Espectro dos actínídeos.....                                                          | 14 |
| Tabela 2 : Principais actínídeos emissores.....                                                  | 15 |
| Tabela 3 : Espectro dos produtos de fissão.....                                                  | 15 |
| Tabela 4 : Principais nuclídeos emissores.....                                                   | 15 |
| Tabela 5 : Equação de ajuste da curva de decaimento.....                                         | 39 |
| Tabela 6 : Resultado experimental posição M14.....                                               | 42 |
| Tabela 7 : Resultado experimental posição M21.....                                               | 44 |
| Tabela 8 : Resultado experimental posição M27.....                                               | 46 |
| Tabela 9 : Resultado experimental posição J17.....                                               | 48 |
| Tabela 10 : Resultado experimental posição J20.....                                              | 50 |
| Tabela 11 : Resultado experimental posição J22.....                                              | 52 |
| Tabela 12 : Resultado experimental posição C22.....                                              | 54 |
| Tabela 13 : Resultado experimental posição C24.....                                              | 56 |
| Tabela 14 : Resultado experimental posição ab27.....                                             | 58 |
| Tabela 15 : Resultados da posição M27 nos tempos 5min., 40min. e 1h e 15min.....                 | 60 |
| Tabela 16 : Resultado experimental, teste de reprodutibilidade posição M21.....                  | 62 |
| Tabela 17 : Resultados da densidade de potência relativa normalizada<br>via código CITATION..... | 75 |
| Tabela 18 : Resultados calculados e experimentais, posição M14.....                              | 80 |
| Tabela 19 : Resultados calculados e experimentais, posição M21.....                              | 82 |
| Tabela 20 : Resultados calculados e experimentais, posição M27.....                              | 84 |
| Tabela 21 : Resultados calculados e experimentais, posição J17.....                              | 86 |
| Tabela 22 : Resultados calculados e experimentais, posição J20.....                              | 88 |
| Tabela 23 : Resultados calculados e experimentais, posição J22.....                              | 90 |
| Tabela 24 : Resultados calculados e experimentais, posição C22.....                              | 92 |
| Tabela 25 : Resultados calculados e experimentais, posição C24.....                              | 94 |
| Tabela 26 : Resultados calculados e experimentais, posição ab27.....                             | 96 |
| Tabela 27 : Distribuição radial da densidade de potência relativa.....                           | 98 |

**ÍNDICE DE FIGURAS**

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 : Curvas características do “yield” de fissão em função do número de massa.....                                 | 11 |
| Figura 2 : Espectro dos produtos de ativação do aço inox da vareta combustível.....                                      | 17 |
| Figura 3 : Foto do motor e servomecanismo.....                                                                           | 22 |
| Figura 4 : Foto da unidade de movimentação e indicação de posicionamento.....                                            | 22 |
| Figura 5 : Foto de um colimador.....                                                                                     | 23 |
| Figura 6 : Foto dos cilindros de blindagem e detector.....                                                               | 24 |
| Figura 7 : Foto do arranjo colimador / blindagem.....                                                                    | 24 |
| Figura 8 : Desenho esquemático e dimensional do colimador / blindagem.....                                               | 25 |
| Figura 9 : Arranjo experimental da instrumentação nuclear.....                                                           | 26 |
| Figura 10 : Panorama geral do aparato experimental montado no<br>Laboratório de Medidas Nucleares.....                   | 27 |
| Figura 11 : Desenho esquemático da vareta combustível.....                                                               | 29 |
| Figura 12 : Posicionamento da vareta combustível no núcleo do reator.....                                                | 29 |
| Figura 13 : Quadro de distribuição das varetas combustíveis (configuração 34).....                                       | 30 |
| Figura 14 : Resultados experimentais das posições M14, M21, M27 (na cota 180mm) e<br>na posição M14 (na cota 380mm)..... | 37 |
| Figura 15 : Resultado das curvas normalizadas de decaimento.....                                                         | 38 |
| Figura 16 : Curva de decaimento radioativo x tempo.....                                                                  | 40 |
| Figura 17 : Resultado experimental - posição M14 ( operação 741).....                                                    | 43 |
| Figura 18 : Resultado experimental - posição M21 (operação 754).....                                                     | 45 |
| Figura 19 : Resultado experimental - posição M27 (operação 742).....                                                     | 47 |
| Figura 20 : Resultado experimental - posição J17 (operação 756).....                                                     | 49 |
| Figura 21 : Resultado experimental - posição J20 (operação 747).....                                                     | 51 |
| Figura 22 : Resultado experimental - posição J22 (operação 749).....                                                     | 53 |
| Figura 23 : Resultado experimental - posição C22 (operação 751).....                                                     | 55 |
| Figura 24 : Resultado experimental - posição C24 (operação 761).....                                                     | 57 |
| Figura 25 : Resultado experimental - posição ab27 (operação 765).....                                                    | 59 |

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 26 : Resultados comparativos, posição M27 nos tempos<br>5min., 40min. e 1h e 15min.57..... | 61 |
| Figura 27 : Gráfico comparativo do teste de reprodutibilidade.....                                | 63 |
| Figura 28 : Gráfico comparativo calculado x experimental, posição M14.....                        | 81 |
| Figura 29 : Gráfico comparativo calculado x experimental, posição M21.....                        | 83 |
| Figura 30 : Gráfico comparativo calculado x experimental, posição M27.....                        | 85 |
| Figura 31 : Gráfico comparativo calculado x experimental, posição J17.....                        | 87 |
| Figura 32 : Gráfico comparativo calculado x experimental, posição J20.....                        | 89 |
| Figura 33 : Gráfico comparativo calculado x experimental, posição J22.....                        | 91 |
| Figura 34 : Gráfico comparativo calculado x experimental, posição C22.....                        | 93 |
| Figura 35 : Gráfico comparativo calculado x experimental, posição C24.....                        | 95 |
| Figura 36 : Gráfico comparativo calculado x experimental, posição AB27.....                       | 97 |

## **CAPÍTULO 1: CONSIDERAÇÕES GERAIS**

### **1.1 INTRODUÇÃO**

### **1.2 HISTÓRICO**

### **1.3 OBJETIVO DO TRABALHO**

### **1.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 1**

## 1.1 INTRODUÇÃO

A determinação da distribuição da densidade de potência de um reator nuclear<sup>1,2</sup> constitui um dos fatores principais no que diz respeito a análise de segurança nos projetos de instalações nucleares. Como vínculo de projeto, esse parâmetro deve satisfazer limites de segurança para assegurar a não-fusão da vareta combustível como também garantir que o fluxo de calor esteja abaixo do valor crítico “D.N.B.”(Departure from Nucleate Boyling).

Dessa forma é imprescindível a determinação precisa da densidade de potência.

No projeto de reatores nucleares a densidade de potência é calculada segundo códigos computacionais de parâmetros nucleares, como exemplo o “CITATION”<sup>3</sup>. O cálculo é efetuado frequentemente utilizando a teoria de difusão com parâmetros de multigrupo obtidos por meio de um código celular como o “HAMMER-TECHNION”<sup>4</sup>. A análise é geralmente feita em 2 ou 4 grupos de energia em geometria tridimensional.

Para a verificação da precisão desse procedimento é necessário que sejam elaborados experimentos em Unidade Crítica<sup>1</sup>. A determinação experimental da densidade de potência para servir como padrão de comparação desses métodos computacionais<sup>4</sup> e estabelecer margens de desvio, é um dos requisitos fundamentais para a qualificação global de metodologia de cálculo utilizada em projetos e análises de reatores nucleares.

Outros parâmetros de interesse como reatividade das barras de controle, coeficientes de reatividade, mapeamento de fluxo neutrônico servirão como suporte para a interpretação dos desvios e tendências encontradas na comparação da densidade de potência calculada e medida.

Entre as metodologias de medida, destaca-se a técnica de varredura (“scanning”) das varetas combustíveis<sup>5,6,7</sup>, que vem sendo largamente utilizada devido a uma série de vantagens, entre elas destaca-se:

- Técnica de medida não destrutiva;
- Não inserção de dispositivo adicional de medida no núcleo do reator;
- Boa precisão dos resultados.

A metodologia de varredura baseia-se na proporcionalidade da atividade gama emitida pelo decaimento radioativo dos produtos de fissão da vareta combustível e a densidade de potência<sup>8,9,10,11</sup>. Os produtos de fissão são em geral radioativos e decaem pela emissão  $\beta$  e/ou  $\gamma$ . O espectro final de emissão é uma função complexa do histórico de irradiação e o período de decaimento. Entretanto o comportamento agregado pode ser obtido experimentalmente após a irradiação e utilizado para inferir a densidade de potência no qual a vareta combustível ou um ponto da mesma foi submetido. Se a atividade gama é determinada experimentalmente logo após a irradiação pode-se afirmar que a radiação medida é proporcional à densidade de potência.

A técnica de varredura utilizada no trabalho trata basicamente de medir os gamas emitidos ao longo de toda região ativa utilizando um dispositivo especial de movimentação e posicionamento da vareta combustível dotado de colimadores e blindagens. A medida é feita com detector NaI(Tl) e toda instrumentação nuclear associada.

Para a medida de varredura gama da vareta combustível, são computados somente os gamas com energia superior a  $0,6\text{MeV}$ <sup>12</sup> com o intuito de excluir principalmente a radiação gama do  $^{239}\text{Np}$ <sup>13</sup>, por não ser um produto de fissão e além disso por ser produzido principalmente por ativações eptérmicas no U-238 e não térmicas que é de interesse do trabalho.



## 1.2 HISTÓRICO

A técnica de varredura gama de vareta combustível tem sido realizada para obter parâmetros experimentais na área de física de reatores desde os primórdios do desenvolvimento dos primeiros reatores nucleares como “YANKEE”<sup>14</sup> E “TRX”<sup>15</sup>.

Inicialmente na década de 50, essa metodologia foi utilizada para a determinação do “Buckling” (medida da curvatura do perfil de fluxo do núcleo do reator) das Unidades Críticas<sup>16</sup> através da varredura axial da vareta combustível considerando gamas com energia superior a 500 KeV.

Posteriormente na década de 60 essa metodologia foi aplicada na determinação do “Burnup”<sup>17,18</sup> (medida de queima de combustível) e da medida da densidade de potência relativa<sup>8,18,19,20</sup>.

Um dos primeiros trabalhos com aplicação direta no levantamento da distribuição da densidade de potência relativa trata-se do Projeto “SAXTON PLUTONIUM PROGRAM”<sup>18</sup>. Esse trabalho foi realizado em uma Unidade Crítica com combustível  $\text{PUO}_2$  e  $\text{UO}_2$  natural, onde foram considerados os gamas com energia superior a 500 KeV.

Na década de 70 essa técnica de medida foi de grande valia para a determinação experimental da densidade de potência relativa no reator LWBR (Light Water Breeder Reactor) com combustível  $\text{ThO}_2$ - $^{233}\text{UO}_2$  como parte do programa de desenvolvimento e levantamento de dados experimentais básicos para confirmação de métodos de análise nuclear<sup>9</sup>.

Já na década de 80, esta técnica foi utilizada na distribuição de densidade de potência de elementos combustíveis tipo PWR (Power Water Reactor) na Unidade Crítica TCA<sup>7</sup> do Japão. Considerando-se reatores rápidos menciona-se a determinação de distribuição da densidade de potência na Instalação FCA<sup>1</sup> (Fast Critical Assembly) também no Japão.



Mais recentemente esta técnica foi aplicada para a determinação do “Buckling” para polígonos regulares em sistemas térmicos<sup>12</sup> e também foram obtidos valores experimentais da densidade de potência relativa para várias configurações de núcleos.

Na área de reatores BWR (Boiling Water Reactor) encontram-se resultados experimentais<sup>21</sup> de distribuição de densidade de potência relativa utilizando-se combustíveis MOX como parte do Programa VENUS<sup>22</sup> (Bélgica). Ainda dentro do mesmo programa foram realizados experimentos<sup>23</sup> com combustível PWR com óxido misto. Esses valores experimentais estão sendo de grande utilidade para validação dos códigos CASMO-4/SIMULATE-3<sup>24</sup>.

Com o histórico até aqui descrito fica evidente a grande utilização da técnica de varredura gama da vareta combustível em reatores nucleares. Ao longo desses anos de utilização a maior evolução observada foi no desenvolvimento tecnológico da instrumentação nuclear associada ao experimento de medida da distribuição de densidade de potência relativa.

### 1.3 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo do trabalho consiste no estudo da metodologia, no desenvolvimento e testes do aparato experimental e na implantação da metodologia de medida no Laboratório de Medidas Nucleares do Reator IPEN/MB-01<sup>25</sup>. Além disso, a metodologia de cálculo comumente aplicada para a determinação de densidade de potência na Divisão de Física de Reatores (RAF) será objeto de comparação para obter possíveis desvios e margens de incerteza, proporcionando uma validação do método de cálculo computacional.

## 1.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 1

- /1/ **AKIO OHNO, TOSHITAKA OSUGI**; "Measurement of Relative Power Distribution at Fast Critical Assembly by Using Gamma Counting Method", Journal of Nuclear Science and Technology, 22(1), 76, Jan/85.
- /2/ **SATOH K., OHNO A., OSUGI T.**; "Measurement of Relative Power Distribution in the Simulated Axially Heterogeneous Core by Gamma Scanning Method" ; JAERI-M-86-191, Jan/87.
- /3/ **FOWLER T. B.; VONDY D. R.**; "Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION" ; ORNL-TM-2496; Julho/1972.
- /4/ **BARHEN J.; RHOTENSTEIN W.; TAVIV E.**; "The HAMMER Code System Technion"; ISRAEL INSTITUTE OF TECHNOLOGY, NP-565, 1978.
- /5/ **GOUDEY J. L.; CHROMIK J. J.**; "Special TIP and Gamma Scan, Comparissns of Simulated Process Computer Thermal Neutron TIP and Gamma TIP Calculations with Gamma Scan Measurements" , EPRI NP-561-1979.
- /6/ **OWEN T. D.**; "Measurement of Power and Burn-up in Irradiated Nuclear Reactor Fuel by a Non-Destructive Method" ,Brit. J. Apl., 1963, Vol.14, 456.
- /7/ **MURAKAMI K., AOKI I.**; "Measurement of Reactivity Effects of Distributed Absorber Rods and Power Distribution in a PWR-Type Fuel Assembly" , JAERI-M-84-194, Oct./94.
- /8/ **KOBAYASHI I., TSURUTA H., HASHIMOTO M., ABE S., KODAIRA T., OGURA S.**; "Critical Experiment and Analysis on the Core for Japan First Nuclear Ship Reactor" , JAERI-1166, Sept./78.
- /9/ **SMITH G. G, SEMANS J. P., MITCHELL J. A.**; "U233 Oxide-Thorium Detailed Cell Critical Experiments" ; WAPD-TM-1101, Oct./74
- /10/ **LAMARSH J. R.**, "Introduction to Nuclear Reactor Theory" ; Addison Wesley Publishing Company 1.972.
- /11/ **DUDERSDADT J. J., HAMILTON J. L.**; "Nuclear Reactor Analysis" ; 1972.
- /12/ **MYIOSH Y., ITAGAKI M., AKAI M.**; "A Geometric Buckling Expression for Regular Polygons: I. Measurements in Low-Enriched UO2-H2O Lattices" ; JAERI-3190-11, Jan./93.
- /13/ **REUS U. and WESTMEIER W.**; "Atomic Data and Nuclear Data Tables" ; Part I, Vol.29, N.1, July 1.983.

- /14/ **GARBE R. W., WALCHLI H. E.;** "Quarterly Progress Report for the Period July 1 to September 30, 1958"; Westinghouse Electric Corp., Atomis Power Department, YAEC-97, November/1958.
- /15/ **BROWN J. R., HARRIS D. R., FRANTZ F.S., VOLPE J.J.;** "Kinetic and Buckling Measurements on Lattices of Slightly enriched Uranium or  $UO_2$  Rods in Light Water"; WAPD-176, 1958.
- /16/ **DAVISON P. W., BERG S. S.;** "YANKEE CRITICAL EXPERIMENTS - Measurements on Lattices of Stainless Steel Clad Slightly Enriched Uranium Dioxide Fuel Rods in Light Water"; YAEC-94, 1958.
- /17/ **NODVIK R. J.;** "Evaluation of Gamma Activity Distributions in Yankee Core I and II Spent Fuel"; Westinghouse Electric Corp., June/1965.
- /18/ **TAYLOR E. G.;** "Saxton Plutonium Program Critical Experiments for The Saxton Partial Plutonium Core"; Westinghouse Electric Corp., Dec/1965.
- /19/ **LACEY P. G.;** "Local Fission Power Distributions Around Control Rods and Control Rod Followers in Simulated PWR Cores"; Westinghouse Electric Corp., Sep/1964.
- /20/ **LACEY P. G.;** "Fine Structure Power Peaking in a Critical Experiment Mockup of A Chemical Shim Core"; Westinghouse Electric Corp., Mar/1963.
- /21/ **SAJI E.;** "Analyses of Boiling Water Reactor Mixed-Oxide Critical Experiments with CASMO-4 / SIMULATE-3"; Nuclear Science and Engineering, 121, 52-56 / 1995.
- /22/ **CHARLIER A., BASSELIER J. and LEENDERS L.;** "VENUS International Program (VIP), A Nuclear Data Package for LWR Pu Recycle"; American Nuclear Society French Section, 23-26, Vol. 1, April/1990.
- /23/ **MASAAKI M., MITSURU K.;** "CASMO-4 / SIMULATE-3 Benchmarking Against High Plutonium Content Pressurized Water Reactor Mixed-Oxide Fuel Critical Experiment"; Nuclear Science and Engineering, 121, 41-51 (1995).
- /24/ **EDENIUS M., SMITH K. and PLANCK VER D.;** "New Data Methods for CASO and SIMULATE"; Proc. Topl. Mtg. Advances in Reactor Physics and Safety, Saratoga Springs, New York, Sep. 17-19, Vol.2, U.S. Nuclear Regulatory Commission 1986.
- /25/ **Documento Interno IPEN/CNEN;** "Relatório de Análise de Segurança do Reator IPEN MB-01", Cap. V, 1986.

## **CAPÍTULO 2: TRANSMUTAÇÃO E ANÁLISE DE ESPECTROMETRIA**

### **2.1 INTRODUÇÃO**

### **2.2 ESPECTROMETRIA VIA CÓDIGO ORIGEN 2**

### **2.3 ESPECTROMETRIA EXPERIMENTAL**

### **2.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 2**

## 2.1 Introdução

A operação de um reator nuclear depende fundamentalmente do modo como os neutrons interagem com a matéria. O processo mais importante constitui o nascimento e o desaparecimento dos neutrons, pois a sustentação da reação em cadeia do núcleo do reator depende de um balanço detalhado entre a produção e o desaparecimento dos nêutrons nesse núcleo.

O processo de nascimento ou produção de nêutrons é ocasionado pela reação de fissão. Nesse processo um nêutron interage com um núcleo pesado (como o  $^{235}\text{U}$ ), gerando dois ou mais nêutrons, dois grandes fragmentos e considerável liberação de energia<sup>1</sup>. A reação em cadeia é perpetuada pelos nêutrons que surgem da fissão e geram cerca de 200 Mev de energia em cada fissão, devido a energia cinética dos fragmentos de fissão, nêutrons e outras partículas. A energia cinética é dissipada como calor quase que instantaneamente. Os produtos da reação interagem com o meio ao redor produzindo ionização e excitação molecular e atômica.

Os fragmentos que surgem na fissão são chamados de produtos de fissão.

O termo produto de fissão é usado para definir tanto os nuclídeos gerados diretamente pela fissão (fragmentos de fissão) como pelo decaimento radioativo (produtos de decaimento radioativo)<sup>2</sup>. Esses produtos de fissão são gerados em quantidades consideráveis.

A formação dos produtos de fissão no núcleo do reator é uma função crescente do nível de potência na qual o reator opera, do tempo de exposição do combustível ao fluxo de nêutrons, e conseqüentemente, da energia total produzida pelo combustível.

Os fragmentos de fissão podem ter número de massa entre 72 e 160 e podem ser divididos em dois grupos: o grupo dos fragmentos leves com número de massa entre 80 e 110 e o grupo dos fragmentos pesados com número de massa entre 125 e 155<sup>2</sup>.



Os produtos de fissão são gerados em uma quantidade específica para cada núcleo pesado fissionado. Essa quantidade é representada pelo rendimento de fissão (“yield”) que é a probabilidade de formação de um dado nuclídeo na fissão ou em uma dada cadeia de decaimento radioativo. O “yield” é função do núcleo a ser fissionado e da energia do nêutron incidente e é sempre expresso pela porcentagem de ocorrência desse nuclídeo pelo seu número de massa. Cada núcleo fissil possui sua curva característica de “yield” e cada fragmento de fissão possui seu “yield” de fissão característico<sup>1</sup>.

A figura 1 apresenta um exemplo característico da porcentagem de formação de produtos de fissão.

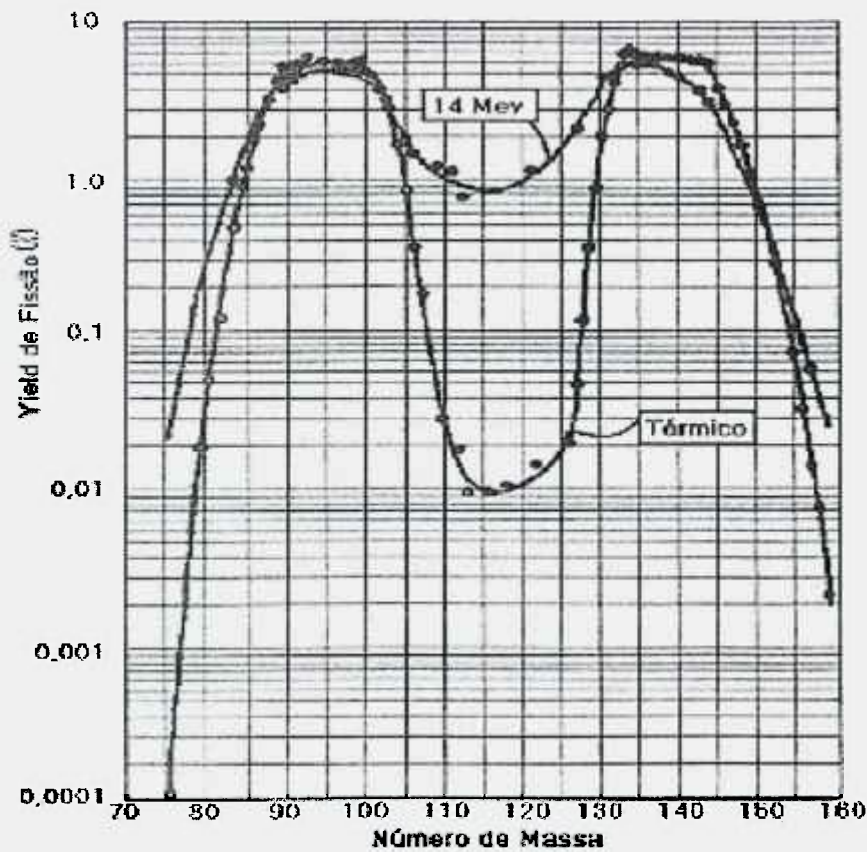


Figura 1:Curvas características do yield de fissão em função do número de massa<sup>3</sup>.

Os produtos de fissão são em geral radioativos e decaem pela emissão de radiação  $\beta$  e/ou  $\gamma$ , dependendo da característica nuclear do nuclídeo.

A sequência entre os vários modos de acoplamento entre actínídeos e produtos de fissão é denominada de cadeia de transmutação e é em geral uma matriz complexa interligando vários nuclídeos. Essas cadeias de transmutação foram objetos de vários estudos<sup>4,5</sup> e estão contidas em vários códigos nucleares como o ORIGEN 2<sup>6</sup>, CINDER 2<sup>7</sup>, etc...

O interesse fundamental nesse trabalho é a emissão gama devido ao decaimento radioativo dos produtos de fissão. Como existem vários produtos de fissão decaindo por emissão gama simultaneamente, o espectro final é a superposição de vários nuclídeos e modos de decaimento. Esses dados já estão incluídos nas bibliotecas de dados nucleares dos códigos de transmutação e em geral representam o estado da arte do conhecimento do evento na época de liberação da revisão do código.

Os produtos de fissão de interesse para a determinação da densidade de potência relativa possuem meia vida em geral pequena comparado ao tempo de irradiação e aquisição de dados, visto que entram em equilíbrio com o fluxo neutrônico e suas atividades são proporcionais à densidade de fissão.

Na próxima seção serão mostradas simulações com o código ORIGEN 2 com o intuito de ilustrar o evento a ser determinado experimentalmente nesse trabalho.



## 2.2 ESPECTROMETRIA VIA CÓDIGO “ORIGEN 2”

A análise dos nuclídeos predominantes no trabalho da medida da densidade de potência relativa via varredura gama da vareta combustível foi feita pelo código computacional “ORIGEN 2”<sup>4</sup>, uma vez que o levantamento desses dados experimentalmente trata-se de uma operação não factível dentro dos recursos experimentais disponíveis.

O código ORIGEN 2 possui uma biblioteca altamente detalhada de dados de emissão gama para os actínídeos e produtos de fissão que servirão para ter um conhecimento mais apurado dos fenômenos de transmutação que ocorrem durante a irradiação e decaimento.

A simulação foi efetuada assumindo o reator operando a 1W de potência durante 2 horas ininterruptas; sendo todos resultados normalizados pela massa de urânio por vareta. Após esse período a simulação foi efetuada assumindo somente o decaimento radioativo nos tempos de 10, 15, 20, 25, 30, 35, e 40 minutos que engloba o tempo de aquisição dos dados experimentais.

O código ORIGEN 2 fornece o espectro de emissão gama por nuclídeo em vários grupos de energia; além da emissão total. A tabela 1 fornece o espectro dos fótons devido ao decaimento radioativo dos nuclídeos actínídeos, enquanto que a tabela 2 fornece a mesma grandeza para os produtos de fissão. A energia média das tabelas corresponde à média das energias do grupo<sup>4</sup>.

Pode ser observado de imediato nas tabelas 1 e 3 que os produtos de fissão dominam o espectro dos fótons ao longo do tempo. Nas tabelas 2 e 4 estão apresentadas as contribuições relativa por nuclídeo. Considerando o caso dos actínídeos, pode ser notado que o  $^{239}\text{U}$  e o  $^{239}\text{Np}$  dominam a emissão dos fótons. Por outro lado considerando os produtos de fissão existe uma gama de nuclídeos que contribuem para a fonte total, sendo os principais mostrados na tabela 4.

Nos casos dos produtos de fissão observou-se que os principais emissores gama possuem meia vida relativamente pequena comparada ao evento de tomada dos dados experimentais. Da análise da tabela 2 dos actínídeos surge a razão de discriminar as contagens acima da energia de 0,6 MeV, visto que a parte principal da contribuição do decaimento do <sup>239</sup>U e <sup>239</sup>Np são omitidas; sendo que esses nuclídeos são formados principalmente por capturas eptérmicas radioativas no <sup>238</sup>U e não térmicas que são importantes para esse trabalho.

| Energia Média<br>(MeV) | TEMPO DE RESFRIAMENTO APÓS OPERAÇÃO |           |           |           |           |           |           |
|------------------------|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                        | 10minutos                           | 15minutos | 20minutos | 25minutos | 30minutos | 35minutos | 40minutos |
| 1.000E-02              | 7.218E+06                           | 6.416E+06 | 5.725E+06 | 5.128E+06 | 4.613E+06 | 4.169E+06 | 3.785E+06 |
| 2.500E-02              | 6.549E+05                           | 5.676E+05 | 4.924E+05 | 4.274E+05 | 3.715E+05 | 3.232E+05 | 2.816E+05 |
| 3.750E-02              | 2.098E+06                           | 9.484E+05 | 8.193E+05 | 7.078E+05 | 6.117E+05 | 5.287E+05 | 4.571E+05 |
| 5.750E-02              | 5.845E+05                           | 5.064E+05 | 4.391E+05 | 3.809E+05 | 3.308E+05 | 2.875E+05 | 2.502E+05 |
| 8.500E-02              | 6.272E+06                           | 5.434E+06 | 4.712E+06 | 4.088E+06 | 3.549E+06 | 3.085E+06 | 2.684E+06 |
| 1.250E-01              | 5.393E+05                           | 5.146E+05 | 4.933E+05 | 4.748E+05 | 4.589E+05 | 4.451E+05 | 4.332E+05 |
| 2.250E-01              | 8.845E+05                           | 8.551E+05 | 8.298E+05 | 8.079E+05 | 7.889E+05 | 7.726E+05 | 7.584E+05 |
| 3.750E-01              | 9.542E+04                           | 8.449E+04 | 7.505E+04 | 6.691E+04 | 5.988E+04 | 5.382E+04 | 4.858E+04 |
| 5.750E-01              | 7.804E+04                           | 6.739E+04 | 5.820E+04 | 5.026E+04 | 4.342E+04 | 3.751E+04 | 3.241E+04 |
| 8.500E-01              | 1.153E+05                           | 9.956E+04 | 8.594E+04 | 7.419E+04 | 6.404E+04 | 5.529E+04 | 4.773E+04 |
| 1.250E+00              | 1.413E+03                           | 1.229E+03 | 1.071E+03 | 9.341E+02 | 8.165E+02 | 7.154E+02 | 6.283E+02 |
| 1.750E+00              | 9.092E+00                           | 9.387E+00 | 9.683E+00 | 9.979E+00 | 1.027E+01 | 1.057E+01 | 1.087E+01 |
| 2.250E+00              | 9.092E-01                           | 9.092E-01 | 9.092E-01 | 9.092E-01 | 9.092E-01 | 9.092E-01 | 9.092E-01 |
| TOTAL                  | 1.754E+07                           | 1.550E+07 | 1.373E+07 | 1.221E+07 | 1.089E+07 | 9.758E+06 | 8.778E+06 |

Tabela 1:Espectro dos actínídeos (fótons/seg.).

| NUCLÍDEO          | $\bar{E}$ (MeV) | 10min.    | 15min.    | 20min.    | 25min.    | 30min.    | 35min.    | 40min.    |
|-------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <sup>239</sup> U  | 0.010           | 5.935E+06 | 5.122E+06 | 4.421E+06 | 3.815E+06 | 3.293E+06 | 2.842E+06 | 2.453E+06 |
| <sup>239</sup> Np | 0.010           | 3.258E+05 | 3.371E+05 | 3.468E+05 | 3.550E+05 | 3.621E+05 | 3.682E+05 | 3.734E+05 |
| <sup>239</sup> U  | 0.025           | 6.410E+05 | 5.532E+05 | 4.774E+05 | 4.121E+05 | 3.556E+05 | 3.069E+05 | 2.649E+05 |
| <sup>239</sup> Np | 0.025           | 4.257E+03 | 4.405E+03 | 4.531E+03 | 4.639E+03 | 4.732E+03 | 4.811E+03 | 4.879E+03 |
| <sup>239</sup> U  | 0.038           | 1.093E+06 | 9.436E+05 | 8.144E+05 | 7.029E+05 | 6.066E+05 | 5.236E+05 | 4.519E+05 |
| <sup>239</sup> U  | 0.058           | 5.724E+05 | 4.940E+05 | 4.264E+05 | 3.680E+05 | 3.176E+05 | 2.741E+05 | 2.366E+05 |
| <sup>239</sup> Np | 0.058           | 7.811E+03 | 8.081E+03 | 8.313E+03 | 8.512E+03 | 8.682E+03 | 8.827E+03 | 8.951E+03 |
| <sup>239</sup> U  | 0.085           | 6.133E+06 | 5.293E+06 | 4.568E+06 | 3.943E+06 | 3.403E+06 | 2.937E+06 | 2.535E+06 |
| <sup>239</sup> Np | 0.085           | 5.806E+04 | 6.006E+04 | 6.179E+04 | 6.326E+04 | 6.453E+04 | 6.561E+04 | 6.653E+04 |
| <sup>239</sup> U  | 0.125           | 2.229E+05 | 1.924E+05 | 1.660E+05 | 1.433E+05 | 1.237E+05 | 1.067E+05 | 9.212E+04 |
| <sup>239</sup> Np | 0.125           | 1.675E+05 | 1.733E+05 | 1.782E+05 | 1.825E+05 | 1.861E+05 | 1.893E+05 | 1.919E+05 |
| <sup>239</sup> U  | 0.225           | 2.440E+05 | 2.106E+05 | 1.817E+05 | 1.569E+05 | 1.354E+05 | 1.168E+05 | 1.008E+05 |
| <sup>239</sup> Np | 0.225           | 1.161E+05 | 1.201E+05 | 1.236E+05 | 1.265E+05 | 1.291E+05 | 1.312E+05 | 1.331E+05 |
| <sup>239</sup> U  | 0.375           | 8.269E+04 | 7.137E+04 | 6.160E+04 | 5.316E+04 | 4.588E+04 | 3.960E+04 | 3.418E+04 |
| <sup>239</sup> Np | 0.375           | 1.119E+04 | 1.158E+04 | 1.191E+04 | 1.219E+04 | 1.244E+04 | 1.264E+04 | 1.282E+04 |
| <sup>239</sup> U  | 0.575           | 7.781E+04 | 6.716E+04 | 5.796E+04 | 5.002E+04 | 4.317E+04 | 3.726E+04 | 3.216E+04 |
| <sup>239</sup> U  | 0.850           | 1.153E+05 | 9.948E+04 | 8.586E+04 | 7.410E+04 | 6.396E+04 | 5.520E+04 | 4.764E+04 |
| <sup>239</sup> U  | 1.250           | 1.358E+03 | 1.172E+03 | 1.012E+03 | 8.733E+02 | 7.537E+02 | 6.505E+02 | 5.614E+02 |

Tabela 2: Principais actinídeos emissores (fótons/seg.).

| Energia Média | TEMPO DE RESFRIAMENTO |           |           |           |           |           |           |
|---------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| (MeV)         | 10minutos             | 15minutos | 20minutos | 25minutos | 30minutos | 35minutos | 40minutos |
| 8.500E-01     | 1.394E+07             | 1.229E+07 | 1.113E+07 | 1.023E+07 | 9.493E+06 | 8.867E+06 | 8.322E+06 |
| 1.250E+00     | 1.054E+07             | 9.287E+06 | 8.301E+06 | 7.490E+06 | 6.808E+06 | 6.225E+06 | 5.721E+06 |
| 1.750E+00     | 2.657E+06             | 2.319E+06 | 2.070E+06 | 1.872E+06 | 1.711E+06 | 1.576E+06 | 1.461E+06 |
| 2.250E+00     | 2.528E+06             | 2.269E+06 | 2.058E+06 | 1.879E+06 | 1.726E+06 | 1.593E+06 | 1.477E+06 |
| TOTAL         | 2.967E+07             | 2.617E+07 | 2.356E+07 | 2.147E+07 | 1.974E+07 | 1.826E+07 | 1.698E+07 |

Tabela 3: Espectro dos produtos de fissão (fótons/seg.).

| NUCLÍDEO            | T 1/2    | $\bar{E}$ (MeV) | 10min.    | 15min.    | 20min.    | 25min.    | 30min.    | 35min.    | 40min.    |
|---------------------|----------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <sup>94</sup> Y     | 18,6 min | 0.850           | 1.727E+06 | 1.441E+06 | 1.202E+06 | 1.003E+06 | 8.363E+05 | 6.975E+05 | 5.818E+05 |
| <sup>130</sup> Sb-m | 40 min   | 0.850           | 6.441E+05 | 4.099E+05 | 2.515E+05 | 1.511E+05 | 8.948E+04 | 5.254E+04 | 3.067E+04 |
| <sup>131</sup> Sb   | 23 min   | 0.850           | 7.684E+05 | 6.610E+05 | 5.685E+05 | 4.890E+05 | 4.206E+05 | 3.617E+05 | 3.111E+05 |
| <sup>133</sup> Te-m | 55,4 min | 0.850           | 1.518E+06 | 1.426E+06 | 1.340E+06 | 1.258E+06 | 1.182E+06 | 1.110E+06 | 1.043E+06 |
| <sup>134</sup> Te   | 41,8 min | 0.850           | 1.063E+06 | 9.780E+05 | 9.002E+05 | 8.285E+05 | 7.626E+05 | 7.019E+05 | 6.461E+05 |
| <sup>134</sup> I    | 52,6 min | 0.850           | 3.762E+06 | 3.781E+06 | 3.777E+06 | 3.754E+06 | 3.715E+06 | 3.662E+06 | 3.598E+06 |
| <sup>142</sup> Ba   | 10,7 min | 0.850           | 4.085E+05 | 2.955E+05 | 2.137E+05 | 1.546E+05 | 1.118E+05 | 8.089E+04 | 5.851E+04 |
| <sup>89</sup> Rb    | 15,4 min | 1.250           | 1.507E+06 | 1.226E+06 | 9.846E+05 | 7.868E+05 | 6.274E+05 | 4.998E+05 | 3.980E+05 |
| <sup>92</sup> Sr    | 2,71 h   | 1.250           | 1.054E+06 | 1.031E+06 | 1.010E+06 | 9.884E+05 | 9.675E+05 | 9.471E+05 | 9.272E+05 |
| <sup>101</sup> Mo   | 14,6 min | 1.250           | 5.326E+05 | 4.202E+05 | 3.315E+05 | 2.615E+05 | 2.063E+05 | 1.628E+05 | 1.284E+05 |
| <sup>134</sup> I    | 52 min   | 1.250           | 6.383E+05 | 6.415E+05 | 6.409E+05 | 6.370E+05 | 6.303E+05 | 6.214E+05 | 6.106E+05 |
| <sup>138</sup> Cs   | 32,2 min | 1.250           | 3.006E+06 | 2.883E+06 | 2.732E+06 | 2.565E+06 | 2.391E+06 | 2.216E+06 | 2.043E+06 |
| <sup>142</sup> Ba   | 10,7 min | 1.250           | 6.449E+05 | 4.665E+05 | 3.374E+05 | 2.440E+05 | 1.765E+05 | 1.277E+05 | 9.236E+04 |
| <sup>142</sup> La   | 1,52 h   | 2.250           | 5.663E+05 | 5.607E+05 | 5.511E+05 | 5.388E+05 | 5.248E+05 | 5.097E+05 | 4.940E+05 |

Tabela 4: Principais nuclídeos (produtos de fissão) emissores (fótons/seg.).

## 2.3 ESPECTROMETRIA EXPERIMENTAL

Para uma análise particular quanto aos produtos de ativação, foi observado através de um trabalho de simulação com o ORIGEN 2, que a contribuição na emissão  $\gamma$  dos produtos de ativação no aço inox do encamizamento da vareta combustível foi desprezível sendo que o principal emissor gama trata-se do  $^{56}\text{Mn}$ , que contribui com 98% da emissão total dos produtos de ativação.

Em termos de contagens, o valor correspondente a emissão gama do  $^{56}\text{Mn}$  é menor que 1% do total das contagens emitidas por todos os nuclídeos da vareta combustível com energia superior a 0,6 MeV.

A título de uma verificação experimental, foi construída uma vareta “oca” especial e posicionada no núcleo na região central (posição M14) irradiada a 1W por duas horas e posteriormente foi feita contagens com detector GeHP para análise dos nuclídeos presentes.

O resultado está apresentado na Figura 2 , confirmando a predominância do  $^{56}\text{Mn}$ .



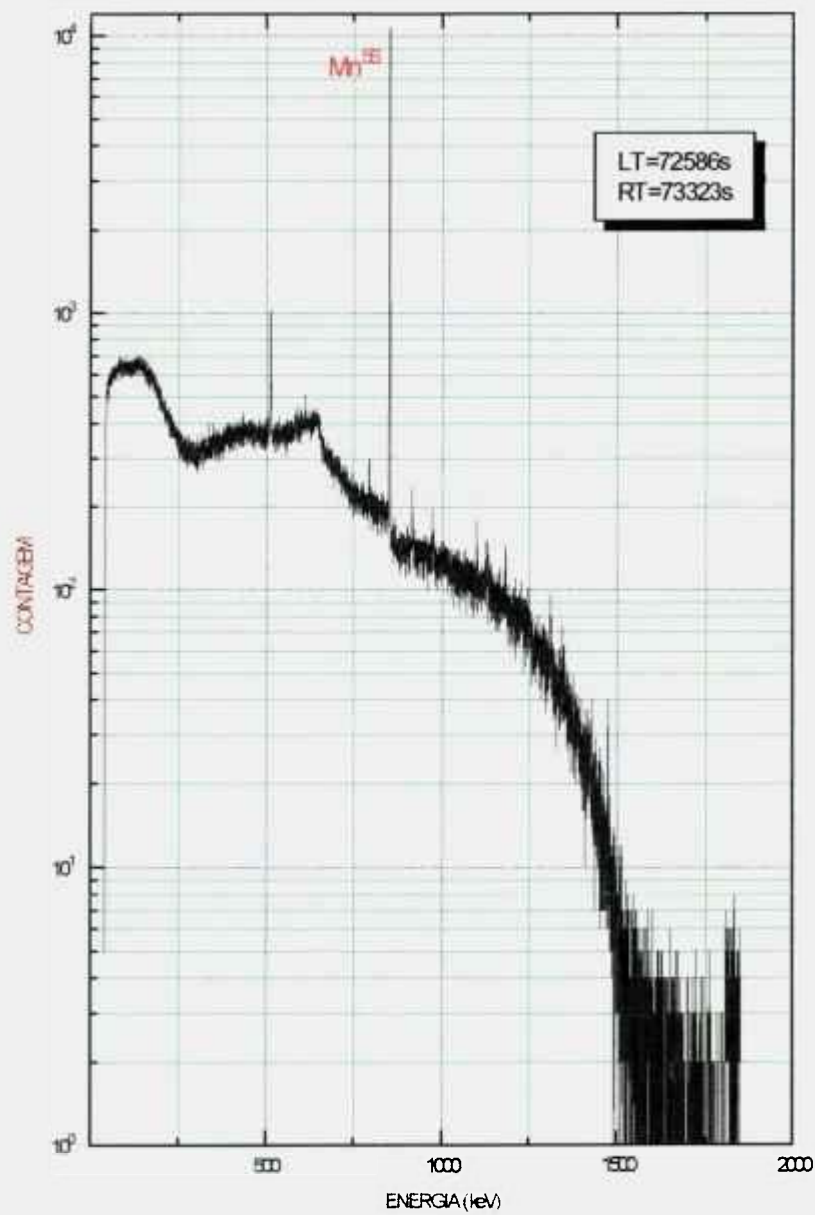


Figura 2:Espectro dos produtos de ativação do aço inox da vareta combustível

## 2.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 2

- /1/ **LAMARSH, J. R.**; "Introduction to Nuclear Reactor Theory" , New York, Addison-Wesley, 1966.
- /2/ **LEWIS, E. E.**; "Nuclear Power Reactor Safety" , John Waley & Sons, New York, 1977.
- /3/ **BENEDICT M.; PIGFORD T. H.; LEVI, H. W.**, "Nuclear Chemical Engineering" , Second Edition, McGraw-Hill, Book Company.
- /4/ **TASAKA K.**; "DCHAIN2: A computer Code for Calculation of Transmutation of Nuclides.", Japan Atomic Research Institute, JAERI-M-8727 (March, 1980).
- /5/ **MARR D.R.**; "A Users Manual for Computer Code RIBD-II, A Fission Product Inventory Code", Hanford Engineering Development Laboratory, HEDL-TME-75-26 (1975).
- /6/ **RSIC COMPUTER CODE COLLECTION**, "ORIGEN 2 , Isotope Generation and Depletion Code - Matrix Exponential Method", OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, CCC-371, Dec./1985.
- /7/ **WILSON W. B., ENGLAND T. R., LABAUVE R. J., BATT A M. E., WESSOL D. E., PERRY R. T.**; "Status of Cinder and ENDF/B-V Based Libraries for Transmutation Calculations", Proc. Conf. Waste Transmutation; Austin, TX., p.673 (1981).

## **CAPÍTULO 3: PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **3.1 INTRODUÇÃO**

### **3.2 BANCADA EXPERIMENTAL**

#### **3.2.1 SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO E INDICAÇÃO DE POSICIONAMENTO DA VARETA COMBUSTÍVEL**

#### **3.2.2 COLIMADORES E BLINDAGENS**

#### **3.2.3 INSTRUMENTAÇÃO NUCLEAR**

#### **3.2.4 VARETA COMBUSTÍVEL**

### **3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

#### **3.3.1 PROCEDIMENTO DE OPERAÇÃO**

#### **3.3.2 PROCEDIMENTO DE MEDIDA DO DECAIMENTO RADIOATIVO**

#### **3.3.3 PROCEDIMENTO DE VARREDURA DA VARETA COMBUSTÍVEL**

### **3.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 3**



### 3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo trata do aparato experimental desenvolvido e adaptado, assim como todo dispositivo e instrumentação nuclear associada ao experimento. Além disso está descrito o procedimento padrão adotado desde a operação no Reator IPEN/MB-01 até a remoção da vareta combustível e início das contagens no Laboratório de Medidas Nucleares, incluindo o procedimento estabelecido para medida de decaimento radioativo e de varredura das contagens gama da vareta combustível.

A parte do aparato experimental que foi desenvolvido é composta pelas blindagens, colimadores e dispositivo de acomodação da vareta combustível. Já a parte adaptada é composta pela unidade de acionamento de motor de passo (U.A.M.P.) e o indicador de posição relativa (I.P.R.), sistemas estes utilizados na instrumentação de controle do Reator IPEN/MB-01. Estes módulos utilizados são sobressalentes do conjunto da instrumentação do Reator IPEN/MB-01.

## 3.2 BANCADA EXPERIMENTAL

### 3.2.1 SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO E SISTEMA DE INDICAÇÃO DE POSICIONAMENTO DA VARETA COMBUSTÍVEL.

O sistema de movimentação da vareta combustível é composto da unidade de acionamento de motor de passo associado a um servomecanismo onde se dá a movimentação da vareta combustível. O motor de acionamento do sistema de movimentação é dotado de duas velocidades (normal 2mm/s e reduzida 1mm/s). Todo comando de movimentação e chave seletora de velocidade encontra-se no painel frontal da unidade.

Acoplado a esse dispositivo está o sistema de indicação de posicionamento da vareta combustível, dotado de um “display” digital com precisão de décimos de milímetro.

Ilustrações dos dois sistemas estão apresentadas nas figuras 3 e 4.

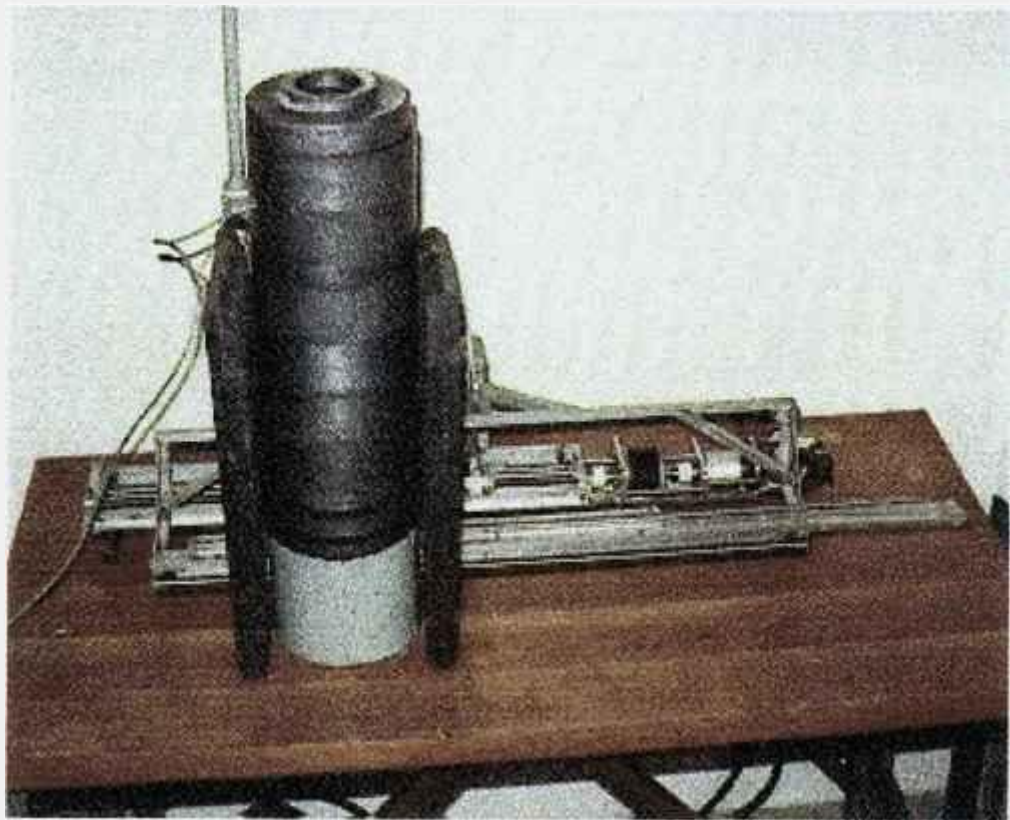


Figura 3:Foto do motor e servomecanismo.

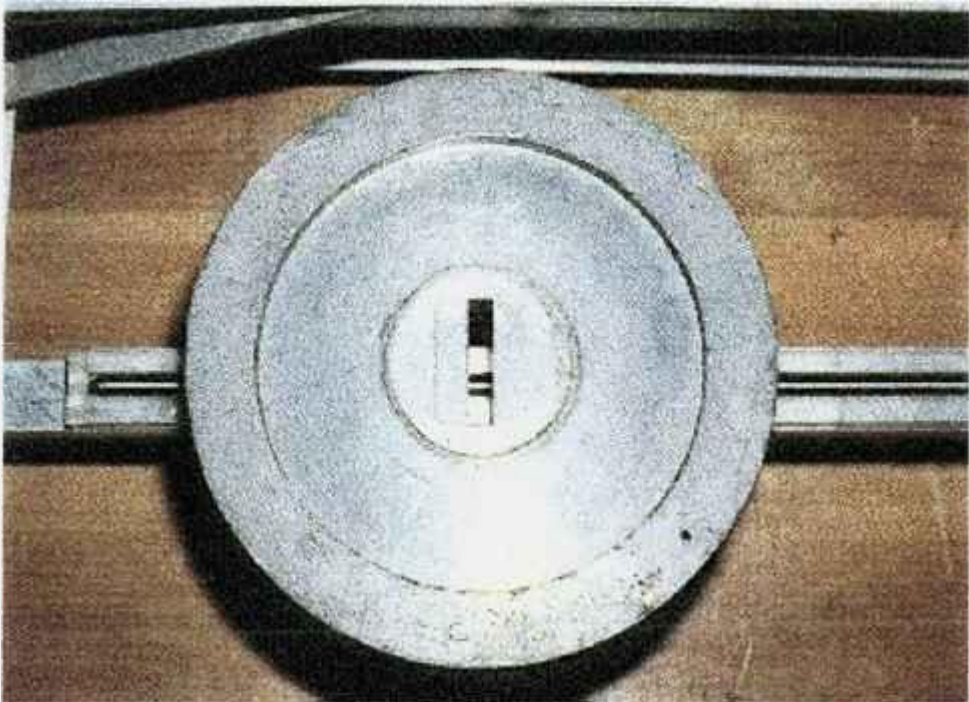


Figura 4:Foto da unidade de movimentação e indicação de posicionamento.

### 3.2.2 COLIMADORES E BLINDAGENS

O sistema de colimadores e blindagens de chumbo tem como objetivo garantir as contagens gama somente na região de interesse<sup>1,2,3</sup>, ou seja na abertura do colimador e passagem para o detector, blindando a radiação externa. A figura 4 indica a geometria do colimador, o qual é composto de quatro discos. É importante observar a vareta posicionada no dispositivo de acomodação e a abertura de 10 mm no primeiro disco do colimador, constituindo a região de interesse nas medidas de varredura da vareta combustível.

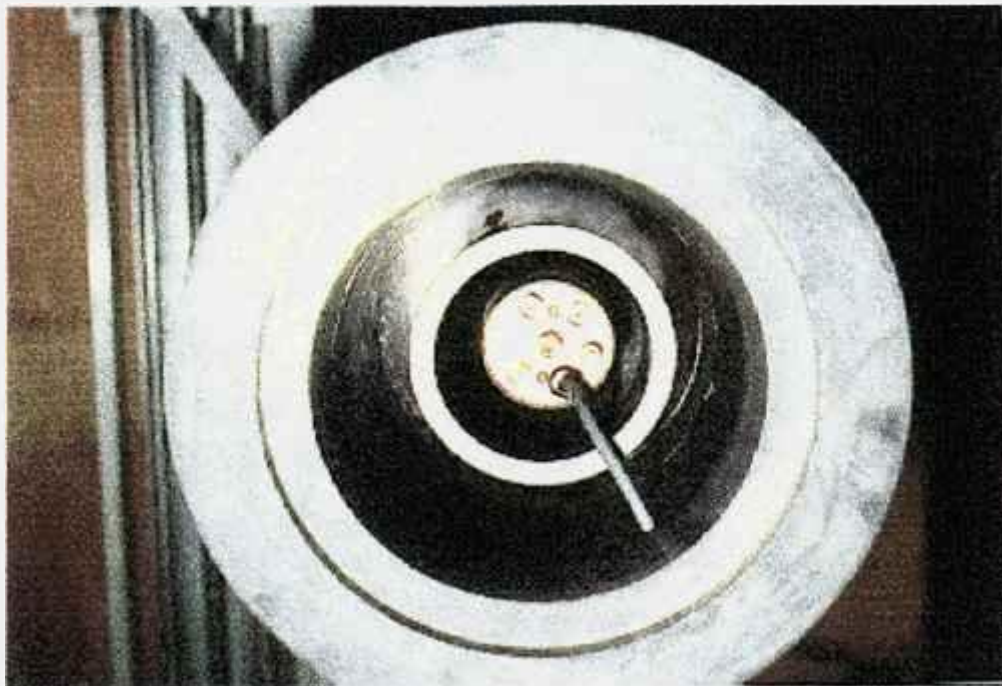
A distância da superfície da vareta até a base do primeiro disco é de aproximadamente 1 mm, afim de evitar contagens gama das regiões adjacentes.



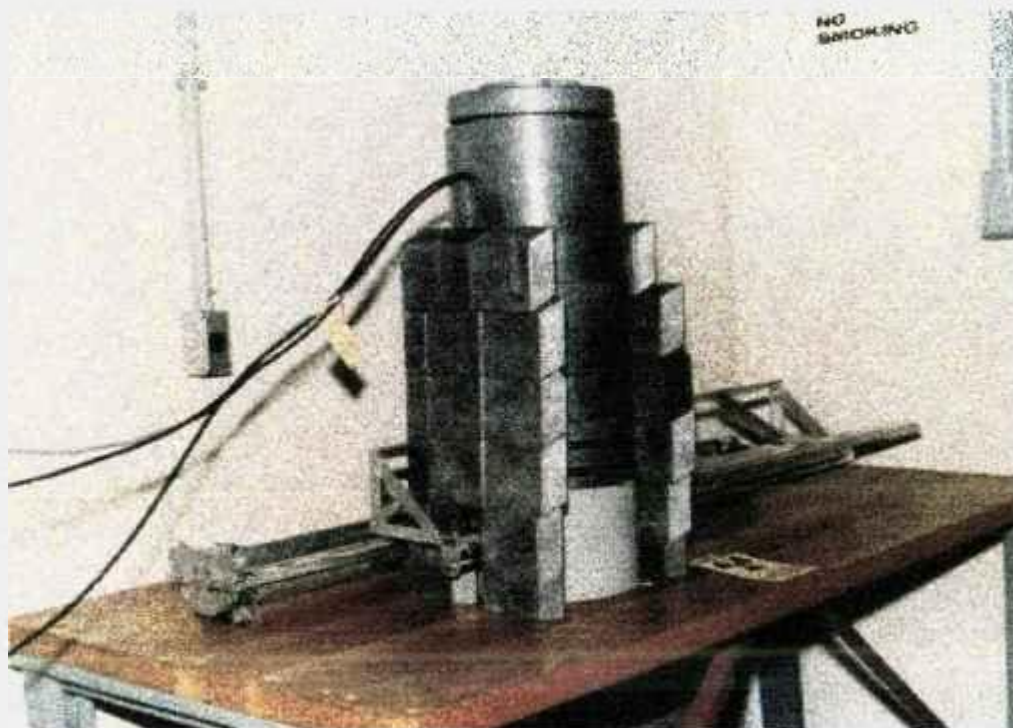
**Figura 5: Foto de um colimador.**

Após os discos do colimador, vem posicionado o detector NaI (TI) internamente a dois cilindros de chumbo blindados lateralmente com uma parede de tijolos de chumbo como indicam as figuras 6 e 7. A figura 8 mostra um desenho esquemático e dimensional do colimador e blindagem.





**Figura 6:Foto dos cilindros de blindagem e detector.**



**Figura 7:Foto do arranjo colimador / blindagem**

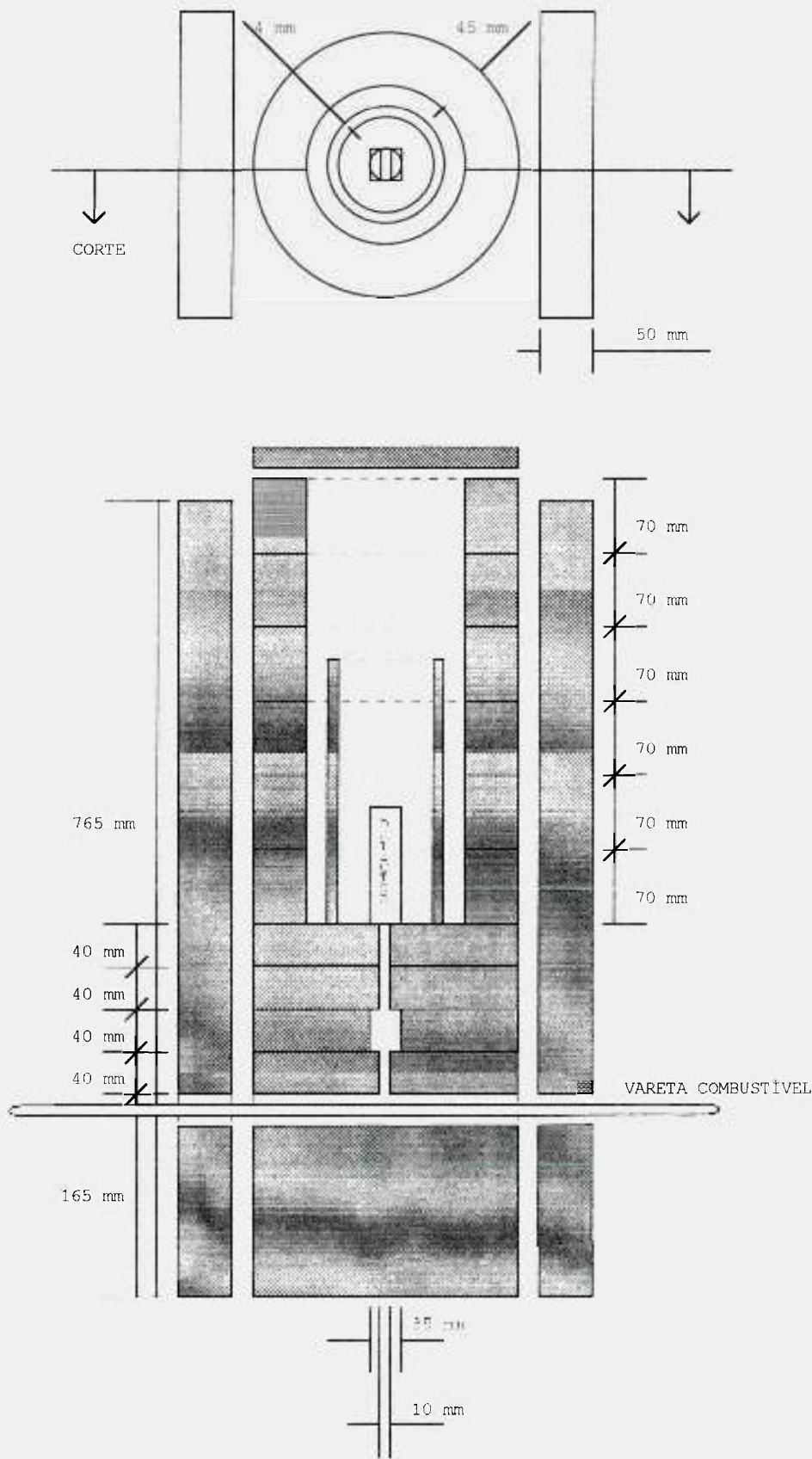
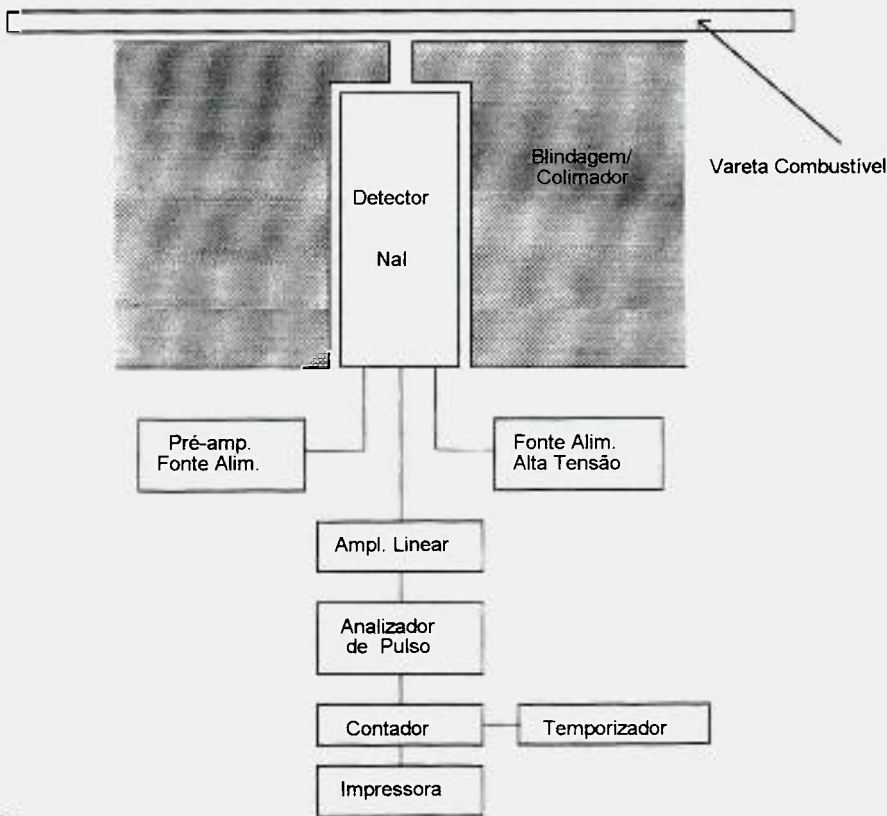


Figura 8:Desenho esquemático e dimensional do colimador / blindagem.

3.2.3 INSTRUMENTAÇÃO NUCLEAR

Para a medida das contagens gama foi utilizado um detector NaI (TI) de 2”x 2”, devido ao maior interesse quanto a eficiência das contagens. O arranjo da instrumentação nuclear<sup>4</sup> está indicado na figura 9.

A instrumentação nuclear é composta pela fonte de baixa tensão para alimentação do pré-amplificador do detector e a de alta tensão (800V pos.) para polarização do detector. Os pulsos de saída são ligados a um amplificador linear onde se dá a formatação do pulso nuclear, o qual posteriormente é discriminado no analisador monocanal, passando somente os pulsos com energia superior a 0,6 Mev. Estes pulsos são então contados dentro de um intervalo de tempo pré determinado, via contador/temporizador e finalmente registrados na impressora. Toda instrumentação nuclear utilizada é EG&G Ortec e o detector Harshaw Filtrol. O sistema de medida nuclear foi devidamente calibrado em energia utilizando fontes padrões de Cs<sub>137</sub> e Co<sub>60</sub> da “Amershan”<sup>5</sup>.



**Figura 9:Arranjo experimental da instrumentação nuclear.**



A figura 10 apresenta um panorama geral de todo arranjo experimental montado no Laboratório de Medidas Nucleares. O laboratório está localizado no edifício de apoio do Reator IPEN/MB-01 e é dotado de um controlador de temperatura com variação máxima de  $2^{\circ}\text{C}$ , devido a sensibilidade do detector NaI(Tl) para variações bruscas de temperatura.

É importante observar a localização do experimentador distante aproximadamente 4 metros da vareta combustível proporcionando um decréscimo significativo em termos de dose de radiação, que durante todo o experimento foi monitorada ficando bem abaixo dos limites recomendados pelas “Diretrizes Básicas de Radioproteção”, CNEN-NE-3.01, Julho/88.



**Figura 10:** Panorama geral do aparato experimental montado no Laboratório de Medidas Nucleares.

3.2.4 VARETA COMBUSTÍVEL

Para as medidas do experimento em caráter definitivo foi utilizada uma vareta combustível sobressalente sob registro UC-058 com as mesmas especificações técnicas<sup>6</sup> das varetas originais do núcleo. O objetivo em utilizar uma vareta sobressalente é não comprometer o andamento de outros experimentos na Unidade Crítica, uma vez que após a operação a vareta tem que ser removida do núcleo para a medida de varredura.

Especificações Técnicas da Vareta Combustível

*Vareta Combustível:*

Tipo: Tubo de aço contendo pastilhas sinterizadas de UO<sub>2</sub>.

Comprimento 1.194,0 mm

Comprimento ativo: 546,0 mm

Diâmetro externo do encamisamento: 9,80+/-0,05mm

Diâmetro interno do encamisamento: 8,60+/-0,04mm

Material do encamisamento: AISI 304L

Gás de preenchimento: He a 1 bar de pressão

*Combustível:*

Forma: pastilhas cilíndricas com concavidade e chanfro em ambas extremidades.

Diâmetro da pastilha: 8,49+/-0,001mm

Altura da pastilha: 10,5 +/-1,0mm

Densidade do UO<sub>2</sub>: 10,4 g/cm<sup>3</sup>

*Tampões da extremidade:*

Material: AISI 304L

Comprimento: 13,0mm

*Mola de Pressão:*

Material: Inconel 600

Comprimento: 110,5mm

Pastilhas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:

Quantidade: 16 pastilhas

Altura de cada pastilha: 9,0+/-0,02mm

Diâmetro da pastilha: 8,47+/-0,07mm

*Tubo espaçador:*

Material: AISI 304L

Comprimento: 396,0 +/-0,2mm

Enriquecimento: 4,3%

Massa da vareta: 680g ; Massa de UO<sub>2</sub>: 309,2g

*Composição isotópica da vareta combustivel:*

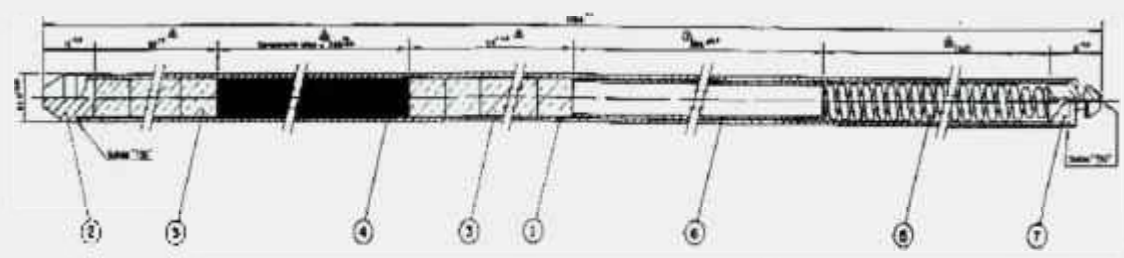
| <i>pastilha combustivel</i> | <i>concentração(átomos/barn-cm)</i> |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| U235                        | 1.00349E-03                         |
| U238                        | 2.17938E-02                         |
| O16                         | 4.55138E-02                         |

*Revestimento, tubo guia*

|      |             |
|------|-------------|
| Fe   | 5.67582E-02 |
| Ni   | 8.64435E-03 |
| Cr   | 1.72649E-02 |
| Mn55 | 1.59898E-03 |
| Si   | 3.34513E-04 |

*Pastilha de Alumina*

|     |             |
|-----|-------------|
| Al  | 4.30049E-02 |
| O16 | 6.45074E-02 |



1. Tubo de revestimento
3. Pastilha isolante de  $\text{Al}_2\text{O}_3$
5. Mola
7. Tampão superior
2. Tampão inferior
4. Pastilha combustível de  $\text{UO}_2$
6. Tubo espaçador

Figura 11: Desenho esquemático da vareta combustível

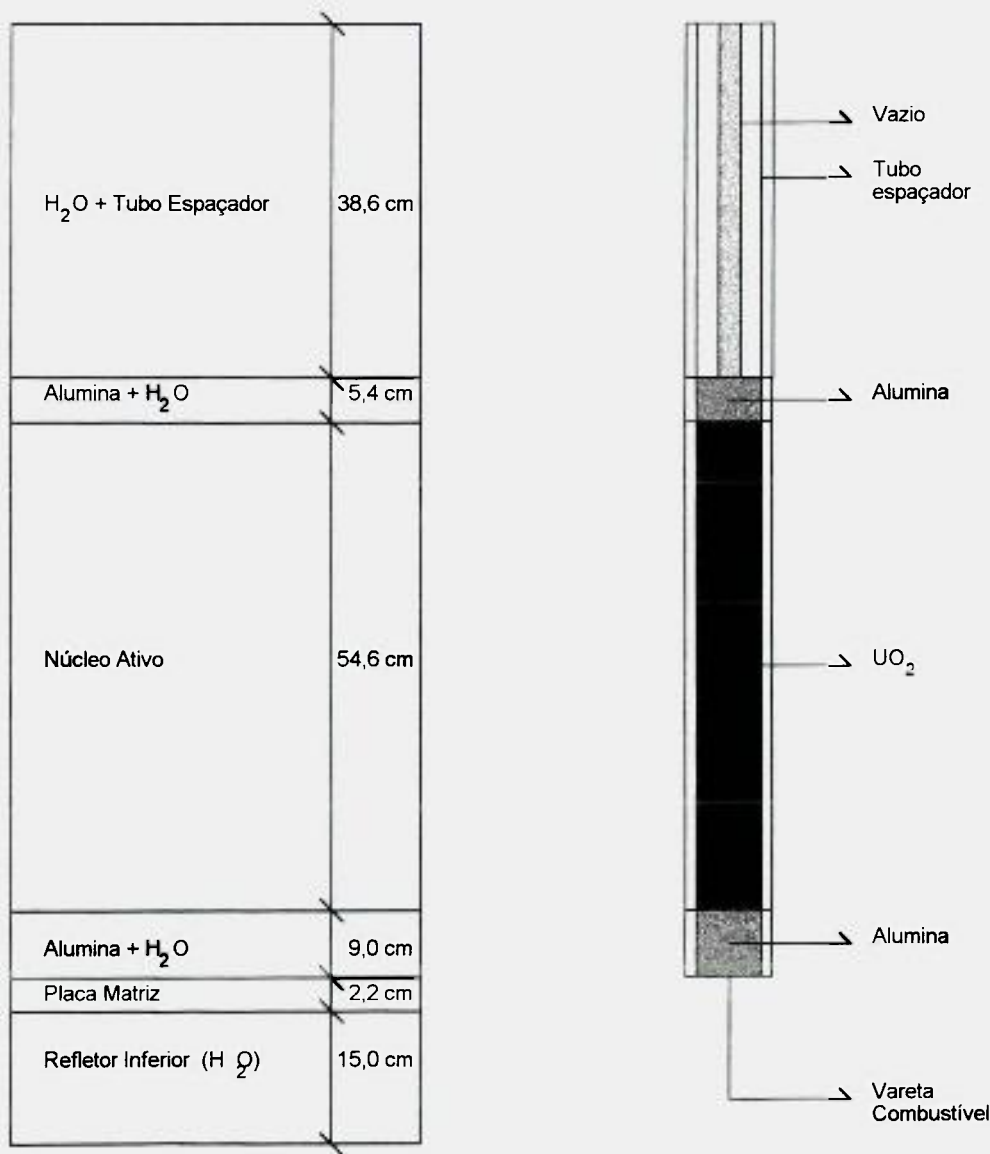
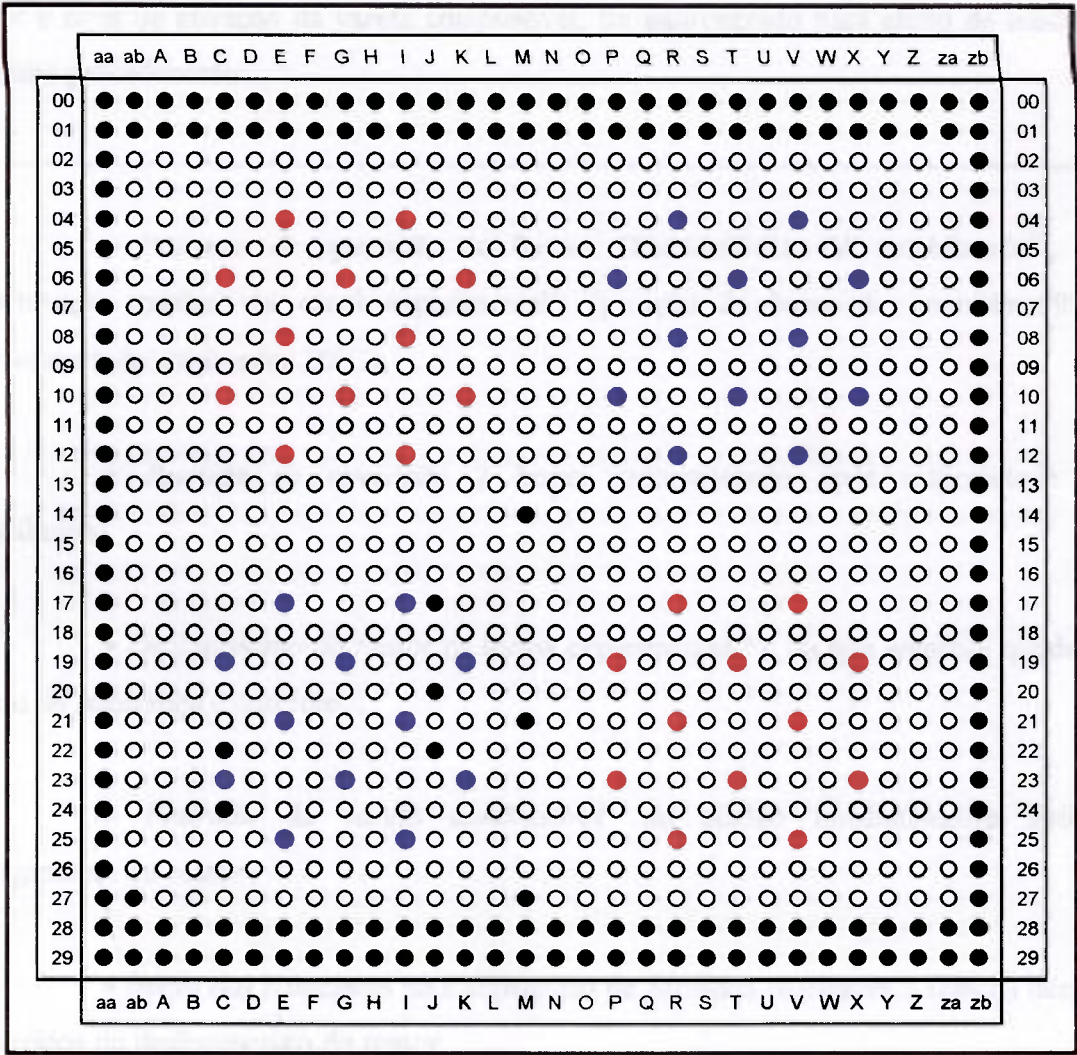


Figura 12: Posicionamento da vareta combustível no núcleo do reator.



Todo o trabalho de medida da distribuição de densidade de potência relativa foi realizado com o núcleo na configuração “34” retangular de 26 x 28 varetas<sup>6</sup>, totalizando 680 varetas combustíveis. A figura 13 apresenta o mapa de distribuição e posicionamento das varetas combustíveis e dos elementos de controle e segurança.



- LEGENDA:
- Vareta Combustível
  - Vareta Absorvedora de Controle
  - Vareta Absorvedora de Segurança
  - Vareta Combustível Medida
  - Posição Não Utilizada da Placa Matriz

Figura 13:Quadro de distribuição das varetas combustíveis (configuração 34).

### 3.3 Procedimento Experimental

#### 3.3.1 Procedimento de operação no reator

Após estudos, testes e análises quanto ao tempo de operação, potência do reator e nível de ativação da vareta combustível, foi padronizado para efeito de medida o seguinte procedimento:

- *Potência de operação* do Reator IPEN/MB-01 1W estabilizada<sup>16</sup>, com monitoração gráfica via canal experimental<sup>7</sup>, (posição da barra de controle 59% e temperatura do moderador 20°C);
- *Período de operação* 2 horas cronometrado após criticalidade 1W estabilizada;
- *Desligamento do reator* na forma experimental(\*); ou seja somente queda das barras de segurança e controle<sup>8</sup>;
- *Retirada da vareta combustível<sup>9</sup>* do núcleo imediatamente após o desligamento do reator;
- *Início das contagens* no Laboratório de Medidas Nucleares 5 (cinco) minutos decorridos do desligamento do reator.

(\*)Obs.:O desligamento na forma experimental se dá pela queda das barras de segurança e controle, permanecendo por mais alguns instantes a água no tanque moderador, funcionando como blindagem e reduzindo a dose de radiação próximo ao núcleo do reator

### 3.3.2 PROCEDIMENTO DE MEDIDA DO DECAIMENTO RADIOATIVO

O objetivo de obter uma expressão analítica descrevendo o comportamento da emissão gama em função do tempo é corrigir a contagem medida retrocedendo ao final da irradiação. Certamente essa função é uma função complexa porque descreve o comportamento agregado de vários emissores gama.

O procedimento adotado foi associar a curva de decaimento levantada pelos dados experimentais à somatória de três exponenciais.

Para a medida do decaimento radioativo foram feitas contagens integradas no contador / temporizador a cada 40s e registradas na impressora. O tempo de aquisição se deu ao longo de 5 horas de decaimento dando um total de 423 pontos levantados por posição selecionada.

Foram feitas quatro medidas de decaimento em três posições no núcleo M14, M21 e M27 (*central, intermediária e periférica*), na cota 180mm do comprimento ativo da vareta combustível no sentido inferior para superior. Na posição central M14 foi realizada uma outra medida na cota 380mm. Com isso foi feito um levantamento do decaimento radioativo considerando uma distribuição radial e axial no núcleo.

Todo processamento dos dados de decaimento radioativo foi feito via programa computacional descrito no Apêndice A.



### 3.3.3 Procedimento de varredura da vareta combustível

A varredura<sup>10</sup> (“*scanning*”) da vareta combustível foi feita em passos de 20mm em 20mm . Foi medido também um ponto fora da região ativa afim de verificar o comportamento do colimador e blindagem. Para efeito de resultado e posterior estabelecimento do padrão para comparação e validação do método de cálculo só foi considerado a varredura da vareta combustível na região ativa entre 20mm e 520mm.

Portanto a cota 20mm (correspondente ao tempo de 460 s , ou seja 7min.que equivale a 420s. + 40s.do tempo de contagem) constitui o terceiro ponto medido na varredura, desprezando-se as cotas -20mm e o zero. O desprezo da cota -20mm é evidente pois não faz sentido a medida da densidade de potência fora da região ativa. A cota zero é um ponto crítico pois não é possível estabelecer uma boa precisão do início da região ativa.

A última cota 540mm também é desprezada devido ao fato de que a abertura do colimador é de 10mm e o comprimento ativo da vareta é 546mm, portanto o último ponto ficaria em uma posição intermediária entre o final da região ativa e o início da região sem UO<sub>2</sub>, não fazendo sentido a medida nesse ponto.

O tempo de contagem no contador/temporizador é de 40s. O disparo do contador é feito sempre no início do minuto “*cheio*”, ou seja o contador é disparado no início do minuto, conta durante 40s ficando os outros 20s sem contar (nesse intervalo é feito o deslocamento da vareta para a próxima posição) e reinicia a contagem no início do próximo minuto. Todo esse disparo do contador é feito automaticamente, sendo disparado manualmente somente o primeiro ponto “*start*”que é o estabelecido em 5min. decorridos do desligamento do reator. Os valores das contagens nas posições com os tempos respectivos são anotados em uma planilha de dados. Com isto, as contagens nas respectivas cotas da região ativa da vareta se dão sempre no mesmo tempo após a irradiação da vareta na operação do Reator, e esses tempos serão então considerados na correção do decaimento.

### 3.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 3

- /1/ **KOBAYASHI I., TSURUTA H., HASHIMOTO M., ABE S., KODAIRA T., OGUIRA S.;** “Critical Experiment and Analysis on the Core for Japan First Nuclear Ship Reactor” , JAERI-1166, Sept./78.
  
- /2/ **MYIOSH Y., ITAGAKI M.,AKAI M.;** “A Geometric Buckling Expression for Regular Polygons: I. Measurements in Low-Enriched UO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O Lattices” ,JAERI-3190, JAN./1993.
  
- /3/ **RAMUSSEN N. C. and SOKVA J. A.;** “The Non-Destructive Measurement of Burn-up by Gamma-Ray Spectroscopy” , Massachussets Institute of Technology, 1992.
  
- /4/ **EG & G ORTEC,** “Experiments in Nuclear Science” , AN-34, 1984.
  
- /5/ **AMERSHAN,** “Product Specification, Gamma Reference Sources” , Amershan International Limited, Oct/1987.
  
- /6/ **Documento Interno IPEN/CNEN-SP R10-IP3-213PR-4EN-001,**“Especificação Técnica para o Projeto Nuclear da UCRI”, Agosto/1988
  
- /7/ **Documento Interno IPEN/CNEN-SP 16-OP-037 ,** “Rotina de Operação Reator IPEN/MB-01 Partida do Reator” , Jan. 1988.
  
- /8/ **Documento Interno IPEN/CNEN-SP.,16-OP-038,** “Rotina de Operação Reator IPEN/MB-01” , Jan. 1988.
  
- /9/ **Documento Interno IPEN/CNEN-SP.,** “Relatório de Análise de Segurança do Reator IPEN/MB-01, Mamuseio da Vareta Combustível” , Cap. V Item 5.2.1.4.,1986.
  
- /10/ **Documento Interno IPEN/CNEN-SP.,** “Rotina Experimental - Medida de Distribuição de Densidade de Potência Relativa do Reator IPEN/MB-01, pela Técnica de Varredura da Vareta Combustível” , Comite de Análise de Segurança, Março/1996.

## **CAPÍTULO 4: RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

### **4.1 INTRODUÇÃO**

### **4.2 LEVANTAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS**

#### **4.2.1 MEDIDA DO DECAIMENTO RADIOATIVO**

#### **4.2.2 MEDIDA DA DENSIDADE DE POTÊNCIA RELATIVA**

### **4.3 AVALIAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS**

#### **4.3.1 ANÁLISE DA CONSISTÊNCIA DA CORREÇÃO DO DECAIMENTO**

#### **4.3.2 TESTE DE REPRODUTIBILIDADE DAS MEDIDAS**

### **4.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 4**

#### 4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais que servirão como padrões para comparação dos resultados teóricos levantados via código computacional CITATION<sup>1</sup>

As posições selecionadas para levantamento do decaimento radioativo foram: M14, M21 e M27 na cota de comprimento ativo 180mm e outra medida na posição M14 na cota 380mm, proporcionando assim uma avaliação na distribuição axial e radial do núcleo quanto ao decaimento radioativo. As posições selecionadas para levantamento da distribuição axial da densidade de potência relativa foram: M14, M21, M27, J17, J20, J22, C22, C24 e ab27.

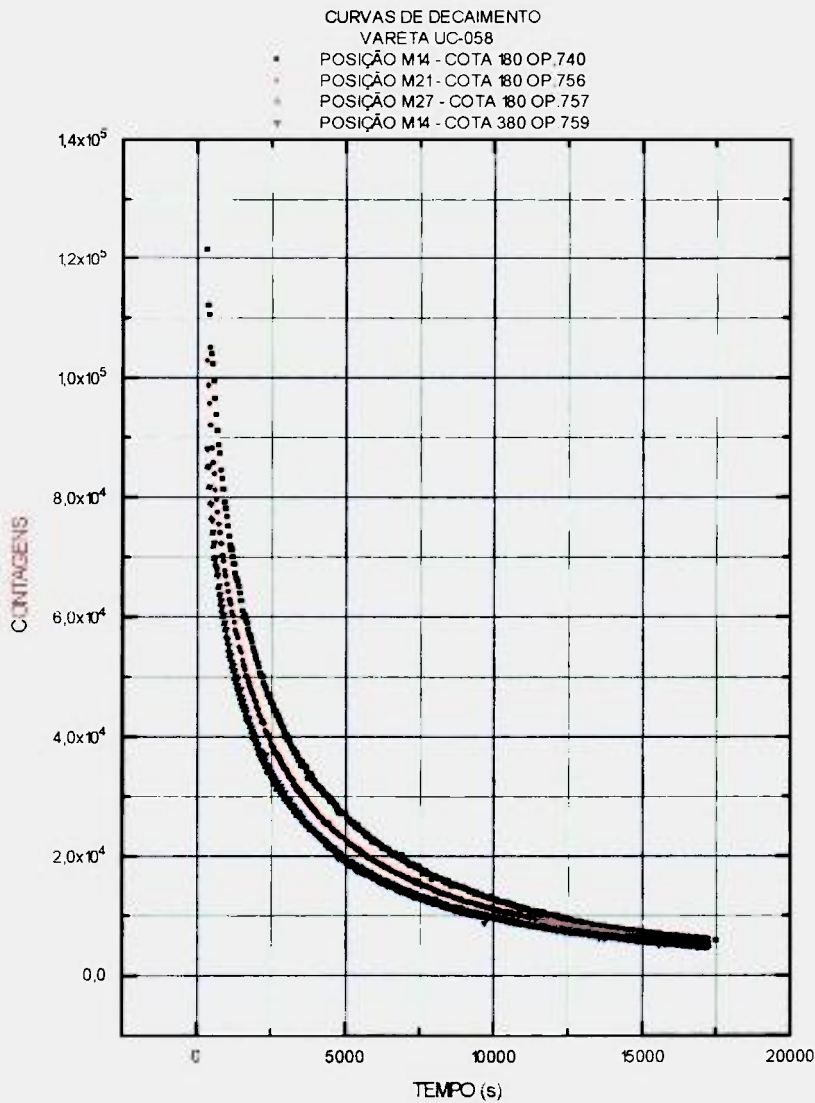
O objetivo em selecionar estas posições no quadrante onde está posicionado o elemento de controle é exatamente para analisar o efeito que este causa na distribuição da densidade de potência, pelo fato de se tratar de um meio absorvedor de neutrons.

Não foi possível o levantamento dos dados na posição central inferior a barra de controle devido a dificuldade de remoção das varetas nessa posição em tempo hábil para início das contagens no tempo estabelecido em 5 minutos. Nessa posição faz-se necessário a remoção do MAB (mecanismo de acionamento de barras) para a retirada das varetas combustíveis.

4.2 LEVANTAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

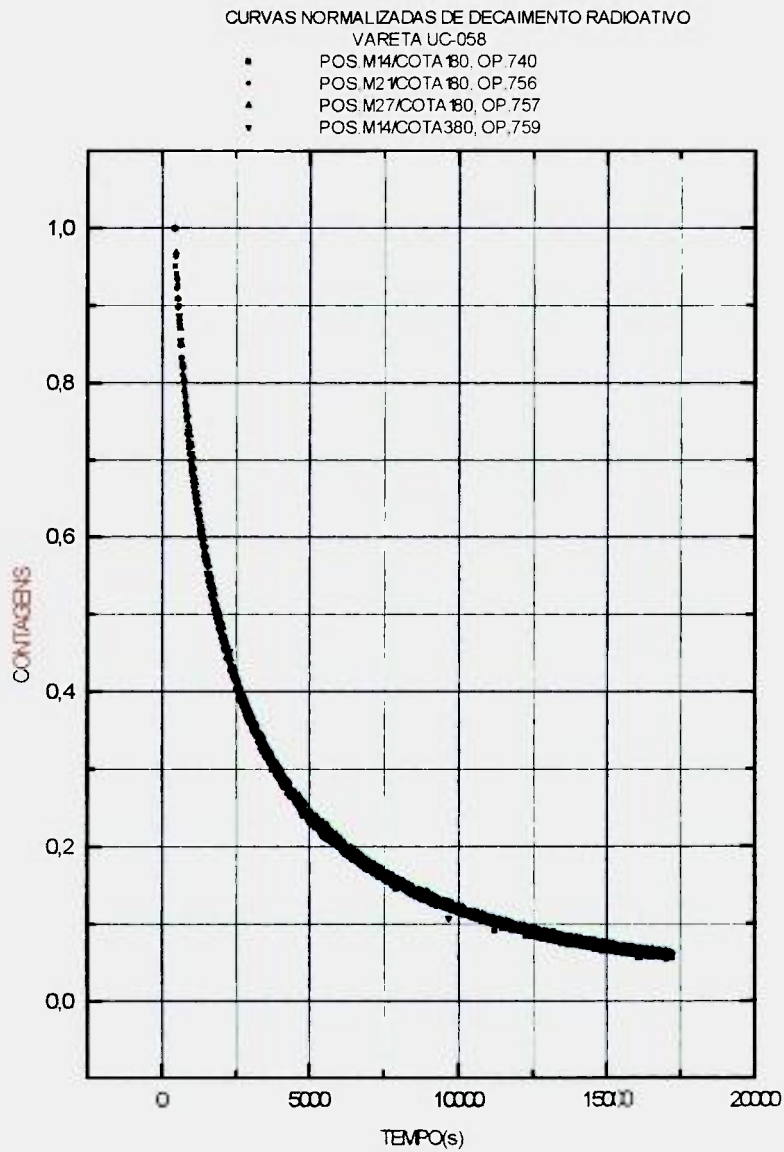
4.2.1 MEDIDA DO DECAIMENTO RADIOATIVO

A figura 14 apresenta as curvas de decaimento radioativo levantadas pelos resultados experimentais ao longo de 5 horas de decaimento nas posições selecionadas.



**Figura.14:Resultados experimentais, posições M14, M21, M27 (cota 180mm) e M14 cota (380m).**

A figura 15 apresenta o resultado das curvas de decaimento normalizadas pelo valor máximo das contagens.



**Figura 15:Resultado das curvas de decaimento normalizadas**

Os resultados mostraram uma sobreposição das curvas normalizadas de decaimento indicando uma independência quanto a posição do levantamento do decaimento radioativo, o que era previsto uma vez que todas as varetas combustíveis são constituídas das mesmas especificações técnicas quanto a massa, enriquecimento e encamizamento<sup>2</sup>.



Para as curvas não normalizadas de decaimento radioativo ocorreu um deslocamento somente na magnitude da curva devido a diferença do fluxo neutrônico nas posições correspondentes. Sendo assim a equação de ajuste da curva normalizada para correção do decaimento radioativo é válida para qualquer medida de varredura em qualquer posição deste núcleo.

Para efeito de ajuste da curva e levantamento da equação de correção do decaimento radioativo, foi considerada a média dos valores levantados nas quatro medidas (posições) experimentais, chegando-se a uma curva “média” de decaimento radioativo.

O ajuste da curva de decaimento radioativo foi feito via programa matemático ORIGIN Versão 3.0<sup>3</sup>.

Equação de ajuste da curva de decaimento:

Para ajuste da curva de decaimento radioativo foi possível associar a somatória de três exponenciais, sendo os resultados finais apresentados na tabela 5.

$$f(t) = A_1 \cdot e^{-E_1 \cdot T} + A_2 \cdot e^{-E_2 \cdot T} + A_3 \cdot e^{-E_3 \cdot T}$$

onde:

$$\text{Chiquadrado} = 5,33333$$

$$A1 = 0,57178 \pm 0,00258 \quad ; \quad E1 = 0,00184 \pm 0,00002$$

$$A2 = 0,24009 \pm 0,00157 \quad ; \quad E2 = 0,00009 \pm 4,0733E-7$$

$$A3 = 0,50124 \pm 0,00175 \quad ; \quad E3 = 0,0004 \pm 2,5852E-6$$

Tabela 5: Equação de ajuste da curva de decaimento.

Para apresentação gráfica da curva normalizada com o respectivo ajuste foram escolhidos somente trinta pontos experimentais para efeito ilustrativo, pois na realidade o total de pontos é 423 ao longo de 5 (cinco) horas de decaimento. Esses resultados são apresentados na figura 16.

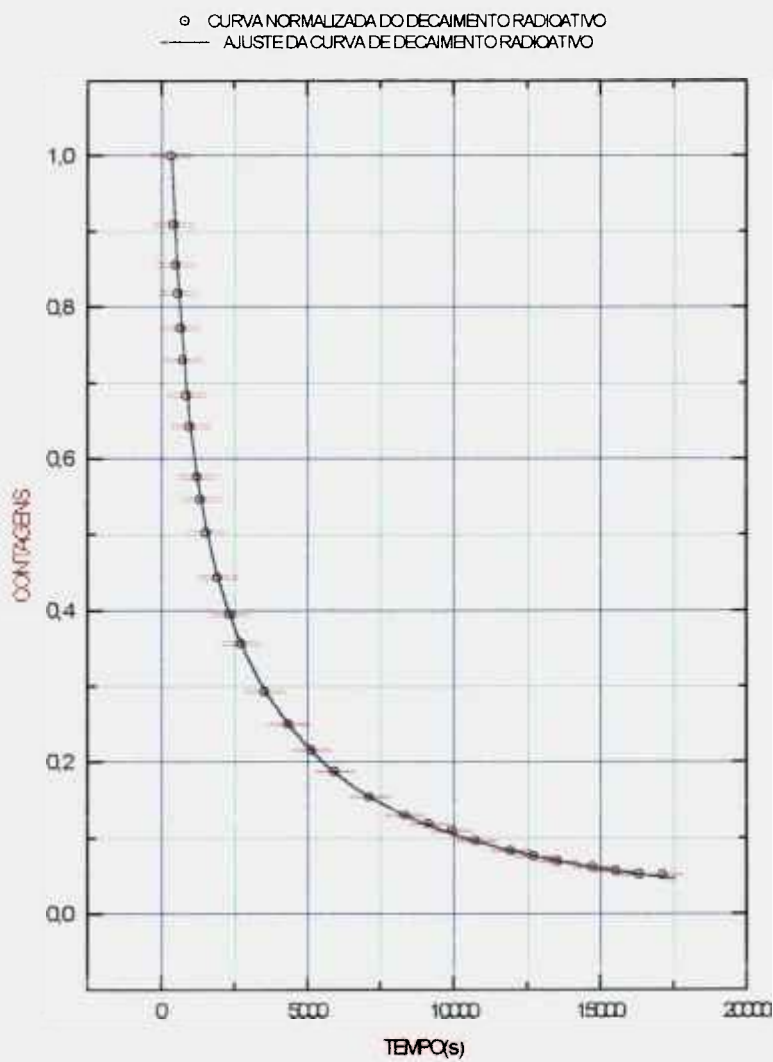


Figura.16: Curva de decaimento radioativo x tempo.

#### 4.2.2 MEDIDA DA DENSIDADE DE POTÊNCIA RELATIVA

Nas tabelas de 6 a 14 são apresentadas as densidades de potência relativa com as respectivas incertezas em função da posição axial. O procedimento para obter a densidade relativa de potência é descrito pelas seguintes etapas:

- É feita a diferença entre as contagens integradas após a operação do reator e o valor da contagem de B.G. (antes da operação) evidentemente na respectiva cota (posição da região ativa da vareta); coluna DIF.
- É calculado o valor da função de correção do decaimento para o respectivo tempo da medida; coluna FUNÇÃO.
- O valor da diferença das contagens após operação menos o B.G. é dividido pelo valor da função do respectivo tempo; coluna DIF/FUNÇÃO.
- Finalmente é feita a normalização dos resultados pelo valor máximo da distribuição, obtendo-se a distribuição axial da densidade de potência relativa; coluna NORM.

Obs.: Todo procedimento de correção do decaimento radioativo assim como a normalização dos resultados é feito via programa computacional descrito no Apêndice A.

A última coluna representa a incerteza associada a densidade de potência relativa cuja descrição do procedimento de obtenção será plenamente descrito no capítulo 5.

**POSIÇÃO M14**

| POS.<br>(mm) | TEMPO<br>(S) | B.G. | CONTAGEM | DIF.<br>(cont. - BG) | FUNÇÃO  | DIF/FUNC | NORM.   | INCERTEZA<br>1( $\sigma$ ) |
|--------------|--------------|------|----------|----------------------|---------|----------|---------|----------------------------|
| 20.0         | 460          | 700  | 58208    | 57508                | 0.89150 | 64507    | 0.52780 | 0.32E-02                   |
| 40.0         | 520          | 743  | 62455    | 61712                | 0.85495 | 72182    | 0.59060 | 0.35E-02                   |
| 60.0         | 580          | 845  | 67959    | 67114                | 0.82129 | 81718    | 0.66863 | 0.39E-02                   |
| 80.0         | 640          | 843  | 72134    | 71291                | 0.79024 | 90215    | 0.73814 | 0.42E-02                   |
| 100.0        | 700          | 914  | 76137    | 75223                | 0.76155 | 98776    | 0.80820 | 0.45E-02                   |
| 120.0        | 760          | 977  | 78936    | 77959                | 0.73499 | 106067   | 0.86785 | 0.48E-02                   |
| 140.0        | 820          | 1076 | 81125    | 80049                | 0.71037 | 112687   | 0.92202 | 0.51E-02                   |
| 160.0        | 880          | 1034 | 81019    | 79985                | 0.68748 | 116345   | 0.95195 | 0.53E-02                   |
| 180.0        | 940          | 1065 | 80662    | 79597                | 0.66617 | 119484   | 0.97763 | 0.54E-02                   |
| 200.0        | 1000         | 1076 | 79910    | 78834                | 0.64630 | 121978   | 0.99804 | 0.55E-02                   |
| 220.0        | 1060         | 1083 | 77747    | 76664                | 0.62772 | 122131   | 0.99929 | 0.56E-02                   |
| 240.0        | 1120         | 1065 | 75657    | 74592                | 0.61032 | 122218   | 1.00000 | 0.56E-02                   |
| 260.0        | 1180         | 1036 | 72082    | 71046                | 0.59399 | 119608   | 0.97864 | 0.56E-02                   |
| 280.0        | 1240         | 999  | 67816    | 66817                | 0.57864 | 115473   | 0.94481 | 0.55E-02                   |
| 300.0        | 1300         | 1043 | 64519    | 63476                | 0.56417 | 112511   | 0.92058 | 0.54E-02                   |
| 320.0        | 1360         | 982  | 59403    | 58421                | 0.55052 | 106119   | 0.8683  | 0.52E-02                   |
| 340.0        | 1420         | 940  | 54449    | 53509                | 0.53761 | 99532    | 0.81438 | 0.50E-02                   |
| 360.0        | 1480         | 862  | 50762    | 49900                | 0.52537 | 94981    | 0.77714 | 0.49E-02                   |
| 380.0        | 1540         | 865  | 45915    | 45050                | 0.51375 | 87688    | 0.71747 | 0.47E-02                   |
| 400.0        | 1600         | 785  | 41149    | 40364                | 0.50271 | 80293    | 0.65697 | 0.44E-02                   |
| 420.0        | 1660         | 762  | 37049    | 36287                | 0.49218 | 73727    | 0.60324 | 0.42E-02                   |
| 440.0        | 1720         | 704  | 32832    | 32128                | 0.48214 | 66637    | 0.54523 | 0.40E-02                   |
| 460.0        | 1780         | 695  | 28300    | 27605                | 0.47254 | 58419    | 0.47799 | 0.37E-02                   |
| 480.0        | 1840         | 637  | 24451    | 23814                | 0.46335 | 51396    | 0.42053 | 0.35E-02                   |
| 500.0        | 1900         | 566  | 20762    | 20196                | 0.45453 | 44432    | 0.36355 | 0.32E-02                   |
| 520.0        | 1960         | 564  | 18029    | 17465                | 0.44607 | 39153    | 0.32035 | 0.30E-02                   |

**Tabela 6:Resultado experimental, posição M14.**

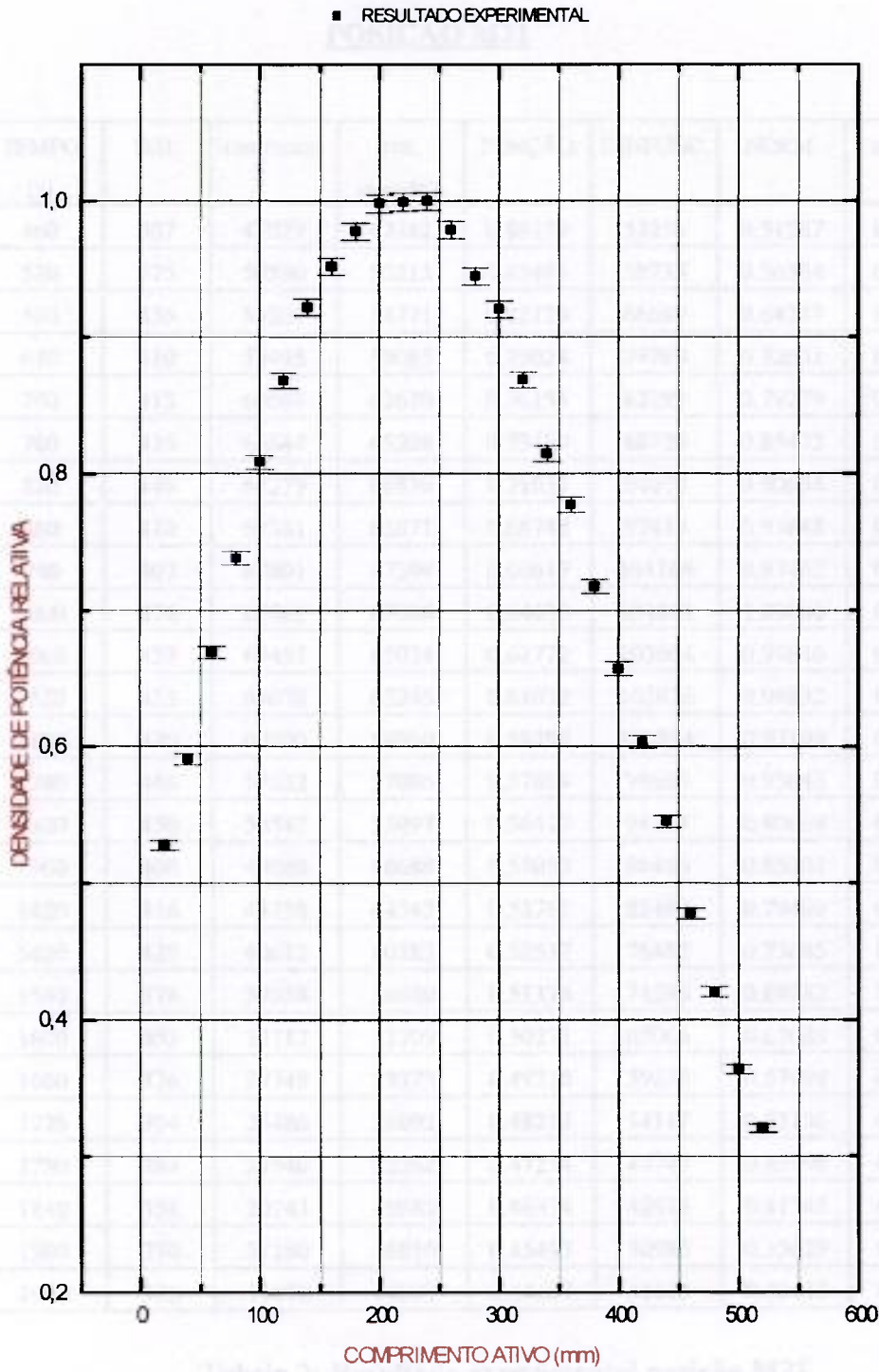


Figura 17: Resultado experimental - posição M14 (operação 741).

POSIÇÃO M21

| POS.<br>(mm) | TEMPO<br>(s) | B.G. | CONTAGEM | DIF.<br>(cont.-BG) | FUNÇÃO  | DIF/FUNC. | NORM.   | INCERTEZA<br>I(σ) |
|--------------|--------------|------|----------|--------------------|---------|-----------|---------|-------------------|
| 20.0         | 460          | 387  | 47829    | 47442              | 0.89150 | 53216     | 0.51267 | 0.32E-02          |
| 40.0         | 520          | 375  | 50590    | 50215              | 0.85495 | 58735     | 0.56584 | 0.35E-02          |
| 60.0         | 580          | 436  | 55207    | 54771              | 0.82129 | 66689     | 0.64247 | 0.38E-02          |
| 80.0         | 640          | 410  | 59495    | 59085              | 0.79024 | 74769     | 0.72031 | 0.42E-02          |
| 100.0        | 700          | 413  | 63083    | 62670              | 0.76155 | 82293     | 0.79279 | 0.46E-02          |
| 120.0        | 760          | 435  | 65644    | 65209              | 0.73499 | 88720     | 0.85472 | 0.49E-02          |
| 140.0        | 820          | 449  | 67279    | 66830              | 0.71037 | 94078     | 0.90634 | 0.51E-02          |
| 160.0        | 880          | 410  | 67381    | 66971              | 0.68748 | 97415     | 0.93848 | 0.53E-02          |
| 180.0        | 940          | 407  | 67801    | 67394              | 0.66617 | 101166    | 0.97462 | 0.55E-02          |
| 200.0        | 1000         | 476  | 67562    | 67086              | 0.64630 | 103801    | 1.00000 | 0.57E-02          |
| 220.0        | 1060         | 457  | 65491    | 65034              | 0.62772 | 103604    | 0.99810 | 0.57E-02          |
| 240.0        | 1120         | 433  | 63678    | 63245              | 0.61032 | 103626    | 0.99832 | 0.57E-02          |
| 260.0        | 1180         | 470  | 60400    | 59930              | 0.59399 | 100894    | 0.97199 | 0.57E-02          |
| 280.0        | 1240         | 446  | 57532    | 57086              | 0.57864 | 98656     | 0.95043 | 0.56E-02          |
| 300.0        | 1300         | 450  | 53547    | 53097              | 0.56417 | 94114     | 0.90669 | 0.55E-02          |
| 320.0        | 1360         | 400  | 49088    | 48688              | 0.55052 | 88440     | 0.85202 | 0.53E-02          |
| 340.0        | 1420         | 416  | 44758    | 44342              | 0.53761 | 82480     | 0.79460 | 0.50E-02          |
| 360.0        | 1480         | 429  | 40612    | 40183              | 0.52537 | 76485     | 0.73685 | 0.48E-02          |
| 380.0        | 1540         | 378  | 37058    | 36680              | 0.51375 | 71396     | 0.68782 | 0.46E-02          |
| 400.0        | 1600         | 403  | 33112    | 32709              | 0.50271 | 65066     | 0.62683 | 0.44E-02          |
| 420.0        | 1660         | 376  | 29749    | 29373              | 0.49218 | 59679     | 0.57494 | 0.42E-02          |
| 440.0        | 1720         | 394  | 26486    | 26092              | 0.48214 | 54117     | 0.52136 | 0.40E-02          |
| 460.0        | 1780         | 384  | 22946    | 22562              | 0.47254 | 47747     | 0.45998 | 0.37E-02          |
| 480.0        | 1840         | 358  | 20243    | 19885              | 0.46334 | 42916     | 0.41345 | 0.35E-02          |
| 500.0        | 1900         | 370  | 17180    | 16810              | 0.45453 | 36983     | 0.35629 | 0.32E-02          |
| 520.0        | 1960         | 375  | 14472    | 14097              | 0.44607 | 31603     | 0.30445 | 0.30E-02          |

Tabela 7: Resultado experimental posição M21



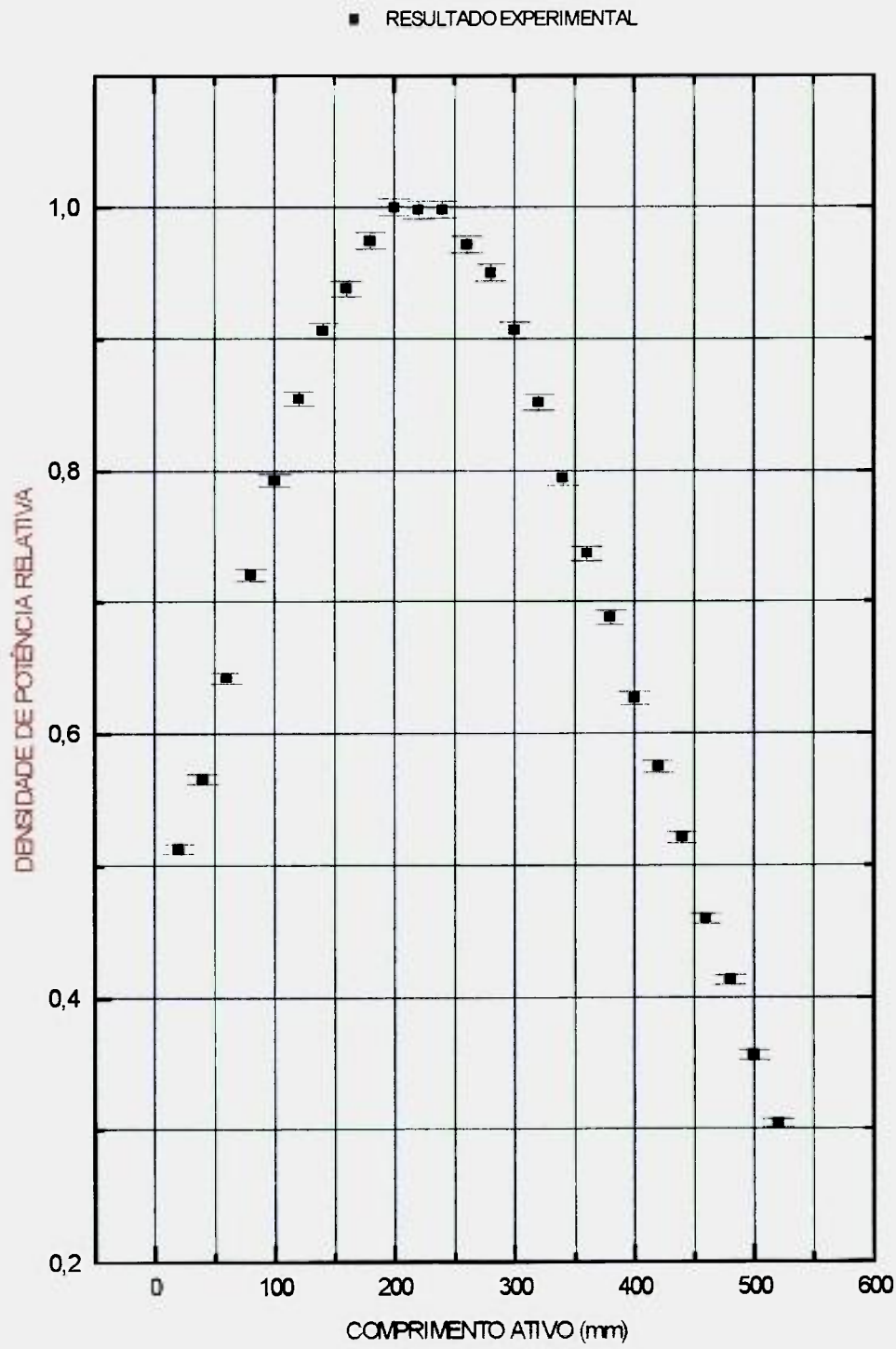


Figura 18:Resultado experimental posição M21 (operação 754).

POSIÇÃO M27

| POS.<br>(mm) | TEMPO<br>(s) | B.G. | CONTAGEM | DIF<br>(cont.-BG) | FUNÇÃO  | DIF/FUNC | NORM.   | INCERTEZA<br>1(σ) |
|--------------|--------------|------|----------|-------------------|---------|----------|---------|-------------------|
| 20.0         | 460          | 909  | 42547    | 41638             | 0.89150 | 46705    | 0.51716 | 0.35E-02          |
| 40.0         | 520          | 895  | 45766    | 44871             | 0.85495 | 52484    | 0.58115 | 0.38E-02          |
| 60.0         | 580          | 1045 | 49764    | 48719             | 0.82129 | 59320    | 0.65684 | 0.42E-02          |
| 80.0         | 640          | 1132 | 53448    | 52316             | 0.79024 | 66203    | 0.73305 | 0.46E-02          |
| 100.0        | 700          | 1203 | 56976    | 55773             | 0.76155 | 73236    | 0.81093 | 0.50E-02          |
| 120.0        | 760          | 1293 | 58774    | 57481             | 0.73499 | 78206    | 0.86596 | 0.53E-02          |
| 140.0        | 820          | 1350 | 59691    | 58341             | 0.71037 | 82128    | 0.90939 | 0.56E-02          |
| 160.0        | 880          | 1382 | 60350    | 58968             | 0.68748 | 85774    | 0.94976 | 0.58E-02          |
| 180.0        | 940          | 1464 | 60451    | 58987             | 0.66617 | 88546    | 0.98046 | 0.60E-02          |
| 200.0        | 1000         | 1433 | 59488    | 58055             | 0.64630 | 89827    | 0.99464 | 0.61E-02          |
| 220.0        | 1060         | 1436 | 58126    | 56690             | 0.62772 | 90311    | 1.00000 | 0.62E-02          |
| 240.0        | 1120         | 1425 | 56040    | 54615             | 0.61032 | 89486    | 0.99086 | 0.62E-02          |
| 260.0        | 1180         | 1456 | 53637    | 52181             | 0.59399 | 87848    | 0.97273 | 0.61E-02          |
| 280.0        | 1240         | 1357 | 50627    | 49270             | 0.57864 | 85148    | 0.94283 | 0.60E-02          |
| 300.0        | 1300         | 1423 | 47299    | 45876             | 0.56417 | 81315    | 0.90039 | 0.59E-02          |
| 320.0        | 1360         | 1378 | 44067    | 42689             | 0.55052 | 77543    | 0.85862 | 0.57E-02          |
| 340.0        | 1420         | 1319 | 40801    | 39482             | 0.53761 | 73440    | 0.81319 | 0.56E-02          |
| 360.0        | 1480         | 1200 | 37291    | 36091             | 0.52537 | 68696    | 0.76066 | 0.53E-02          |
| 380.0        | 1540         | 1169 | 33852    | 32683             | 0.51375 | 63616    | 0.70441 | 0.51E-02          |
| 400.0        | 1600         | 1086 | 30567    | 29481             | 0.50271 | 58645    | 0.64936 | 0.49E-02          |
| 420.0        | 1660         | 1006 | 27438    | 26432             | 0.49218 | 53704    | 0.59465 | 0.47E-02          |
| 440.0        | 1720         | 937  | 24433    | 23496             | 0.48214 | 48733    | 0.53961 | 0.44E-02          |
| 460.0        | 1780         | 885  | 21279    | 20394             | 0.47254 | 43159    | 0.47789 | 0.41E-02          |
| 480.0        | 1840         | 805  | 18407    | 17602             | 0.46334 | 37989    | 0.42064 | 0.38E-02          |
| 500.0        | 1900         | 736  | 15377    | 14641             | 0.45453 | 32211    | 0.35667 | 0.35E-02          |
| 520.0        | 1960         | 673  | 13484    | 12811             | 0.44607 | 28720    | 0.31801 | 0.33E-02          |

Tabela 8:Resultado experimental posição M27

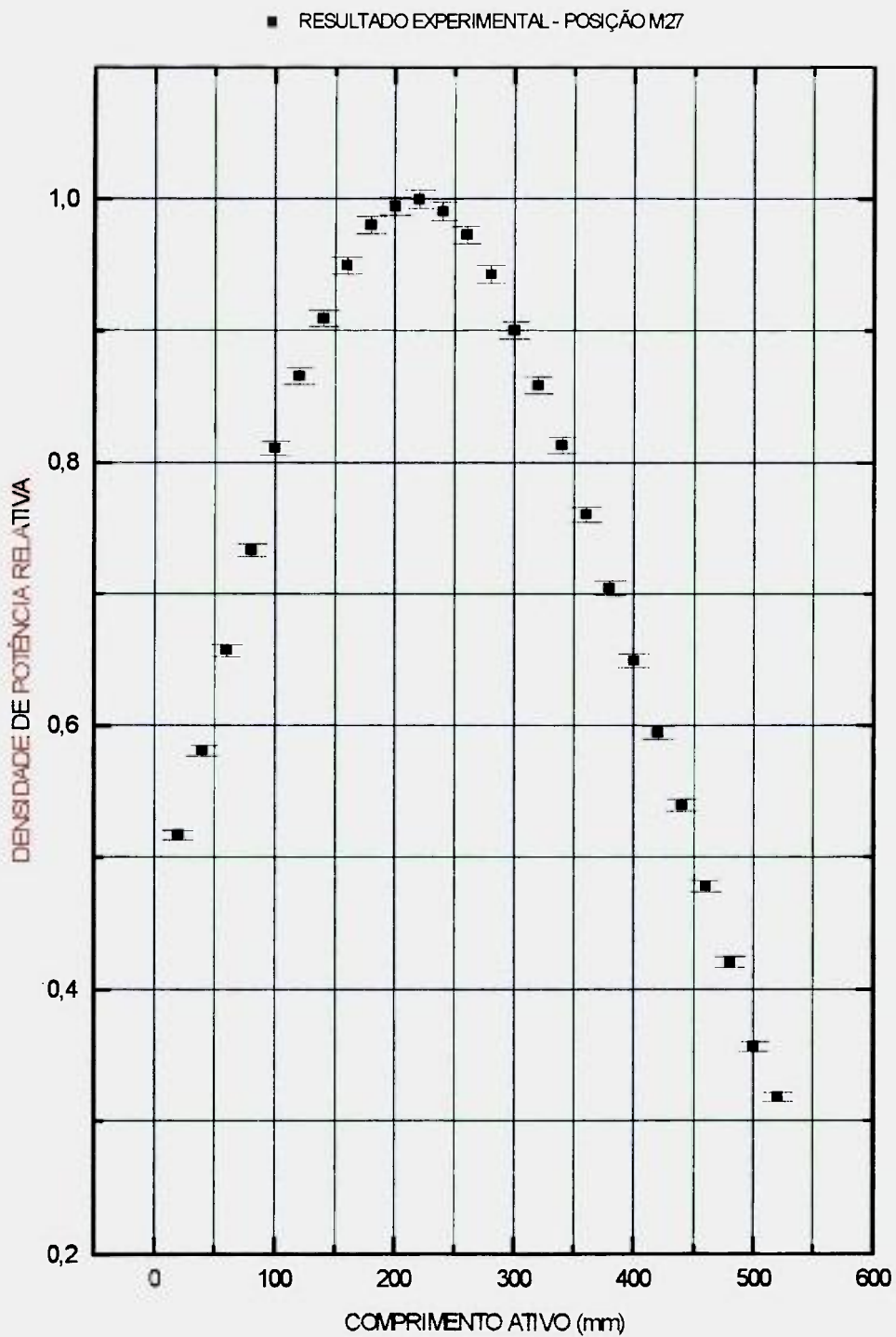


Figura 19: Resultado experimental posição M27 (operação 742).

POSIÇÃO J17

| POS.<br>(mm) | TEMPO<br>(s) | B.G. | CONTAGEM | DIF.<br>(cont.-BG) | FUNÇÃO  | DIF/FUNC. | NORM.   | INCERTEZA<br>1(σ) |
|--------------|--------------|------|----------|--------------------|---------|-----------|---------|-------------------|
| 20.0         | 460          | 375  | 51441    | 51066              | 0.89150 | 57281     | 0.48460 | 0.29E-02          |
| 40.0         | 520          | 368  | 55289    | 54921              | 0.85495 | 64239     | 0.54347 | 0.31E-02          |
| 60.0         | 580          | 366  | 60803    | 60437              | 0.82129 | 73588     | 0.62256 | 0.35E-02          |
| 80.0         | 640          | 402  | 65159    | 64757              | 0.79024 | 81946     | 0.69327 | 0.38E-02          |
| 100.0        | 700          | 414  | 69263    | 68849              | 0.76155 | 90406     | 0.76484 | 0.42E-02          |
| 120.0        | 760          | 441  | 72578    | 72137              | 0.73499 | 98146     | 0.83032 | 0.45E-02          |
| 140.0        | 820          | 466  | 75542    | 75076              | 0.71037 | 105687    | 0.89411 | 0.48E-02          |
| 160.0        | 880          | 450  | 76099    | 75649              | 0.68748 | 110038    | 0.93093 | 0.49E-02          |
| 180.0        | 940          | 452  | 77285    | 76833              | 0.66617 | 115335    | 0.97574 | 0.52E-02          |
| 200.0        | 1000         | 471  | 76239    | 75768              | 0.64630 | 117234    | 0.99181 | 0.53E-02          |
| 220.0        | 1060         | 443  | 74641    | 74198              | 0.62772 | 118203    | 1.00000 | 0.53E-02          |
| 240.0        | 1120         | 422  | 72086    | 71664              | 0.61032 | 117420    | 0.99338 | 0.53E-02          |
| 260.0        | 1180         | 448  | 68808    | 68360              | 0.59399 | 115086    | 0.97363 | 0.53E-02          |
| 280.0        | 1240         | 418  | 64188    | 63770              | 0.57864 | 110207    | 0.93236 | 0.52E-02          |
| 300.0        | 1300         | 452  | 57125    | 56673              | 0.56417 | 100453    | 0.84984 | 0.49E-02          |
| 320.0        | 1360         | 447  | 47396    | 46949              | 0.55052 | 85281     | 0.72148 | 0.44E-02          |
| 340.0        | 1420         | 435  | 39826    | 39391              | 0.53761 | 73271     | 0.61988 | 0.40E-02          |
| 360.0        | 1480         | 432  | 35600    | 35168              | 0.52537 | 66939     | 0.56631 | 0.38E-02          |
| 380.0        | 1540         | 401  | 32292    | 31891              | 0.51375 | 62074     | 0.52515 | 0.36E-02          |
| 400.0        | 1600         | 397  | 29007    | 28610              | 0.50271 | 56912     | 0.48148 | 0.35E-02          |
| 420.0        | 1660         | 378  | 26149    | 25771              | 0.49218 | 52361     | 0.44297 | 0.33E-02          |
| 440.0        | 1720         | 379  | 23302    | 22923              | 0.48214 | 47545     | 0.40223 | 0.31E-02          |
| 460.0        | 1780         | 387  | 20446    | 20059              | 0.47254 | 42449     | 0.35913 | 0.30E-02          |
| 480.0        | 1840         | 380  | 17740    | 17360              | 0.46334 | 37467     | 0.31697 | 0.28E-02          |
| 500.0        | 1900         | 342  | 15344    | 15002              | 0.45453 | 33005     | 0.27923 | 0.26E-02          |
| 520.0        | 1960         | 340  | 13155    | 12815              | 0.44607 | 28729     | 0.24305 | 0.24E-02          |

Tabela 9:Resultado experimental posição J17



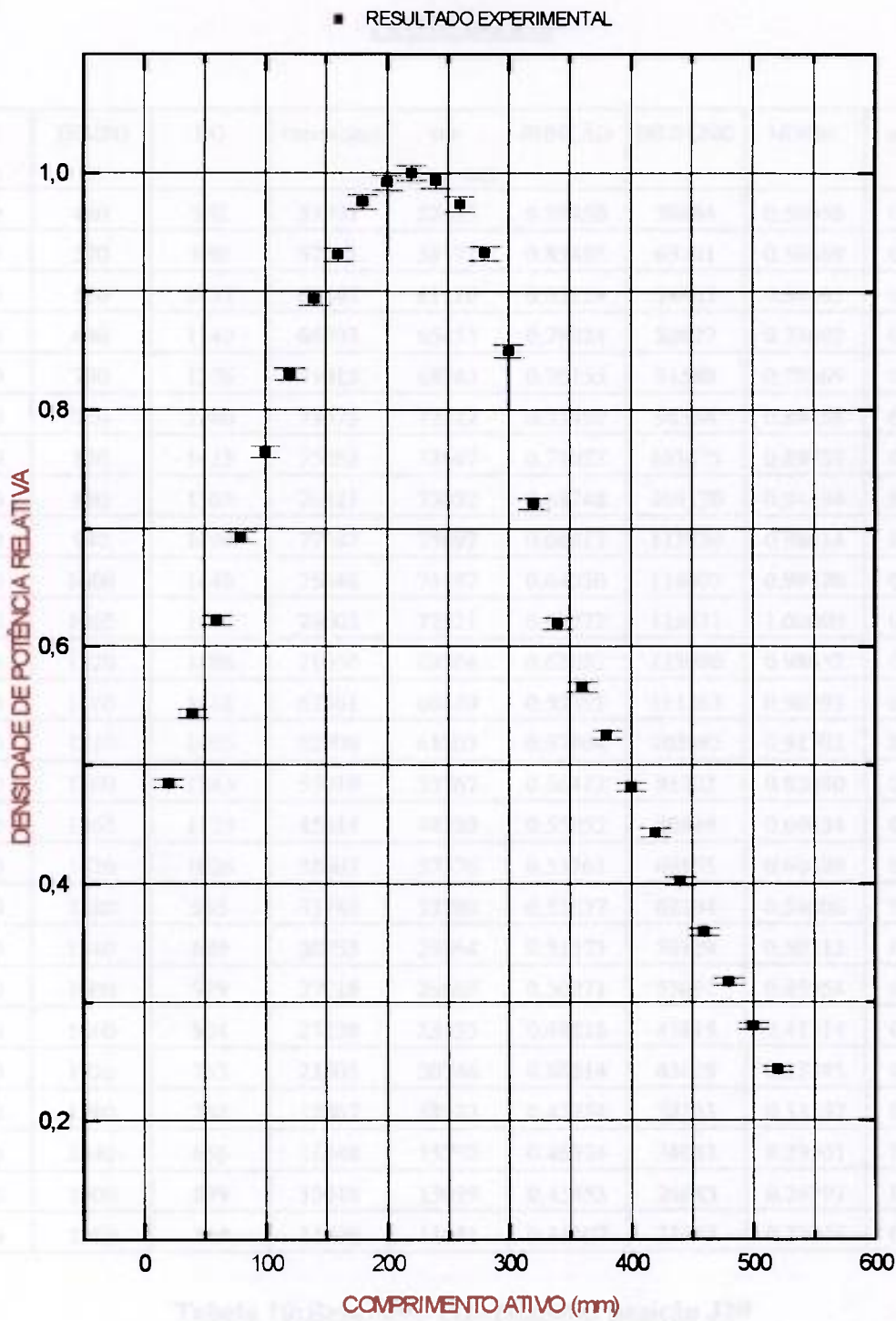


Figura 20:Resultado experimental posição J17 (operação 746)

POSIÇÃO J20

| POS.<br>(mm) | TEMPO<br>(s) | BG   | CONTAGEM | DIF.<br>(cont.-BG) | FUNÇÃO  | DIF/FUNC | NORM.   | INCERTEZA<br>1(σ) |
|--------------|--------------|------|----------|--------------------|---------|----------|---------|-------------------|
| 20.0         | 460          | 902  | 53397    | 52495              | 0.89150 | 58884    | 0.50968 | 0.30E-02          |
| 40.0         | 520          | 980  | 57151    | 56171              | 0.85495 | 65701    | 0.56869 | 0.33E-02          |
| 60.0         | 580          | 1037 | 62147    | 61110              | 0.82129 | 74407    | 0.64405 | 0.36E-02          |
| 80.0         | 640          | 1140 | 66593    | 65453              | 0.79024 | 82827    | 0.71692 | 0.40E-02          |
| 100.0        | 700          | 1276 | 71019    | 69743              | 0.76155 | 91580    | 0.79269 | 0.43E-02          |
| 120.0        | 760          | 1260 | 73572    | 72312              | 0.73499 | 98384    | 0.85158 | 0.46E-02          |
| 140.0        | 820          | 1415 | 75062    | 73647              | 0.71037 | 103675   | 0.89738 | 0.48E-02          |
| 160.0        | 880          | 1369 | 76421    | 75052              | 0.68748 | 109170   | 0.94494 | 0.51E-02          |
| 180.0        | 940          | 1490 | 77387    | 75897              | 0.66617 | 113930   | 0.98614 | 0.53E-02          |
| 200.0        | 1000         | 1449 | 75646    | 74197              | 0.64630 | 114803   | 0.99370 | 0.53E-02          |
| 220.0        | 1060         | 1481 | 74002    | 72521              | 0.62772 | 115531   | 1.00000 | 0.54E-02          |
| 240.0        | 1120         | 1486 | 71050    | 69564              | 0.61032 | 113980   | 0.98657 | 0.54E-02          |
| 260.0        | 1180         | 1412 | 67561    | 66149              | 0.59399 | 111363   | 0.96393 | 0.53E-02          |
| 280.0        | 1240         | 1405 | 62708    | 61303              | 0.57864 | 105943   | 0.91701 | 0.52E-02          |
| 300.0        | 1300         | 1243 | 55010    | 53767              | 0.56417 | 95302    | 0.82490 | 0.48E-02          |
| 320.0        | 1360         | 1125 | 45414    | 44289              | 0.55052 | 80449    | 0.69634 | 0.43E-02          |
| 340.0        | 1420         | 1026 | 38602    | 37576              | 0.53761 | 69895    | 0.60499 | 0.40E-02          |
| 360.0        | 1480         | 965  | 33745    | 32780              | 0.52537 | 62394    | 0.54006 | 0.37E-02          |
| 380.0        | 1540         | 889  | 30753    | 29864              | 0.51375 | 58129    | 0.50315 | 0.36E-02          |
| 400.0        | 1600         | 929  | 27618    | 26689              | 0.50271 | 53091    | 0.45954 | 0.34E-02          |
| 420.0        | 1660         | 804  | 24239    | 23435              | 0.49218 | 47615    | 0.41214 | 0.32E-02          |
| 440.0        | 1720         | 755  | 21501    | 20746              | 0.48214 | 43029    | 0.37245 | 0.31E-02          |
| 460.0        | 1780         | 744  | 18867    | 18123              | 0.47254 | 38353    | 0.33197 | 0.29E-02          |
| 480.0        | 1840         | 656  | 16448    | 15792              | 0.46334 | 34083    | 0.29501 | 0.27E-02          |
| 500.0        | 1900         | 599  | 13618    | 13019              | 0.45453 | 28643    | 0.24792 | 0.25E-02          |
| 520.0        | 1960         | 549  | 11900    | 11351              | 0.44607 | 25447    | 0.22026 | 0.23E-02          |

Tabela 10:Resultado experimental posição J20



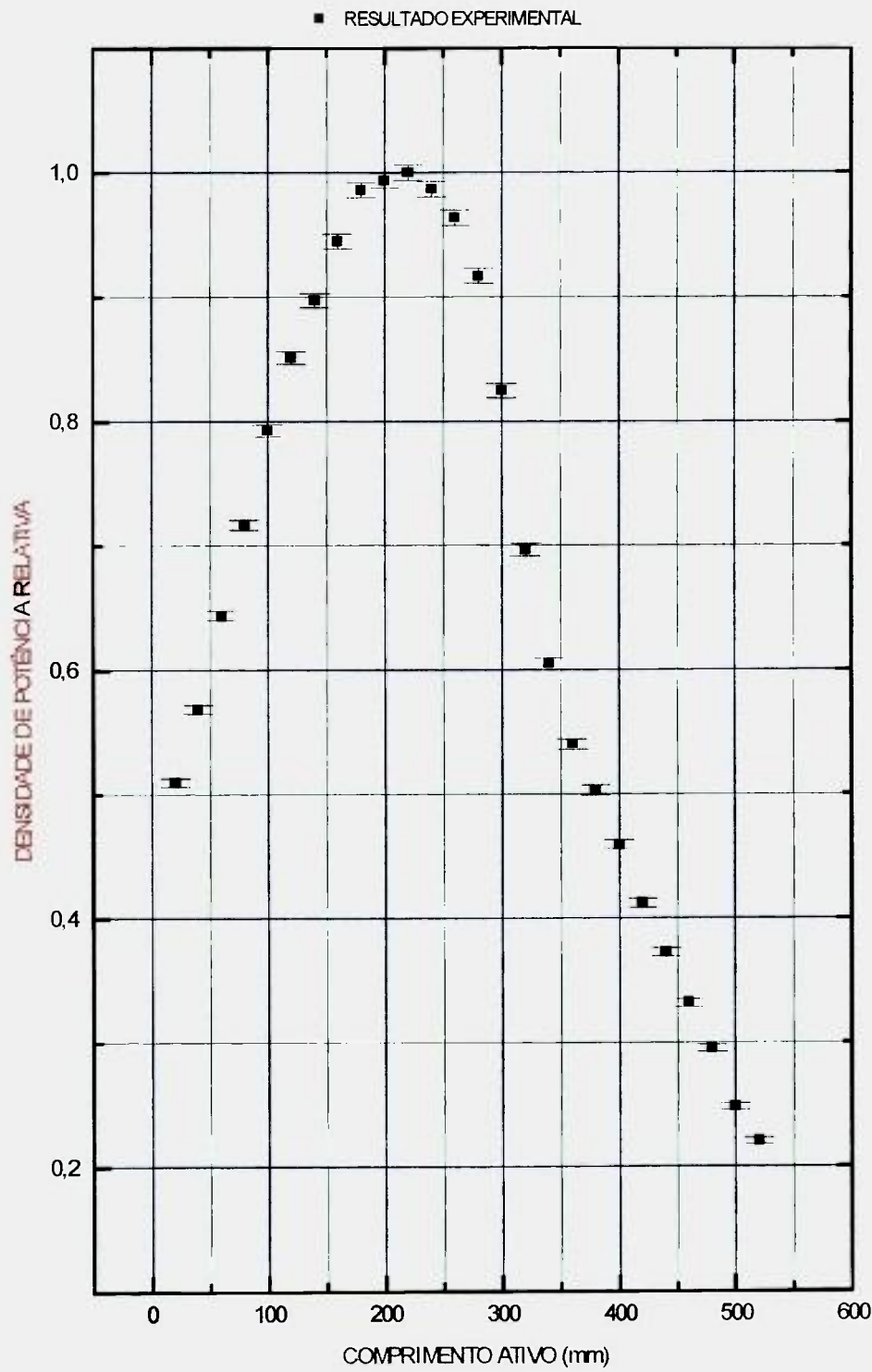


Figura 21:Resultado experimental da posição J20 (operação 747).

POSIÇÃO J22

| POS.<br>(mm) | TEMPO<br>(s) | B.G. | CONTAGEM | DIF.<br>(cont.-BG) | FUNÇÃO  | DIF/FUNC | NORM.   | INCERTEZA<br>1(σ) |
|--------------|--------------|------|----------|--------------------|---------|----------|---------|-------------------|
| 20.0         | 460          | 910  | 46898    | 45988              | 0.89150 | 51585    | 0.51967 | 0.33E-02          |
| 40.0         | 520          | 896  | 49684    | 48788              | 0.85495 | 57066    | 0.57489 | 0.36E-02          |
| 60.0         | 580          | 1091 | 54732    | 53641              | 0.82129 | 65313    | 0.65798 | 0.40E-02          |
| 80.0         | 640          | 1094 | 58661    | 57567              | 0.79024 | 72848    | 0.73388 | 0.44E-02          |
| 100.0        | 700          | 1172 | 61454    | 60282              | 0.76155 | 79157    | 0.79744 | 0.47E-02          |
| 120.0        | 760          | 1270 | 64029    | 62759              | 0.73499 | 85387    | 0.86020 | 0.50E-02          |
| 140.0        | 820          | 1260 | 65425    | 64165              | 0.71037 | 90327    | 0.90996 | 0.53E-02          |
| 160.0        | 880          | 1350 | 66170    | 64820              | 0.68748 | 94286    | 0.94985 | 0.55E-02          |
| 180.0        | 940          | 1370 | 66380    | 65010              | 0.66617 | 97587    | 0.98311 | 0.57E-02          |
| 200.0        | 1000         | 1383 | 65494    | 64111              | 0.64630 | 99197    | 0.99933 | 0.58E-02          |
| 220.0        | 1060         | 1323 | 63633    | 62310              | 0.62772 | 99264    | 1.00000 | 0.59E-02          |
| 240.0        | 1120         | 1370 | 61444    | 60074              | 0.61032 | 98430    | 0.99160 | 0.59E-02          |
| 260.0        | 1180         | 1349 | 58361    | 57012              | 0.59399 | 95981    | 0.96693 | 0.58E-02          |
| 280.0        | 1240         | 1418 | 53408    | 51990              | 0.57864 | 89849    | 0.90515 | 0.56E-02          |
| 300.0        | 1300         | 1244 | 46788    | 45544              | 0.56417 | 80727    | 0.81325 | 0.52E-02          |
| 320.0        | 1360         | 1074 | 38678    | 37604              | 0.55052 | 68306    | 0.68813 | 0.47E-02          |
| 340.0        | 1420         | 955  | 32493    | 31538              | 0.53761 | 58664    | 0.59099 | 0.42E-02          |
| 360.0        | 1480         | 879  | 28564    | 27685              | 0.52537 | 52696    | 0.53087 | 0.40E-02          |
| 380.0        | 1540         | 861  | 25636    | 24775              | 0.51375 | 48223    | 0.48581 | 0.38E-02          |
| 400.0        | 1600         | 763  | 22663    | 21900              | 0.50271 | 435642   | 0.43887 | 0.36E-02          |
| 420.0        | 1660         | 761  | 20613    | 19852              | 0.49218 | 40335    | 0.40634 | 0.35E-02          |
| 440.0        | 1720         | 767  | 18142    | 17375              | 0.48214 | 36037    | 0.36305 | 0.33E-02          |
| 460.0        | 1780         | 691  | 15880    | 15189              | 0.47254 | 32144    | 0.32382 | 0.31E-02          |
| 480.0        | 1840         | 623  | 13821    | 13198              | 0.46334 | 28484    | 0.28695 | 0.29E-02          |
| 500.0        | 1900         | 620  | 11909    | 11289              | 0.45453 | 24837    | 0.25021 | 0.27E-02          |
| 520.0        | 1960         | 548  | 10087    | 9539               | 0.44607 | 21384    | 0.21543 | 0.25E-02          |

Tabela 11:Resultado experimental posição J22

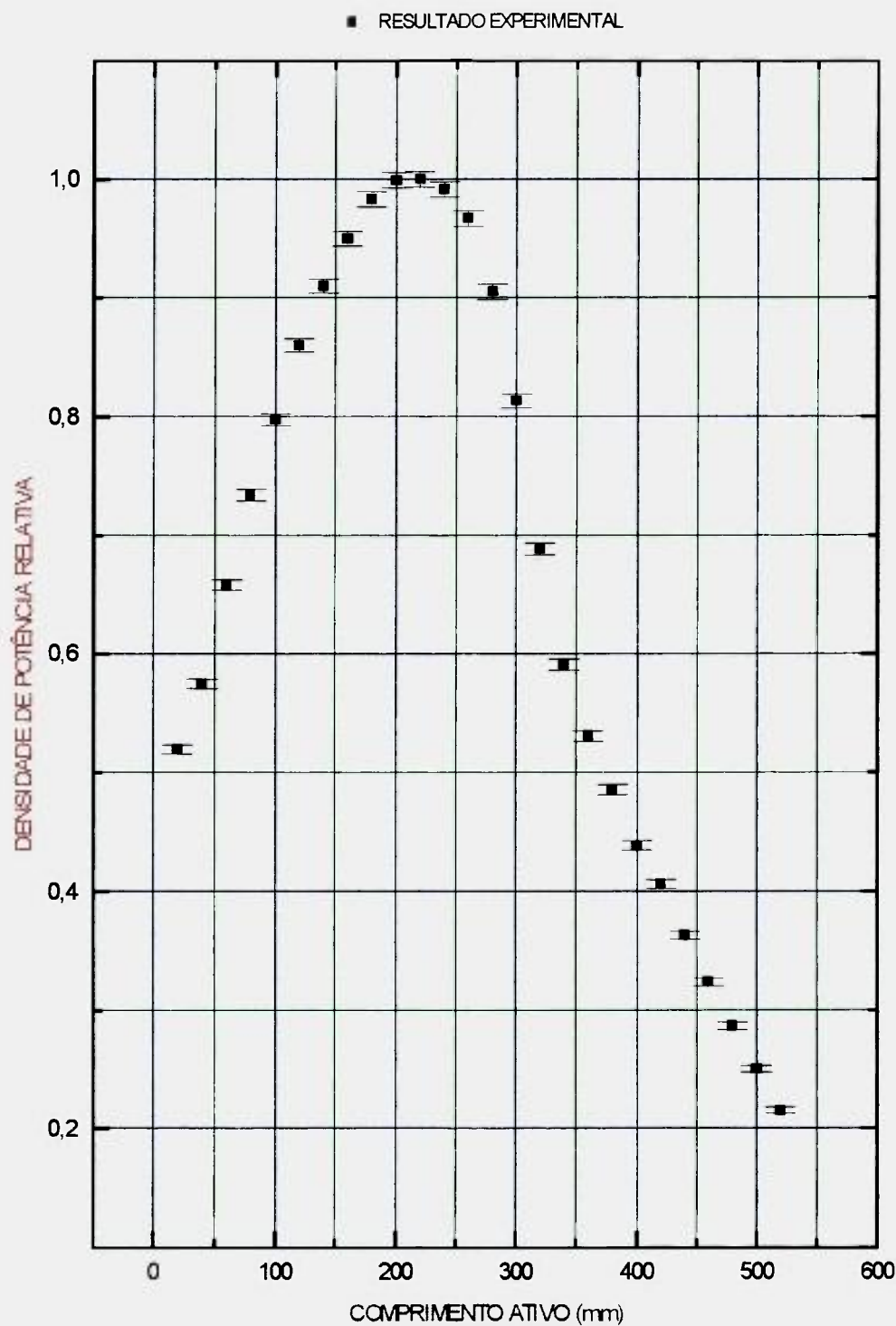


Figura 22:Resultado experimental posição J22 (operação 749).

**POSIÇÃO C22**

| POS<br>(mm) | TEMPO<br>(s) | BG   | CONTAGEM | DIF.<br>(cont.-BG) | FUNÇÃO  | DIF/FUNC | NORM.   | INCERTEZA<br>1(σ) |
|-------------|--------------|------|----------|--------------------|---------|----------|---------|-------------------|
| 20.0        | 460          | 869  | 31563    | 30694              | 0.89150 | 34429    | 0.52541 | 0.42E-02          |
| 40.0        | 520          | 895  | 33732    | 32837              | 0.85495 | 38408    | 0.58613 | 0.47E-02          |
| 60.0        | 580          | 1009 | 36521    | 35512              | 0.82129 | 43239    | 0.65986 | 0.51E-02          |
| 80.0        | 640          | 1153 | 38861    | 37708              | 0.79024 | 47717    | 0.72819 | 0.56E-02          |
| 100.0       | 700          | 1190 | 41130    | 39940              | 0.76155 | 52446    | 0.80034 | 0.60E-02          |
| 120.0       | 760          | 1184 | 42845    | 41661              | 0.73499 | 56682    | 0.86500 | 0.64E-02          |
| 140.0       | 820          | 1353 | 43821    | 42468              | 0.71037 | 59783    | 0.91232 | 0.68E-02          |
| 160.0       | 880          | 1296 | 44263    | 42967              | 0.68748 | 62499    | 0.95377 | 0.70E-02          |
| 180.0       | 940          | 1390 | 43865    | 42475              | 0.66617 | 63760    | 0.97300 | 0.72E-02          |
| 200.0       | 1000         | 1443 | 43794    | 42351              | 0.64630 | 65529    | 1.00000 | 0.74E-02          |
| 220.0       | 1060         | 1416 | 42402    | 40986              | 0.62772 | 65294    | 0.99641 | 0.75E-02          |
| 240.0       | 1120         | 1396 | 40925    | 39529              | 0.61032 | 64768    | 0.98839 | 0.75E-02          |
| 260.0       | 1180         | 1357 | 39023    | 37666              | 0.59399 | 63412    | 0.96769 | 0.74E-02          |
| 280.0       | 1240         | 1222 | 35581    | 34359              | 0.57864 | 59379    | 0.90615 | 0.71E-02          |
| 300.0       | 1300         | 1192 | 31200    | 30008              | 0.56417 | 53189    | 0.81169 | 0.66E-02          |
| 320.0       | 1360         | 1048 | 25901    | 24853              | 0.55052 | 45144    | 0.68893 | 0.60E-02          |
| 340.0       | 1420         | 996  | 21382    | 20386              | 0.53761 | 37920    | 0.57868 | 0.54E-02          |
| 360.0       | 1480         | 899  | 18681    | 17782              | 0.52537 | 33847    | 0.51652 | 0.50E-02          |
| 380.0       | 1540         | 880  | 16527    | 15647              | 0.51375 | 30456    | 0.46478 | 0.48E-02          |
| 400.0       | 1600         | 828  | 14843    | 14015              | 0.50271 | 27879    | 0.42545 | 0.46E-02          |
| 420.0       | 1660         | 775  | 13091    | 12316              | 0.49218 | 25023    | 0.38187 | 0.43E-02          |
| 440.0       | 1720         | 747  | 11661    | 10914              | 0.48214 | 22637    | 0.34545 | 0.41E-02          |
| 460.0       | 1780         | 667  | 9979     | 9312               | 0.47254 | 19706    | 0.30073 | 0.38E-02          |
| 480.0       | 1840         | 639  | 8844     | 8205               | 0.46334 | 17708    | 0.27023 | 0.37E-02          |
| 500.0       | 1900         | 598  | 7437     | 6839               | 0.45453 | 15046    | 0.22961 | 0.34E-02          |
| 520.0       | 1960         | 585  | 6359     | 5774               | 0.44607 | 12944    | 0.19753 | 0.32E-02          |

**Tabela 12:Resultado experimental posição C22.**

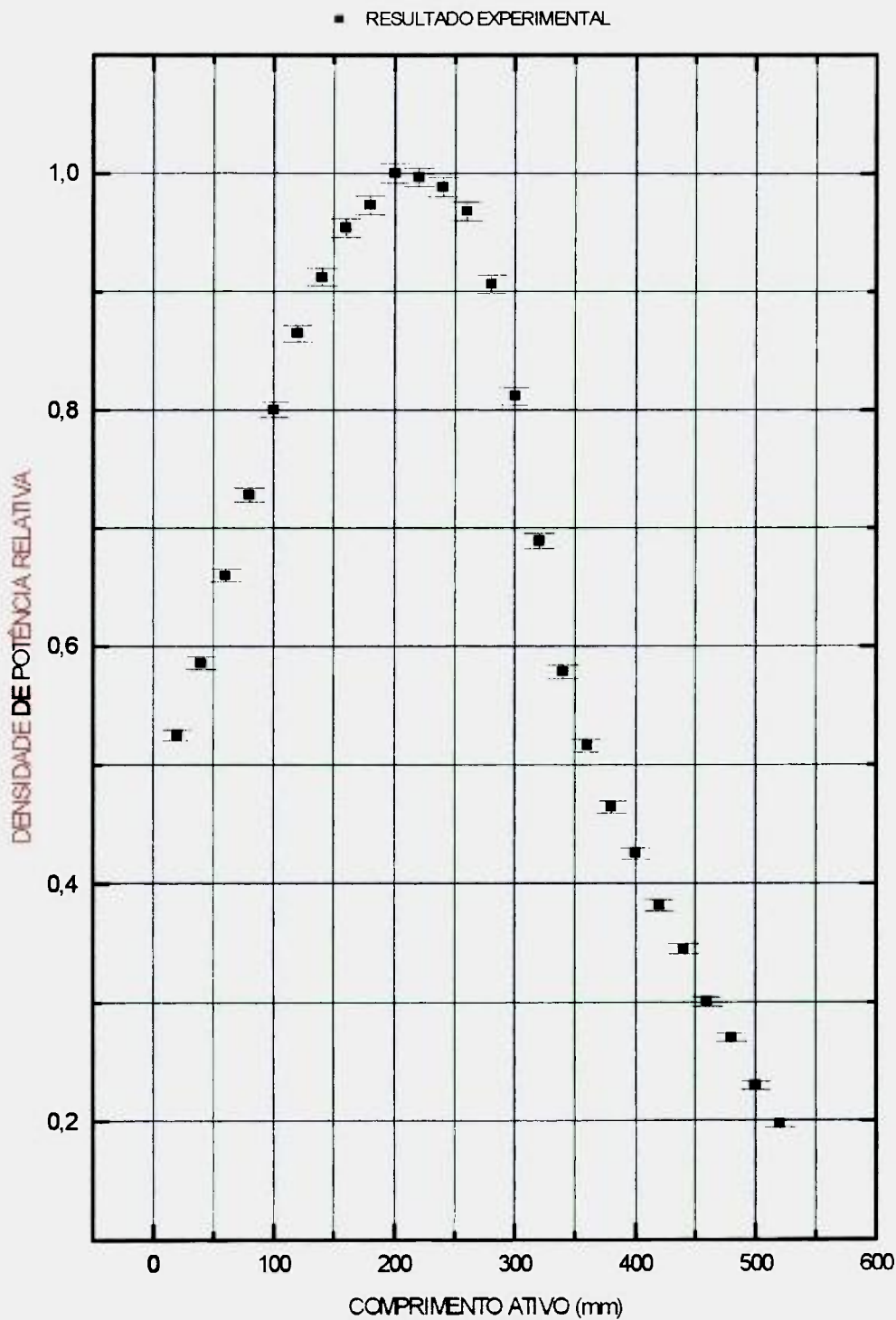


Figura 23:Resultado experimental posição C22 (operação 751)



POSIÇÃO C24

| POS.<br>(mm) | TEMPO<br>(s) | BG  | CONTAGEM | DIF.<br>(cont.-BG) | FUNÇÃO  | DIF/FUNC | NORM.   | INCERTEZA<br>1(σ) |
|--------------|--------------|-----|----------|--------------------|---------|----------|---------|-------------------|
| 20.0         | 460          | 508 | 26939    | 26431              | 0.89150 | 29648    | 0.52350 | 0.44E-02          |
| 40.0         | 520          | 553 | 28397    | 27844              | 0.85495 | 32568    | 0.57507 | 0.48E-02          |
| 60.0         | 580          | 588 | 31181    | 30593              | 0.82129 | 37250    | 0.65774 | 0.53E-02          |
| 80.0         | 640          | 518 | 33214    | 32696              | 0.79024 | 41375    | 0.73057 | 0.58E-02          |
| 100.0        | 700          | 655 | 35133    | 34478              | 0.76155 | 45273    | 0.79941 | 0.63E-02          |
| 120.0        | 760          | 626 | 36438    | 35812              | 0.73499 | 48724    | 0.86034 | 0.67E-02          |
| 140.0        | 820          | 659 | 37545    | 36886              | 0.71037 | 51925    | 0.91687 | 0.71E-02          |
| 160.0        | 880          | 667 | 38310    | 37643              | 0.68748 | 54755    | 0.96683 | 0.74E-02          |
| 180.0        | 940          | 656 | 37691    | 37035              | 0.66617 | 55594    | 0.98164 | 0.76E-02          |
| 200.0        | 1000         | 695 | 37297    | 36602              | 0.64630 | 56633    | 1.00000 | 0.77E-02          |
| 220.0        | 1060         | 651 | 35894    | 35243              | 0.62772 | 56145    | 0.99137 | 0.78E-02          |
| 240.0        | 1120         | 644 | 34575    | 33931              | 0.61032 | 55595    | 0.98167 | 0.78E-02          |
| 260.0        | 1180         | 684 | 32879    | 32195              | 0.59399 | 54201    | 0.95705 | 0.77E-02          |
| 280.0        | 1240         | 654 | 30460    | 29806              | 0.57864 | 51510    | 0.90954 | 0.75E-02          |
| 300.0        | 1300         | 661 | 26650    | 25989              | 0.56417 | 46065    | 0.81340 | 0.69E-02          |
| 320.0        | 1360         | 635 | 21295    | 20660              | 0.55052 | 37528    | 0.66265 | 0.61E-02          |
| 340.0        | 1420         | 581 | 17518    | 16937              | 0.53761 | 31504    | 0.55629 | 0.55E-02          |
| 360.0        | 1480         | 591 | 15378    | 14787              | 0.52537 | 28146    | 0.49698 | 0.52E-02          |
| 380.0        | 1540         | 585 | 13708    | 13123              | 0.51375 | 25543    | 0.45103 | 0.49E-02          |
| 400.0        | 1600         | 469 | 12157    | 11688              | 0.50271 | 23250    | 0.41054 | 0.47E-02          |
| 420.0        | 1660         | 544 | 10896    | 10352              | 0.49218 | 21033    | 0.37139 | 0.44E-02          |
| 440.0        | 1720         | 493 | 9681     | 9188               | 0.48214 | 19057    | 0.33649 | 0.42E-02          |
| 460.0        | 1780         | 516 | 8442     | 7926               | 0.47254 | 16773    | 0.29617 | 0.40E-02          |
| 480.0        | 1840         | 462 | 7253     | 6791               | 0.46334 | 14657    | 0.25879 | 0.37E-02          |
| 500.0        | 1900         | 462 | 6144     | 5682               | 0.45453 | 12501    | 0.22073 | 0.35E-02          |
| 520.0        | 1960         | 411 | 5449     | 5038               | 0.44607 | 11294    | 0.19943 | 0.33E-02          |

Tabela 13:Resultado experimental posição C24.



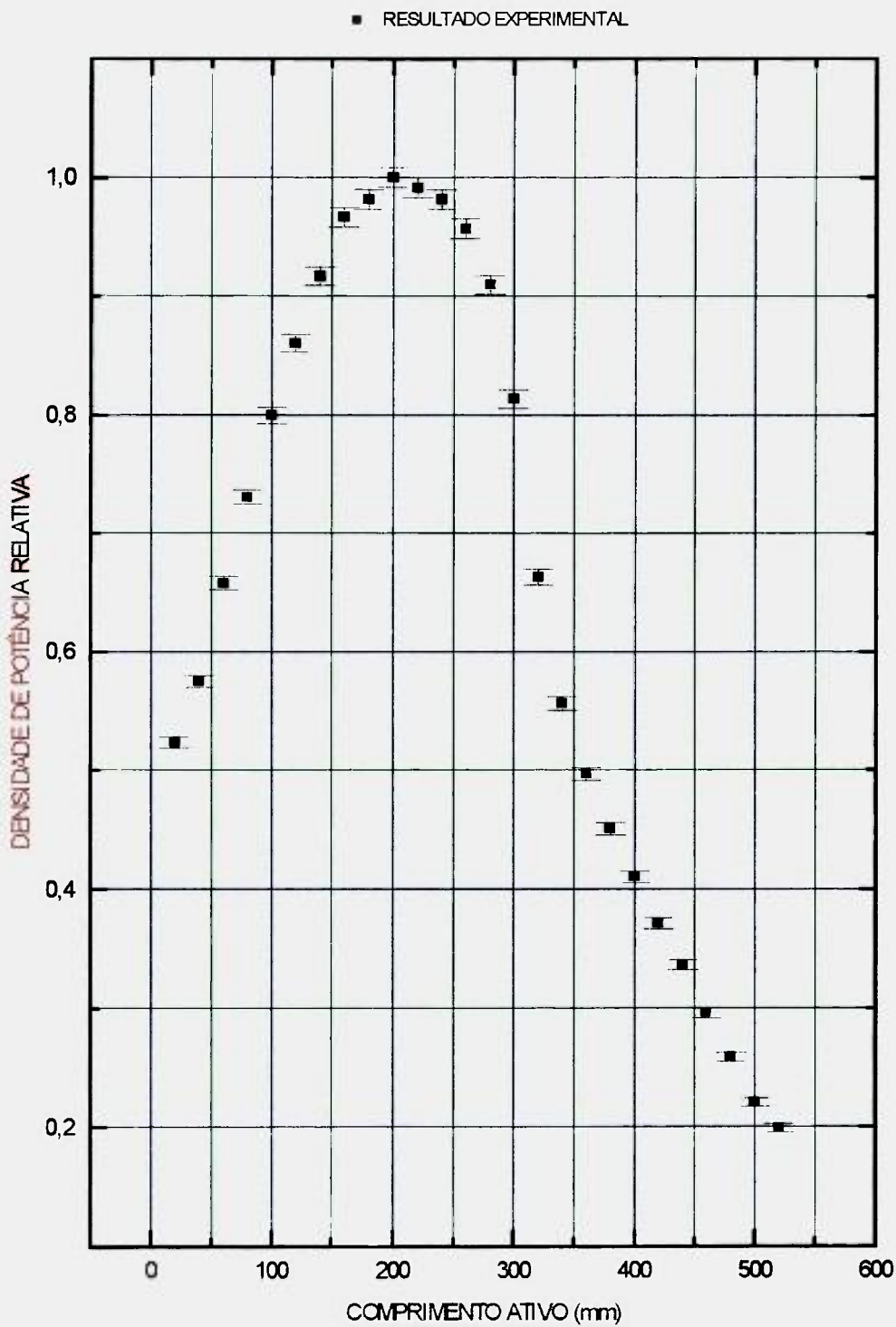


Figura 24: Resultado experimental posição C24 (operação 761).

**POSIÇÃO ab27**

| POS.<br>(mm) | TEMPO<br>(s) | BG  | CONTAGEM | DIF.<br>(cont.-BG) | FUNÇÃO  | DIF/FUNC | NORM.   | INCERTEZA<br>1(σ) |
|--------------|--------------|-----|----------|--------------------|---------|----------|---------|-------------------|
| 20.0         | 460          | 624 | 23760    | 23136              | 0.89150 | 25952    | 0.51220 | 0.47E-02          |
| 40.0         | 520          | 717 | 25988    | 25271              | 0.85495 | 29559    | 0.58339 | 0.52E-02          |
| 60.0         | 580          | 736 | 28362    | 27626              | 0.82129 | 33637    | 0.66389 | 0.57E-02          |
| 80.0         | 640          | 839 | 30170    | 29331              | 0.79024 | 37117    | 0.73256 | 0.62E-02          |
| 100.0        | 700          | 856 | 31778    | 30922              | 0.76155 | 40604    | 0.80139 | 0.67E-02          |
| 120.0        | 760          | 959 | 32959    | 32000              | 0.73499 | 43538    | 0.85929 | 0.72E-02          |
| 140.0        | 820          | 906 | 33772    | 32866              | 0.71037 | 46266    | 0.91314 | 0.76E-02          |
| 160.0        | 880          | 956 | 34593    | 33637              | 0.68748 | 48928    | 0.96567 | 0.79E-02          |
| 180.0        | 940          | 958 | 34129    | 33171              | 0.66617 | 49793    | 0.98275 | 0.81E-02          |
| 200.0        | 1000         | 959 | 33705    | 32746              | 0.64630 | 50667    | 1.00000 | 0.83E-02          |
| 220.0        | 1060         | 984 | 32679    | 31695              | 0.62772 | 50492    | 0.99655 | 0.83E-02          |
| 240.0        | 1120         | 998 | 31632    | 30634              | 0.61032 | 50193    | 0.99065 | 0.84E-02          |
| 260.0        | 1180         | 953 | 29902    | 28949              | 0.59399 | 48736    | 0.96189 | 0.82E-02          |
| 280.0        | 1240         | 911 | 28285    | 27374              | 0.57864 | 47308    | 0.93369 | 0.81E-02          |
| 300.0        | 1300         | 916 | 26137    | 25221              | 0.56417 | 44704    | 0.88231 | 0.79E-02          |
| 320.0        | 1360         | 818 | 24081    | 23263              | 0.55052 | 42256    | 0.83400 | 0.76E-02          |
| 340.0        | 1420         | 738 | 22255    | 21517              | 0.53761 | 40024    | 0.78993 | 0.74E-02          |
| 360.0        | 1480         | 687 | 20186    | 19499              | 0.52537 | 37115    | 0.73252 | 0.71E-02          |
| 380.0        | 1540         | 620 | 18436    | 17816              | 0.51375 | 34678    | 0.68443 | 0.68E-02          |
| 400.0        | 1600         | 635 | 16309    | 15674              | 0.50271 | 31179    | 0.61537 | 0.64E-02          |
| 420.0        | 1660         | 618 | 14526    | 13908              | 0.49218 | 28258    | 0.55772 | 0.61E-02          |
| 440.0        | 1720         | 576 | 12970    | 12394              | 0.48214 | 25706    | 0.50736 | 0.57E-02          |
| 460.0        | 1780         | 554 | 11234    | 10680              | 0.47254 | 22601    | 0.44608 | 0.54E-02          |
| 480.0        | 1840         | 530 | 9651     | 9121               | 0.46334 | 19685    | 0.38852 | 0.50E-02          |
| 500.0        | 1900         | 495 | 8294     | 7799               | 0.45453 | 17158    | 0.33865 | 0.47E-02          |
| 520.0        | 1960         | 440 | 7073     | 6633               | 0.44607 | 14870    | 0.29348 | 0.43E-02          |

**Tabela 14:Resultado experimental posição ab27.**

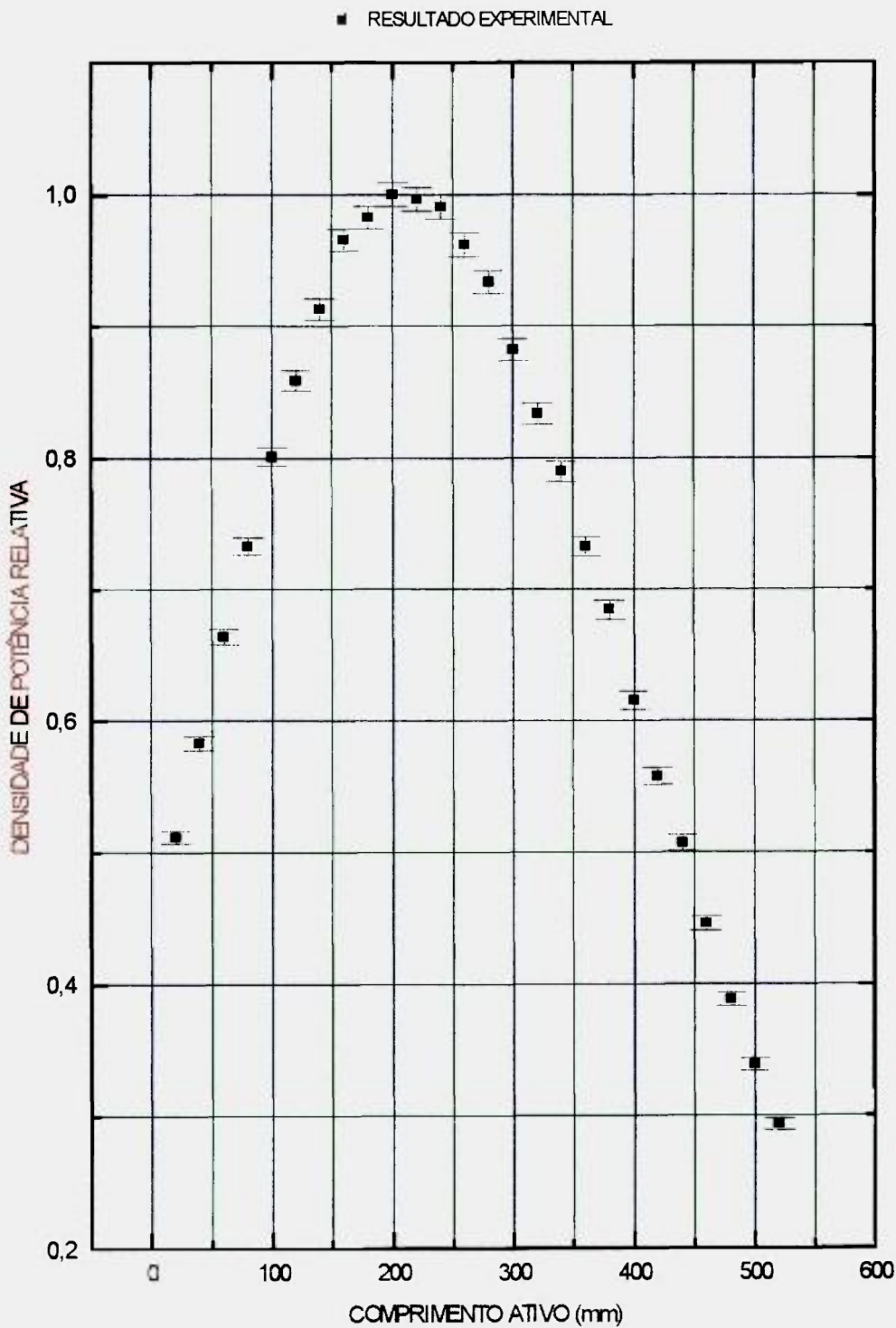


Figura 25: Resultado experimental posição ab27 (operação 765).

4.3 AVALIAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

4.3.1 ANÁLISE DA CONSISTÊNCIA DA CORREÇÃO DO DECAIMENTO RADIOATIVO.

Para análise da consistência da correção do decaimento foram realizadas três varreduras em uma mesma vareta irradiada em uma determinada posição no núcleo (no caso posição M27), e iniciada as varreduras nos tempos 5 minutos, 40 minutos e 1 hora e 15 minutos, após o desligamento do reator. Analisando os resultados observa-se a proximidade dos valores para as três medidas certificando a correção do decaimento radioativo. Como justificativa ao tempo de 5 minutos estabelecido para o início das contagens, observa-se que é o caso onde se tem a menor incerteza e também a consideração da contagem gama emitida pelos produtos de fissão com meia vida inferior ao tempo de início do segundo tempo de teste no caso 40 minutos. Obs.: D.P.R.(Densidade de Potência Relativa)

| POSIÇÃO<br>(mm) | D.P.R.<br>início<br>(5 min.) | INCERTEZA | D.P.R.<br>início<br>(40 min.) | INCERTEZA | D.P.R.<br>início<br>(1h15min.) | INCERTEZA |
|-----------------|------------------------------|-----------|-------------------------------|-----------|--------------------------------|-----------|
| 20.0            | 0.51716                      | 0.35E-02  | 0.51132                       | 0.53E-02  | 0.51033                        | 0.68E-02  |
| 40.0            | 0.58115                      | 0.38E-02  | 0.58682                       | 0.58E-02  | 0.58250                        | 0.74E-02  |
| 60.0            | 0.65684                      | 0.42E-02  | 0.66232                       | 0.63E-02  | 0.65579                        | 0.81E-02  |
| 80.0            | 0.73305                      | 0.46E-02  | 0.73603                       | 0.69E-02  | 0.73987                        | 0.89E-02  |
| 100.0           | 0.81093                      | 0.50E-02  | 0.80456                       | 0.73E-02  | 0.79939                        | 0.94E-02  |
| 120.0           | 0.86596                      | 0.53E-02  | 0.86912                       | 0.78E-02  | 0.87594                        | 0.10E-01  |
| 140.0           | 0.90939                      | 0.56E-02  | 0.91117                       | 0.81E-02  | 0.90827                        | 0.10E-01  |
| 160.0           | 0.94976                      | 0.58E-02  | 0.95225                       | 0.84E-02  | 0.94829                        | 0.11E-01  |
| 180.0           | 0.98046                      | 0.60E-02  | 0.96831                       | 0.86E-02  | 0.98814                        | 0.11E-01  |
| 200.0           | 0.99464                      | 0.61E-02  | 0.98853                       | 0.87E-02  | 0.98402                        | 0.11E-01  |
| 220.0           | 1.00000                      | 0.62E-02  | 1.00000                       | 0.88E-02  | 1.00000                        | 0.11E-01  |
| 240.0           | 0.99086                      | 0.62E-02  | 0.97583                       | 0.87E-02  | 0.99468                        | 0.11E-01  |
| 260.0           | 0.97273                      | 0.61E-02  | 0.97251                       | 0.87E-02  | 0.96796                        | 0.11E-01  |
| 280.0           | 0.94283                      | 0.60E-02  | 0.93433                       | 0.85E-02  | 0.94081                        | 0.11E-01  |
| 300.0           | 0.90039                      | 0.59E-02  | 0.88369                       | 0.82E-02  | 0.90392                        | 0.11E-01  |
| 320.0           | 0.85862                      | 0.57E-02  | 0.85381                       | 0.80E-02  | 0.87314                        | 0.10E-01  |
| 340.0           | 0.81319                      | 0.56E-02  | 0.79616                       | 0.77E-02  | 0.79789                        | 0.98E-02  |
| 360.0           | 0.76066                      | 0.53E-02  | 0.74620                       | 0.74E-02  | 0.74713                        | 0.93E-02  |
| 380.0           | 0.70441                      | 0.51E-02  | 0.68613                       | 0.70E-02  | 0.69782                        | 0.90E-02  |
| 400.0           | 0.64936                      | 0.49E-02  | 0.63721                       | 0.67E-02  | 0.63877                        | 0.85E-02  |
| 420.0           | 0.59465                      | 0.47E-02  | 0.58096                       | 0.63E-02  | 0.58690                        | 0.80E-02  |
| 440.0           | 0.53961                      | 0.44E-02  | 0.51672                       | 0.59E-02  | 0.52930                        | 0.75E-02  |
| 460.0           | 0.47789                      | 0.41E-02  | 0.46726                       | 0.55E-02  | 0.46757                        | 0.70E-02  |
| 480.0           | 0.42064                      | 0.38E-02  | 0.41392                       | 0.52E-02  | 0.41642                        | 0.65E-02  |
| 500.0           | 0.35667                      | 0.35E-02  | 0.36100                       | 0.48E-02  | 0.37223                        | 0.61E-02  |
| 520.0           | 0.31801                      | 0.33E-02  | 0.32016                       | 0.45E-02  | 0.30978                        | 0.56E-02  |

Tabela.15:Resultados da posição M27 nos tempos 5min.,40min.e 1h e 15min.



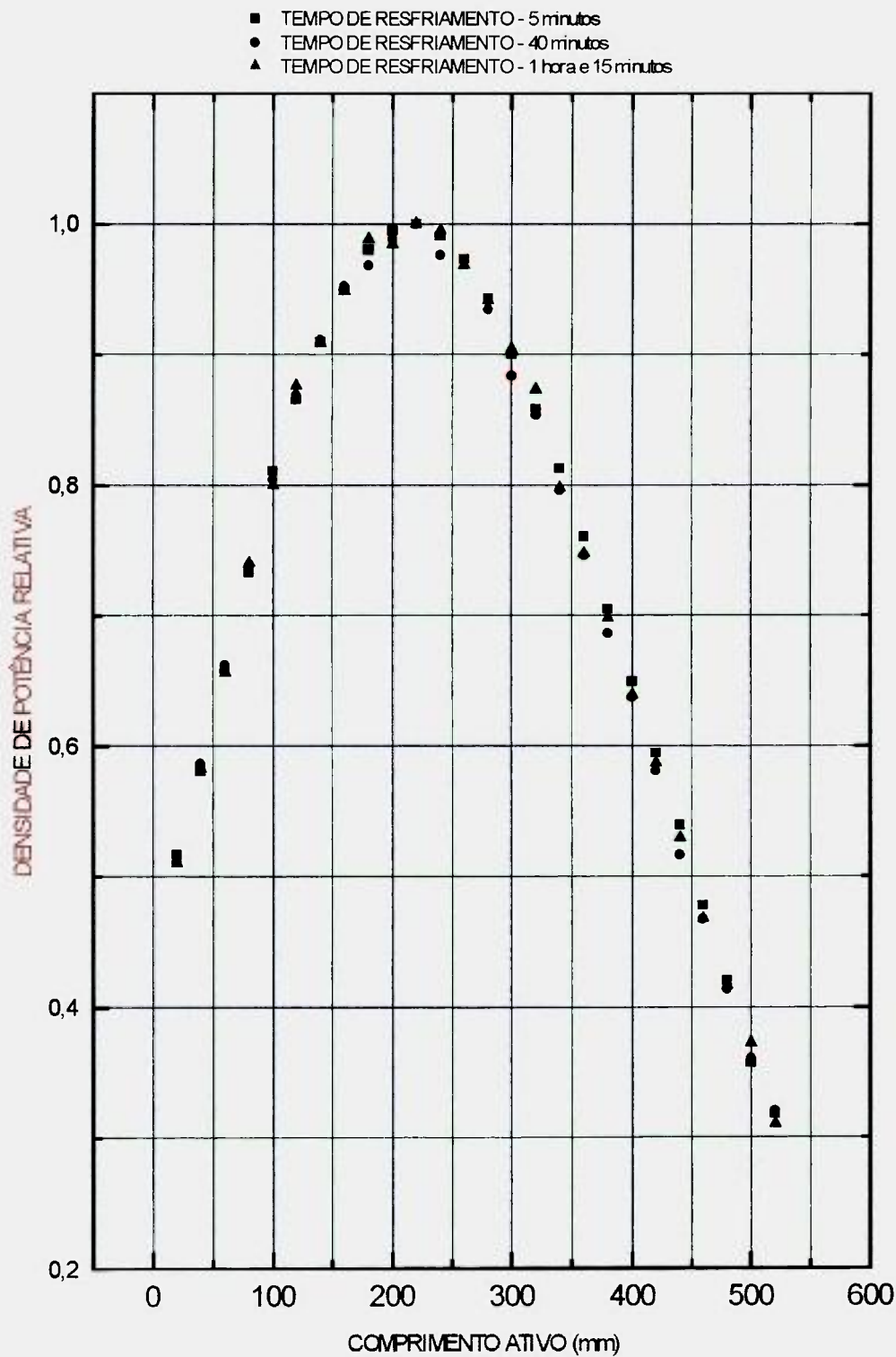


Figura.26: Resultados comparativos, posição M27 nos tempos 5min., 40min.e 1h e 15min.

4.3.2 TESTE DE REPRODUTIBILIDADE DAS MEDIDAS EXPERIMENTAIS

Para o teste de reprodutibilidade das medidas experimentais foram comparados os resultados da distribuição da densidade de potência relativa na posição M21 levantados após a operação 754 em 06/08/96 com os resultados levantados após operação 765 em 22/08/96.

| POSIÇÃO | OPERAÇÃO 754 | INCERTEZA(1σ) | OPERAÇÃO 765 | INCERTEZA(1σ) |
|---------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| 20.0    | 0.51267      | 0.32E-02      | 0.51274      | 0.32E-02      |
| 40.0    | 0.56584      | 0.35E-02      | 0.56089      | 0.34E-02      |
| 60.0    | 0.64247      | 0.38E-02      | 0.63920      | 0.38E-02      |
| 80.0    | 0.72031      | 0.42E-02      | 0.71422      | 0.42E-02      |
| 100.0   | 0.79279      | 0.46E-02      | 0.78866      | 0.45E-02      |
| 120.0   | 0.85472      | 0.49E-02      | 0.84067      | 0.48E-02      |
| 140.0   | 0.90634      | 0.51E-02      | 0.90002      | 0.51E-02      |
| 160.0   | 0.93848      | 0.53E-02      | 0.93781      | 0.53E-02      |
| 180.0   | 0.97462      | 0.55E-02      | 0.97279      | 0.55E-02      |
| 200.0   | 1.00000      | 0.57E-02      | 0.99829      | 0.57E-02      |
| 220.0   | 0.99810      | 0.57E-02      | 1.00000      | 0.57E-02      |
| 240.0   | 0.99832      | 0.57E-02      | 0.98938      | 0.57E-02      |
| 260.0   | 0.97199      | 0.57E-02      | 0.97954      | 0.57E-02      |
| 280.0   | 0.95043      | 0.56E-02      | 0.95567      | 0.56E-02      |
| 300.0   | 0.90669      | 0.55E-02      | 0.91038      | 0.55E-02      |
| 320.0   | 0.85202      | 0.53E-02      | 0.85723      | 0.53E-02      |
| 340.0   | 0.79460      | 0.50E-02      | 0.80089      | 0.51E-02      |
| 360.0   | 0.73685      | 0.48E-02      | 0.73724      | 0.48E-02      |
| 380.0   | 0.68782      | 0.46E-02      | 0.68599      | 0.46E-02      |
| 400.0   | 0.62683      | 0.44E-02      | 0.63546      | 0.44E-02      |
| 420.0   | 0.57494      | 0.42E-02      | 0.57662      | 0.42E-02      |
| 440.0   | 0.52136      | 0.49E-02      | 0.52370      | 0.40E-02      |
| 460.0   | 0.45998      | 0.37E-02      | 0.46905      | 0.37E-02      |
| 480.0   | 0.41345      | 0.35E-02      | 0.41110      | 0.35E-02      |
| 500.0   | 0.35629      | 0.32E-02      | 0.35539      | 0.32E-02      |
| 520.0   | 0.30445      | 0.30E-02      | 0.30883      | 0.30E-02      |

Tabela.16:Resultado experimental, teste de reprodutibilidade posição M21.



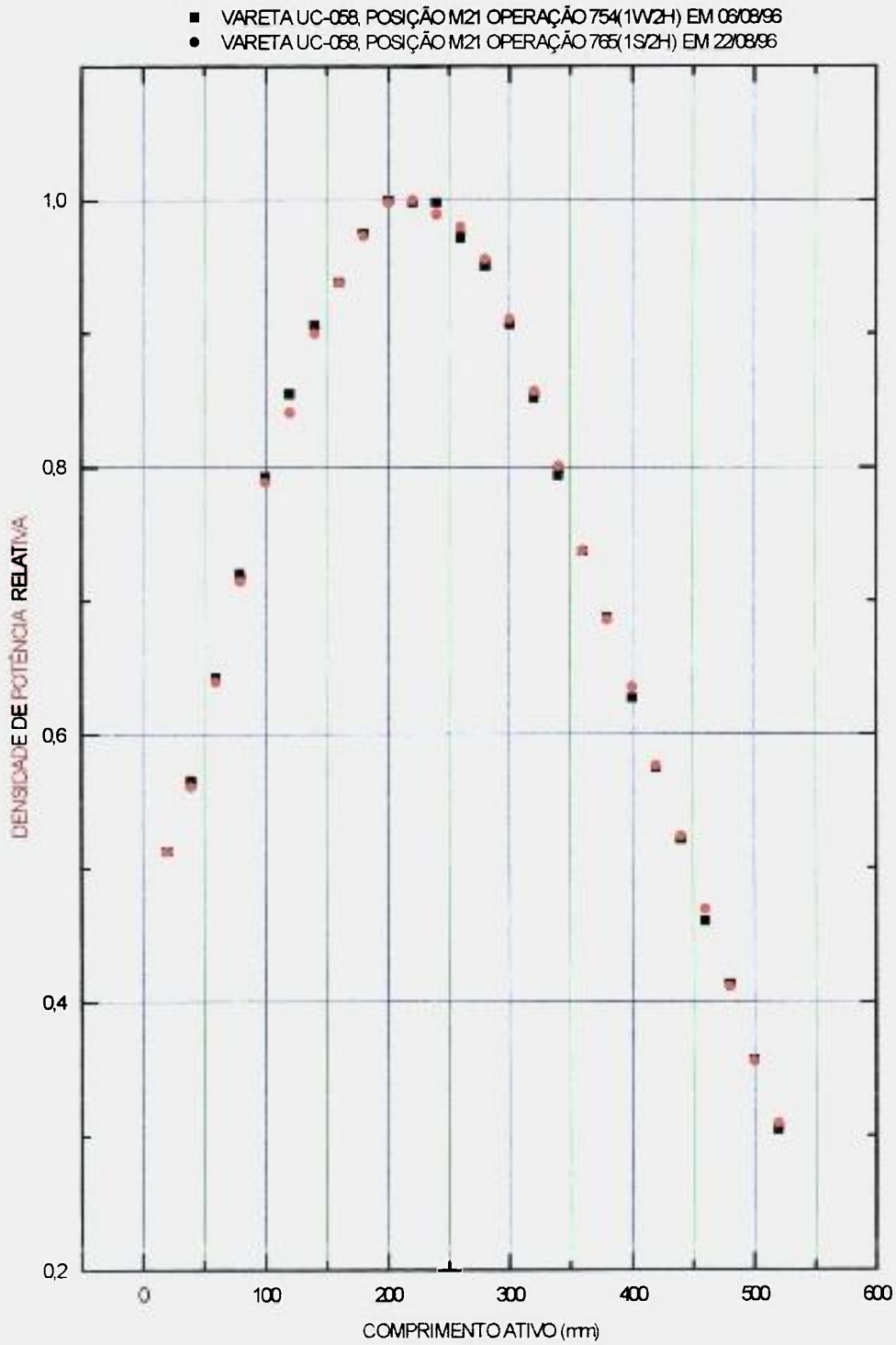


Figura 27:Gráfico comparativo do teste de reprodutibilidade.

#### 4.4.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 4

- /1/ **FOWLER T. B., VONDY D. R.,** “Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION”, ORNL - TM - 2496, Jul./1972.
- /2/ **DOCUMENTO INTERNO IPEN/CNEN-S.P.,** “Relatório de Análise de Segurança do Reator IPEN/MB-01”, Cap. V, 1986.
- /3/ **MICROCAL<sup>TM</sup> SOFTWARE INC.,** “Technical Graphics and Analysis in Windows”, User’s Guide, 1995.

## **CAPÍTULO 5: ANÁLISE DE INCERTEZA**

### **5.1 INTRODUÇÃO**

### **5.2 CÁLCULO DA INCERTEZA DAS MEDIDAS EXPERIMENTAIS**

### **5.3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 5**

## 5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo está diretamente associado ao tratamento de incerteza dos dados experimentais que consiste em um dos principais fatores quando se trata de um trabalho estritamente experimental. As incertezas estão intimamente ligadas a distribuição de probabilidade que rege os processos pelo qual nós observamos os fenômenos físicos.

Como fontes de incertezas no processo de medida estão : potência de operação do reator, tempo de operação, posicionamento da vareta combustível no dispositivo de medida da varredura gama e toda incerteza intrínseca da instrumentação nuclear associada.

Após análise do processo concluiu-se que a predominância de incerteza em toda medida está na estatística de medida propriamente dita, podendo ser desprezadas as fontes anteriormente mencionadas. Os resultados de qualquer conjunto de medidas estão sujeitos à interação de um grande número de fatores que escapam ao controle do pesquisador. Os testes estatísticos aplicados aos resultados fornecidos por um método permitem condensar esses resultados e fornecer uma informação praticamente completa sobre a exatidão e precisão das medidas que o método pode oferecer.

## 5.2 CÁLCULO DA INCERTEZA DAS MEDIDAS EXPERIMENTAIS

Em experimentos envolvendo medidas nucleares tais como decaimento radioativo e contagens de amostras radioativas, dada uma medida  $x$ , podemos dizer que o desvio padrão  $\sigma$  da medida será a raiz quadrada da mesma<sup>1</sup>.

$$\sigma = \sqrt{x} \quad (5.2.1)$$

No entanto, as contagens de amostras radioativas consistem em um grande número de medidas, que poderão ser somadas, multiplicadas ou manipuladas de forma a se obter a quantidade de interesse. Para estes casos, a incerteza associada com a contagem original não pode ser calculado simplesmente pela raiz quadrada da grandeza final, sendo necessário definir-se um resultado geral, que possa ser aplicado independentemente do número de variáveis.

Tomemos as contagens  $x, y, z, \dots$ , não correlacionadas e seus respectivos desvios padrões  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \dots$ . Então o desvio padrão para qualquer grandeza  $u$ , derivada das contagens, será dado pela seguinte expressão, conhecida como equação de propagação de erro que é aplicada em situações envolvendo medidas nucleares<sup>1,2,3</sup>:

$$\sigma_u^2 = \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \sigma_x^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \sigma_y^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \sigma_z^2 + \dots \quad (5.2.2)$$

A seguir serão apresentadas algumas recorrências da equação anterior aplicadas nesse trabalho:

• *Soma e subtração de contagens:*

$$u = x \pm y \quad (5.2.3)$$

O desvio padrão, a partir da equação (E.2), pode ser simplificado por:

$$\sigma_u = \sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2)} \quad (5.2.4)$$

• *Multiplicação ou divisão por constantes*

Seja a multiplicação ou divisão de contagens, por uma constante, dada por:

$$u = A \cdot x \quad \text{ou} \quad v = \frac{x}{B} \quad (5.2.5)$$

O desvio padrão da medida será:

$$\sigma_u = A \cdot \sigma_x \quad \text{ou} \quad \sigma_v = \frac{\sigma_x}{B} \quad (5.2.6)$$

• *Multiplicação ou divisão por contagens:*

Seja a multiplicação ou divisão de contagens, dada por:

$$u = x \cdot y \quad \text{ou} \quad u = \frac{x}{y} \quad (5.2.7)$$

O desvio padrão da medida será:

$$\sigma_u = u \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2} \quad (5.2.8)$$

• Para a função  $f(t)$  de correção do decaimento radioativo, o desvio padrão é calculado pela matriz de covariância <sup>4</sup> (devido ao compromisso entre os parâmetros da equação), dada por:

$$\sigma_f^2 = T_{(1 \times 6)}^+ \cdot V_{\sigma (6 \times 6)} \cdot T_{(6 \times 1)} \quad (5.2.9)$$

onde:

$$V_{\sigma (6 \times 6)} = (D_{(6 \times 423)}^+ \cdot V_{(423 \times 423)}^{-1} \cdot D_{(423 \times 6)})^{-1} \quad (5.2.10)$$

$$\text{sendo} \quad f(t) = A_1 \cdot e^{-E_1 \cdot t} + A_2 \cdot e^{-E_2 \cdot t} + A_3 \cdot e^{-E_3 \cdot t} \quad (5.2.11)$$



e as derivadas parciais:

$$\frac{\partial f(t)}{\partial A_1} = e^{-E_1 t} ; \quad \frac{\partial f(t)}{\partial A_2} = e^{-E_2 t} ; \quad \frac{\partial f(t)}{\partial A_3} = e^{-E_3 t} ;$$

$$\frac{\partial f(t)}{\partial E_1} = -t.A_1.e^{-E_1 t} ; \quad \frac{\partial f(t)}{\partial E_2} = -t.A_2.e^{-E_2 t} ; \quad \frac{\partial f(t)}{\partial E_3} = -t.A_3.e^{-E_3 t}$$

temos que a matriz  $T(t)_{(6 \times 1)} =$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f(t)}{\partial A_1} \\ \frac{\partial f(t)}{\partial A_2} \\ \frac{\partial f(t)}{\partial A_3} \\ \frac{\partial f(t)}{\partial E_1} \\ \frac{\partial f(t)}{\partial E_2} \\ \frac{\partial f(t)}{\partial E_3} \end{bmatrix}$$

a matriz  $V^{-1}_{(423 \times 423)} =$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_{t_1}^2} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_{t_2}^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\sigma_{t_{423}}^2} \end{bmatrix}$$

a matriz  $D_{(423 \times 6)} =$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f(t_1)}{\partial A_1} & \frac{\partial f(t_1)}{\partial A_2} & \dots & \frac{\partial f(t_1)}{\partial E_3} \\ \frac{\partial f(t_2)}{\partial A_1} & \frac{\partial f(t_2)}{\partial A_2} & \dots & \frac{\partial f(t_2)}{\partial E_3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f(t_{423})}{\partial A_1} & \frac{\partial f(t_{423})}{\partial A_2} & \dots & \frac{\partial f(t_{423})}{\partial E_3} \end{bmatrix}$$

Portanto a expressão final para cálculo da incerteza da densidade de potência relativa (D.P.R.) é dada por:

$$DPR = \frac{C_i / F_i}{C_{max} / F_{max}}, \tag{5.2.12}$$

onde:

- $C_i$  : representa a contagem líquida na posição “i”
- $F_i$ : representa a correção do decaimento para a posição “i”
- $C_{max}$ : representa a contagem líquida máxima, e
- $F_{max}$ : representa a correção do decaimento para a posição de  $C_{max}$

Aplicando a equação (5.2.2) em (5.2.12) tem-se:

$$\sigma^2_{DPR} = \left(\frac{\partial DPR}{\partial C_i}\right)^2 \cdot \sigma^2_{C_i} + \left(\frac{\partial DPR}{\partial F_i}\right)^2 \cdot \sigma^2_{F_i} + \left(\frac{\partial DPR}{\partial C_{max}}\right)^2 \cdot \sigma^2_{C_{max}} + \left(\frac{\partial DPR}{\partial F_{max}}\right)^2 \cdot \sigma^2_{F_{max}} \tag{5.2.13}$$

onde:

$$\frac{\partial DPR}{\partial C_i} = \frac{1/F_i}{C_{max} / F_{max}} \tag{5.2.14}$$

$$\frac{\partial DPR}{\partial F_i} = - \frac{C_i / F_i^2}{C_{max} / F_{max}} \tag{5.2.15}$$

$$\frac{\partial DPR}{\partial C_{max}} = - \frac{C_i / F_i}{C_{max}^2 / F_{max}} \tag{5.2.16}$$

$$\frac{\partial DPR}{\partial F_{max}} = \frac{C_i / F_i}{C_{max}} \tag{5.2.17}$$

### 5.3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 5

- /1/ **KNOLL G. F.**, "Radiation Detection and Measurement" , John Wiley & Sons, 1989.
- /2/ **BEVINGTON R. PHILIP, ROBINSON D. KEITH**, "Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences" , chap. 3, 1992
- /3/ **ATALLA L. T.**, "Interpretação Quantitativa de Resultados Experimentais" , Publicação IPE/CNEN, Inf. IEA 60, Maio 1978.
- /4/ **SMITH L. DONALD**, "Probability, Statistics and Data Uncertainties in Nuclear Science and Technology" , Vol.4, chap.9, 1991.

## **CAPÍTULO 6: RESULTADOS CALCULADOS**

### **6.1 INTRODUÇÃO**

### **6.2 LEVANTAMENTO DOS DADOS VIA CÓDIGO CITATION**

### **6.3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 6**

## 6.1 INTRODUÇÃO:

O código "CITATION"<sup>1</sup> é um programa escrito em Fortran, desenvolvido para cálculo de difusão de neutrons, em uma, duas ou três dimensões, para geometrias cartesianas, cilíndrica e esférica. Após a resolução da equação de difusão, pelo método das diferenças finitas, o programa "CITATION" fornece alguns parâmetros tais como fator de multiplicação efetivo, concentrações de núclídeos, distribuição de fluxo de neutrons e a distribuição de densidade de potência que é o parâmetro a ser comparado com os dados experimentais levantados ao longo desse trabalho. O método utilizado consiste em dividir os eixos do reator em "meshs"(malhas) e calcular a densidade de potência nos pontos centrais de cada "mesh".

Com o objetivo de obter o mapeamento da densidade de potência relativa mais detalhada possível, o reator IPEN/MB-01 foi modelado em geometria tridimensional segundo as várias regiões descritas nas figuras 12 e 13 do capítulo 3. As barras de controle foram consideradas paralelas e na posição crítica de 59% inseridas.

As seções de choque em 4 grupos para cada região da modelagem do Reator IPEN/MB-01 foram obtidas com a metodologia comumente utilizada na Divisão de Física de Reatores do IPEN baseada no acoplamento:

NJOY / AMPX-II / HAMMER - TECHNION<sup>2</sup>

Os dados finais são transferidos para o programa CITATION para a análise final. Todos os cálculos foram efetuados a 20°C que é a temperatura do experimento a 1 W de potência.

A título de uma descrição simplificada do processo, o programa NJOY: efetua o pré-processamento dos dados nucleares a partir de bibliotecas básicas (no caso ENDFB-IV e JENDL-2), onde são geradas bibliotecas de dados nucleares pontuais e em multigrupo de energia, para posterior processamento nos sistemas AMPX-II e código celular HAMMER - TECHNION.

O programa AMPX-II tem a função de verificar a consistência dos dados, o cálculo de autoblindagem das ressonâncias resolvidas e organizar a biblioteca de saída segundo as energias das regiões térmica e eptérmica/rápido, para o HAMMER-TECHNION.

O código celular HAMMER - TECHNION, resolve a equação de transporte na célula estabelecendo os dados celulares homogêneos para entrada no CITATION onde se dá o processamento final do cálculo dos parâmetros nucleares.

A tabela 17 apresenta a densidade de potência relativa axial nas posições M14, M21, M27, J17, J20, J22, C22, C24 e ab27 obtidas com o CITATION. Os dados são normalizados consistentemente com os dados obtidos experimentalmente; ou seja pela densidade de potência máxima.



6.2 LEVANTAMENTO DOS DADOS VIA CÓDIGO CITATION

| comp.<br>ativo | POSIÇÃO NO NÚCLEO |         |         |         |          |          |         |         |         |
|----------------|-------------------|---------|---------|---------|----------|----------|---------|---------|---------|
| (mm)           | M14               | M21     | M27     | J17     | J20      | J22      | C22     | C24     | ab27    |
| 20             | 0.50355           | 0.50465 | 0.50053 | 0.50451 | 0.50691  | 0.50820  | 0.51385 | 0.51570 | 0.51169 |
| 40             | 0.56997           | 0.57144 | 0.57162 | 0.57271 | 0.57537  | 0.57671  | 0.58242 | 0.58401 | 0.58661 |
| 60             | 0.65057           | 0.65228 | 0.65266 | 0.65385 | 0.65686  | 0.65828  | 0.66438 | 0.66598 | 0.66889 |
| 80             | 0.72839           | 0.73032 | 0.73032 | 0.73200 | 0.73527  | 0.73686  | 0.74322 | 0.74482 | 0.74707 |
| 100            | 0.79864           | 0.80072 | 0.80043 | 0.80245 | 0.80589  | 0.80756  | 0.81397 | 0.81557 | 0.81719 |
| 120            | 0.85951           | 0.86167 | 0.86116 | 0.86343 | 0.86694  | 0.86855  | 0.87484 | 0.87627 | 0.87738 |
| 140            | 0.91014           | 0.91223 | 0.91169 | 0.91393 | 0.91733  | 0.91888  | 0.92460 | 0.92587 | 0.92646 |
| 160            | 0.94985           | 0.95177 | 0.95119 | 0.95335 | 0.95640  | 0.95780  | 0.96249 | 0.96339 | 0.96362 |
| 180            | 0.97823           | 0.97978 | 0.97921 | 0.98108 | 0.98351  | 0.98460  | 0.98783 | 0.98834 | 0.98827 |
| 200            | 0.99498           | 0.99597 | 0.99556 | 0.99674 | 0.99825  | 0.99885  | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 |
| 220            | 1.00000           | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000 | 1.00000  | 1.00000  | 0.99848 | 0.99792 | 0.99871 |
| 240            | 0.99346           | 0.99169 | 0.99271 | 0.99029 | 0.98785  | 0.98704  | 0.98227 | 0.98120 | 0.98455 |
| 260            | 0.97564           | 0.97071 | 0.97394 | 0.96555 | 0.95917  | 0.95735  | 0.94902 | 0.94757 | 0.95810 |
| 280            | 0.94730           | 0.93629 | 0.94440 | 0.91762 | 0.905795 | 0.90279  | 0.89013 | 0.88823 | 0.92043 |
| 300            | 0.91309           | 0.89314 | 0.90903 | 0.83566 | 0.82479  | 0.82087  | 0.79715 | 0.79374 | 0.87761 |
| 320            | 0.86167           | 0.82868 | 0.85609 | 0.70562 | 0.70036  | 0.69565  | 0.65587 | 0.64636 | 0.81623 |
| 340            | 0.81367           | 0.77319 | 0.80709 | 0.62891 | 0.61853  | 0.61319  | 0.57118 | 0.56096 | 0.76106 |
| 360            | 0.75957           | 0.71651 | 0.75244 | 0.57609 | 0.56011  | 0.55424  | 0.51336 | 0.50419 | 0.70112 |
| 380            | 0.70308           | 0.66064 | 0.69577 | 0.52913 | 0.51103  | 0.504868 | 0.46492 | 0.45635 | 0.64088 |
| 400            | 0.64487           | 0.60458 | 0.63763 | 0.48334 | 0.46489  | 0.45867  | 0.42011 | 0.41196 | 0.58114 |
| 420            | 0.58527           | 0.54799 | 0.57841 | 0.43758 | 0.41975  | 0.41372  | 0.37720 | 0.36946 | 0.52226 |
| 440            | 0.52464           | 0.49079 | 0.51833 | 0.39159 | 0.37498  | 0.36931  | 0.33546 | 0.32823 | 0.46438 |
| 460            | 0.46328           | 0.43319 | 0.45774 | 0.34546 | 0.33040  | 0.32525  | 0.29462 | 0.28801 | 0.40766 |
| 480            | 0.40205           | 0.37598 | 0.39744 | 0.29965 | 0.28647  | 0.28193  | 0.27023 | 0.24904 | 0.35249 |
| 500            | 0.34416           | 0.32205 | 0.34000 | 0.25668 | 0.24566  | 0.24178  | 0.22961 | 0.21331 | 0.30058 |
| 520            | 0.30226           | 0.28396 | 0.29507 | 0.22752 | 0.21913  | 0.21583  | 0.19753 | 0.19054 | 0.25861 |

Tabela 17: Resultados da densidade de potência relativa normalizada via código CITATION.

### 6.3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO CAPÍTULO 6

- /1/ **FOWLER T. B., VONDY D. R.**, "Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION", ORNL - TM - 2496, Jul./1972.
- /2/ **SANTOS A e FERREIRA C. R.**, "Elaboração de uma interface AMPX-II / HAMMER - TECNHION", Anais do III Congresso Geral de Energia Nuclear - III CGEN, agosto de 1990, R.J - Brasil.

## **CAPÍTULO 7: ANÁLISE COMPARATIVA**

### **7.1 INTRODUÇÃO**

### **7.2 RESULTADOS COMPARATIVOS CALCULADOS X EXPERIMENTAIS**

#### **7.2.1 DISTRIBUIÇÃO AXIAL DA DENSIDADE DE POTÊNCIA RELATIVA**

#### **7.2.2 DISTRIBUIÇÃO RADIAL DA DENSIDADE DE POTÊNCIA RELATIVA**

## 7.1 INTRODUÇÃO

Com objetivo de determinar possíveis desvios e margens de incerteza, faz-se necessário uma comparação dos resultados obtidos via cálculo (CITATION) e os resultados obtidos experimentalmente. Esta avaliação é de fundamental importância pois vem validar a metodologia de cálculo atualmente utilizada pela Divisão de Física de Reatores na determinação da Densidade de Potência em cálculos de parâmetros neutrônicos.

Estão apresentados os resultados comparativos das posições M14, M21, M27, J17, J20, J22, C22, C24 e ab27 nas tabelas de 18 a 26 e figuras 28 a 36.

A razão C/E significa a divisão dos resultados calculados pelos resultados experimentais, proporcionando uma avaliação do desempenho da metodologia de cálculo atualmente utilizada.

Nas posições M14, M21 e M27 as curvas apresentam um aspecto cossenoidal, indicando a pouca perturbação dos elementos de controle. Como desvio máximo comparativo entre os resultados calculados e os resultados experimentais observamos a ordem de 9,6% na posição M21 no comprimento ativo (cota) 500mm. Isso se deve ao fato de esta posição estar próximo ao refletor e o código computacional não considerar adequadamente as características neutrônicas nesta região.

Para as posições J17, J20, J22, C22, C24, as curvas evidenciam o deslocamento da densidade de potência provocado pelo efeito do elemento de controle. Nestas posições observamos o desvio máximo da ordem de 8,08%, também na cota 500mm devido as mesmas considerações anteriormente mencionadas.

Para a posição ab27, caso mais crítico devido ao duplo efeito ou seja, a vareta estar localizada na interface núcleo - refletor e o maior desvio ser encontrado na posição superior ativa da vareta.

A título ilustrativo estão apresentados na tabela 27, os resultados da distribuição radial da densidade de potência relativa comparando os valores calculados com os experimentais. Para a distribuição os resultados foram normalizados pelo valor correspondente da posição M14 (região central) na cota 260mm do comprimento ativo da vareta combustível. Para uma avaliação mais apurada da distribuição radial faz-se necessário o levantamento de várias outras posições ao longo do núcleo.

7.2 RESULTADOS COMPARATIVOS CALCULADOS X EXPERIMENTAIS

7.2.1 DISTRIBUIÇÃO AXIAL DA DENSIDADE DE POTÊNCIA RELATIVA

**POSICÃO M14**

| Posição.(mm) | CITATION | Experimental | Incerteza (1σ) | C/E     |
|--------------|----------|--------------|----------------|---------|
| 20.0         | 0.50355  | 0.52780      | 0.32E-02       | 0.95405 |
| 40.0         | 0.56997  | 0.59060      | 0.35E-02       | 0.96506 |
| 60.0         | 0.65057  | 0.66863      | 0.39E-02       | 0.97300 |
| 80.0         | 0.72839  | 0.73814      | 0.42E-02       | 0.98679 |
| 100.0        | 0.79864  | 0.80820      | 0.45E-02       | 0.98817 |
| 120.0        | 0.85951  | 0.86785      | 0.48E-02       | 0.99039 |
| 140.0        | 0.91014  | 0.92202      | 0.51E-02       | 0.98712 |
| 160.0        | 0.94985  | 0.95195      | 0.53E-02       | 0.99779 |
| 180.0        | 0.97823  | 0.97763      | 0.54E-02       | 1.00062 |
| 200.0        | 0.99498  | 0.99804      | 0.55E-02       | 0.99693 |
| 220.0        | 1.00000  | 0.99929      | 0.56E-02       | 1.00071 |
| 240.0        | 0.99346  | 1.00000      | 0.56E-02       | 0.99346 |
| 260.0        | 0.97564  | 0.97864      | 0.56E-02       | 0.99693 |
| 280.0        | 0.94730  | 0.94481      | 0.55E-02       | 1.00263 |
| 300.0        | 0.91309  | 0.92058      | 0.54E-02       | 0.99187 |
| 320.0        | 0.86167  | 0.86828      | 0.52E-02       | 0.99238 |
| 340.0        | 0.81367  | 0.81438      | 0.50E-02       | 0.99912 |
| 360.0        | 0.75957  | 0.77714      | 0.49E-02       | 0.97739 |
| 380.0        | 0.70308  | 0.71747      | 0.47E-02       | 0.97994 |
| 400.0        | 0.64487  | 0.65697      | 0.44E-02       | 0.98159 |
| 420.0        | 0.58527  | 0.60324      | 0.42E-02       | 0.97021 |
| 440.0        | 0.52464  | 0.54523      | 0.40E-02       | 0.96223 |
| 460.0        | 0.46328  | 0.47799      | 0.37E-02       | 0.96923 |
| 480.0        | 0.40205  | 0.42053      | 0.34E-02       | 0.95606 |
| 500.0        | 0.34416  | 0.36355      | 0.32E-02       | 0.94667 |
| 520.0        | 0.30226  | 0.32035      | 0.30E-02       | 0.94352 |

**Tabela 18:Resultados calculados e experimentais, posição M14.**



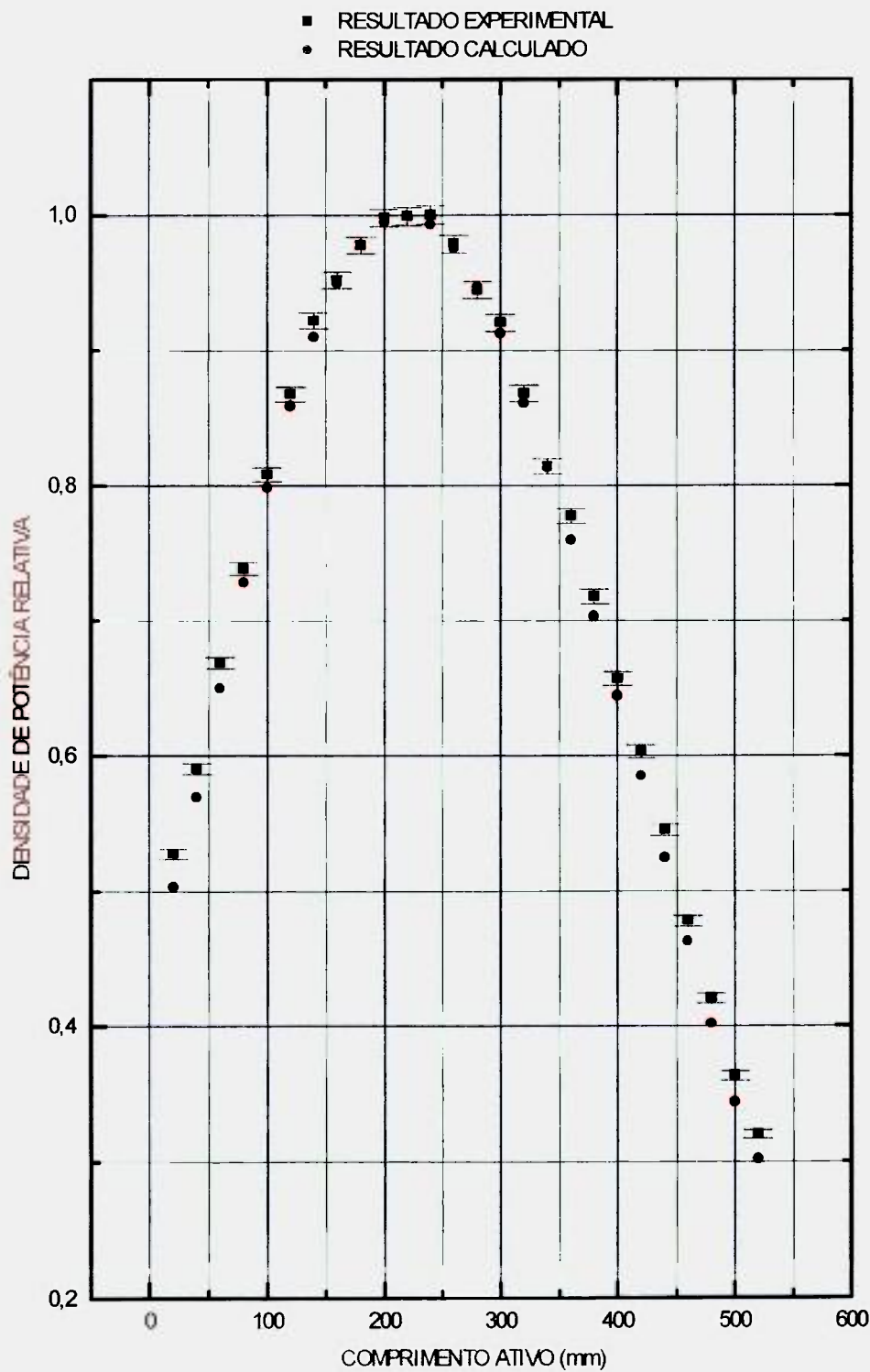


Figura 28:Gráfico comparativo calculado X experimental, posição M14.

**POSIÇÃO M21**

| Posição (mm) | CITATION | Experimental | Incerteza (1σ) | C/E     |
|--------------|----------|--------------|----------------|---------|
| 20.0         | 0.50465  | 0.51267      | 0.32E-02       | 0.98435 |
| 40.0         | 0.57144  | 0.56584      | 0.35E-02       | 1.00990 |
| 60.0         | 0.65228  | 0.64247      | 0.38E-02       | 1.01526 |
| 80.0         | 0.73032  | 0.72031      | 0.42E-02       | 1.01390 |
| 100.0        | 0.80072  | 0.79279      | 0.46E-02       | 1.01000 |
| 120.0        | 0.86167  | 0.85472      | 0.49E-02       | 1.00814 |
| 140.0        | 0.91223  | 0.90634      | 0.51E-02       | 1.00650 |
| 160.0        | 0.95177  | 0.93848      | 0.53E-02       | 1.01416 |
| 180.0        | 0.97978  | 0.97462      | 0.55E-02       | 1.00529 |
| 200.0        | 0.99597  | 1.00000      | 0.57E-02       | 0.99597 |
| 220.0        | 1.00000  | 0.99810      | 0.57E-02       | 1.00190 |
| 240.0        | 0.99169  | 0.99832      | 0.57E-02       | 0.99336 |
| 260.0        | 0.97071  | 0.97199      | 0.57E-02       | 0.99868 |
| 280.0        | 0.93629  | 0.95043      | 0.56E-02       | 0.98542 |
| 300.0        | 0.89314  | 0.90669      | 0.55E-02       | 0.98507 |
| 320.0        | 0.82868  | 0.85202      | 0.53E-02       | 0.97261 |
| 340.0        | 0.77319  | 0.79460      | 0.50E-02       | 0.97305 |
| 360.0        | 0.71651  | 0.73685      | 0.48E-02       | 0.97240 |
| 380.0        | 0.66064  | 0.68782      | 0.46E-02       | 0.96048 |
| 400.0        | 0.60457  | 0.62683      | 0.44E-02       | 0.96449 |
| 420.0        | 0.54799  | 0.57494      | 0.42E-02       | 0.95313 |
| 440.0        | 0.49079  | 0.52136      | 0.40E-02       | 0.94137 |
| 460.0        | 0.43319  | 0.45998      | 0.37E-02       | 0.94175 |
| 480.0        | 0.37593  | 0.41345      | 0.35E-02       | 0.90925 |
| 500.0        | 0.32205  | 0.35629      | 0.32E-02       | 0.90391 |
| 520.0        | 0.28396  | 0.30445      | 0.30E-02       | 0.93268 |

**Tabela 19:Resultados calculados e experimentais, posição M21.**

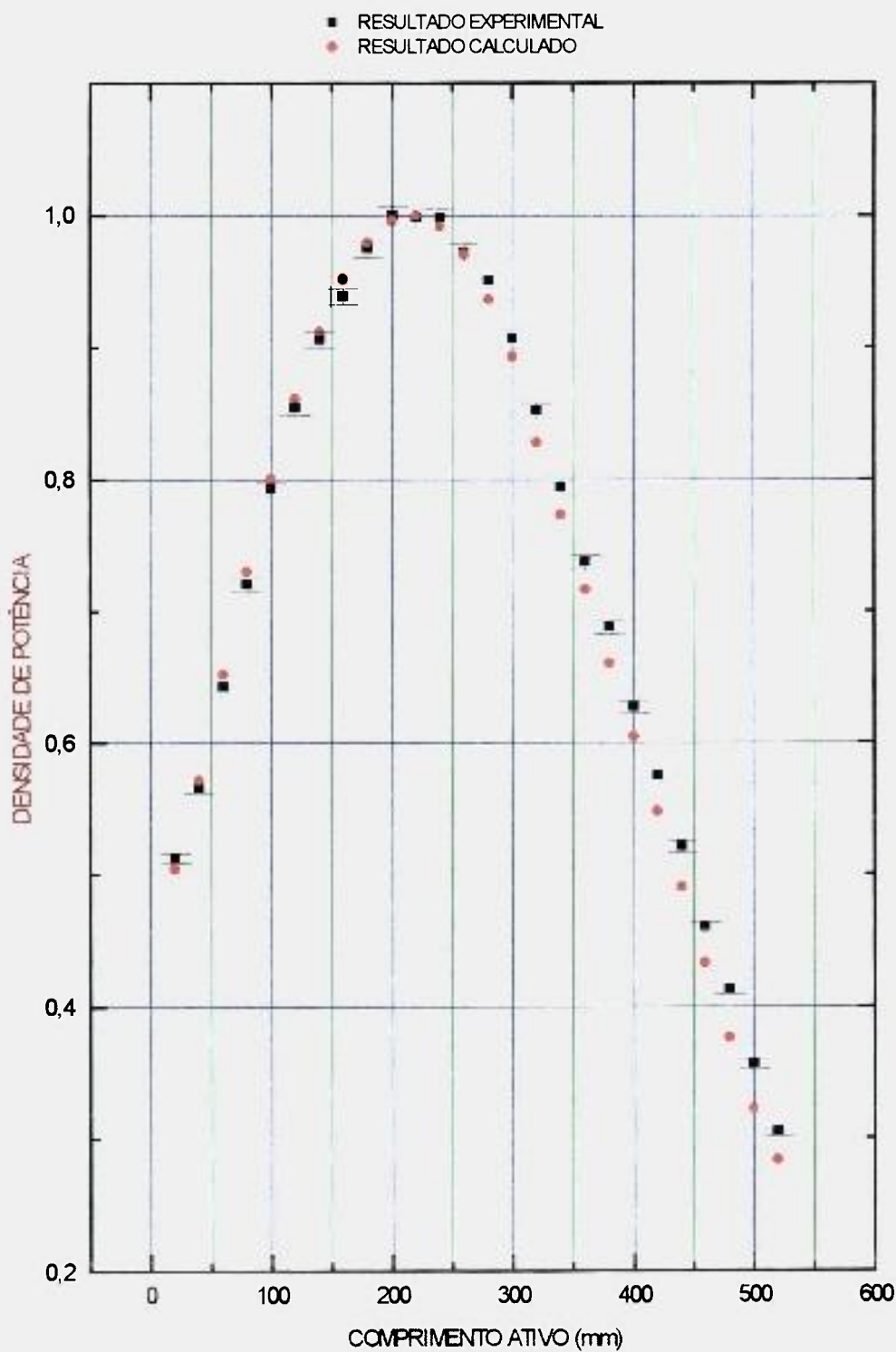


Figura 29:Gráfico comparativo calculado X experimental, posição M21.

**POSICÃO M27**

| Posição.(mm) | CITATION | Experimental | Incerteza ( $1\sigma$ ) | C/E     |
|--------------|----------|--------------|-------------------------|---------|
| 20.0         | 0.50053  | 0.51716      | 0.35E-02                | 0.96785 |
| 40.0         | 0.57164  | 0.58115      | 0.38E-02                | 0.98361 |
| 60.0         | 0.65266  | 0.65684      | 0.42E-02                | 0.99362 |
| 80.0         | 0.73032  | 0.73305      | 0.46E-02                | 0.99627 |
| 100.0        | 0.80043  | 0.81093      | 0.50E-02                | 0.98705 |
| 120.0        | 0.86116  | 0.86596      | 0.53E-02                | 0.99446 |
| 140.0        | 0.91169  | 0.90939      | 0.56E-02                | 1.00253 |
| 160.0        | 0.95119  | 0.94976      | 0.58E-02                | 1.00150 |
| 180.0        | 0.97921  | 0.98046      | 0.60E-02                | 0.99872 |
| 200.0        | 0.99556  | 0.99464      | 0.61E-02                | 1.00093 |
| 220.0        | 1.00000  | 1.00000      | 0.62E-02                | 1.00000 |
| 240.0        | 0.99271  | 0.99086      | 0.62E-02                | 1.00187 |
| 260.0        | 0.97394  | 0.97273      | 0.61E-02                | 1.00125 |
| 280.0        | 0.94440  | 0.94283      | 0.60E-02                | 1.00167 |
| 300.0        | 0.90903  | 0.90039      | 0.59E-02                | 1.00057 |
| 320.0        | 0.85609  | 0.85862      | 0.57E-02                | 0.99705 |
| 340.0        | 0.80709  | 0.81319      | 0.56E-02                | 0.99249 |
| 360.0        | 0.75244  | 0.76066      | 0.53E-02                | 0.98919 |
| 380.0        | 0.69577  | 0.70441      | 0.51E-02                | 0.98773 |
| 400.0        | 0.63763  | 0.64936      | 0.49E-02                | 0.98194 |
| 420.0        | 0.57841  | 0.59465      | 0.47E-02                | 0.97269 |
| 440.0        | 0.51833  | 0.53961      | 0.44E-02                | 0.96055 |
| 460.0        | 0.45774  | 0.47789      | 0.41E-02                | 0.95784 |
| 480.0        | 0.39744  | 0.42064      | 0.38E-02                | 0.94485 |
| 500.0        | 0.34000  | 0.35667      | 0.35E-02                | 0.95328 |
| 520.0        | 0.29507  | 0.31801      | 0.33E-02                | 0.92786 |

**Tabela 20: Resultados calculados e experimentais, posição M27.**

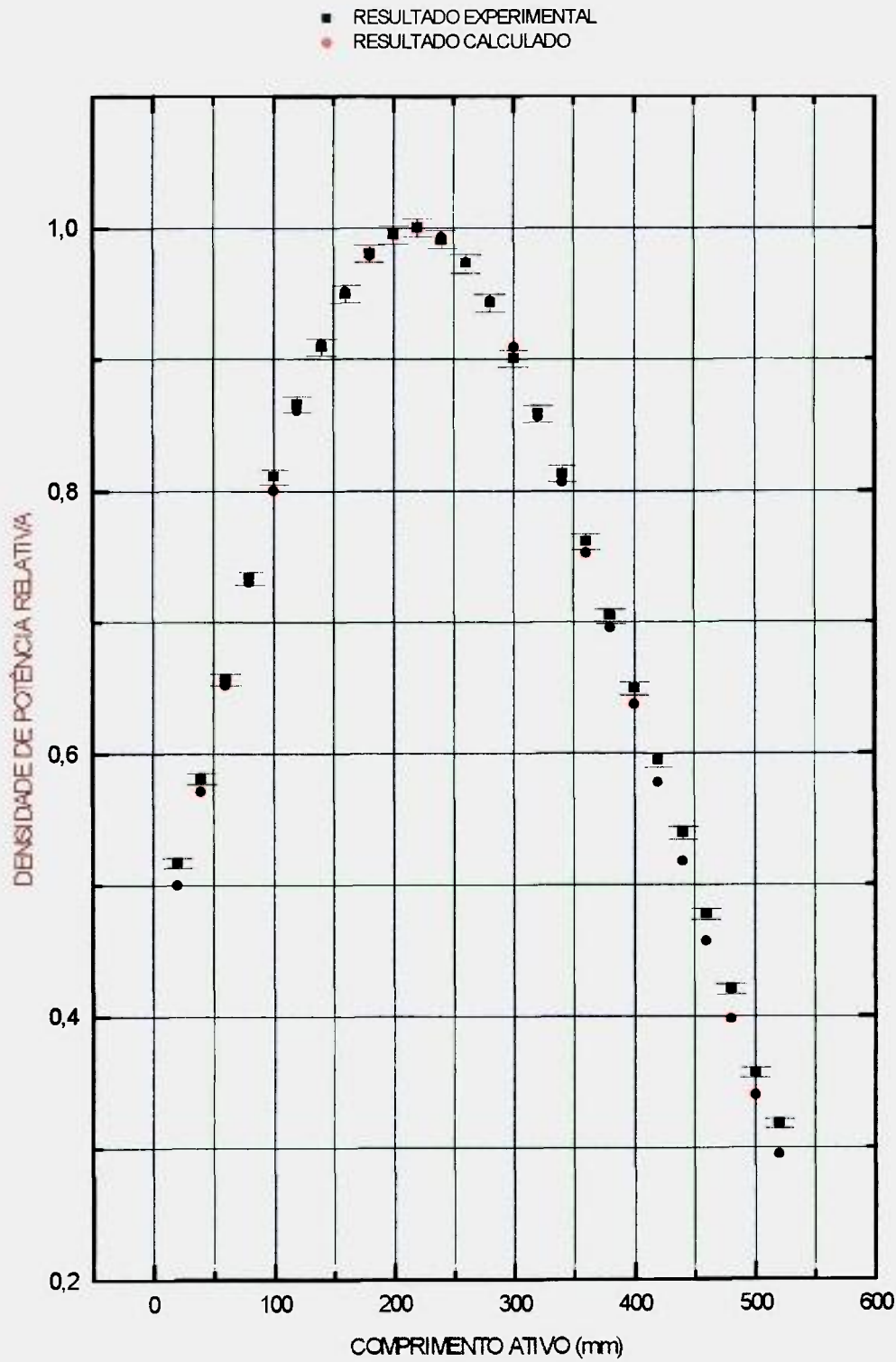


Figura 30:Gráfico comparativo calculado X experimental, posição M27



**POSIÇÃO J17**

| Posição (mm) | CITATION | Experimental | Incerteza(1σ) | C/E     |
|--------------|----------|--------------|---------------|---------|
| 20.0         | 0.50451  | 0.48460      | 0.29E-02      | 1.04108 |
| 40.0         | 0.57271  | 0.54347      | 0.31E-02      | 1.07356 |
| 60.0         | 0.65385  | 0.62256      | 0.35E-02      | 1.05026 |
| 80.0         | 0.73200  | 0.69327      | 0.38E-02      | 1.05131 |
| 100.0        | 0.80245  | 0.76484      | 0.42E-02      | 1.04918 |
| 120.0        | 0.86343  | 0.83032      | 0.45E-02      | 1.03988 |
| 140.0        | 0.91393  | 0.89411      | 0.48E-02      | 1.02216 |
| 160.0        | 0.95335  | 0.93093      | 0.49E-02      | 1.00548 |
| 180.0        | 0.98108  | 0.97574      | 0.52E-02      | 1.00548 |
| 200.0        | 0.99674  | 0.99181      | 0.53E-02      | 1.00497 |
| 220.0        | 1.00000  | 1.00000      | 0.53E-02      | 1.00000 |
| 240.0        | 0.99029  | 0.99338      | 0.53E-02      | 0.99689 |
| 260.0        | 0.96555  | 0.97363      | 0.53E-02      | 0.99170 |
| 280.0        | 0.91762  | 0.93236      | 0.52E-02      | 0.98419 |
| 300.0        | 0.83566  | 0.84984      | 0.49E-02      | 0.98332 |
| 320.0        | 0.70562  | 0.72148      | 0.44E-02      | 0.97802 |
| 340.0        | 0.62891  | 0.61987      | 0.40E-02      | 1.01458 |
| 360.0        | 0.57609  | 0.56631      | 0.38E-02      | 1.01727 |
| 380.0        | 0.52913  | 0.52515      | 0.36E-02      | 1.00757 |
| 400.0        | 0.48334  | 0.48148      | 0.35E-02      | 1.00386 |
| 420.0        | 0.43758  | 0.44297      | 0.33E-02      | 0.98783 |
| 440.0        | 0.39159  | 0.40223      | 0.31E-02      | 0.97356 |
| 460.0        | 0.34546  | 0.35913      | 0.30E-02      | 0.96193 |
| 480.0        | 0.29965  | 0.31697      | 0.28E-02      | 0.94537 |
| 500.0        | 0.25668  | 0.27923      | 0.26E-02      | 0.91924 |
| 520.0        | 0.22752  | 0.24305      | 0.24E-02      | 0.93613 |

**Tabela 21: Resultados calculados e experimentais, posição J17.**



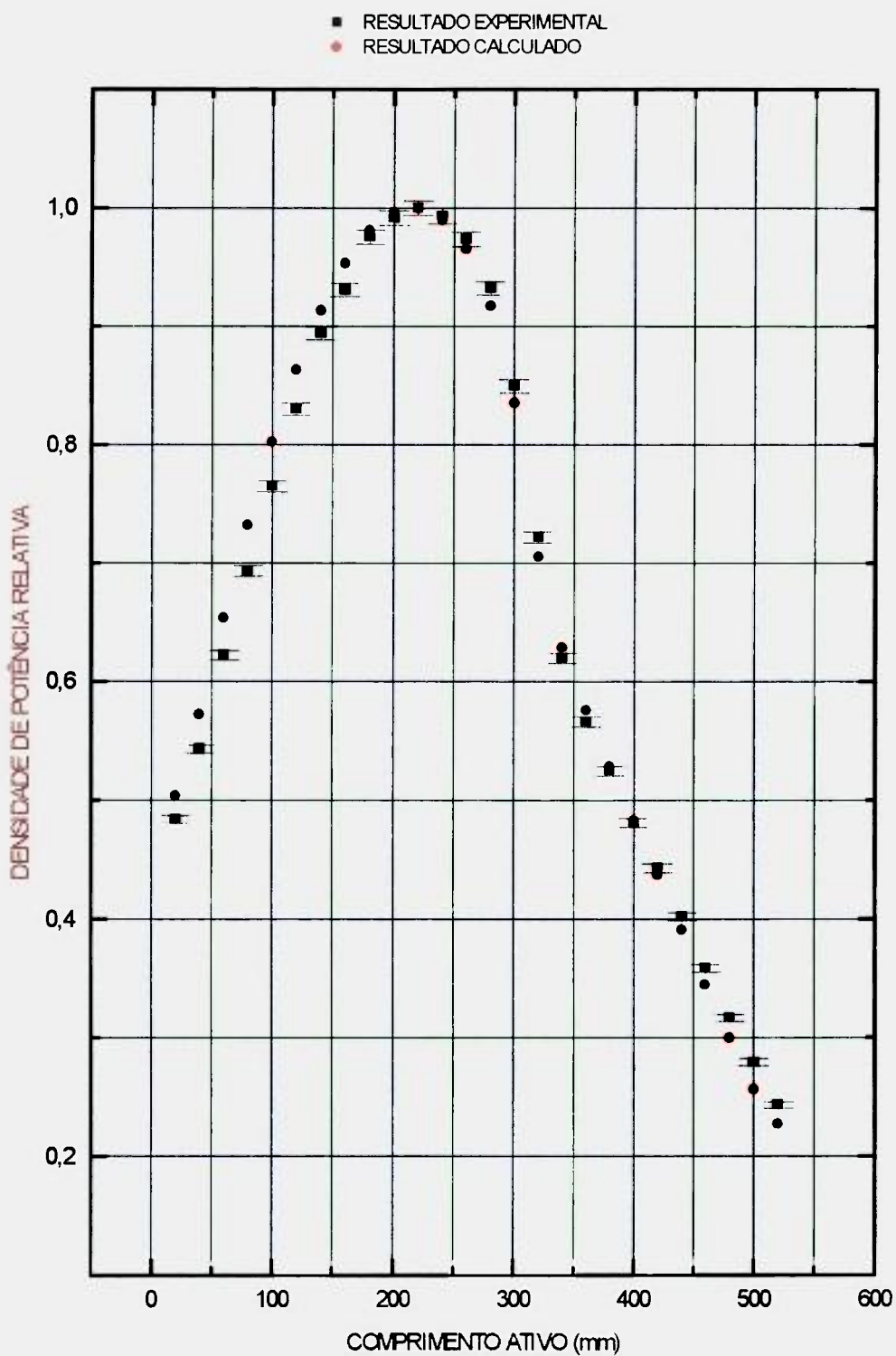


Figura 31: Gráfico comparativo calculado X experimental, posição J17.

**POSIÇÃO J20**

| Posição (mm) | CITATION | Experimental | Incerteza (1σ) | C/E     |
|--------------|----------|--------------|----------------|---------|
| 20.0         | 0.50691  | 0.50968      | 0.30E-02       | 0.99456 |
| 40.0         | 0.57537  | 0.56868      | 0.33E-02       | 1.01175 |
| 60.0         | 0.65686  | 0.64405      | 0.36E-02       | 1.02560 |
| 80.0         | 0.73527  | 0.71692      | 0.40E-02       | 1.02560 |
| 100.0        | 0.80589  | 0.79269      | 0.43E-02       | 1.01665 |
| 120.0        | 0.86694  | 0.85158      | 0.46E-02       | 1.01803 |
| 140.0        | 0.91733  | 0.89738      | 0.48E-02       | 1.02223 |
| 160.0        | 0.95640  | 0.94494      | 0.51E-02       | 1.01213 |
| 180.0        | 0.98351  | 0.98614      | 0.53E-02       | 0.99733 |
| 200.0        | 0.99825  | 0.99370      | 0.53E-02       | 1.00457 |
| 220.0        | 1.00000  | 1.00000      | 0.54E-02       | 1.00000 |
| 240.0        | 0.98785  | 0.98657      | 0.54E-02       | 1.00130 |
| 260.0        | 0.95917  | 0.96393      | 0.53E-02       | 0.99506 |
| 280.0        | 0.90579  | 0.91701      | 0.52E-02       | 0.98777 |
| 300.0        | 0.82479  | 0.82490      | 0.48E-02       | 0.99986 |
| 320.0        | 0.70036  | 0.69634      | 0.43E-02       | 1.00577 |
| 340.0        | 0.61853  | 0.60499      | 0.40E-02       | 1.02238 |
| 360.0        | 0.56011  | 0.54006      | 0.37E-02       | 1.03711 |
| 380.0        | 0.51103  | 0.50315      | 0.36E-02       | 1.01567 |
| 400.0        | 0.46489  | 0.45954      | 0.34E-02       | 1.01165 |
| 420.0        | 0.41975  | 0.41214      | 0.32E-02       | 1.01848 |
| 440.0        | 0.37498  | 0.37245      | 0.31E-02       | 1.00679 |
| 460.0        | 0.33040  | 0.33197      | 0.29E-02       | 0.99528 |
| 480.0        | 0.28647  | 0.29501      | 0.27E-02       | 0.97107 |
| 500.0        | 0.24566  | 0.24792      | 0.25E-02       | 0.99088 |
| 520.0        | 0.21913  | 0.22026      | 0.23E-02       | 0.99490 |

**Tabela 22: Resultados calculados e experimentais, posição J20.**

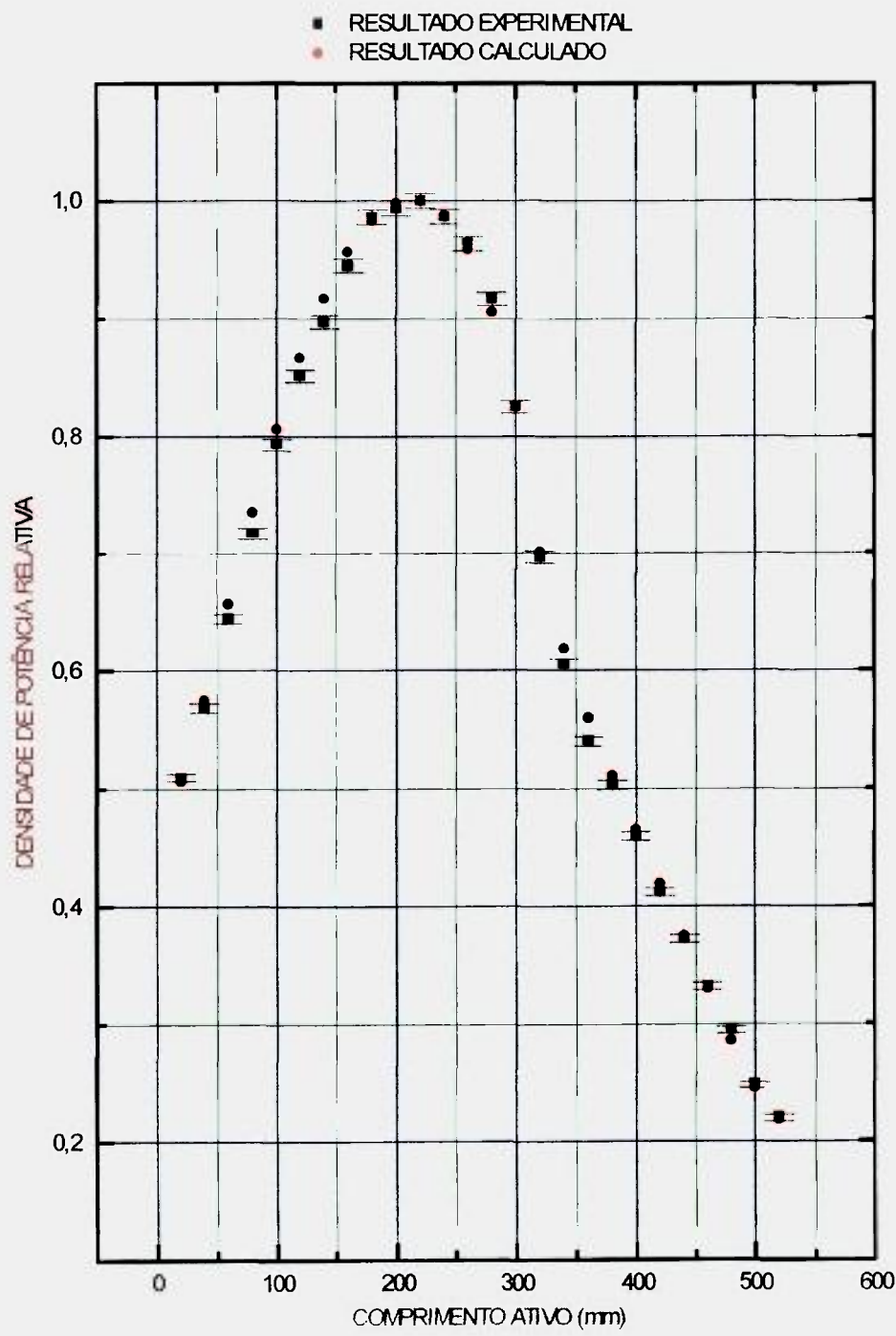


Figura 32:Gráfico comparativo calculado X experimental, posição J20.

**POSIÇÃO J22**

| Posição (mm) | CITATION | Experimental | Incerteza(1σ) | C/E     |
|--------------|----------|--------------|---------------|---------|
| 20.0         | 0.50691  | 0.50968      | 0.30E-02      | 0.99456 |
| 40.0         | 0.57537  | 0.56869      | 0.33E-02      | 1.01175 |
| 60.0         | 0.65686  | 0.64405      | 0.36E-02      | 1.01989 |
| 80.0         | 0.73527  | 0.71692      | 0.40E-02      | 1.02560 |
| 100.0        | 0.80589  | 0.79269      | 0.43E-02      | 1.01668 |
| 120.0        | 0.86694  | 0.85158      | 0.46E-02      | 1.01803 |
| 140.0        | 0.91733  | 0.89738      | 0.48E-02      | 1.02223 |
| 160.0        | 0.95640  | 0.94494      | 0.51E-02      | 1.01213 |
| 180.0        | 0.98351  | 0.98614      | 0.53E-02      | 0.99733 |
| 200.0        | 0.99825  | 0.99370      | 0.53E-02      | 1.00457 |
| 220.0        | 1.00000  | 1.00000      | 0.54E-02      | 1.00000 |
| 240.0        | 0.98785  | 0.98657      | 0.54E-02      | 1.00130 |
| 260.0        | 0.95917  | 0.96393      | 0.53E-02      | 0.99506 |
| 280.0        | 0.90579  | 0.91701      | 0.52E-02      | 0.98777 |
| 300.0        | 0.82479  | 0.82490      | 0.48E-02      | 0.99986 |
| 320.0        | 0.70036  | 0.69634      | 0.43E-02      | 1.00577 |
| 340.0        | 0.61853  | 0.60499      | 0.40E-02      | 1.02238 |
| 360.0        | 0.56011  | 0.54006      | 0.37E-02      | 1.03711 |
| 380.0        | 0.51103  | 0.50315      | 0.36E-02      | 1.01567 |
| 400.0        | 0.46489  | 0.45954      | 0.34E-02      | 1.01165 |
| 420.0        | 0.41975  | 0.41214      | 0.32E-02      | 1.01848 |
| 440.0        | 0.37498  | 0.37245      | 0.31E-02      | 1.00679 |
| 460.0        | 0.33040  | 0.33197      | 0.29E-02      | 0.99528 |
| 480.0        | 0.28647  | 0.29501      | 0.27E-02      | 0.97107 |
| 500.0        | 0.24566  | 0.24792      | 0.25E-02      | 0.99088 |
| 520.0        | 0.21913  | 0.22026      | 0.23E-02      | 0.99490 |

**Tabela 23: Resultados calculados e experimentais, posição J22.**

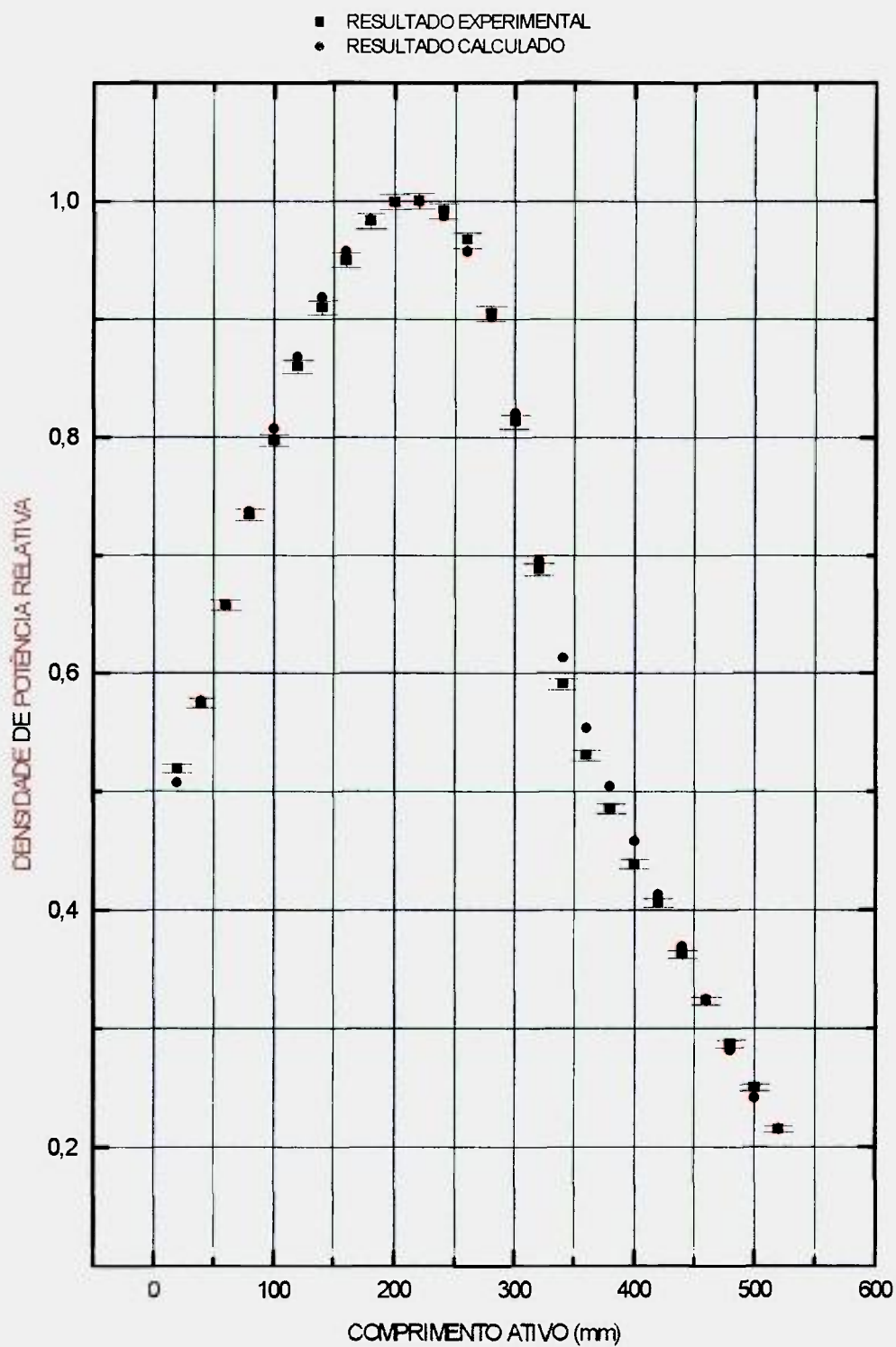


Figura 33:Gráfico comparativo calculado X experimental, posição J22.



POSIÇÃO C22

| Posição (mm) | CITATION | Experimental | Incerteza(1σ) | C/E      |
|--------------|----------|--------------|---------------|----------|
| 20.0         | 0.51385  | 0.52541      | 0.42E-02      | 0.97801  |
| 40.0         | 0.58242  | 0.58613      | 0.47E-02      | 0.993689 |
| 60.0         | 0.66438  | 0.65986      | 0.51E-02      | 1.00685  |
| 80.0         | 0.74322  | 0.72819      | 0.56E-02      | 1.02064  |
| 100.0        | 0.81397  | 0.80034      | 0.60E-02      | 1.01702  |
| 120.0        | 0.87484  | 0.86500      | 0.64E-02      | 1.01138  |
| 140.0        | 0.92460  | 0.91232      | 0.68E-02      | 1.01346  |
| 160.0        | 0.96249  | 0.95377      | 0.70E-02      | 1.00914  |
| 180.0        | 0.98782  | 0.97300      | 0.72E-02      | 1.01523  |
| 200.0        | 1.00000  | 1.00000      | 0.74E-02      | 1.00000  |
| 220.0        | 0.99848  | 0.99641      | 0.75E-02      | 1.00207  |
| 240.0        | 0.98227  | 0.98839      | 0.75E-02      | 0.99381  |
| 260.0        | 0.94902  | 0.96769      | 0.74E-02      | 0.98071  |
| 280.0        | 0.89013  | 0.90615      | 0.71E-02      | 0.98232  |
| 300.0        | 0.79715  | 0.81169      | 0.67E-02      | 0.98209  |
| 320.0        | 0.65587  | 0.68893      | 0.60E-02      | 0.95202  |
| 340.0        | 0.57118  | 0.57868      | 0.54E-02      | 0.98704  |
| 360.0        | 0.51336  | 0.51652      | 0.50E-02      | 0.99389  |
| 380.0        | 0.46492  | 0.46478      | 0.48E-02      | 1.00030  |
| 400.0        | 0.42011  | 0.42545      | 0.46E-02      | 0.98745  |
| 420.0        | 0.37720  | 0.38187      | 0.43E-02      | 0.98777  |
| 440.0        | 0.33546  | 0.34545      | 0.41E-02      | 0.97110  |
| 460.0        | 0.29462  | 0.30073      | 0.38E-02      | 0.97969  |
| 480.0        | 0.25492  | 0.27023      | 0.37E-02      | 0.94332  |
| 500.0        | 0.21846  | 0.22961      | 0.34E-02      | 0.95142  |
| 520.0        | 0.19515  | 0.19753      | 0.32E-02      | 0.98791  |

**Tabela 24: Resultados calculados e experimentais, posição C22.**



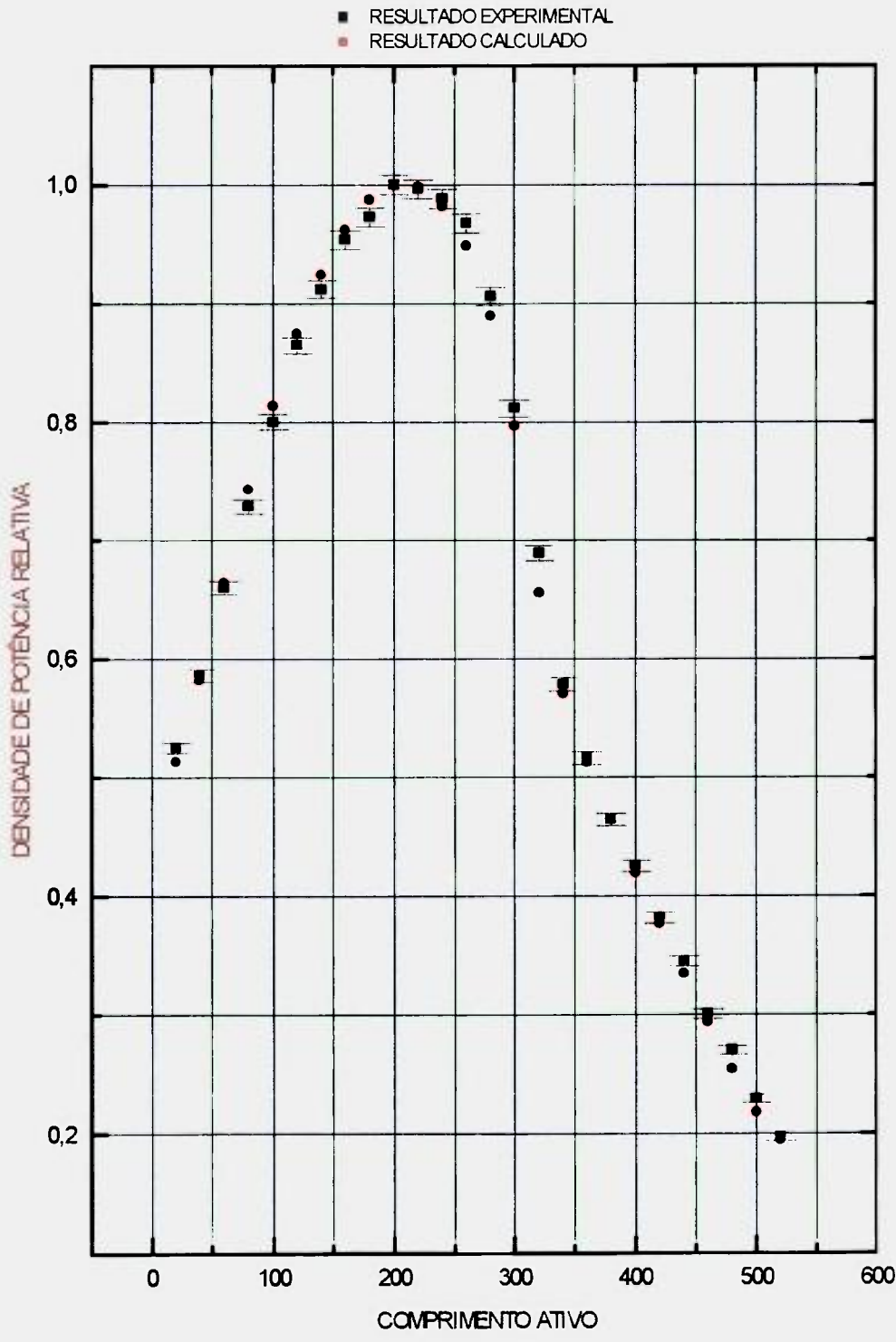


Figura 34:Gráfico comparativo calculado X experimental, posição C22.

**POSIÇÃO C24**

| Posição (mm) | CITATION | Experimental | Incerteza (1 $\sigma$ ) | C/E      |
|--------------|----------|--------------|-------------------------|----------|
| 20.0         | 0.51570  | 0.52350      | 0.44E-02                | 0.98510  |
| 40.0         | 0.58405  | 0.57507      | 0.48E-02                | 1.01562  |
| 60.0         | 0.66598  | 0.65774      | 0.53E-02                | 1.01253  |
| 80.0         | 0.74482  | 0.73057      | 0.58E-02                | 1.01950  |
| 100.0        | 0.81557  | 0.79941      | 0.63E-02                | 1.02021  |
| 120.0        | 0.87627  | 0.86034      | 0.67E-02                | 1.01851  |
| 140.0        | 0.92587  | 0.91687      | 0.71E-02                | 0.99644  |
| 160.0        | 0.96339  | 0.96683      | 0.74E-02                | 0.99644  |
| 180.0        | 0.98834  | 0.98164      | 0.76E-02                | 1.00682  |
| 200.0        | 1.00000  | 1.00000      | 0.77E-02                | 1.00000  |
| 220.0        | 0.99792  | 0.99137      | 0.78E-02                | 1.00661  |
| 240.0        | 0.98120  | 0.98167      | 0.78E-02                | 0.99952  |
| 260.0        | 0.94757  | 0.95705      | 0.77E-02                | 0.99009  |
| 280.0        | 0.88823  | 0.90954      | 0.75E-02                | 0.97657  |
| 300.0        | 0.79374  | 0.81340      | 0.69E-02                | 0.97584  |
| 320.0        | 0.64636  | 0.66265      | 0.61E-02                | 0.97541  |
| 340.0        | 0.56096  | 0.55629      | 0.55E-02                | 1.00839  |
| 360.0        | 0.50419  | 0.49698      | 0.52E-02                | 1.01451  |
| 380.0        | 0.45635  | 0.45103      | 0.49E-02                | 1.011816 |
| 400.0        | 0.41196  | 0.41054      | 0.47E-02                | 1.00346  |
| 420.0        | 0.36946  | 0.37139      | 0.45E-02                | 0.99482  |
| 440.0        | 0.32823  | 0.33649      | 0.42E-02                | 0.97545  |
| 460.0        | 0.28801  | 0.29617      | 0.40E-02                | 0.97245  |
| 480.0        | 0.24904  | 0.25879      | 0.37E-02                | 0.96231  |
| 500.0        | 0.21331  | 0.22073      | 0.35E-02                | 0.96637  |
| 520.0        | 0.19054  | 0.19943      | 0.33E-02                | 0.95546  |

**Tabela 25: Resultados calculados e experimentais, posição C24.**

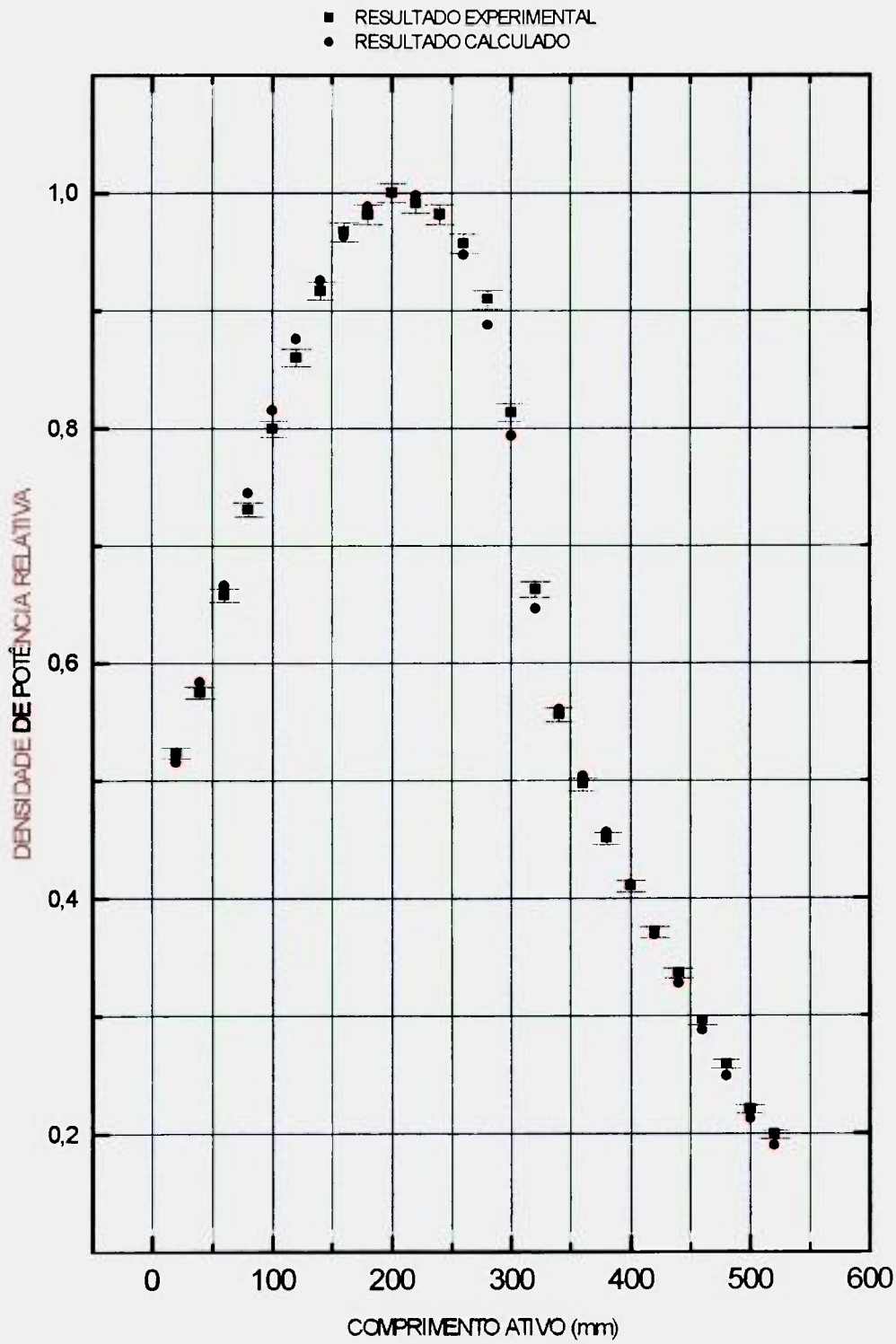


Figura 35:Gráfico comparativo calculado X experimental, posição C24.

POSICÃO ab27

| Posição (mm) | CITATION | Experimental | Incerteza (1σ) | C/E     |
|--------------|----------|--------------|----------------|---------|
| 20.0         | 0.51169  | 0.51220      | 0.47E-02       | 0.99900 |
| 40.0         | 0.58661  | 0.58339      | 0.52E-02       | 1.00552 |
| 60.0         | 0.66889  | 0.66389      | 0.57E-02       | 1.00752 |
| 80.0         | 0.74707  | 0.732568     | 0.62E-02       | 1.01981 |
| 100.0        | 0.81719  | 0.80139      | 0.67E-02       | 1.01972 |
| 120.0        | 0.87738  | 0.85929      | 0.72E-02       | 1.02105 |
| 140.0        | 0.92646  | 0.91314      | 0.76E-02       | 1.01459 |
| 160.0        | 0.96362  | 0.96567      | 0.79E-02       | 0.99787 |
| 180.0        | 0.98827  | 0.98275      | 0.81E-02       | 1.00561 |
| 200.0        | 1.00000  | 1.00000      | 0.83E-02       | 1.00000 |
| 220.0        | 0.99871  | 0.99655      | 0.83E-02       | 1.00217 |
| 240.0        | 0.98455  | 0.99065      | 0.84E-02       | 0.99384 |
| 260.0        | 0.95810  | 0.96189      | 0.82E-02       | 0.99606 |
| 280.0        | 0.92043  | 0.93369      | 0.81E-02       | 0.98579 |
| 300.0        | 0.87761  | 0.88231      | 0.79E-02       | 0.99467 |
| 320.0        | 0.81623  | 0.83400      | 0.76E-02       | 0.97869 |
| 340.0        | 0.76106  | 0.78993      | 0.74E-02       | 0.96345 |
| 360.0        | 0.70112  | 0.73252      | 0.71E-02       | 0.95713 |
| 380.0        | 0.64088  | 0.68443      | 0.68E-02       | 0.93637 |
| 400.0        | 0.58114  | 0.61537      | 0.64E-02       | 0.94437 |
| 420.0        | 0.52226  | 0.55772      | 0.61E-02       | 0.93642 |
| 440.0        | 0.46438  | 0.50736      | 0.57E-02       | 0.91529 |
| 460.0        | 0.40766  | 0.44608      | 0.54E-02       | 0.91387 |
| 480.0        | 0.35249  | 0.38852      | 0.50E-02       | 0.90727 |
| 500.0        | 0.30058  | 0.33865      | 0.46E-02       | 0.88760 |
| 520.0        | 0.25861  | 0.29348      | 0.43E-02       | 0.88119 |

Tabela 26: Resultados calculados e experimentais, posição ab27.

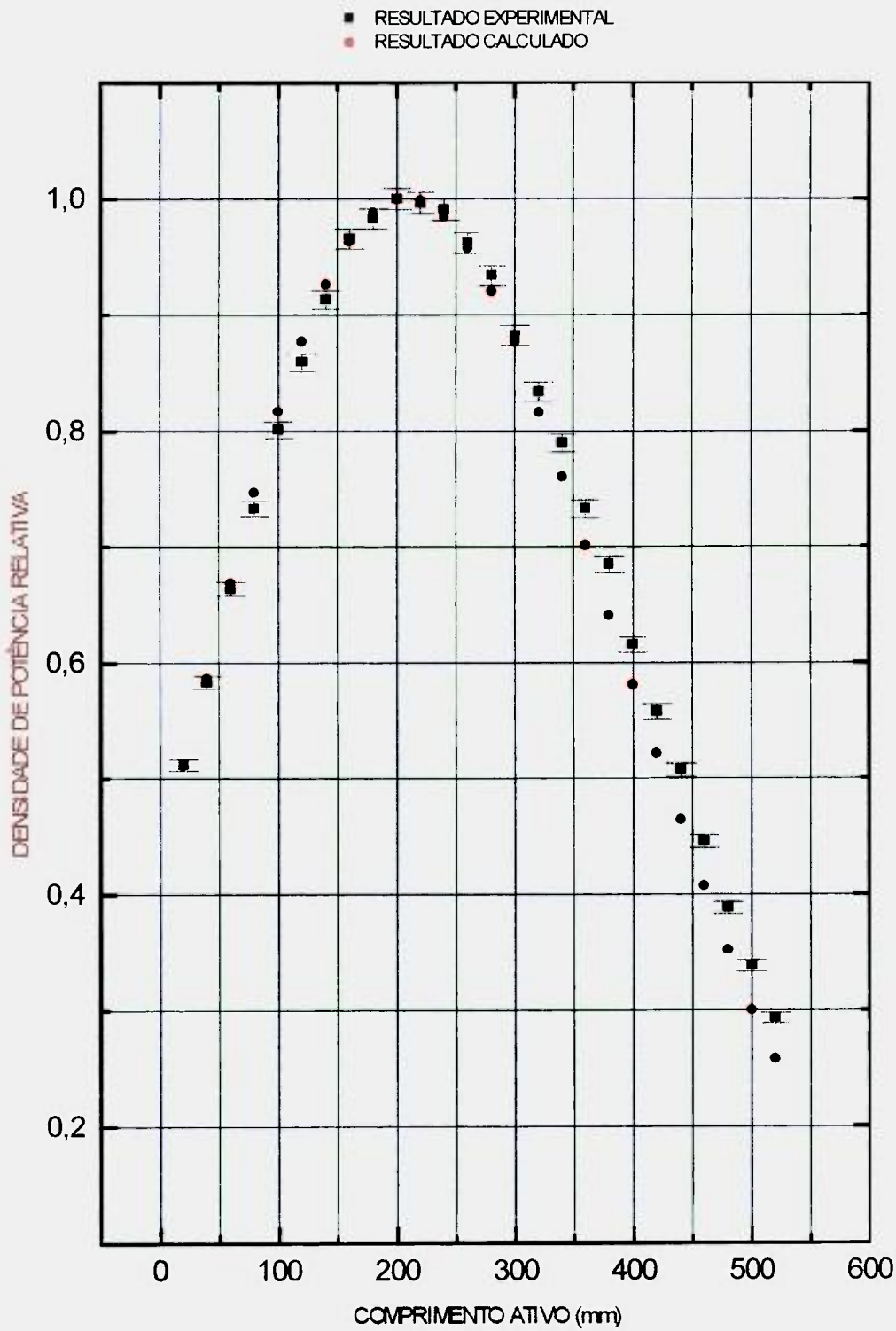


Figura 36:Gráfico comparativo calculado X experimental, posição ab27.



7.2.2 DISTRIBUIÇÃO RADIAL DA DENSIDADE DE POTÊNCIA RELATIVA

| COTA<br>(mm) | POSIÇÃO | EXPERIMENTAL<br>(CONTAGENS) | CALCULADO<br>(W/cm <sup>3</sup> ) | EXPERIMENTAL<br>NORMALIZADO | CALCULADO<br>NORMALIZADO | C/E  |
|--------------|---------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|--------------------------|------|
| 260          | M14     | 119.607                     | 0.24473E-4                        | 1.000                       | 1.000                    | 1.00 |
| 260          | M21     | 100.893                     | 0.20449E-4                        | 0.843                       | 0.835                    | 0.99 |
| 260          | M27     | 87.848                      | 0.15363E-4                        | 0.734                       | 0.628                    | 0.85 |
| 260          | J17     | 115.085                     | 0.24859E-4                        | 0.962                       | 1.016                    | 1.06 |
| 260          | J20     | 111.363                     | 0.21870E-4                        | 0.931                       | 0.894                    | 0.96 |
| 260          | J22     | 95.981                      | 0.19213E-4                        | 0.802                       | 0.785                    | 0.98 |
| 260          | C22     | 63.411                      | 0.12473E-4                        | 0.530                       | 0.510                    | 0.96 |
| 260          | C24     | 54.201                      | 0.10482E-4                        | 0.453                       | 0.428                    | 0.95 |
| 260          | ab27    | 48.736                      | 0.79371E-5                        | 0.407                       | 0.324                    | 0.80 |

Tabela 27:Distribuição radial da densidade de potência relativa

Na distribuição radial da densidade de potência relativa, apesar de estarmos considerando aqui um número reduzido de posições medidas, já foi possível observar uma compensação na distribuição próxima da região do fator de pico (razão da densidade de potência máxima pela densidade média de potência no núcleo do reator), posição J17. O fator de pico determinado via código computacional está na posição P11 e por simetria do núcleo equivaleria à posição I16, portanto bem próxima a posição J17 mencionada.

A posição AB27 cota 260mm em relação a posição M14 apresentou desvio de 20%, entretanto esse desvio deve ser maior na parte superior do núcleo devido ao desvio já encontrado em relação à forma axial (ver figura 36).



## **CAPÍTULO 8: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

### **8.1 CONCLUSÕES**

### **8.2 RECOMENDAÇÕES**

## 8.1 CONCLUSÕES

Os sistemas de movimentação e indicação de posicionamento da vareta combustível, o sistema de medida das contagens gama englobando o arranjo colimador e blindagem assim como toda a instrumentação eletrônica nuclear associada demonstraram consistência nos resultados possibilitando a implantação em caráter definitivo de todo aparato experimental junto ao Laboratório de Medidas Nucleares.

As incertezas experimentais foram de maneira geral pequenas ( $<1\%$ ), ou seja de excelente qualidade, qualificando esses resultados como padrão de comparação.

Os resultados comparativos entre os valores calculados via código computacional CITATION e os valores levantados experimentalmente foram bastante satisfatórios, demonstrando uma boa avaliação no desempenho da metodologia de cálculo utilizada para parâmetros neutrônicos.

Os maiores desvios apresentados entre resultados calculados e resultados experimentais foram localizados em posições próximas a interface núcleo-refletor devido ao fato do código computacional não considerar adequadamente as características neutrônicas nesta região, além disso observou-se que os maiores desvios encontram-se nas posições de comprimento ativo menos significativa em termos de densidade de potência na vareta combustível.

Foi possível observar claramente o efeito dos elementos de controle deslocando o perfil axial ao longo da região ativa da vareta combustível.

Em vista dos resultados positivos do trabalho realizado fica demonstrado a eficiência da metodologia de medida da densidade de potência relativa por varredura gama da vareta combustível constituindo assim mais uma técnica de medida disponível para medida de parâmetros neutrônicos na Divisão de Física de Reatores do IPEN/CNEN-SP.

## 8.2 RECOMENDAÇÕES

Como sequência do trabalho fica como sugestão a automação de todo sistema de medida de contagem, necessitando o desenvolvimento de uma interface entre o sistema de movimentação e indicação de posicionamento da vareta combustível e a instrumentação nuclear associada.

Uma vez a metodologia implantada, recomenda-se fazer o mapeamento da distribuição da densidade de potência relativa em um quadrante do núcleo do reator, determinando experimentalmente a posição exata do fator de pico.

Com isto, seria produtivo o levantamento da medida absoluta da densidade de potência em uma determinada posição do núcleo e por extrapolação determinar a distribuição da densidade de potência absoluta para todo o núcleo do Reator IPEN/MB-01.

## **APÊNDICE A**

A.1      **PROCESSAMENTO DE DADOS / FLUXOGRAMA**

A.2      **DESCRIÇÃO SIMPLIFICADA DOS PROGRAMAS**

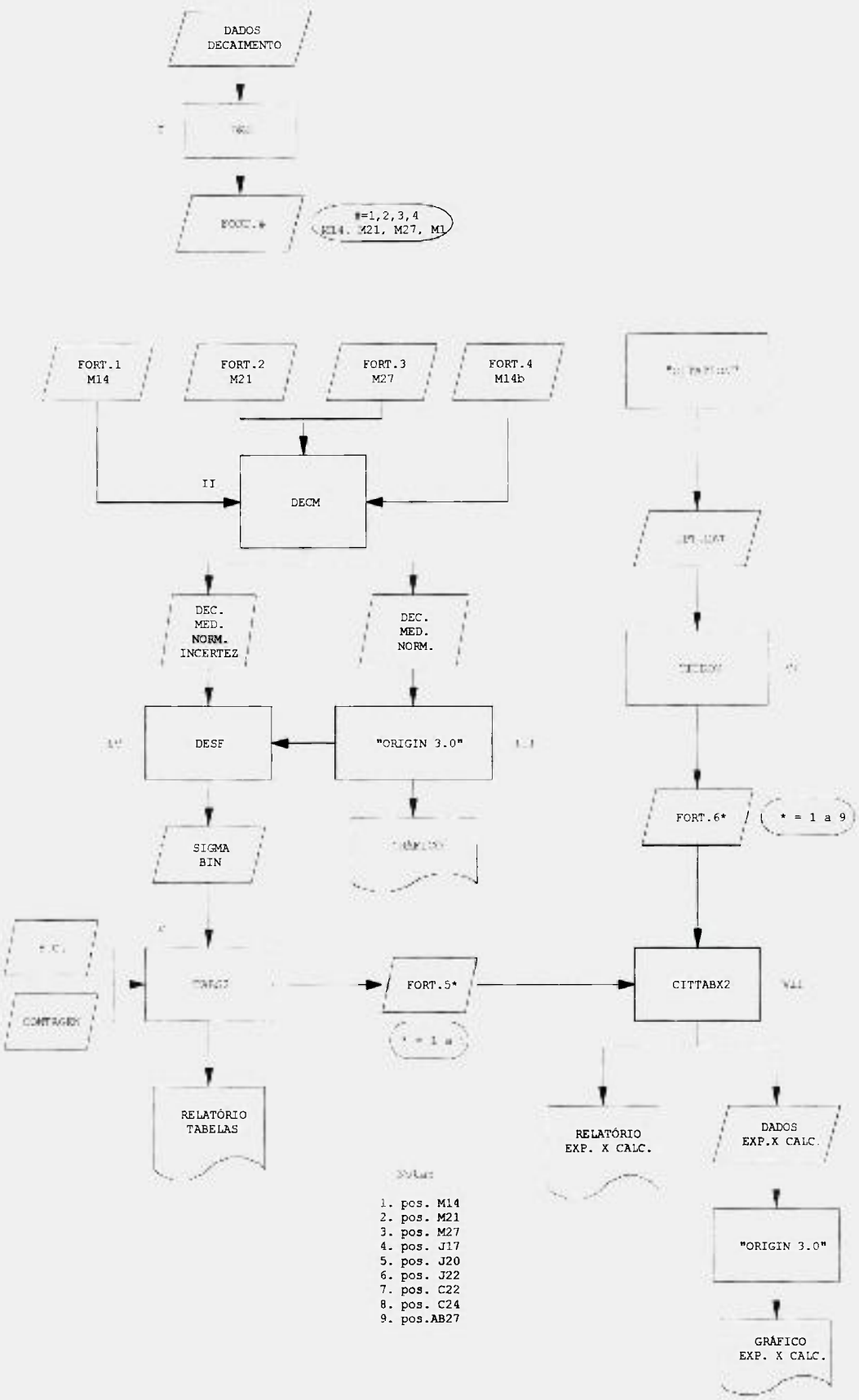
A.3      **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO APÊNDICE A**

### A.1.PROCESSAMENTO DE DADOS

Todo processamento dos dados englobando os resultados experimentais e os valores teóricos calculados via CITATION<sup>1</sup> se deu via programas computacionais desenvolvidos em linguagem FORTRAN-77 <sup>2,3</sup>.

Foram desenvolvidos 6 programas que realizaram funções desde a organização dos dados de decaimento radioativo até a confrontação final dos resultados da densidade de potência relativa via cálculo e os resultados experimentais.

FLUXOGRAMA





## A.2.DESCRICÃO SIMPLIFICADA DOS PROGRAMAS DESENVOLVIDOS

### **Programa I : DEC (Apêndice B1)**

Os dados da impressora são digitados neste programa e organizados em colunas (tempo X contagens).

### **Programa II : DECM (Apêndice B2)**

O programa DECM calcula a média das quatro posições, normaliza pelo valor máximo e calcula os respectivos desvios.

As saídas do DECM estão arranjadas em: tempo, decaimento normalizado e incerteza, sendo decimal a saída para o “Origin 3.0”/4/ e binário a saída para o programa DESF.

### **Programa III : “Origin Versão 3.0”**

É um programa matemático que faz o ajuste da curva de decaimento e fornece os parâmetros da equação.

### **Programa IV : DESF (Apêndice B3)**

Este programa calcula a incerteza do valor da função nos tempos das medidas relacionadas às respectivas posições da região ativa da vareta combustível. A saída do programa (SIGMA BIN) é gravada na forma binária e interligada ao programa TABS2.

### **Programa V : TABS2 (Apêndice B4)**

Este programa calcula a diferença das contagens após a irradiação e o valor do B.G. antes da operação. O resultado é dividido pelo valor da função no respectivo tempo.

Posteriormente é feita a normalização pelo valor máximo e o cálculo da incerteza total, gerando o arquivo FORT.5\* e o relatório dos resultados. O arquivo FORT.5\* está organizado em colunas: posição, valor normalizado e incerteza, para as nove posições (vide nota no fluxograma).

### **Programa VI : CITDD3 (Apêndice B5)**

Este programa lê o arquivo gerado pelo “Citation” com os valores teóricos (calculados) da densidade de potência, normaliza e reposiciona os resultados.

Obs.: As medidas experimentais foram levantadas da parte inferior do núcleo ativo para a parte superior, porém os valores calculados via “Citation” são gerados inversamente, ou seja da superior para a inferior, daí a necessidade do reposicionamento dos resultados teóricos.

### **Programa VII : CITTABX2 (Apêndice B6)**

Este programa faz a confrontação final dos resultados, gerando um relatório e os arquivos para o “Origin 3.0”, onde são plotados os gráficos comparativos (resultados experimentais X resultados calculados).

### A.3.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DO APÊNDICE A

- /1/    **FOWLER T. B., VONDY D. R.,** "Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION" , ORNL - TM - 2496, Jul./1972.
  
- /2/    **Sun Microsystems Inc.,** "Sun Fortran Reference Guide" , 1991.
  
- /3/    **Control Data Corporation,** "Fortran Version - 5.0 Reference Manual" , 11/86.
  
- /4/    **MICROCAL<sup>TM</sup> SOFTWARE INC.,** "Technical Graphics and Analysis in Windows" , User's Guide, 1995.

**APÊNDICE B**

|             |                         |
|-------------|-------------------------|
| APÊNDICE B1 | PROGRAMA I - DEC        |
| APÊNDICE B2 | PROGRAMA II - DECM      |
| APÊNDICE B3 | PROGRAMA IV - DESF      |
| APÊNDICE B4 | PROGRAMA V - TABS2      |
| APÊNDICE B5 | PROGRAMA VI - CITDD3    |
| APÊNDICE B6 | PROGRAMA VII - CITTABX2 |

## APÊNDICE B1: PROGRAMA I - DEC

## PROGRAM DEC

C

C     PROGRAMA PARA LEITURA DE DADOS DE DECAIMENTO

C

DIMENSION NV(500), NT(500), VNT(500)

DATA NV / 500 \* 0 / , IT / 40 /

C

C     LEITURA DE TEMPO INICIAL

C

READ(5,\*) NT(1)

C

C     PREPARO DE TABELA DE TEMPO

C

DO 10 I=2,500

NT(I) = NT(I-1) + IT

10 CONTINUE

C

C     LEITURA DE DADOS DECAIMENTO E CALCULO DE INCERTEZA

C

I = 1

20 READ(5,\*,END=30) NV(I)

VNT(I) = SQRT( FLOAT( NV(I) ) )

I = I + 1

GO TO 20

C

C     IMPRESSAO FINAL

C

30 N = I - 1

DO 60 I=1,N

```
WRITE(6,600) NT(I), NV(I), VNT(I)
```

```
60 CONTINUE
```

```
WRITE(6,*) N
```

```
C
```

```
STOP
```

```
C
```

```
600 FORMAT( 1X, 2I8, F9.2 )
```

```
C
```

```
END
```

## APÊNDICE B2: PROGRAMA II - DECM

## PROGRAM DECM

C

C PROGRAMA PARA CALCULAR MEDIA DAS CONTAGENS DE  
DECAIMENTO E INCERTEZAS

C DADOS m14, m21, m27, m14b - GERA ARQUIVO PARA decz/desf

C

DIMENSION NC(4), NP(4,500), NV(4,500), V(4,500), NM(500), VM(500)

DIMENSION Z(500), DZ(500)

DATA NC / 4 \* 0 /, NP / 2000 \* 0 /

DATA NV / 2000 \* 0 /, V / 2000 \* 0. /

C

C LEITURA DAS CONTAGENS E INCERTEZAS

C

WRITE(6,600)

READ(5,\*) NA

IF ( NA .GT. 4 ) GO TO 100

N = 0

J = 1

10 REWIND J

20 N = N + 1

READ(J,\*,END=30) NP(J,N), NV(J,N), V(J,N)

GO TO 20

30 NC(J) = N - 1

N = 0

J = J + 1

IF ( J .LE. NA ) GO TO 10

C

MIN = NC(1)

DO 40 I=2,NA



```
      IF ( MIN .LE. NC(I) ) GO TO 40
      MIN = NC(I)
40  CONTINUE
C
      WRITE(7,*) MIN
      DO 45 I=1,MIN
          WRITE(7,10) NP(1,I), ( NV(J,I), V(J,I), J=1,NA )
45  CONTINUE
C
C  CALCULO DAS MEDIAS E INCERTEZAS
C
      DO 60 I=1,MIN
          NM(I) = 0
          VM(I) = 0.
          DO 50 J=1,NA
              NM(I) = NM(I) + NV(J,I)
              VM(I) = VM(I) + V(J,I) * V(J,I)
50  CONTINUE
          NM(I) = NM(I) / NA
          VM(I) = SQRT( VM(I) ) / NA
60  CONTINUE
C
C  NORMALIZACAO
C
      AMAX = 0.
      DO 70 I=1,MIN
          IF ( FLOAT( NM(I) ) .LE. AMAX ) GO TO 70
          AMAX = FLOAT( NM(I) )
          SGA = VM(I)
70  CONTINUE
      WRITE(7,*) AMAX, SGA
```

C

C    CALCULO DE INCERTEZA NORMALIZADO

C

 $AMAX2 = AMAX * AMAX$      $SGA2 = SGA * SGA$      $T3 = SGA2 / AMAX2$ 

DO 80 I=1,MIN

 $Z(I) = FLOAT( NM(I) ) / AMAX$          $VNM2 = FLOAT( NM(I) * NM(I) )$          $T1 = VNM2 / AMAX2$          $T2 = ( VM(I) * VM(I) ) / VNM2$          $DZ(I) = T1 * ( T2 + T3 )$          $DZ(I) = SQRT( DZ(I) )$ 

80 CONTINUE

C

C    GRAVA ARQUIVO PARA PROGRAMA decz - desf

C    ARQUIVO 8 - TEMPO, NORMALIZADO E INCERTEZA

C

REWIND 8

DO 90 I=1,MIN

WRITE(7,700) NP(1,I), NM(I), VM(I), Z(I), DZ(I)

WRITE(8) NP(1,I), Z(I), DZ(I)

90 CONTINUE

ENDFILE 8

C

100 STOP

C

600 FORMAT( ' FORNECA NUMERO DE ARQUIVOS ( MAX. = 4 ) ' )

700 FORMAT( 1X, I7, I8, F10.3, F11.6, E12.4 )

710 FORMAT( 1X, I7, 4( I8, F10.3 ) )

C

END

## APÊNDICE B3: PROGRAMA IV - DESF

## PROGRAM DESF

```
C
C
C   PROGRAMA PARA PREPARAR INCERTEZAS DA FUNCAO AJUSTADA
C
C   PARAMETER(NT=423)
C
C   DIMENSION IT(NT), V(NT), DV(NT), VI(NT,NT), D(NT,6)
C   DIMENSION VS(6,6), DT(6,NT), P1(6,NT), P2(6,6), XT(6,6)
C   DIMENSION T(6), TT(6)
C
C   DATA A1 / 0.56638 /, A2 / 0.23983 /, A3 / 0.50298 /
C   DATA E1 / 0.00184 /, E2 / 0.00009 /, E3 / 0.0004 /
C
C   DO 10 I=1,NT
C       DO 5 J=1,NT
C           VI(I,J) = 0.
5   CONTINUE
C       DO 7 J=1,6
C           D(I,J) = 0.
7   CONTINUE
10  CONTINUE
C
C   LEITURA ARQUIVO 8 PREPARADO PELO PROGRAMA DECM ( decy )
C   TEMPO, DECAIMENTO NORMALIZADO E INCERTEZA
C
C   REWIND 8
C   DO 20 I=1,NT
C       READ(8) IT(I), V(I), DV(I)
20  CONTINUE
```

```
WRITE(6,*) NT
```

C

```
C   MONTAGEM DA MATRIZ VI
```

C

```
DO 30 I=1,NT
```

```
    VI(I,I) = 1. / ( DV(I) * DV(I) )
```

C

```
    VI(I,I) = 1.
```

```
30  CONTINUE
```

C

```
C   MONTAGEM DA MATRIZ D
```

C

```
DO 40 I=1,NT
```

```
    D(I,1) = EXP( - E1 * FLOAT( IT(I) ) )
```

```
    D(I,2) = EXP( - E2 * FLOAT( IT(I) ) )
```

```
    D(I,3) = EXP( - E3 * FLOAT( IT(I) ) )
```

```
    D(I,4) = - FLOAT( IT(I) ) * A1 * D(I,1)
```

```
    D(I,5) = - FLOAT( IT(I) ) * A2 * D(I,2)
```

```
    D(I,6) = - FLOAT( IT(I) ) * A3 * D(I,3)
```

```
40  CONTINUE
```

C

```
C   MONTAGEM DA MATRIZ DT - D TRANSPOSTA
```

C

```
DO 60 I=1,6
```

```
    DO 50 J=1,NT
```

```
        DT(I,J) = D(J,I)
```

```
50  CONTINUE
```

```
60  CONTINUE
```

C

```
C   CALCULO DA MATRIZ VS
```

C

```
CALL PROD( 6, NT, NT, DT, VI, P1 )
```

```

CALL PROD( 6, NT, 6, P1, D, P2 )
CALL INV( 6, P2, VS )
CALL PROD( 6, 6, 6, P2, VS, XT )
DO 61 I=1,6
    WRITE(6,610) ( XT(I,J),J=1,6 )
61  CONTINUE
    DO 65 I=1,6
        WRITE(6,610) ( VS(I,J),J=1,6 )
65  CONTINUE
610  FORMAT( 1X, 6E12.4 )
C
C  TEMPO EQUIVALENTES AO CITATION
C
    IT(1) = 340
    I = 1
66  I = I + 1
    IT(I) = IT(I-1) + 60
    IF ( IT(I) .LT. 1960 ) GO TO 66
    NTN = I
    WRITE(6,*) NTN
C
C  CALCULO INCERTEZA EM FUNCAO DO TEMPO
C
    DO 90 I=1,NTN
        T(1) = EXP( - E1 * FLOAT( IT(I) ) )
        T(2) = EXP( - E2 * FLOAT( IT(I) ) )
        T(3) = EXP( - E3 * FLOAT( IT(I) ) )
        T(4) = - FLOAT( IT(I) ) * A1 * T(1)
        T(5) = - FLOAT( IT(I) ) * A2 * T(2)
        T(6) = - FLOAT( IT(I) ) * A3 * T(3)
        DO 80 J=1,6

```

```
      TT(J) = 0.
      DO 70 K=1,6
          TT(J) = TT(J) + T(K) * VS(K,J)
70      CONTINUE
80      CONTINUE
      VF = 0.
      DO 85 J=1,6
          VF = VF + TT(J) * T(J)
85      CONTINUE
      VX = SQRT( VF )
      WRITE(6,600) IT(I), VX
      WRITE(99) IT(I), VX
90      CONTINUE
C
      STOP
C
600  FORMAT( 1X, I5, E13.5 )
C
      END
      SUBROUTINE INV( ND, A, AI )
C
      DIMENSION A(ND,ND), AI(ND,ND)
      DIMENSION W(10000)
C
      DO 20 I=1,ND
          DO 10 J=1,ND
              AI(I,J) = A(I,J)
10      CONTINUE
20      CONTINUE
C
      CALL MB11A( ND, ND, AI, ND, W )
```



C

RETURN

END

SUBROUTINE PROD( IA, IJ, JB, A, B, X )

C

DIMENSION A(IA,IJ), B(IJ,JB), X(IA,JB)

C

DO 30 I=1,IA

DO 20 J=1,JB

X(I,J) = 0.

DO 10 K=1,IJ

X(I,J) = X(I,J) + A(I,K) \* B(K,J)

10 CONTINUE

20 CONTINUE

30 CONTINUE

C

RETURN

END

SUBROUTINE MB11A (M,N,A,IA,W)

C STANDARD FORTRAN 66 (A VERIFIED PFORT SUBROUTINE)

DIMENSION A(IA,1),W(1)

COMMON/MB11B/LP

C PARTITION THE WORKING SPACE ARRAY W

C THE FIRST PARTITION HOLDS THE FIRST COMPONENTS OF THE

C VECTORS OF THE ELEMENTARY TRANSFORMATIONS

NRW=M

C THE SECOND PARTITION RECORDS ROW INTERCHANGES

NCW=M+M

C THE THIRD PARTITION RECORDS COLUMN INTERCHANGES

C SET THE INITIAL RECORDS OF ROW AND COLUMN INTERCHANGES

DO 1 I=1,M

```
N1=NRW+I
W(N1)=0.5+FLOAT(I)
1  CONTINUE
DO 2 I=1,N
  N1=NCW+I
  W(N1)=0.5+FLOAT(I)
2  CONTINUE
C  'KK' COUNTS THE SEPARATE ELEMENTARY TRANSFORMATIONS
  KK=1
C  FIND LARGEST ROW AND MAKE ROW INTERCHANGES
3  RMAX=0.0
  DO 4 I=KK,M
    SUM=0.
    DO 5 J=KK,N
      SUM=SUM+A(I,J)**2
5  CONTINUE
  IF (RMAX-SUM) 6,4,4
6  RMAX=SUM
  IR=I
4  CONTINUE
  IF(RMAX.EQ.0.0) GO TO 81
  IF (IR-KK) 7,7,8
8  N3=NRW+KK
  SUM=W(N3)
  N4=NRW+IR
  W(N3)=W(N4)
  W(N4)=SUM
  DO 9 J=1,N
    SUM=A(KK,J)
    A(KK,J)=A(IR,J)
    A(IR,J)=SUM
```

```
9  CONTINUE
C   FIND LARGEST ELEMENT OF PIVOTAL ROW, AND MAKE COLUMN
C   INTERCHANGES
7  RMAX=0.
   SUM=0.
   DO 10 J=KK,N
   SUM=SUM+A(KK,J)**2
   IF (RMAX-ABS(A(KK,J))) 11,10,10
11  RMAX=ABS(A(KK,J))
   IR=J
10  CONTINUE
   IF (IR-KK) 12,12,13
13  N5=NCW+KK
   RMAX=W(N5)
   N6=NCW+IR
   W(N5)=W(N6)
   W(N6)=RMAX
   DO 14 I=1,M
   RMAX=A(I,KK)
   A(I,KK)=A(I,IR)
   A(I,IR)=RMAX
14  CONTINUE
C   REPLACE THE PIVOTAL ROW BY THE VECTOR OF THE
C   TRANSFORMATION
12  SIGMA=SQRT(SUM)
   BSQ=SQRT(SUM+SIGMA*ABS(A(KK,KK)))
   W(KK)=SIGN(SIGMA+ABS(A(KK,KK)),A(KK,KK))/BSQ
   A(KK,KK)=-SIGN(SIGMA,A(KK,KK))
   KP=KK+1
   IF (KP-N) 15,15,16
15  DO 17 J=KP,N
```

```

      A(KK,J)=A(KK,J)/BSQ
17  CONTINUE
C    APPLY THE TRANSFORMATION TO THE REMAINING ROWS OF A
      IF (KP-M) 18,18,16
18  DO 19 I=KP,M
      SUM=W(KK)*A(I,KK)
      DO 20 J=KP,N
      SUM=SUM+A(KK,J)*A(I,J)
20  CONTINUE
      A(I,KK)=A(I,KK)-SUM*W(KK)
      DO 21 J=KP,N
      A(I,J)=A(I,J)-SUM*A(KK,J)
21  CONTINUE
19  CONTINUE
      KK=KP
      GO TO 3
C    AT THIS STAGE THE REDUCTION OF A IS COMPLETE
C    NOW WE BUILD UP THE GENERALIZED INVERSE
C    APPLY THE FIRST ELEMENTARY TRANSFORMATION
16  KK=M
      KP=M+1
      SUM=W(M)/A(M,M)
      IF (N-M) 33,33,34
34  DO 35 J=KP,N
      A(M,J)=-SUM*A(M,J)
35  CONTINUE
33  A(M,M)=1./A(M,M)-SUM*W(M)
C    NOW APPLY THE OTHER (M-1) TRANSFORMATIONS
36  KP=KK
      KK=KP-1
      IF (KK) 37,37,38

```

```
C    FIRST TRANSFORM THE LAST (M-KK) ROWS
38  DO 39 I=KP,M
    SUM=0.
    DO 40 J=KP,N
    SUM=SUM+A(KK,J)*A(I,J)
40  CONTINUE
    DO 41 J=KP,N
    A(I,J)=A(I,J)-SUM*A(KK,J)
41  CONTINUE
    W(I)=-SUM*W(KK)
39  CONTINUE
C    THEN CALCULATE THE NEW ROW IN POSITION KK
    DO 42 J=KP,N
    SUM=-W(KK)*A(KK,J)
    DO 43 I=KP,M
    SUM=SUM-A(I,KK)*A(I,J)
43  CONTINUE
    A(KK,J)=SUM/A(KK,KK)
42  CONTINUE
C    AND REVISE THE COLUMN IN POSITION KK
    SUM=1.-W(KK)**2
    DO 44 I=KP,M
    SUM=SUM-A(I,KK)*W(I)
    A(I,KK)=W(I)
44  CONTINUE
    A(KK,KK)=SUM/A(KK,KK)
    GO TO 36
C    RESTORE THE ROW INTERCHANGES
37  DO 45 I=1,M
46  N1=NRW+I
    IR=IFIX(W(N1))
```

```
IF (I-IR) 47,45,45
47 SUM=W(N1)
   N2=NRW+IR
   W(N1)=W(N2)
   W(N2)=SUM
   DO 48 J=1,N
   SUM=A(I,J)
   A(I,J)=A(IR,J)
   A(IR,J)=SUM
   A(IR,J)=SUM
48 CONTINUE
   GO TO 46
45 CONTINUE
C   RESTORE THE COLUMN INTERCHANGES
   DO 49 J=1,N
50 N1=NCW+J
   IR=IFIX(W(N1))
   IF (J-IR) 51,49,49
51 SUM=W(N1)
   N2=NCW+IR
   W(N1)=W(N2)
   W(N2)=SUM
   DO 52 I=1,M
   SUM=A(I,J)
   A(I,J)=A(I,IR)
   A(I,IR)=SUM
52 CONTINUE
   GO TO 50
49 CONTINUE
80 RETURN
81 IF(LP.LE.0) GO TO 80
```



MMK=M-KK

WRITE(LP,82) MMK

82 FORMAT(1H0,21H \*\*\* MB11A ERROR \*\*\* ,I3,12HREDUCED ROWS,  
1 17H FOUND TO BE ZERO)

STOP

END

BLOCK DATA

COMMON/MB11B/LP

DATA LP/6/

END

## APÊNDICE B4: PROGRAMA V - TABS2

```
PROGRAM TABS2
```

```
C
```

```
C
```

```
PROGRAMA LEITURA DADOS CONTAGEM, BG
```

```
C
```

```
PARAMETER( NC=31 )
```

```
CHARACTER * 5 AN
```

```
CHARACTER * 7 ARQ
```

```
DIMENSION P(NC), T(NC), A(NC), B(NC), C(NC), F(NC), D(NC),
```

```
C
```

```
DN(NC)
```

```
DIMENSION SF(NC), SC(NC), SDN(NC)
```

```
C
```

```
DATA SF / NC * 0. /
```

```
C
```

```
OPEN(UNIT=99,FILE='SIGMA.BIN',FORM='UNFORMATTED')
```

```
REWIND 99
```

```
DO 1 I=1,28
```

```
    READ(99) IDUM, SF(I)
```

```
1  CONTINUE
```

```
C
```

```
WRITE(6,600)
```

```
READ(5,500) ARQ, IO, T(1)
```

```
MIN = T(1) / 60.
```

```
ISEG = T(1) - ( MIN * 60 )
```

```
WRITE(6,610)
```

```
READ(5,510) AN
```

```
C
```

```
C
```

```
INICIALIZACAO POSICAO - TEMPO
```

```
C
```

```
P(1) = -20.
```

```
DO 10 I=2,NC
    T(I) = T(I-1) + 60.
    P(I) = P(I-1) + 20.
10  CONTINUE
C
C    LEITURA CONTAGEM + BG
C
    OPEN(UNIT=1,FILE='tab2.d')
    OPEN(UNIT=2,FILE=ARQ)
C
    DO 20 I=1,NC
        READ(1,*) A(I)
        READ(2,*) B(I)
20  CONTINUE
C
C    CALCULO DIFERENCA ( CONTAGEM - BG )
C
    DO 30 I=1,NC
        C(I) = B(I) - A(I)
30  CONTINUE
C
C    CALCULO COM FUNCAO AJUSTADA
C
    DO 40 I=1,NC
        T1 = 0.56638 * EXP( - T(I) * 0.00184 )
        T2 = 0.23983 * EXP( - T(I) * 0.00009 )
        T3 = 0.50298 * EXP( - T(I) * 0.0004 )
        F(I) = T1 + T2 + T3
40  CONTINUE
C
C    CALCULO ( CONTAGEM - BG ) / FUNCAO
```

C

DO 50 I=1,NC

 $D(I) = C(I) / F(I)$ 

50 CONTINUE

C

C NORMALIZACAO

C

AMAX = 0.

DO 60 I=1,NC

IF ( D(I) .GT. AMAX ) AMAX = D(I)

60 CONTINUE

DO 70 I=1,NC

 $DN(I) = D(I) / AMAX$ 

70 CONTINUE

C

C CALCULO DE SIGMAS

C

DO 71 I=3,28

 $SC(I) = \text{SQRT}( A(I) + B(I) )$ 

71 CONTINUE

C

AMAX = 0.

DO 72 I=3,28

IF ( C(I) .LE. AMAX ) GO TO 72

AMAX = C(I)

MAX = I

72 CONTINUE

CMAX = AMAX

FMAX = F(MAX)

SCMAX = SC(MAX)

SFMAX = SF(MAX)

C

DO 73 I=3,28

 $T1 = ( 1. / F(I) ) / ( CMAX / FMAX )$  $T1 = T1 * SC(I)$  $T1 = T1 * T1$  $T2 = ( -C(I) / ( F(I) * F(I) ) ) / ( CMAX / FMAX )$  $T2 = T2 * SF(I)$  $T2 = T2 * T2$  $T3 = ( -C(I) / F(I) ) / ( ( CMAX * CMAX ) / FMAX )$  $T3 = T3 * SCMAX$  $T3 = T3 * T3$  $T4 = ( C(I) / F(I) ) / CMAX$  $T4 = T4 * SFMAX$  $T4 = T4 * T4$  $SDN(I) = T1 + T2 + T3 + T4$  $SDN(I) = SQRT( SDN(I) )$ 

73 CONTINUE

C

C ARQUIVOS FINAIS

C

REWIND IO

REWIND 7

WRITE(7,700) AN, MIN, ISEG

WRITE(IO,200) AN, MIN, ISEG

DO 80 I=3,28

 $WRITE(6,620) P(I), T(I), A(I), B(I), C(I), F(I), D(I), DN(I)$  $WRITE(7,620) P(I), T(I), A(I), B(I), C(I), F(I), D(I), DN(I),$ \*  $SDN(I)$ 

80 CONTINUE

WRITE(6,\*) AMAX

WRITE(7,710)

```
DO 90 I=3,28
    WRITE(7,100) P(I), DN(I), SDN(I)
    WRITE(10,100) P(I), DN(I), SDN(I)
90  CONTINUE
C
    STOP
C
C    FORMAT
C
100  FORMAT( 1X, F7.0, F10.5, E12.2 )
200  FORMAT( A5, ' - ', I2, 1H', I2, 1H" )
500  FORMAT( A7, I2, F10.0 )
510  FORMAT( A5 )
600  FORMAT(' PROGRAMA LEITURA DADOS CONTAGEM
C    (CONTAGEM - BG )' /,
    * FORNECA NOME ARQUIVO, FILE, TEMPO INICIAL ( SEG. )' )
610  FORMAT(' FORNECA NOME ( A5 )' /
    *          ' OBS. ARQUIVO PARA IMPRESSAO => fort.7' )
620  FORMAT( 1X, F5.0, 2F7.0, 2F9.0, F10.5, F10.0, F10.5, E12.2 )
700  FORMAT( 1X, A5, ' - ', I2, 1H', I2, 1H" //
    *          1X, ' POS. TEMPO   BG CONTAGEM',
    *          '   DIF. FUNCAO DIF/FUNC.   NORM.   INCER.' / )
710  FORMAT( / 1X, 'POSICAO   NORM.   INCER.' / )
C
    END
```

APÊNDICE B5: PROGRAMA VI - CITDD3

```
PROGRAM CITDD3

C
C  PROGRAMA PARA LEITURA DO ARQUIVO dpt.d
C
  CHARACTER * 5 A(9)
  DIMENSION P(28), V(28), VN(28), NN(75), Z(75), GR(75)

C
  DATA A / 'm14 ', 'm21 ', 'm27 ', 'j17 ', 'j20 ',
*          'j22 ', 'c22 ', 'c24 ', 'ab27' /

C
  NC = 0
  NW1 = 60
  P(1) = 0.
  DO 10 I=2,28
    P(I) = P(I-1) + 20.
10  CONTINUE

C
15  DO 20 I=1,75
    READ(5,*,END=99) NN(I), Z(I), GR(I)
20  CONTINUE

C
  NC = NC + 1
  NW1 = NW1 + 1
  N = 0
  DO 30 I=65,11,-2
    N = N + 1
    V(N) = GR(I)
30  CONTINUE

C
```



```
REWIND NW1
WRITE(NW1,100) A(NC)
C
  AMAX = 0.
  DO 50 I=1,N
    IF ( V(I) .GT. AMAX ) AMAX = V(I)
50  CONTINUE
  DO 60 I=1,N
    VN(I) = V(I) / AMAX
60  CONTINUE
C
  DO 70 I=1,N
    WRITE(NW1,110) P(I), V(I), VN(I)
70  CONTINUE
C
  WRITE(NW1,*) AMAX
  ENDFILE NW1
  GO TO 15
C
99  WRITE(6,600)
  STOP
C
100 FORMAT( A5, ' CITATION ' )
110 FORMAT( 1X, F6.1, E13.5, F10.6 )
600  FORMAT( ' OBS. - ARQUIVOS GERADOS PARA cittabx2 - fort.6* ' /
  *      ' - ARQUIVOS GERADOS PELO tabs - fort.5* ' )
C
  END
```

## APÊNDICE B6: PROGRAMA VII - CITTABX2

PROGRAM CITTABX2

C

C     PROGRAMA PARA GERAR ARQUIVOS COMPARATIVOS

C     EXPERIMENTAL - CALCULADO

C

CHARACTER \* 5 A, B

DIMENSION P(26), V(26), V1(26), V2(26), V3(26)

C

DO 30 I=1,9

NR1 = 60 + I

NR2 = 50 + I

NW = 70 + I

REWIND NR1

REWIND NR2

READ(NR1,100) A

READ(NR1,\*) DUM

READ(NR2,100) B

IF ( A .NE. B ) GO TO 40

DO 10 J=1,26

READ(NR1,\*) P(J), V(J), V1(J)

READ(NR2,\*) DUM, V2(J), V3(J)

10 CONTINUE

REWIND NW

WRITE(NW,200) A

DO 20 J=1,26

WRITE(NW,300) P(J), V1(J), V2(J), V3(J)

20 CONTINUE

ENDFILE NW

30 CONTINUE

C

STOP

C

40 WRITE(6,600) I

STOP

C

100 FORMAT( A5 )

200 FORMAT( 1X, A5, '- equalizada ' //

\* 1X, ' pos. citation experim. incer.' / )

300 FORMAT( 1X, F6.0, 2F10.5, E12.2 )

600 FORMAT( ' ERRO - ARQUIVOS NAO CORRESPONDEM, I = ', I2 )

END