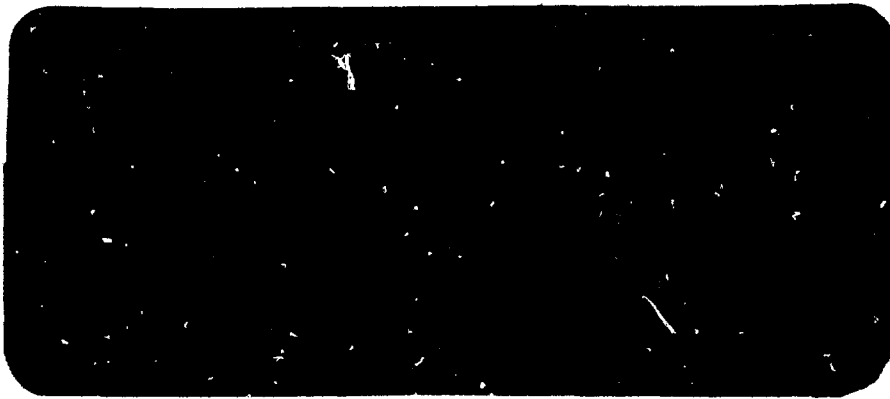
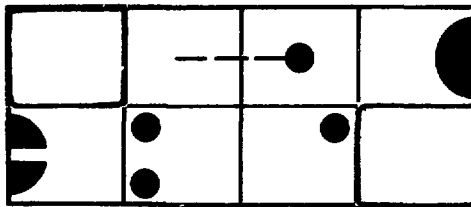


INIS-mf--7830

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

440222

CÁLCULO DA PRESSÃO INTERNA DOS GASES
DE FISSÃO EM VARETAS COMBUSTÍVEIS

Autora: MAURA VASCONCELOS SANTANA

Bell

Orientador: JOSÉ LÚCIO TERRA

Tese apresentada ao Corpo Docente do Curso de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares da UFMG, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências.

TÍTULO DA TESE

Cálculo da pressão interna dos gases de fissão em varetas combustíveis.

NOME DO AUTOR

Maura de Vasconcelos Santana

Tese defendida e aprovada pela banca examinadora, constituída dos Senhores:



M.Sc. Paulo Edson Cardoso



M.Sc. Walkirio Ronaldo de Andrada Lavorato

Orientador:



M.Sc. José Lúcio Terra

Belo Horizonte, 11. de dezembro de 1981

(Data de defesa da tese)

AGRADECIMENTOS

Sou profundamente grata ao Eng^o José Lúcio Terra pe la orientação e apoio, ao Físico Márcio Soares Dias pela co orientação e dedicação, ao Físico Lúcio Carlos Pinto Martins pela escolha do tema, desenhos e sugestões, ao Físico Fernando Soares Lameiras, pelas sugestões decisivas e revisão.

Expresso também, meus agradecimentos:

- CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, pelo uso de suas instalações;
- Seção de Documentação Técnica-CDTN, pela eficiência no atendimento;
- CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear, pelo apoio financeiro;
- Desenhista, George Eduardo de Castro;
- Datilógrafo, Olimpio César Bueno dos Santos;
- Professor Milton Vieira Campos, ex-coordenador do Departamento de Engenharia Nuclear;
- Agradeço ainda a todos aqueles que, direta ou in diretamente participaram na realização deste trabalho.

ÍNDICE

	RESUMO	1
	ABSTRACT	2
1.	INTRODUÇÃO	3
2.	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS GASES DE FISSÃO NUMA VARETA COMBUSTÍVEL	4
3.	PROGRAMA DE CÁLCULO - ESTRUTURA E MODELAÇÃO ..	7
3.1	Fluxograma do Programa PIG-1	7
3.2	Expansão Térmica	11
3.2.1	Expansão Térmica do Combustível	12
3.2.2	Expansão Térmica do Revestimento	14
3.3	Inchamento	15
3.3.1	Inchamento Devido aos Produtos Sólidos de Fis são	15
3.3.2	Inchamento Devido aos Produtos Gasosos de Fis são	16
3.4	Densificação	18
3.4.1	Desenvolvimento Teórico do Modelo de Assmann , Usado para Cálculo da Densificação	19
3.5	Reestruturação	21
3.6	Relocação	24
3.7	Deformações Mecânicas	25
3.8	Produção e Liberação de Gases de Fissão	28
3.8.1	Modelo Weisman	28
3.8.2	Modelo Wordsworth	31
4.	PRESSÃO	37
4.1	Primeiro Modelo	37
4.2	Segundo Modelo	42
4.3	Terceiro Modelo	43
5.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	45
5.1	Liberação Gasosa	45
5.2	Evolução da Pressão Interna	46
6.	CONCLUSÃO	58
	REFERÊNCIAS	60

RESUMO

Foram analisados e selecionados modelos relativos aos principais fenômenos "expansão térmica, inchamento, densificação, reestruturação, relocação, deformação mecânica, produção e liberação de gases produtos de fissão", ligados direta ou indiretamente ao cálculo da pressão interna em varetas combustíveis.

Com base nesta análise desenvolveu-se um código para cálculo da evolução da pressão interna.

Três diferentes modelos foram utilizados para cálculo da evolução da pressão interna, com a finalidade de escolher aqueles de melhor estimativa e conservativo. (aut.)

ABSTRACT

Models concerning the principal phenomena, particularly thermal expansion, fuel swelling, densification, restructing, relocation, mechanical strain, fission gas production and release, direct or indirectly important to calculate the internal pressure in nuclear fuel rods were analysed and selected.

Through these analyses a computer code was developed to calculate fuel pin internal pressure evolution.

Three different models were utilized to calculate the internal pressure in order to select the best and the most conservative estimate. (author).

1. INTRODUÇÃO

O Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, visando a criação de "know-how" próprio na área de projeto e previsão de desempenho de varetas combustíveis, mantém, na Divisão de Tecnologia de Combustível, um grupo destinado a fornecer, futuramente, subsídios às adaptações e modificações de projeto de elementos combustíveis.

Este grupo vem utilizando, até o presente, códigos de previsão de desempenho desenvolvidos externamente e adaptados às condições dos testes de irradiação e características das varetas.

A elaboração de um código próprio que aliasse, em sua primeira versão, simplicidade e economia, tornou-se o objetivo básico deste nosso trabalho.

Os dados experimentais a serem utilizados para afecção são aqueles resultantes dos testes de irradiação projetados e acompanhados pelo grupo.

Os valores calculados da pressão interna nas varetas-teste estão sistematicamente acima dos dados experimentais, o que atende perfeitamente às necessidades de segurança.

À medida que novos testes de irradiação forem sendo realizados, os dados experimentais disponíveis permitirão a confirmação dos resultados até então obtidos, e o desenvolvimento e o aprimoramento do código de cálculo.

2. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS GASES DE FISSÃO NUMA VARETA COMBUSTÍVEL

Uma vareta combustível em operação caracteriza-se por:

- pequenos espaços de acomodação do gás;
- pressões maiores que 40 bar.

Estas condições levam a pensar na não-aplicabilidade da equação dos gases ideais para cálculo da pressão interna do gás. Além do mais, para uma vareta combustível em operação, temos:

- contínuas variações dos espaços de acomodação do gás;
- contínua variação da composição e massa do gás;
- temperatura não-uniforme no interior da vareta.

Ou seja, o sistema no interior da vareta combustível não se encontra em equilíbrio termodinâmico. Portanto, a rigor, nenhuma equação termodinâmica para cálculo da pressão aplica-se ao sistema de uma vareta combustível. Porém, as variações acima expostas são suaves, se o reator opera em regime estacionário, de maneira que o sistema na vareta encontra-se num estado de quase-equilíbrio químico e mecânico. Isto significa que a pressão é uniforme dentro da vareta combustível. Pode-se então calcular a pressão interna de uma vareta combustível em operação se for feita uma divisão dos volumes internos de acomodação do gás, sendo que a cada volume é associada uma temperatura uniforme, e então aplicar a

equação termodinâmica dos gases para cada volume. Naturalmente, quanto mais fina for esta divisão, menor será o erro de cálculo da pressão.

Uma vez que existe uma mistura gasosa no interior da vareta, é muito difícil considerar a interação entre as diferentes moléculas do gás, quando, por exemplo, se calcula com a equação de Van der Waals. O problema de cálculo da pressão interna dos gases torna-se muito mais simples quando é tratado pela equação dos gases ideais e, conforme pode ser constatado através dos valores apresentados na Tabela 1, os resultados são bastante satisfatórios.

As varetas-teste RBE 35 e RBE 36 foram carregadas com microesferas sol-gel de $(U,Th)O_2$ (relação U/Th de 1/21,47) e atingiram uma queima de respectivamente 44,664 e 45,199 Mwd/kg [1]. Estavam equipadas com transdutor de pressão para medida da pressão interna [2]. As varetas irradiadas foram aquecidas à 20°C, 300°C e 800°C e a pressão interna foi medida. Depois, o gás foi retirado, analisado e o volume interno de acomodação do gás foi medido. Com os dados obtidos, calculou-se a pressão interna àquelas temperaturas. O erro envolvido nas medidas da pressão foi de ~2%. O decaimento radioativo foi desprezado.

TABELA 1 - Comparação entre valores medidos e calculados pela equação dos gases ideais

	TEMPERATURA (°C)	20	300	800
VARETA RBE-35	PRESSÃO MEDIDA (bar)	12,62	24,67	46,19
	PRESSÃO CALCULADA (bar)	12,65	24,71	45,28
VARETA RBE-36	PRESSÃO MEDIDA (bar)	49,51	96,80	181,24
	PRESSÃO CALCULADA (bar)	49,53	96,87	181,40

3. PROGRAMA DE CÁLCULO - ESTRUTURA E MODELAÇÃO

Conforme a análise feita no capítulo anterior, esta beleceu-se como base de cálculo da pressão interna na vareta combustível a equação de Clapeyron. Os elementos presentes nesta equação dos gases ideais, pressão, volume, temperatura e número de moles, são influenciados ou/e influenciam os diversos fenômenos que ocorrem na vareta combustível em operação.

Considerando os modelos usuais de cálculo dos diversos fenômenos e seus efeitos diretos, podemos interrelacioná-los esquematicamente (vide Figura 1).

3.1 Fluxograma do Programa PIG-1

O programa PIG-1 foi elaborado para cálculo da pressão interna de varetas combustíveis-teste em operação.

Na modelação da vareta-teste, mostrada esquematicamente na Figura 2, são considerados:

- plenum superior;
- comprimento ativo;
- "fishings";
- porosidade aberta e fechada na pastilha;
- folga entre combustível e revestimento;
- canal central;
- gás de enchimento.

A evolução temporal do estado da vareta combustível

é principalmente considerada através do cálculo contínuo das seguintes grandezas (onde é suposto simetria azimutal):

a) Revestimento

- distribuição axial e radial de temperatura;
- expansão térmica;
- deformação elástica.

b) Combustível

- distribuição axial e radial de temperatura;
- variação volumétrica da pastilha em consequência de reestruturação; densificação, inchamento e expansão térmica;
- variações dimensionais radial e axial em consequência da variação volumétrica da pastilha e relocação (radial);
- distribuição axial e radial de queima.

c) Folga entre combustível e revestimento

- distribuição axial da folga efetiva;
- distribuição axial da pressão de contacto;
- distribuição axial da condutância do "gap".

d) Gás no interior da vareta

- gás de fissão liberado;
- gás de enchimento (He ou Ar);
- pressão do gás no interior da vareta.

A interação mecânica entre combustível e revestimento é calculada até o ponto onde o limite de escoamento do revestimento é alcançado.

O histórico de potência deve ser fornecido como uma série de, no máximo, 20 intervalos de tempo de duração apropriada (diferentes durações), durante os quais as respectivas grandezas de operação são tomadas como constantes. O histórico de potência é fornecido pelo usuário juntamente com uma série de outros dados que contêm uma completa descrição do estado inicial da vareta combustível (propriedades materiais , geometria, gás de enchimento), que estabeleçam parâmetros e sinais de opção para alguns modelos e fixem determinadas instruções para o método de cálculo. Baseado nestas entradas, o programa PIG-1 fixa todos os valores iniciais e, eventualmente, ativa as opções para os modelos, métodos de cálculo e o volume de saída desejados. Particularmente, nesta fase inicial, o comprimento ativo da coluna é dividido axialmente (um máximo de 10 regiões axiais de comprimentos iguais ou não) e radialmente em anéis concêntricos de massas iguais (no máximo 20 e constantes durante todo o cálculo). Estas instruções iniciais fixam a capacidade de solução do cálculo e permanecem invariáveis.

Na Figura 3 está apresentado um fluxograma do programa PIG-1. Para cada passo temporal do programa PIG-1 , avalia-se o estado da vareta combustível no início e no fim do intervalo de tempo-potência.

Para o cálculo da temperatura supõe-se que toda a energia de fissão utilizável seja liberada no combustível .

O fluxo de calor axial assim como a fração de convecção livre de calor na folga combustível/revestimento são desprezados . O perfil radial de temperatura é calculado para uma determinada posição axial contra o fluxo de calor (do exterior para o interior da vareta), sobre as seguintes etapas:

- transmissão de calor refrigerante/tubo de revestimento;
- condução de calor através da parede do revestimento;
- transmissão de calor na folga combustível/tubo de revestimento;
- transmissão de calor no combustível.

Devido a transmissão de calor na folga depender da temperatura e da largura efetiva da folga, e como esta por sua vez é determinada pela variação volumétrica do combustível causada termicamente, o perfil radial de temperatura desde a parede interna do revestimento até o centro do combustível é calculado iterativamente até convergência da temperatura central do combustível. No cálculo do perfil radial de temperatura no combustível é considerada a dependência da condutividade térmica do óxido combustível, da porosidade e temperatura, como também a influência do perfil radial da geração de potência.

Deste algoritmo, que é corrido para cada posição axial, é sobreposta uma iteração por toda a vareta combustível. Esta iteração deve levar tanto a convergência para um valor definido da quantidade de gás de fissão liberado no inter

valo de tempo tratado (que por sua vez novamente influencia a composição do gás e com isso reatua sobre a transmissão de calor na folga e então sobre o cálculo da temperatura), como também deve convergir para um valor definido da pressão do gás, a qual resulta da temperatura em cada volume de acomodação de gás e da quantidade total de gás na vareta combustível.

O programa PIG-1 é relativamente simples e rápido . O comprimento do programa é de 34.300 bites e foi desenvolvido no CDTN-NUCLEBRÁS pela DITCO.PD, em linguagem FORTRAN-4 para o computador CYBER 175.

3.2 Expansão Térmica

Dos vários fenômenos responsáveis pela variação dimensional de uma vareta combustível a Expansão Térmica é um dos fenômenos que surge logo no início da irradiação.

Os efeitos deste fenômeno afetam principalmente: a espessura do "gap" (expansão radial), o "plenum" (expansão axial), "dishes" (comportamento plástico do combustível em temperaturas $\geq 1.200^{\circ}\text{C}$) e canal central, atuando conseqüentemente na Pressão Interna da Vareta.

3.2.1 Expansão Térmica do Combustível

A Expansão Térmica do Combustível foi analisada pelo bloco de dados MATPRO [3]. Trata-se de um ajuste de dados consistentes publicados por diversos autores. Este ajuste forneceu a seguinte expressão para a expansão térmica:

$$\frac{\Delta L}{L} = -4,972 \times 10^{-4} + 7,107 \times 10^{-6}T + 2,581 \times 10^{-9}T^2 + 1,140 \times 10^{-13}T^3 \quad (1)$$

onde: $\frac{\Delta L}{L}$ = expansão térmica linear

T = temperatura (°C)

3.2.1.1 Modelo para a Expansão Térmica Radial

A base para o modelo é a consideração de que as fissuras radiais que se formam na primeira rampa de potência aliviam as tensões radiais e tangenciais originadas do gradiente térmico, resultando em uma expansão térmica quase livre de tensões. Cada anel concêntrico de combustível pode expandir-se sem restrição e as expansões de cada anel são somadas para fornecer o deslocamento do raio externo.

A expressão usada para cálculo do raio final é dada por:

$$R_b = r_b + r_a \cdot \frac{\Delta L}{L} (T_{N+1}) + \sum_{i=1}^N \frac{\Delta L}{L} (T_i) \cdot \delta_{ri} \quad (2)$$

onde: $\delta_{ri} = (r_b - r_a) / (N)$ é a espessura inicial de cada anel;

r_b = é o raio externo inicial do combustível;

r_a = é o raio do canal central;

N = número de anéis radiais concêntricos do com combustível;

T_{N+1} = temperatura no canal central;

T_i = temperatura média do anel i;

R_b = raio externo final do combustível.

3.2.1.2 Expansão Térmica Axial do Combustível

A relação usada para avaliar a expansão térmica axial é:

$$\Delta L_{TOT} = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta L}{L} (\bar{T}_i) \cdot L_i \quad (3)$$

onde: ΔL_{TOT} = variação total da altura ativa da coluna combustível

L_i = é altura inicial do segmento axial i

\bar{T}_i = temperatura média do segmento axial i.

3.2.2 Expansão Térmica do Revestimento

3.2.2.1 Expansão Térmica Diametral do Revestimento

Para cálculo da expansão térmica diametral do revestimento [3], utilizamos a relação:

$$\frac{\Delta D}{D_0} = -2,373 \times 10^{-4} + 6,721 \times 10^{-6} \bar{T}_i \quad (4)$$

esta equação foi ajustada para uma faixa de temperatura: $27^\circ\text{C} < T < 800^\circ\text{C}$.

onde: $\frac{\Delta D}{D_0}$ = expansão diametral do revestimento
 $\bar{T}_i = \frac{T_{\text{EXT}} + T_{\text{INT}}}{2}$, temperatura média do revestimento,

onde:

T_{EXT} = temperatura externa do revestimento

T_{INT} = temperatura interna do revestimento.

3.2.2.2 Expansão Térmica Axial do Revestimento

A relação usada é dada por [3]:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = -2,506 \times 10^{-5} + 4,441 \times 10^{-6} T \quad (5)$$

para $27^\circ\text{C} < T < 800^\circ\text{C}$

sendo: $\frac{\Delta L}{L_0}$ = expansão axial do revestimento

$$\Delta L_{TOT} = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\Delta L}{L_0} (\bar{T}_i) \right] \cdot L_{0i} \quad (6)$$

\bar{T}_i = temperatura média de cada segmento axial

L_{0i} = comprimento inicial do segmento axial i.

3.3 Inchamento

O inchamento é um fenômeno de destaque no decorrer da irradiação de combustíveis nucleares, sendo responsável por sensível acréscimo de volume dos combustíveis cerâmicos.

Devido ao fissionamento dos átomos há a formação de produtos gasosos (principalmente Xe e Kr) e sólidos, os quais, quando retidos na rede, dão origem ao fenômeno inchamento.

3.3.1 Inchamento Devido aos Produtos Sólidos de Fissão

Esta componente do inchamento é calculada segundo uma lei linear [4], sendo diretamente proporcional à queima do combustível. Sendo F a queima em unidades de 10^{20} fissões/cm³, temos:

$$\frac{\Delta V}{V} = 0,0035 \cdot F \quad (7)$$

3.3.2 Inchamento Devido aos Produtos Gasosos de Fissão

Para o cálculo desta componente existem diversos modelos disponíveis na literatura corrente [5, 6].

Em nosso trabalho, optamos pelo modelo denominado lei $(FT)^{3/2}$ [7], que leva em conta a influência da temperatura e queima, sendo um modelo simples não necessitando de cálculos iterativos.

As suposições básicas para o desenvolvimento deste modelo são:

- a) o número de bolhas é fixo;
- b) o gás obedece a lei dos gases ideais;
- c) as bolhas são esféricas;
- d) a pressão gasosa dentro das bolhas é balanceada unicamente pela tensão superficial;
- e) 0,32 átomos de gases (Xe, Kr) são produzidos para cada átomo do combustível fissionado.

Supondo constante o número de bolhas e o espaçamento entre elas, ou seja, saturação da concentração de bolhas, ocorre influência apenas da temperatura e queima do combustível [5]. O número (N) de bolhas de gás presente no combustível será dado por:

$$N = \frac{V}{\ell^3} \quad (8)$$

sendo V o volume inicial do combustível e ℓ o espaçamento médio entre as bolhas.

Podemos então calcular a variação volumétrica do

combustível pela expressão:

$$\Delta V = \frac{4}{3} \pi r^3 \frac{V}{\ell^3} \quad (9)$$

onde r é o raio médio das bolhas de gás de fissão.

Para calcular a pressão de equilíbrio nas bolhas, devemos somar dois termos: um, referindo-se a tensão superficial γ do combustível e o outro, relativo às pressões externas:

$$P_g = \frac{2\gamma}{r} + P_{ext} \quad (10)$$

Tirando o valor de r da equação (9) e substituindo na equação (10), obtém-se:

$$P_g = \frac{2\gamma}{\ell} \left(\frac{3}{4\pi} \frac{\Delta V}{V} \right)^{-1/3} + P_{ext} \quad (11)$$

que é uma expressão que permite calcular a pressão gasosa nas bolhas de gás de fissão.

Da suposição que 0,32 átomos de gases inertes (Xe, Kr) sejam produzidos em cada fissão, calcula-se a relação entre o número de moles de gás e a queima do combustível F (fissões/cm³).

Tem-se:

$$m = 0,32 FV/No \quad (12)$$

onde No é o número de Avogadro e m é o número de moles de gás. Da suposição que os gases têm comportamento ideal, será válida

a lei:

$$P_g \Delta V = mRT \quad (13)$$

Supondo-se negligenciável [5] o termo P_{ext} da equação (10) e combinando-se as equações (11), (12) e (13), teremos:

$$\frac{\Delta V}{V} = \left[\frac{0,32R\ell}{2\gamma N_0} \right]^{3/2} \cdot \left(\frac{3}{4\pi} \right)^{1/2} \cdot (FT)^{3/2} \quad (14)$$

Finalmente:

fazendo-se $K = \left(\frac{0,32R\ell}{2\gamma N_0} \right)^{3/2} \cdot \left(\frac{3}{4\pi} \right)^{1/2}$ obtem-se a expressão

$$\frac{\Delta V}{V} = K \cdot (FT)^{3/2}, \text{ que é conhecida por lei } (FT)^{3/2}.$$

Todavia, em nossos cálculos utilizamos uma versão modificada [8] da lei $(FT)^{3/2}$, qual seja:

$$\frac{\Delta V}{V} = \left(\frac{0,32K_b}{2\gamma} \right)^{3/2} \left(\frac{3}{4\pi} \right)^{1/2} [2 \times 10^{-10} e^{-2,06 \times 10^{-3} T}]^{3/4} (FT)^{3/2} \quad (15)$$

K_b = constante de Boltzmann = $1,3803 \times 10^{-16}$ erg/°K

onde a constante K é uma função da temperatura T no material combustível.

3.4 Densificação

Este fenômeno provoca um aumento da densidade da pastilha, reduzindo a porosidade residual de fabricação da

mesma.

Contribui desta forma, para um aumento do "gap" (contração radial) e do "plenum" (contração axial). Conseqüentem_{ente} haverá um aumento do volume disponível no interior da vareta combustível.

A densificação provoca um aumento da energia armazenada e da geração de calor volumétrica na pastilha, e diminui a capacidade de transferência de calor entre combustível e revestimento.

3.4.1 Desenvolvimento Teórico do Modelo de H. Assmann , Usado para Cálculo da Densificação [9]

a) Conceitos Básicos do Modelo

A densificação ocorre mediante a geração de um excesso de concentração de lacunas nas proximidades dos poros e pela migração dessas lacunas por difusão, para contornos de grãos. São processos consecutivos que podem (ambos) serem ativados termicamente ou induzidos por fissão.

O modelo tem como base estes dois processos e considera quatro faixas distintas de temperaturas para o combustível:

I) Faixa de Temperaturas Baixas - $T \leq 450^{\circ}\text{C}$

Considera que a formação e a migração de lacunas excedentes são atérmicas, e que a taxa de

densificação depende da taxa de fissão.

II) Faixa de Temperaturas Médias - $450^{\circ}\text{C} < T < 750^{\circ}\text{C}$

A contribuição da migração termicamente ativa das lacunas é maior do que a parcela atérmica. A migração termicamente ativada das lacunas determina a taxa de densificação que com isto depende claramente da temperatura.

III) Faixa de Temperaturas Elevadas - $750^{\circ}\text{C} < T < 1300^{\circ}\text{C}$

A formação das lacunas é atérmica e domina o processo. Não se constata nenhuma dependência da taxa de densificação em relação à temperatura.

IV) Faixa de Temperaturas Muito Altas - $T \geq 1300^{\circ}\text{C}$

Tanto a formação quanto a migração de lacunas são termicamente ativadas. A taxa de densificação é dependente da temperatura.

Como consequência das suposições anteriores (relativo às quatro faixas de temperaturas), obteve-se a seguinte relação final para a densificação da pastilha combustível.

$$\frac{\Delta V^{(D)}}{V} = -f^* P_0^f (1 - e^{-aB}) - \sum_i P_{oi}^c \{1 - [1 - b_i B]^n\} \quad (16)$$

onde: $n \rightarrow$ depende das respectivas faixas de temperaturas

$$n = \frac{3}{2} \text{ para faixa de temperatura I e II}$$

$n = 3$ para faixa de temperatura III

$n = 1$ para faixa de temperatura IV.

P_{oi}^c = fração de porosidade grossa inicial

P_o^f = fração inicial de porosidade fina

f^* , a , b_i = são constantes que permitem o ajustamento do modelo a dados medidos

B = queima.

O primeiro termo da equação (16) descreve a densificação resultante da contração e dissolução dos poros finos. O segundo termo corresponde aos poros grossos.

3.5 Reestruturação

Em varetas combustíveis que operam à taxa de queima elevada, podem ocorrer alterações substanciais na morfologia do combustível provocadas pelo nível elevado de temperatura e pelo gradiente acentuado de temperatura. Essas alterações, envolvendo crescimento equiaxial dos grãos da região intermediária do combustível, migração das cavidades (poros e bolhas de gás de fissão) da região mais central, levando ao aparecimento dos grãos colunares e do canal central, caracterizam basicamente a reestruturação do combustível, e para propósitos de análise térmica o combustível pode ser dividido em 3 regiões anulares:

- 1) uma região externa, sem alteração microestrutural;
- 2) uma região intermediária onde se desenvolve o

crescimento de grãos equiaxiais; e

- 3) uma região central formada pelos grãos coluna
res.

Quando a vareta combustível é colocada em operação, um gradiente acentuado de temperatura leva a porosidade de fabricação e as bolhas de gases de fissão da região central, à migrarem para a linha central. O resultado direto deste processo é a redistribuição do combustível para a periferia e o aparecimento do canal central, com conseqüente redução do perfil de temperatura na região central.

O processo de reestruturação exige tempo da ordem de horas em varetas com temperatura central próxima ao ponto de fusão, mas pode não ocorrer em varetas operando a baixa taxa de queima.

Na região intermediária, onde ocorre o crescimento equiaxial dos grãos, apesar do gradiente de temperatura ser acentuado, a temperatura é muito baixa para permitir a migração dos poros em escala macroscópica, sob ação do gradiente de temperatura.

Contudo, as temperaturas nesta região são suficientes para provocar o crescimento dos grãos e permitir a migração das cavidades (poros e bolhas) intragranulares para os contornos de grão.

A densidade da região dos grãos colunares é estimada entre 95 e 99% da densidade do combustível 100% denso à mesma temperatura. A estimativa da temperatura em que esta estrutura se forma sob um gradiente de temperatura apropriado, va

ria de 1700°C a 2150°C. As densidades e temperaturas correspondentes à zona equiaxial são menores que as da região de grãos colunares. Contudo, não é certo de que algum aumento da densidade ocorra nesta região, os poros existentes podem simplesmente coalescer ou mudar de forma.

O raio do canal central está relacionado às posições dos contornos entre as regiões reestruturadas através do balanço de massa, supondo que não exista movimento axial do combustível.

É usual limitar estas regiões com temperaturas características, especificando uma temperatura T_{gc} abaixo da qual não ocorre a formação de grãos colunares. Similarmente assinala-se uma temperatura T_{ge} acima da qual o crescimento equiaxial dos grãos seja apreciável e discernível.

Nichols, conforme Olander [10], as seguintes correlações empíricas para as temperaturas dos contornos das regiões reestruturadas em função do tempo de irradiação:

$$T_{gc} (^{\circ}K) = 1/[3,366 \times 10^{-5} \log t \text{ (dias)} + 4,558 \times 10^{-4}] \quad (17)$$

$$T_{ge} (^{\circ}K) = 1/[3,714 \times 10^{-5} \log t \text{ (dias)} + 4,706 \times 10^{-4}] \quad (18)$$

onde os valores mínimos admitidos são, respectivamente, 1950°K e 1830°K.

Com base nestas equações e no perfil de temperatura, admite-se que a região onde a temperatura seja maior que T_{gc} , o combustível alcance irreversivelmente a densidade máxima $D_{m\acute{a}x}$.

Da mesma forma, na região onde a temperatura seja maior que T_{ge} , o combustível atinge uma densidade D' , intermediária à densidade da região de grãos colunar e não reestruturada.

3.6 Relocação

Um gradiente de temperatura acentuado implica em tensões térmicas atuando nas pastilhas combustíveis, provocando o trincamento. Estas partes trincadas são relocadas em direção ao revestimento, reduzindo a espessura efetiva do "gap" e, conseqüentemente, afetando os cálculos de transmissão de calor e o perfil de temperatura.

O fenômeno relocação é função da Potência, da ciclagem de potência e da queima.

Em nossos cálculos para a Pressão Gasosa Interna, a relocação foi considerada constante, provocando um fechamento de 40% do "gap" nominal; ou seja, a espessura do "gap" a quente é dada por:

$$e = (R_{ir} - R_{ec}) - 0,4 (R_{ir}^0 - R_{ec}^0) \quad (19)$$

onde:

- R_{ir}^0 = raio interno inicial do revestimento
- R_{ec}^0 = raio externo inicial do combustível
- R_{ir} = raio interno a quente do revestimento, considerando as deformações termo-elásticas
- R_{ec} = raio externo a quente do combustível, considerando os efeitos de expansão térmica, inchamento e densificação.

No caso de contato entre revestimento e combustível, a interferência, definida por $\Delta r = R_{ec} - R_{ir}$, é usada como critério entre contato mole ou contato duro através das relações:

$\Delta r \geq 0 \rightarrow$ contato entre combustível e revestimento

$$0 \leq \Delta r \leq 0,4 |R_{ir}^o - R_{ec}^o| \rightarrow \text{contato mole} \quad (20)$$

$$\Delta r > 0,4 |R_{ir}^o - R_{ec}^o| \rightarrow \text{contato duro} \quad (21)$$

3.7 Deformações Mecânicas

A pastilha combustível desde o início da operação está totalmente trincada e livre de tensões mecânicas. Considera-se então que a pastilha pode deformar-se livremente no sentido radial e axial até que haja contacto com o tubo de revestimento. A deformação do tubo de revestimento é calculada para o caso de um tubo sujeito a pressão interna e externa. Os efeitos das deformações mecânicas sobre a condutância do "gap" são considerados através de seu efeito na espessura do "gap" e na pressão de contacto interfacial, assim como é testado se o limite de projeto da deformação do tubo de revestimento é atingido no caso contacto combustível-revestimento (tensão no tubo de revestimento menor que o limite de escoamento).

A deformação radial do tubo de revestimento é dada pela seguinte expressão [11]:

$$e_r = e_t + \left(\frac{1-\nu^2}{E_c}\right) (\sigma_r - \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_\theta) \quad (22)$$

onde: e_t = deformação térmica radial (seção 3.2)

E_c = módulo de Young = $2,11 \times 10^6$ kgF/cm²

ν = coeficiente de Poisson

σ_θ = tensão tangencial

σ_r = tensão radial

A tensão radial é calculada conforme a seguinte expressão:

$$\sigma_r = \frac{a^2 b^2 (p_o - p_i)}{b^2 - a^2} \cdot \frac{1}{r^2} + \frac{p_i a^2 - p_o b^2}{b^2 - a^2} \quad (23)$$

A tensão tangencial é calculada por:

$$\sigma_\theta = - \frac{a^2 b^2 (p_o - p_i)}{b^2 - a^2} \cdot \frac{1}{r^2} + \frac{p_i a^2 - p_o b^2}{b^2 - a^2} \quad (24)$$

Nestas expressões, temos que:

a = raio interno do tubo de revestimento

b = raio externo do tubo de revestimento

r = $(a + b)/2$

p_i = pressão interna gasosa

p_o = pressão externa

No caso de contacto combustível/revestimento, à pressão interna passa a ser acrescida da pressão interfacial de contacto, p_c . Nas expressões acima, para o cálculo de σ_r e

σ_{θ} , o valor de p_i deve ser substituído por $(p_i + p_c)$. A pressão interfacial de contacto é calculada conforme a seguinte expressão [12]:

$$p_c = \left[\frac{\Delta r}{a} \cdot E_c + \frac{2p_o b^2}{b^2 - a^2} + \sigma_t \right] \cdot \left[\frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} + \nu_c + \frac{E_c}{E_f} (1 - \nu_f) \right]^{-1} \quad (25)$$

onde: Δr = interferência calculada combustível/revestimento
 E_f, E_c = módulo de Young do combustível e revestimento
 ν_f, ν_c = razão de Poisson para combustível e revestimento
 σ_t = tensão térmica no revestimento

O limite de escoamento é atingido quando a pressão de contacto se iguala a $p_{c\text{máx}}$, que é dada por:

$$p_{c\text{máx}} = \frac{(\sigma_y - \sigma_t)(b^2 - a^2) + 2 \cdot p_o \cdot b^2}{a^2 + b^2} \quad (26)$$

sendo que:

σ_y é limite de escoamento

$$\sigma_t = \frac{\alpha_c E_c \Delta t (1 - x)}{2(1 - \nu_c) \ln\left(\frac{b}{a}\right)}$$

onde:

$$x = 2 b^2 \left(\ln \frac{b}{a} \right) / (b^2 - a^2)$$

α_c = coeficiente de expansão térmica radial do tubo de revestimento (item 3.2)

Δt = diferença de temperatura entre a superfície interna e externa do tubo de revestimento.

3.8 Produção e Liberação de Gases de Fissão

Durante a irradiação de varetas combustíveis, são produzidos gases de fissão (Xe e Kr) e, dependendo das condições de operação da vareta, uma fração significativa destes gases é liberada da matriz combustível para os espaços vazios da vareta.

A liberação destes gases provoca um aumento do perfil de temperatura na vareta, pois o Xe e Kr têm condutividade de térmica bem menor que a do gás de enchimento (He ou Ar).

Com o decréscimo da condutividade térmica da mistura gasosa, diminui também a condutância do "gap" e, portanto, aumenta o perfil de temperatura no combustível.

A liberação dos gases de fissão diminui a componente gasosa do inchamento do combustível, mas aumenta a pressão gasosa interna da vareta. No presente trabalho a liberação gasosa foi calculada através dos modelos fornecidos nas referências [13] e [14].

3.8.1 Modelo Weisman [13]

O modelo semiempírico desenvolvido por Weisman, considera a liberação gasosa em função do tempo, temperatura, queima e densidade teórica do combustível. O modelo considera a liberação gasosa a partir da matriz do combustível e a liberação do gás aprisionado em contorno de grão e deslocação.

Sendo K_1 a fração do gás de fissão que escapa sem ser aprisionado, o número de moles de gás dn_1 , liberado diretamente no intervalo de tempo dt , é dado por:

$$dn_1 = K_1 \cdot p \cdot dt \quad (27)$$

onde: p é a taxa de produção de gás.

Sendo k a probabilidade de liberação do gás aprisionado por unidade de tempo e C o número de moles de gás aprisionado, o número de moles liberado a partir dos pontos de aprisionamento durante o intervalo de tempo dt é dado por:

$$dn_2 = k C dt$$

Da quantidade dn_2 , somente uma fração K_1 alcança a superfície, de modo que a quantidade total liberada é dada por:

$$dn = dn_1 + K_1 dn_2 = K_1 p dt + K_1 k C dt \quad (28)$$

onde C deve ser igual ao total produzido menos o total liberado, ou seja:

$$C = pt - n \quad (29)$$

Substituindo (29) em (28) e integrando, obtem-se:

$$n = p \left\{ t - \frac{1-K_1}{K_1 k} [1 - \exp(K_1 k t)] \right\} \quad (30)$$

e tendo-se uma potência constante, a fração total liberada é dada por:

$$F = \frac{n}{pt} = 1 - (1-K_1)[1 - \exp(-Kt)]/Kt \quad (31)$$

onde: $K = K_1 k$

$$k = 0,25 \exp(-14800/T)$$

$$K_1 = \exp(-6920/T + 33,95 - 0,338 \text{ DEN})$$

com a temperatura T em Kelvin e a densidade do combustível DEN em %DT.

A extensão de (31) para histórico de tempo-potência variável é feita supondo intervalos com potência constante, de modo que o número de moles Δn_i liberado no i-ésimo intervalo seja:

$$\begin{aligned} \Delta n_i = n_i - n_{i-1} = P_i \left\{ \Delta t_i - \frac{1-K_{1i}}{K_i} [1 - \exp(-K_i \Delta t_i)] \right\} + \\ + C_{i-1} [1 - \exp(-K_i \Delta t_i)] \end{aligned} \quad (32)$$

e a fração total liberada é dada por

$$F = \frac{\sum_i \Delta n_i}{\sum_i p_i \Delta t_i} \quad (33)$$

3.8.2 Modelo Wordsworth [14]

O modelo de Wordsworth supõe que a liberação de gás de fissão resulte, primariamente, da difusão dos átomos gasosos, não sendo considerada a liberação pelo processo de recuo ou "knock-out". Os átomos gasosos são produzidos uniformemente dentro do grão de combustível, sendo coletados nos poros e bolhas, que migram à velocidade constante para os contornos de grão. Considera-se liberado o gás transportado pelo poro ou bolha, quando este alcança o contorno de grão. Em condições de estado estacionário, a quantidade total de gás produzido até um instante t é dado por:

$$V_{\text{prod}} = \dot{E} A g t$$

onde: \dot{E} = taxa de produção de gás de fissão por cm^3
 A = área da seção transversal do combustível
 g = tamanho de grão

O átomo de gás de fissão, que alcança o contorno de grão exatamente no instante t , origina-se da posição x dada pela relação:

$$x = g - vt_1$$

onde: v = velocidade de migração
 t_1 = tempo de migração até o contorno de grão

$$e \quad t_1 = t \quad \text{se} \quad t \leq \frac{g}{v}$$

$$t_1 = \frac{g}{v} \quad \text{se} \quad t > \frac{g}{v}$$

Portanto, o volume liberado de gás de fissão até o instante t é:

$$V_{\text{rel}} = \dot{E} A \int_0^{t_1} \left(\int_0^g \frac{dx}{g-v\tau} \right) d\tau + E \dot{A} \int_{t_1}^t \left(\int_0^g dx \right) d\tau$$

ou seja,

$$V_{\text{rel}} = \frac{\dot{E} A v t^2}{2} \quad \text{para } t \leq g/v$$

$$V_{\text{rel}} = \dot{E} A g t - \frac{\dot{E} A g^2}{2v} \quad \text{para } t > g/v$$

Em condições de estado estacionário, a queima B é diretamente proporcional ao tempo, de modo que:

$$F = B/2 B_{\text{cr}} \quad \text{para } B \leq B_{\text{cr}}$$

$$F = 1 - B_{\text{cr}}/2B \quad \text{para } B > B_{\text{cr}}$$

onde B_{cr} é a queima crítica que é função da temperatura, e ao atingir esta queima o combustível torna-se dinamicamente saturado de gás de fissão.

Os valores empíricos obtidos com base em três regiões de temperatura é dado por:

$$\begin{array}{ll} T \leq 1300^{\circ}\text{C} & B_{\text{cr}} = 80000 \text{ MWd}/t_{\text{m}} \\ 1300^{\circ}\text{C} < T < 1700^{\circ}\text{C} & B_{\text{cr}} = 20000 \text{ MWd}/t_{\text{m}} \\ 1700^{\circ}\text{C} \leq T & B_{\text{cr}} = 0 \end{array}$$

Este modelo pode ser adaptado facilmente para o histórico com potências variáveis. A fração de gás de fissão liberada até o intervalo de tempo anterior é comparada com a fração liberada prevista para o intervalo de tempo que está sendo analisado. Se o último valor é maior que o primeiro (devido, por exemplo, a um aumento de potência), então o gás de fissão produzido anteriormente, mas ainda retido no combustível, é parcialmente liberado, de modo que a fração total do gás liberado se iguale à fração de liberação como calculada para o intervalo de tempo em análise.

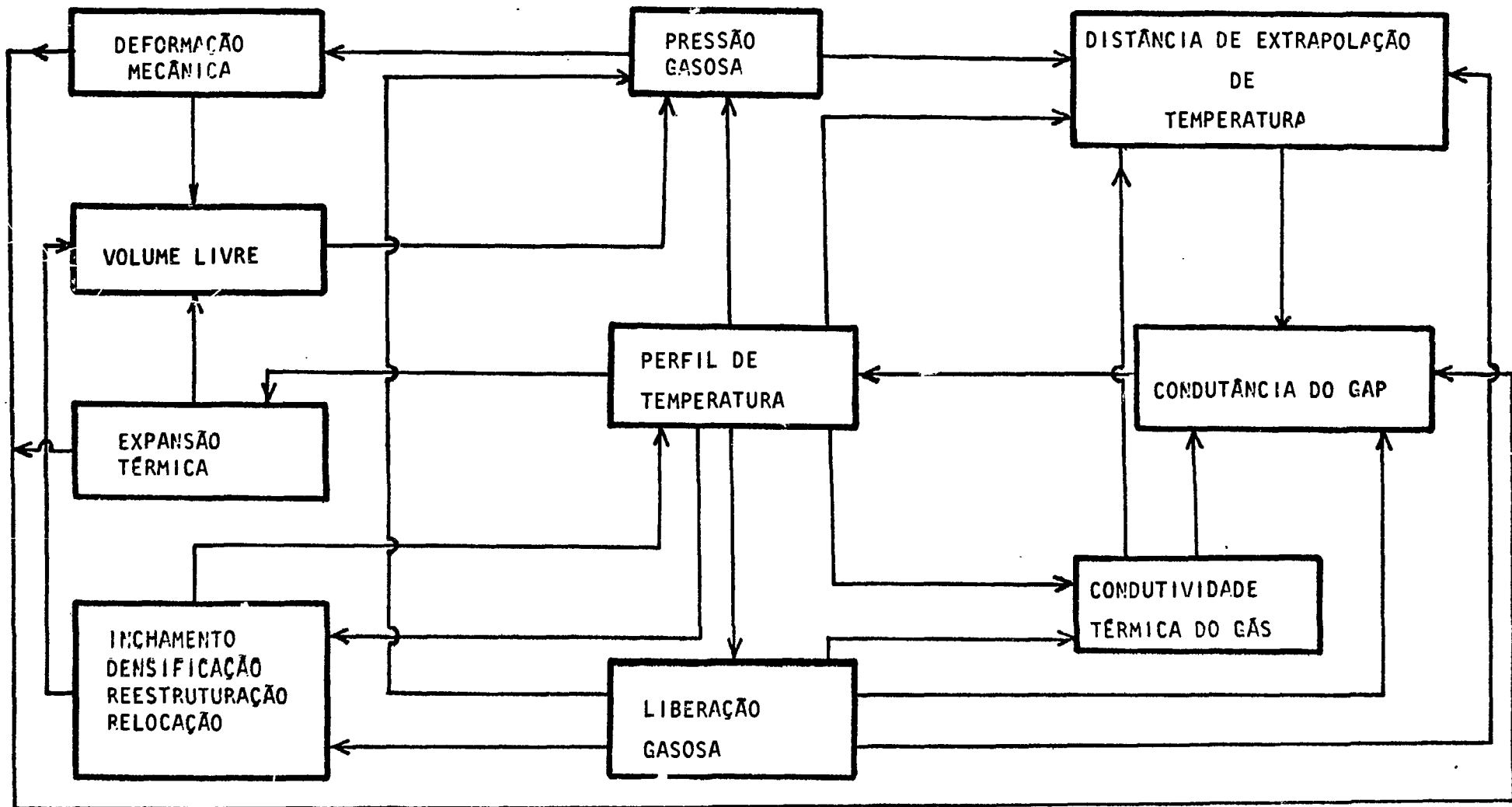


FIG.1-Interdependencia entre elementos de calculo da pressão e fenômenos usuais que ocorrem na vareta em operação

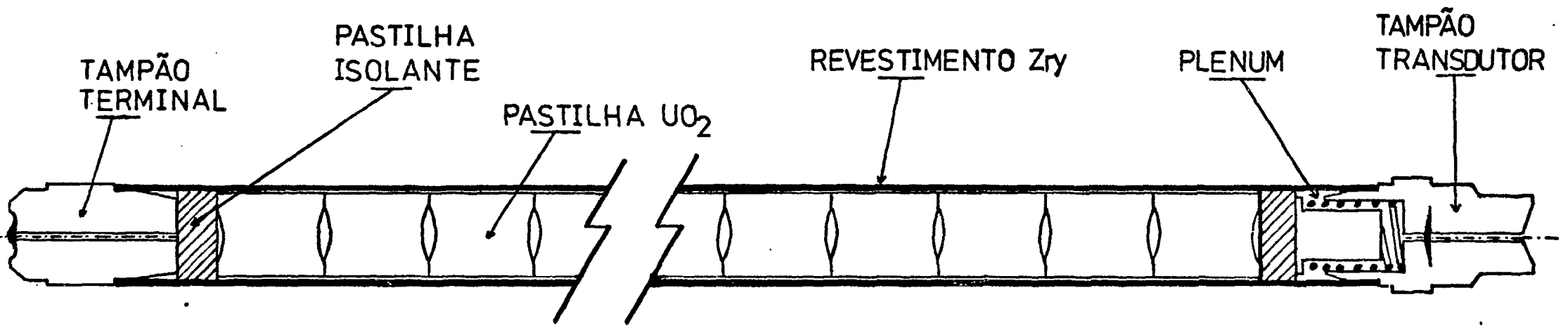


FIG.2- Esquema da vareta combustivel-teste

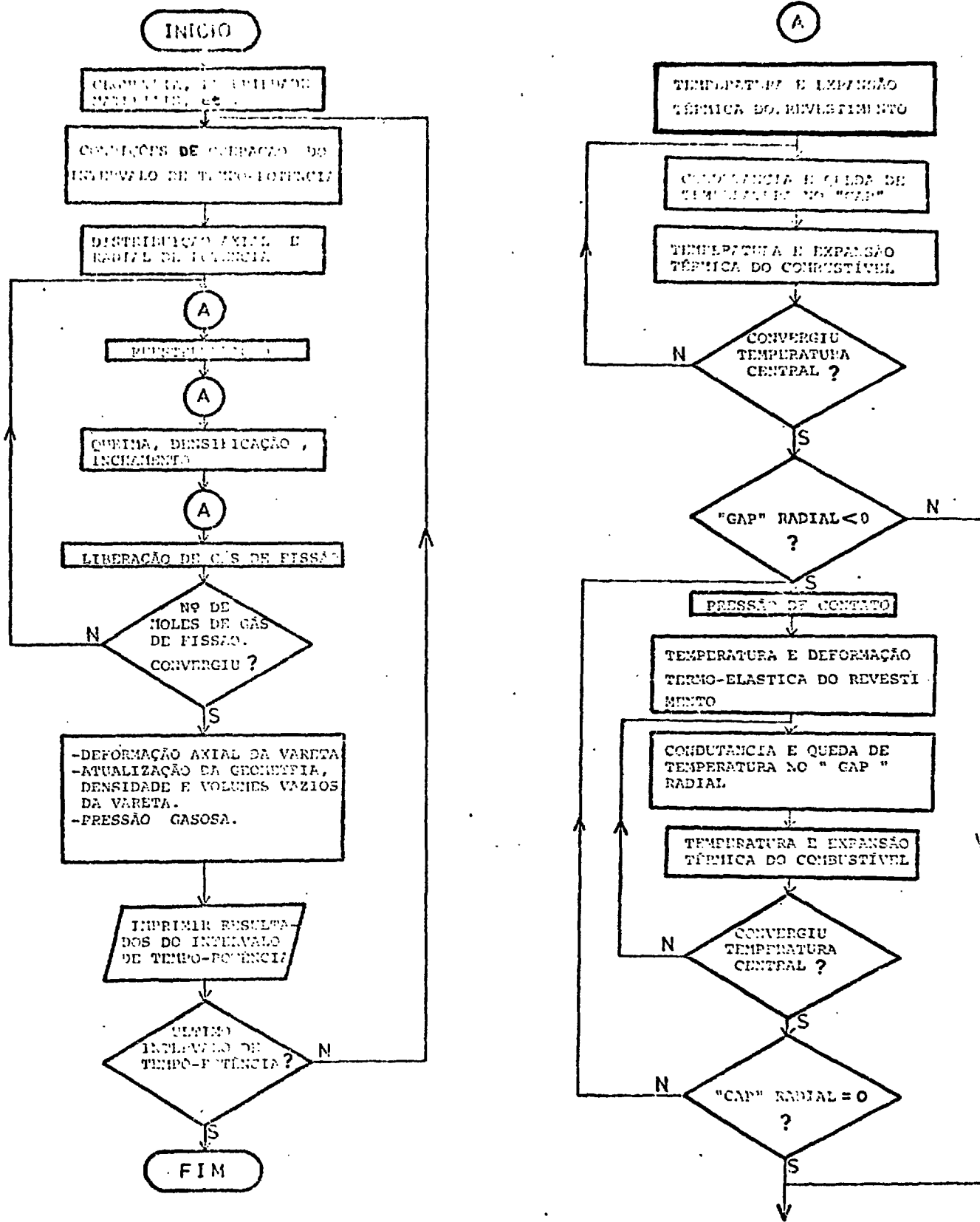


FIG.3-Fluxograma do programa PIG-1

4. PRESSÃO

Os critérios usuais para a pressão interna de uma vareta combustível são:

1) a pressão gasosa de enchimento deve minimizar o estado de sollicitação mecânica do revestimento;

2) a pressão gasosa interna máxima permissível é normalmente limitada a um valor próximo à do sistema de refrigeração.

O 1º critério está relacionado mais diretamente com o valor inicial da pressão gasosa enquanto o 2º critério com a vida útil da vareta combustível, pois em condições normais de operação, os maiores valores da pressão serão observados no fim da vida da vareta.

No cálculo da pressão gasosa, supõe-se que a pressão seja uniforme em todo volume vazio e que o gás tenha comportamento ideal (vide Capítulo 2).

Em nosso trabalho, a pressão gasosa foi calculada utilizando 3 modelos.

4.1 Primeiro Modelo

A relação mais usual para cálculo da pressão é dada por:

$$P = nR/\Sigma (V_i/T_i)$$

onde:

- n = número de moles de átomos gasosos;
 R = constante dos gases;
 V_i = volume vazio;
 T_i = temperatura característica associada ao volume V_i ;
 i = espaços vazios: folga radial, porosidade aberta, canal central, "plenum" e outros.

O número de moles n é dado por:

$$n = n_1 + n_2 + n_3$$

onde:

- n_1 = número de moles do gás de enchimento (He ou Ar);
 n_2 = número de moles de impurezas voláteis;
 n_3 = número de moles de gás de fissão (seção 3.7).

As impurezas voláteis têm origem no processo de fabricação do combustível. Essas impurezas são liberadas no início da irradiação nas regiões quentes do combustível e, posteriormente são adsorvidas ou absorvidas nas regiões de menor temperatura da vareta (extremidade da vareta). Os picos de pressão observados no início da irradiação são provocados por este processo. Devido a seu efeito ser usualmente transitório e curto, não foi considerada a liberação destas impurezas.

4.1.1 Volumes Vazios e Temperaturas Características

Os volumes vazios considerados são: a folga radial,

o canal central, os "dishes", a porosidade aberta, o "plenum" e outros associados com aspectos de fabricação da vareta.

a) Folga Radial

O volume vazio devido a folga radial combustível-revestimento é dado pela relação:

$$V_{\text{gap}} = 2\pi R_c (RUG1 + RUG2) H_c + \pi (R_{ir}^2 - R_c^2) H_c$$

onde:

R_c = raio do combustível;

$RUG1$ e $RUG2$ = rugosidades médias do revestimento e combustível;

H_c = altura da coluna combustível;

R_{ir} = raio interno do revestimento

O 1º termo refere-se ao volume devido às rugosidades, e o 2º termo à separação física entre revestimento e combustível. No caso de contato combustível-revestimento, o 2º termo será nulo. O raio R_c não inclui a relocação do combustível, visto que o volume da folga radial ocupado pelo combustível relocado corresponde aproximadamente ao volume das trincas formadas e além disso, estas trincas estão conectadas à folga radial.

A temperatura característica deste volume é dada por:

$$T_{\text{gap}} = \frac{T_{ir} + T_{ec}}{2}$$

onde:

T_{ir} = temperatura interna do revestimento;

T_{ec} = temperatura externa do combustível.

b) Canal Central

O volume vazio associado ao canal central é dado pela expressão:

$$V_{cc} = \pi R_{cc}^2 H_c$$

onde:

R_{cc} é o raio do canal central.

A temperatura característica T_{cc} é dada pela temperatura central do combustível.

c) "Dishes"

O volume dos "dishes" é calculado pela relação:

$$V_{dh} = F_{dh} \cdot V_c$$

onde:

F_{dh} = volume dos "dishes"/volume do combustível;

V_c = volume do combustível.

A fração F_{dh} é, inicialmente, um parâmetro de fabricação, mas com a vareta em operação seu valor é alterado devido ao comportamento plástico do combustível à temperaturas maiores que 1.200°C [15].

A temperatura característica é dada por:

$$T_{dh} = \frac{T' + T_{cc}}{2}$$

onde T' é a temperatura do combustível na posição radial correspondente a borda do "dish".

d) Porosidade Aberta

O volume vazio associado a porosidade aberta é dado pela expressão:

$$V_{pab} = F_{pab} (1 - \rho) V_c''$$

onde:

V_c'' = volume do combustível contendo a região não reestruturada e de grãos equiaxiais;

ρ = densidade do combustível (fração da DT);

F_{pab} = volume de porosidade aberta/volume total dos poros.

A temperatura característica da porosidade aberta é estimada pela relação:

$$T_{pab} = \frac{T_c'' + T_{ec}}{2}$$

onde:

T_c'' = temperatura interna à região de grãos equiaxiais;

T_{ec} = temperatura externa do combustível.

e) "Plenum" Axial

O "plenum" axial tem um volume dado por:

$$V_{pl} = \pi R_{ir}^2 (H_r - H_c)$$

onde H_r é a altura do revestimento e V_{pl} é o volume máximo do "plenum" axial que pode ser ocupado pelo combustível.

A temperatura característica é dada por:

$$T_{pl} = T''' - \frac{1}{3} \Delta T'''$$

onde T''' é a temperatura média da folga radial na região axial do combustível conectada ao "plenum" e $\Delta T'''$ é a diferença entre T''' e a temperatura do refrigerante (T_{refr}).

f) Volume Mínimo

O volume mínimo (V_{min}) refere-se a aspectos tais como o furo do transdutor de pressão, chanfro do tampão terminal e, principalmente, ao volume mínimo do "plenum" considerando a máxima compressão da mola. A temperatura associada a este volume é dada por T_{pl} .

4.2 Segundo Modelo

O 2º modelo utilizado para cálculo da pressão gasosa é dado pela expressão:

$$P = nR / \left(\frac{V_1}{T_{\text{gap}}} + \frac{V_2}{T_{\text{pl}}} \right)$$

onde: $V_1 = \sum_i V_i$ $i =$ folga radial, canal central, poro-
sidade aberta, "dishes".

$$V_2 = V_{\text{pl}} + V_{\text{min}}$$

Os volumes e as temperaturas são calculados como anteriormente. As temperaturas T_{gap} e T_{pl} correspondem aos menores valores de temperatura associadas aos volumes vazios disponíveis para o gás presente na vareta combustível. Portanto, este modelo deverá fornecer em geral valores calculados inferiores às pressões medidas.

4.3 Terceiro Modelo

o 3º modelo utilizado no cálculo da pressão é dado pela relação:

$$P = nR \bar{T}_{\text{vol}} / V$$

onde:

$$V = \sum V_i$$

$i =$ folga radial, canal central, porosidade aberta, "dishes", "plenum", volume mínimo.

$\bar{T}_{\text{vol}} = \sum_i T_i V_i / V$ é a temperatura volumétrica média dos volumes vazios e T_i é a temperatura característica determinada como na seção 4.1

Esta expressão deverá fornecer valores de pressão superiores aos medidos.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 Liberação Gasosa

Durante os exames de pós-irradiação das varetas DT-50 e DT-51, foram obtidos no puncionamento $1,71 \times 10^{-4}$ moles e $2,18 \times 10^{-4}$ moles de gás.

A liberação gasosa foi calculada pelos modelos de Wordsworth e Weisman, descrito na seção 3.8.

Com o modelo de Weisman foi obtido:

1) O número total de moles de gás livre (gás de fissão liberado + gás de enchimento) calculado com este modelo ao final da irradiação foi bem inferior ao determinado no exame de pós-irradiação;

2) A evolução temporal da pressão calculada não acompanhou satisfatoriamente a evolução da pressão medida mesmo após o ajuste entre a massa gasosa livre calculada e a medida (ajuste obtido através de um dado fator multiplicativo).

Por esses dois motivos, os cálculos finais foram realizados somente com o modelo de Wordsworth, com o qual foi obtido:

DT's	Nº de moles de gás	
	MEDIDO	CALCULADO
50	$1,71 \times 10^{-4}$	$1,76 \times 10^{-4}$
51	$2,18 \times 10^{-4}$	$3,05 \times 10^{-4}$

Subtraindo destes valores a quantidade de He e calculando-se o total de gás produzido, obteve-se as seguintes frações de liberação gasosa:

DT's	Fração de Liberação	
	MEDIDO	CALCULADO
50	16,2%	16,9%
51	19,0%	30,5%

Os resultados acima indicam que o modelo de liberação fornece frações de liberação acima dos resultados experimentais.

5.2 Evolução da Pressão Interna

Na análise da evolução da pressão interna calculada pelo Programa PIG-1, verificou-se que alguns aspectos foram comuns à todas as varetas e outros específicos a cada caso.

5.2.1 Varetas DT's 50 e 51

Nas Figuras 4 e 5 estão plotadas, em função do tempo de irradiação, a pressão gasosa medida, as pressões calculadas pelos três modelos descritos na seção 4 e as potências de operação das varetas.

Devido a estrutura de cálculo adotada no Programa

PIG-1, as diferenças observadas entre as pressões calculadas e medidas são devidas às temperaturas características adotadas para os volumes vazios.

5.2.2 Varetas DT's 54 e 55

Os resultados obtidos para estas varetas estão mostrados nas Figuras 6 e 7. As varetas DT's 54 e 55 estiveram sujeitas a um tempo de irradiação bem superior ao das varetas anteriores e ainda a uma variação de potência mais diversificada. Em virtude disso, as deficiências dos modelos utilizados tornaram-se mais nítidas. A principal deficiência está associada à liberação gasosa nos transientes de potência, que não é considerada no modelo de Wordsworth (item 3.8.2). A ausência deste elemento no modelo de liberação tornou-se mais acentuada para a vareta DT-54 no período entre o 83º e o 125º dia (Figura 6) devido a menor potência linear desta vareta e ao fato desta potência ser decrescente neste período. Tal comportamento neste mesmo período de tempo não é nítido para a vareta DT-55 (Figura 7) devido a maior potência linear de operação desta vareta e a liberação gasosa nos transientes ser portanto menos acentuada, uma vez que é menor a quantidade de gás acumulado nos contornos de grão.

A partir do 136º dia, os resultados não foram considerados, devido a falha do transdutor de pressão.

5.2.3 Pressão Calculada x Pressão Medida

Comparam-se nas Figuras 8, 9 e 10 os valores da pressão interna dos gases de fissão obtidos experimentalmente com aqueles calculados pelo Programa PIG-1, respectivamente, para os modelos 1, 2 e 3 (descritos no capítulo 4).

O modelo 1 (Figura 8) apresenta boa correlação, com valores calculados ligeiramente superiores aos medidos.

Quanto ao modelo 2 (Figura 9), os valores calculados foram inferiores aos medidos.

O modelo 3 (Figura 10) apresenta maior dispersão dos pontos, com valores calculados bem superiores aos medidos.

O modelo de liberação gasosa utilizado nesta primeira versão do Código PIG-1 apresenta resultados de fração de gás liberada superiores aos valores medidos, conforme comentado no item 5.1. Em versões posteriores deste Código, pretende-se efetuar correção nesse modelo de liberação, e/ou utilizar um novo modelo que venha fornecer melhores resultados.

A tendência a ser observada nestes três modelos será:

No modelo 1, os valores calculados aproximarão mais dos valores medidos, podendo ser este modelo considerado como de melhor estimativa.

No modelo 3, os valores calculados permanecerão ainda superiores aos medidos, podendo este modelo ser utilizado

para cálculos conservativos.

Finalmente, quanto ao modelo 2, os valores calculados tornar-se-ão ainda mais inferiores, não sendo interessante do ponto de vista de projetos.

FIGURA - 4

EVOLUÇÃO DA PRESSÃO INTERNA DA VARETA DT-50

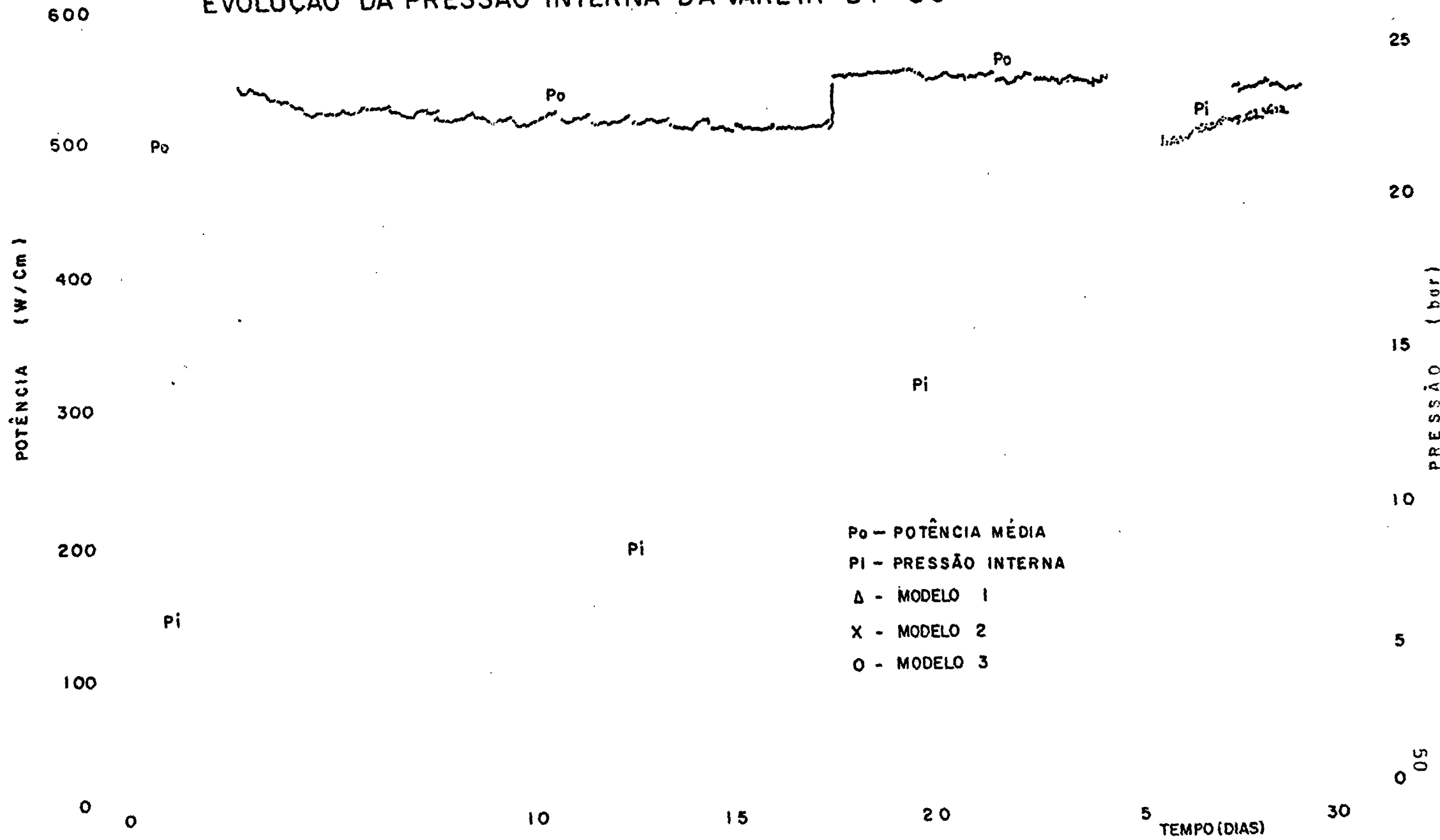
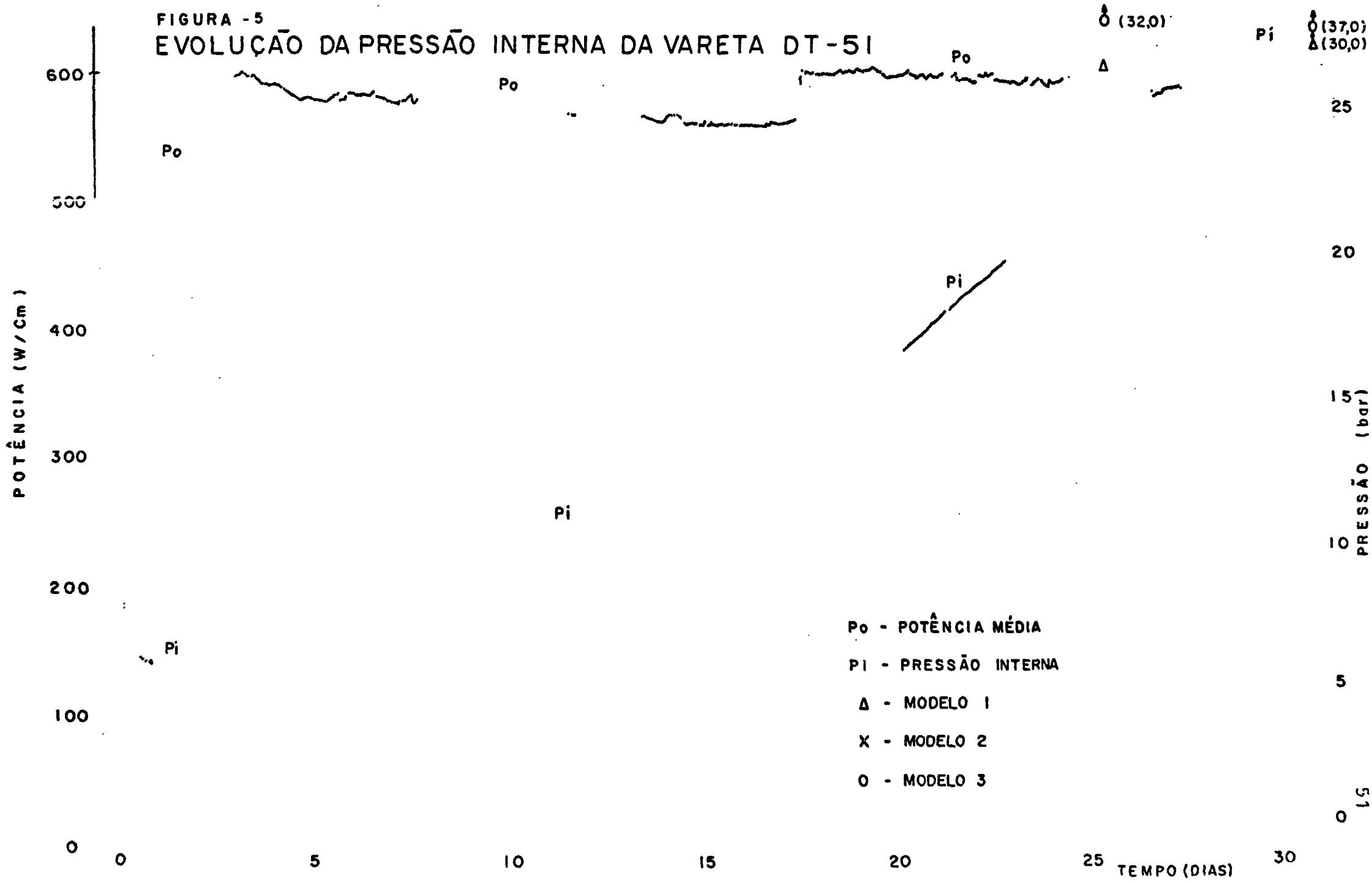


FIGURA - 5

EVOLUÇÃO DA PRESSÃO INTERNA DA VARETA DT-51



○ (32,0)

○ (37,0)
△ (30,0)

25

20

15

10

5

0

15

30

FIGURA - 6
EVOLUÇÃO DA PRESSÃO INTERNA DA VARETA DT-54

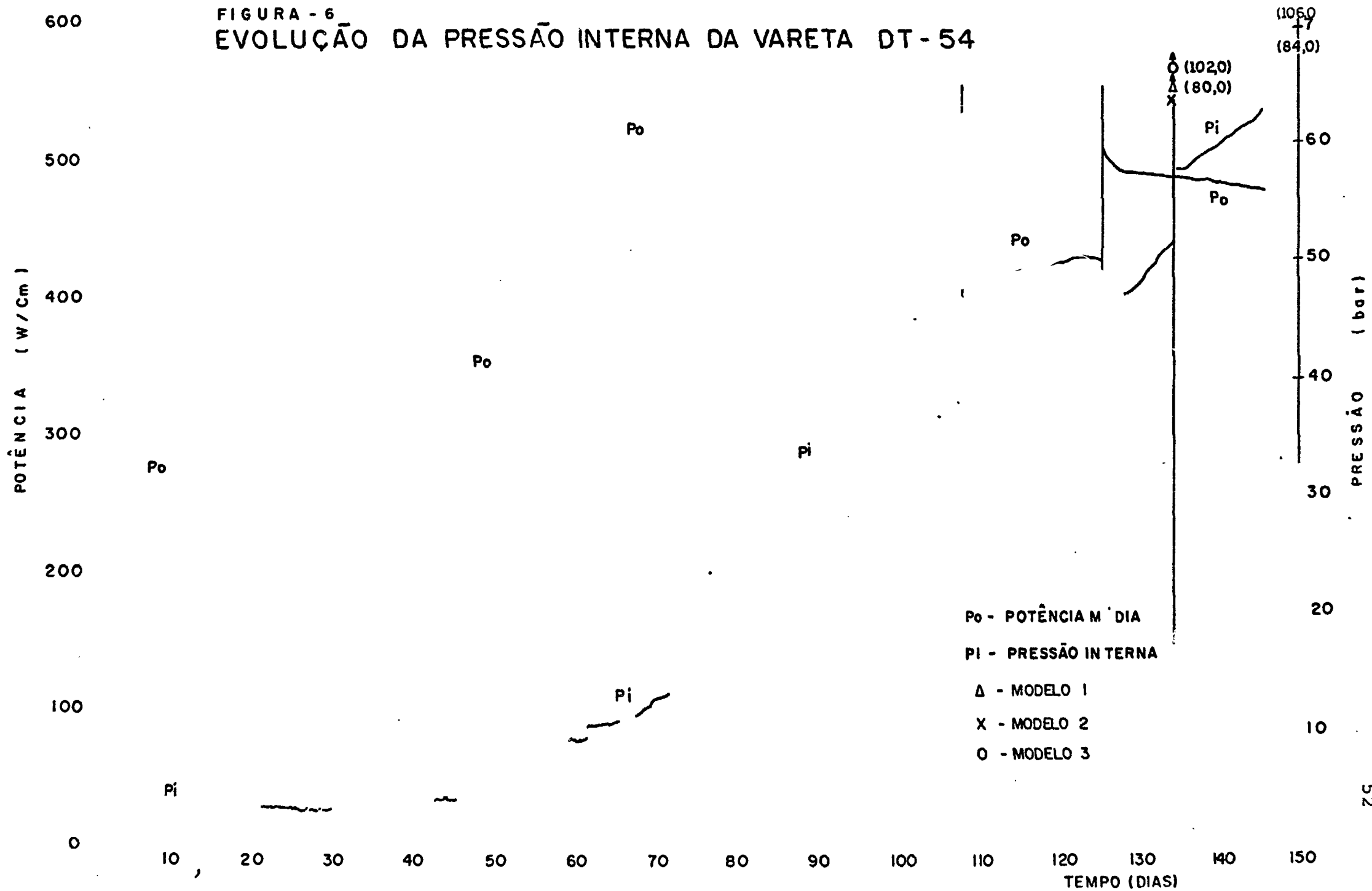


FIGURA 7-A

EVOLUÇÃO DA PRESSÃO INTERNA DA VARETA DT-55

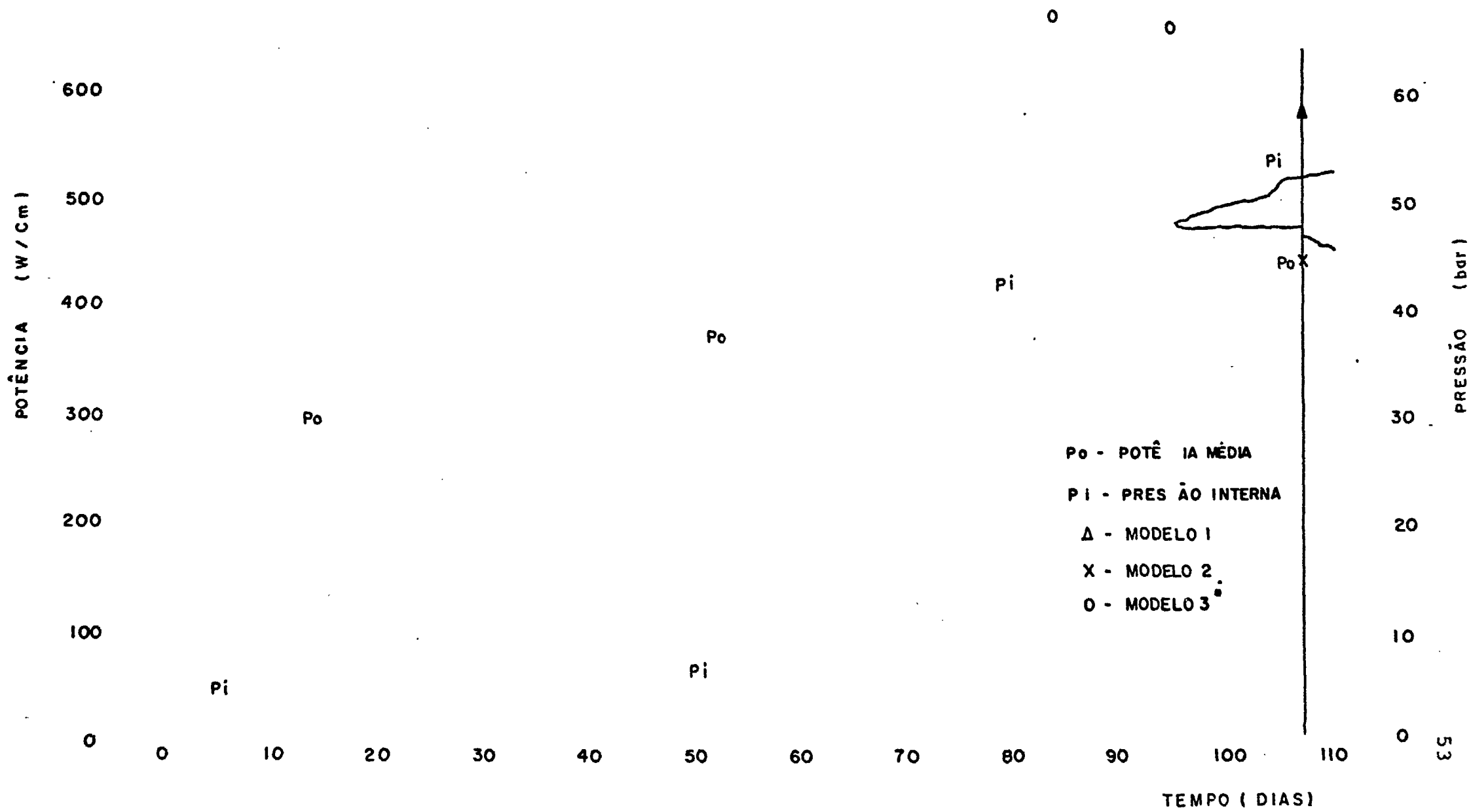
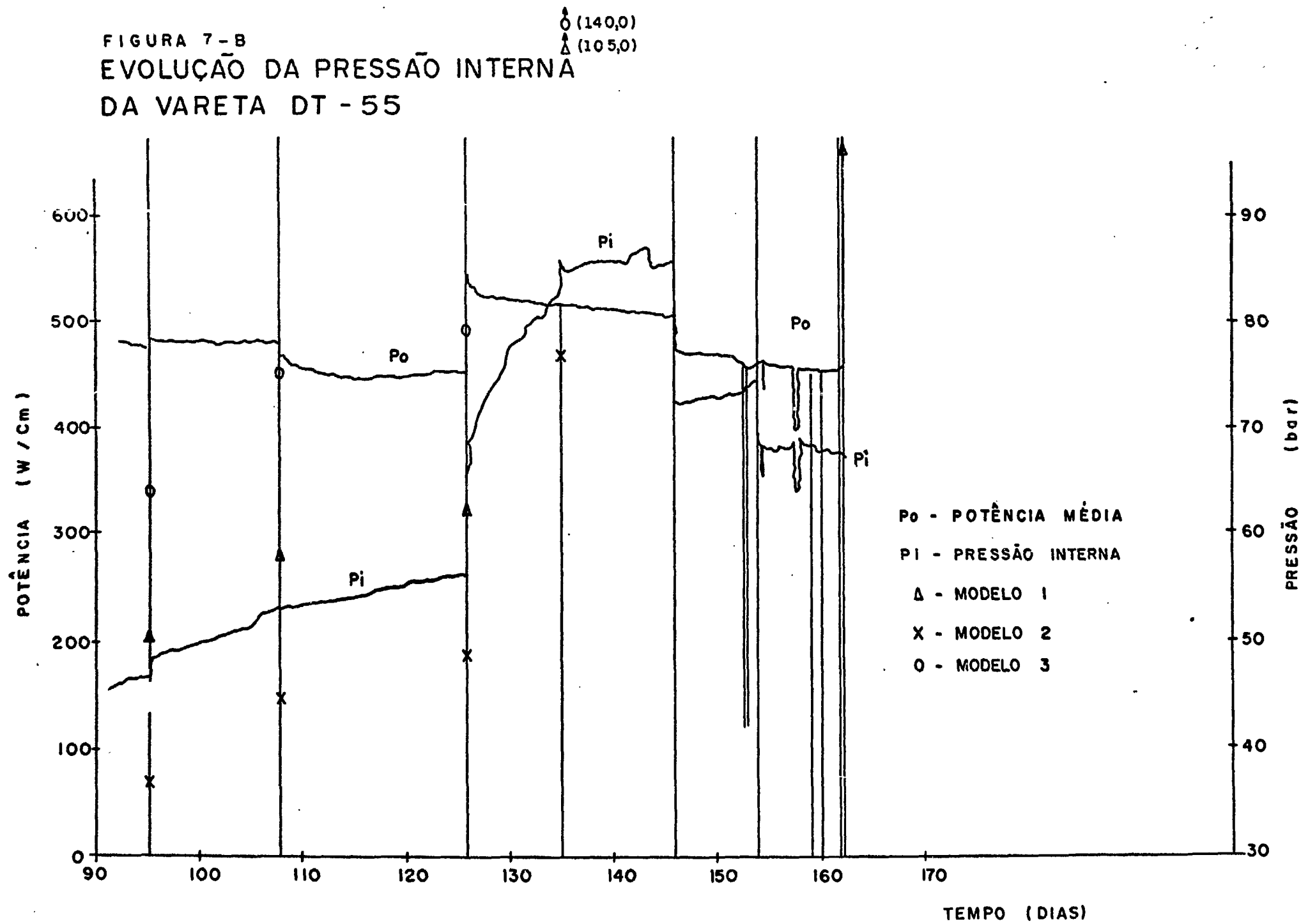


FIGURA 7-B
 EVOLUÇÃO DA PRESSÃO INTERNA
 DA VARETA DT - 55



modelo 1 :

$$P = \frac{nR}{\sum \frac{V_i}{T_i}}$$

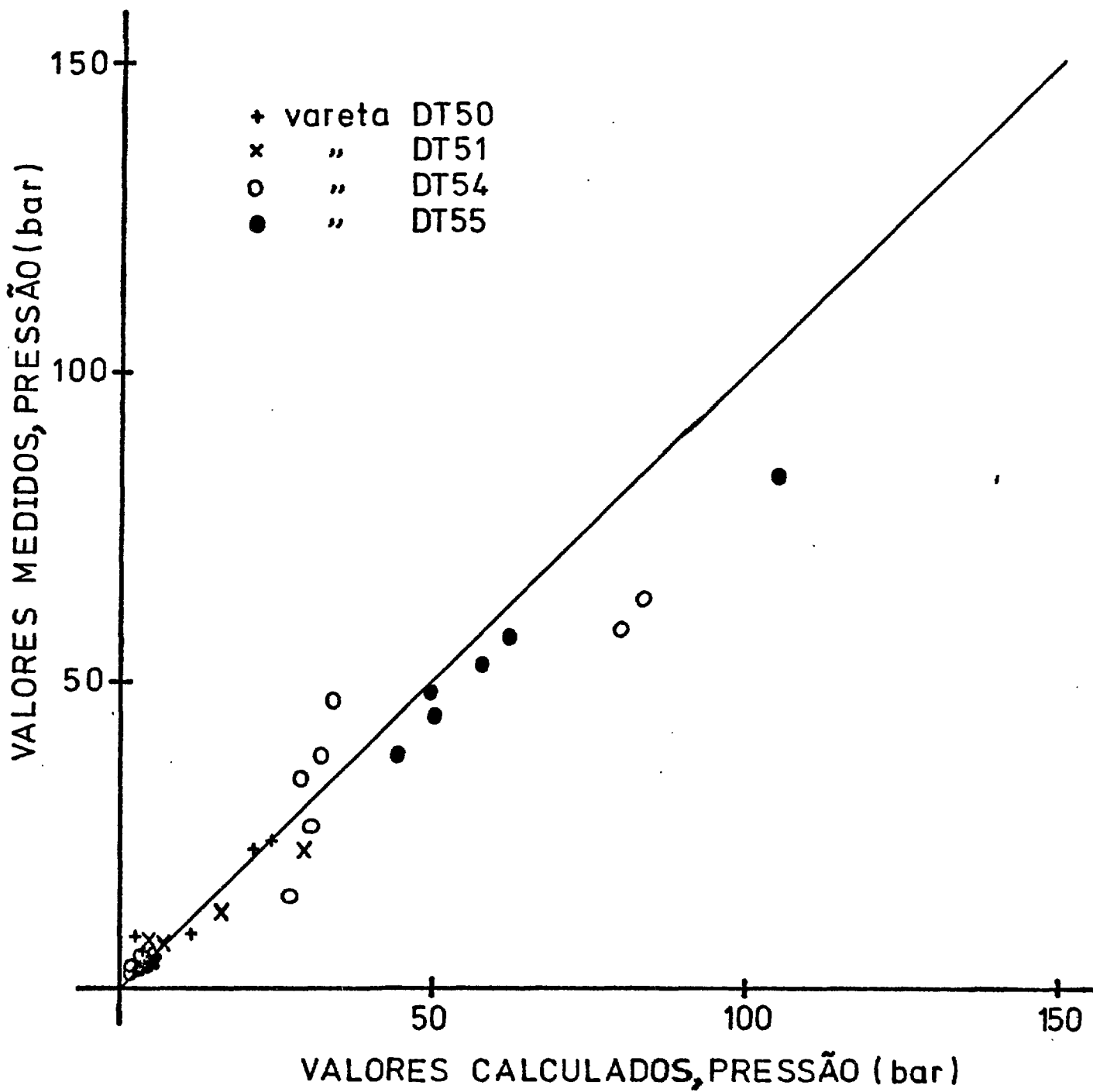


FIG.8- Comparação entre valores calculados e medidos da pressão

modelo 2:

$$P = \frac{nR}{\frac{V1}{T_{gap}} + \frac{V2}{T_{pl}}}$$

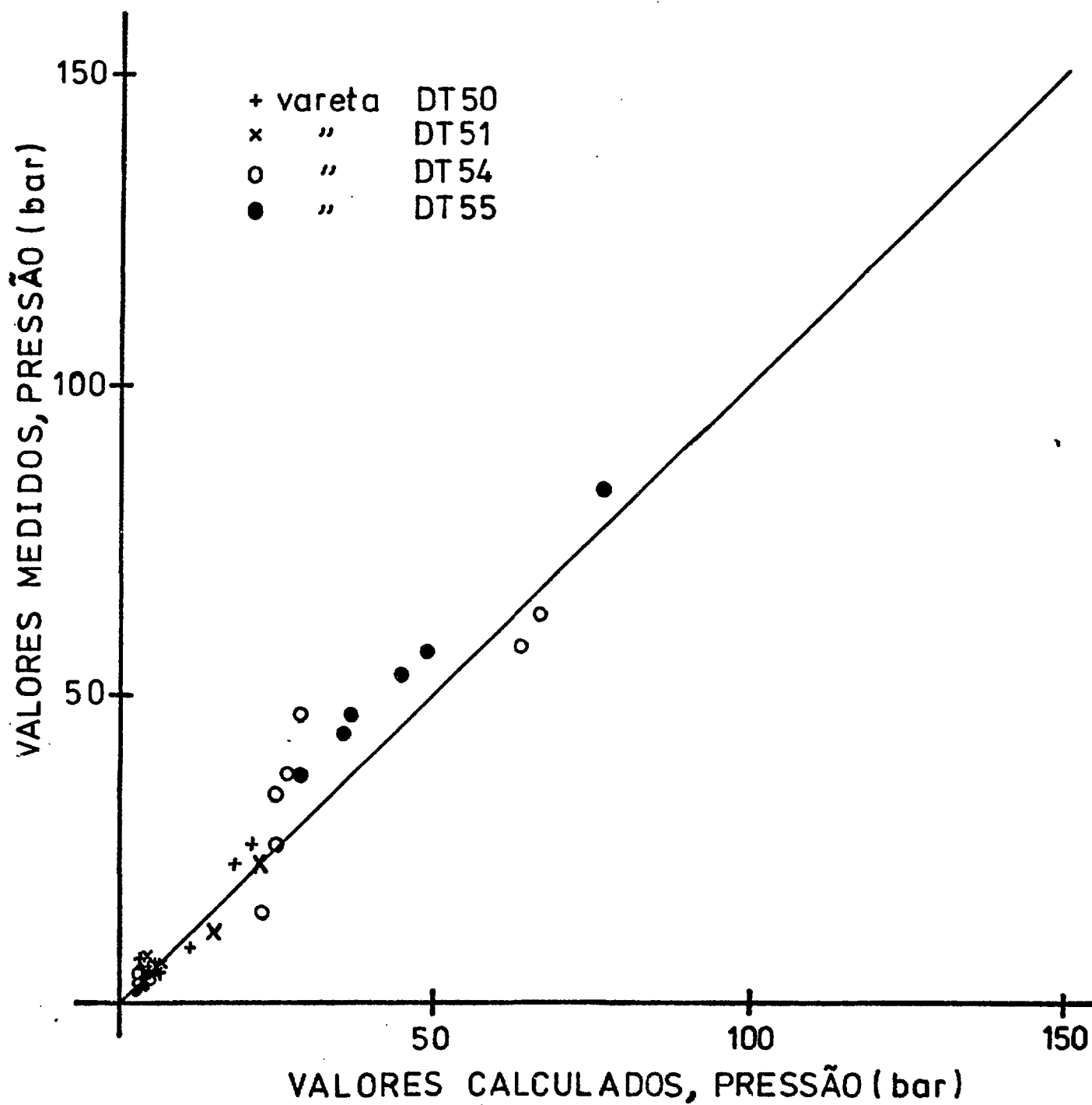


FIG.9- Comparação entre valores calculados e medidos da pressão gasosa

modelo 3:

$$P = \frac{n R \bar{T}_{vd}}{V}$$

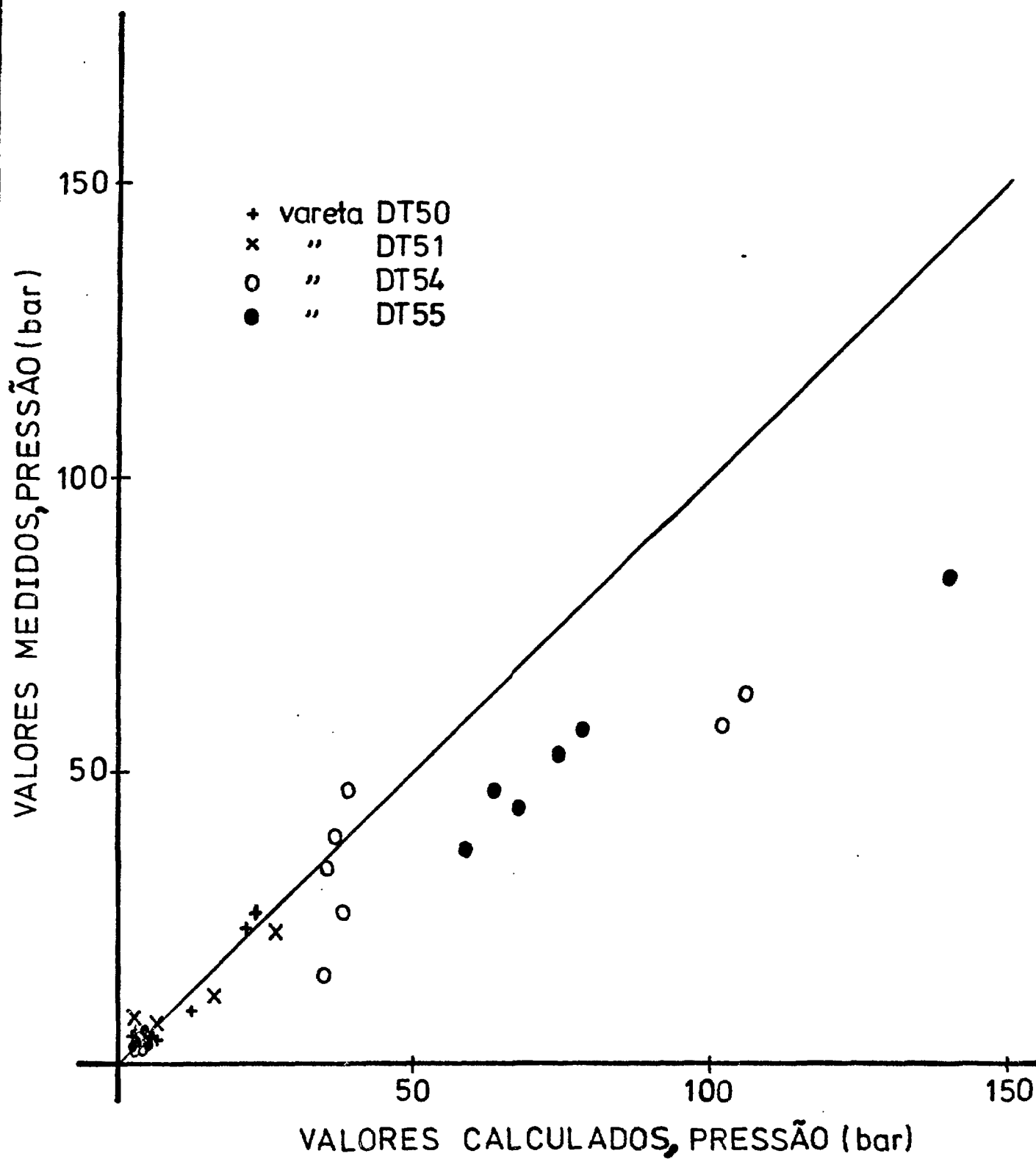


FIG.10 - Comparação entre valores calculados e medidos da pressão gasosa

6. CONCLUSÃO

A análise do comportamento dos gases de fissão, no interior da vareta, permitiu-nos observar, como mostrado no capítulo 2, que a pressão pode ser calculada pela equação dos gases ideais sem prejuízo dos resultados finais e com a vantagem de maior rapidez e simplicidade.

A análise dos diversos modelos de cálculo existentes na literatura para simular os fenômenos que ocorreram na vareta combustível durante a irradiação, permitiu-nos escolher e estruturar a base teórica para o desenvolvimento do Código de Previsão de Desempenho PIG-1.

Conforme pode ser observado no capítulo 5, os resultados obtidos podem ser considerados bons. Os valores obtidos pelo modelo 1, que é o que melhor se ajustou à nossa sistemática de cálculos, estão acima dos valores medidos, o que vem de encontro aos requisitos de segurança.

Importante ressaltar que o Programa de Cálculo PIG-1, desenvolvido na Divisão de Elemento Combustível, alia à simplicidade de utilização a rapidez de execução e poderá, futuramente, evoluir para um código comparável àqueles utilizados em projeto de combustível.

Finalmente, vale-nos observar que de imediato modificações devem ser feitas, principalmente no modelo de liberação gasosa, devido a sua sensível influência sobre a pressão interna.

Outro aspecto a ser considerado é o que se refere a rampas de potência. Um tratamento mais adequado com maior conhecimento dos fenômenos que realmente ocorrem durante uma rampa de potência poderá melhorar sensivelmente os resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

- [1] HERREN, M. Nachuntersuchungen an 2 Testbrennstäben, RBE 35 und 36 aus dem Bestrahlungseisenschub LV 9.3-E 31. Jülich, Kernforschungsanlage Jülich, 1975, (KFA-IRW-IB-25/75).
- [2] REICHARDT, K. Druck - und Temperaturmesseinrichtung. Jülich, Kernforschungsanlage Jülich, s.d. (KFA-27).
- [3] MATPRO - Versão 09; a handbook of materials properties for use in the analysis of light water reactor fuel rod behavior. Idaho, EG&G Idaho, 1976 (TREE NUREG-1005).
- [4] ZIMMERMANN, H. Swelling behavior of ceramic nuclear fuels under irradiation. Oak Ridge, Tennessee, USAEC, 1970 (EURFNR-743).
- [5] GEITHOFF e outros. Irradiation Performance of Fast Reactor Fuels, presented at International Symposium on Plutonium Fuel Technology, AIME Symposium 1967 Nuclear Metallurgy 13, 1968.
- [6] GREENWOOD, G.W. and SPEIGHT, M.V. An analysis of the diffusion of fission gas bubbles and its effect on the behaviour of reactor fuels. Journal of Nuclear Materials, 10(2): 140-144, 1963.
- [7] DIAS, J.W.C. Analysis of the behavior of fission product gas in solid fast reactor oxide fuel under transient heating conditions. Los Angeles, University of California, 1973 (Tese).
- [8] PINTO, L.C.M. Determinação das condições de incha-

mento no UO_2 sob irradiação. Belo Horizonte, Instituto de Pesquisas Radioativas, 1975 (Tese de Mestrado. Curso de Ciências e Técnicas Nucleares).

- [9] ASSMANN, H. & STEHLE, H. Thermal and in-reactor densification of UO_2 , mechanisms and experimental results. Nuclear Engineering and Design, Amsterdam, 48 (1): 49-67, jun., 1978.
- [10] OLANDER, D.R. Fundamental aspects of nuclear reactor fuel elements. Washington, United States Energy Research and Development, 1976. V.1 (RID-Z6711-P1).
- [11] JOHNSON, W. & MELLOR, P.B. Engineering plasticity. London, Van Nostrand Reinhold, 1973. 646 p.
- [12] G.R. HORN AND F.E. PANISKO. User's Guide for GAPCON: A Computer Program to Predict Fuel-to-Cladding Heat Transfer Coefficients in Oxide Fuel Pins, HELD-TME-72-128, September, 1972.
- [13] J. WEISMAN, P.E. MAC'DONALD et al. Fission gas release from UO_2 fuel rods with time varying power histories. Transactions of the American Nuclear Society. Hinsdalle, Ill., 12(2): 900-901, nov. , 1969.
- [14] WORDSWORTH, J. IAMBUS-1; a digital computer code for the design, in-pile performance prediction and post- irradiation analysis of arbitrary fuel rods. Separata de Nuclear Engineering and Design, Amsterdam, 31(3): 309-336, Feb., 1975.
- [15] GAPCON - Thermal - 3. Code description. Richland , Battelle Pacific Northwest Laboratories, 1978 (PNL-2434).