

TÍTULO

. MODELO DE EXPANSÃO TÉRMICA DO GAPCON-THERMAL-3

NOTAS CORRELATAS

DETR.PD 081/79

DETR.PD 105/80

OBJETIVO

Analisar o modelo de expansão térmica do código Gapcon-Thermal-III

LISTA DE DISTRIBUIÇÃO

SUPED * (1)

ASPC.PD * (1)

DETR.PD (2)

DIAAC.PD ()

DIECB.PD (2)

DIFNU.PD * (1)

DISCO.PD ()

DITES.PD ()

LABFRE.PD ()

LABTEH.PD ()

AUTOR(ES) ()

SEDOE.PD * (1)

OUTROS

* Apenas folha de rosto



cma.

RESUMO E CONCLUSÕES

No presente trabalho é descrito o modelo de expansão térmica do código Gapcon-III e o efeito desta expansão nos volumes vazios e pressão gasosa interna da vareta. A comparação do modelo de expansão térmica diametral livre com resultados experimentais mostra que o modelo de expansão livre corresponde a uma situação ideal e é limite superior para os dados experimentais.

ÍNDICE

1. Introdução	2/22
2. Expansão Térmica Livre do Combustível	2/22
3. A Expansão Térmica na Estrutura de Elementos Finitos	5/22
4. Os Volumes Vazios e a Expansão Térmica	9/22
5. A Pressão Gasosa e a Expansão Térmica	12/22
6. Resultados Experimentais da Expansão Diametral	15/22
Referências	16/22
Figuras	17/22

Nº. CÓPIAS

8

AUTOR (ES)	VISTO	DATA	APROVAÇÃO	VISTO	DATA
F.S. LAMEIRAS	<i>[Signature]</i>	15/7/80	CHEFE DO LAB. CU GRUPO		
N.M. SOARES	<i>[Signature]</i>	15/7/80	CHEFE DA DIVISÃO	<i>[Signature]</i>	16.07.80
M.S. DIAS	<i>[Signature]</i>	15/7/80			
CLASSIFICAÇÃO	TAREFA: 21.01				

MODELO DE EXPANSÃO TÉRMICA DO GAPCON-THERMAL-3

1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho estuda-se o modelo de expansão térmica da vareta utilizado no Gapcon Thermal III. Não havendo contato combustível - revestimento, o código adota para o combustível um modelo de expansão quase livre de tensões. Para o revestimento, o código utiliza o método dos elementos finitos e a expansão térmica é calculada através de um modelo radial e um axial. Havendo contato, a expansão térmica do combustível é obtida de modo análogo à do revestimento.

A expansão térmica através do método dos elementos finitos situa-se dentro do cálculo elástico do modelo de análise mecânica do código.

2. EXPANSÃO TÉRMICA LIVRE DO COMBUSTÍVEL

2.1 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.

Se N é o número de contornos radiais no modelo de elementos finitos do combustível, tem-se $2N - 2$ anéis numa faixa radial do combustível.

AUTOR

TÍTULO

DATA

APROVAÇÃO

VISTO

DATA

A espessura inicial de cada anel é dada por:

$$\delta r_i^0 = (r_b - r_a) / (2N - 2)$$

onde r_b é o raio externo do combustível e r_a é o raio do canal central (figura 1a).

No código GAPCON-III é dada uma relação empírica para a deformação térmica do UO_2 e $UO_2 - PuO_2$, até 5% de PuO_2 :

$$\theta(T_i) = 2,896 \times 10^{-9}(T_i^2 - T_0^2) + 6,797 \times 10^{-6}(T_i - T_0) \quad (1)$$

onde

T_0 = temperatura de referência (=21°C)

T_i = temperatura no centro do anel i (°C)

A temperatura T_i no centro r_i de cada anel é calculada, conforme [1,2], através de uma expansão em série de potência da forma:

$$T = C_1 + C_2\left(\frac{r}{r_d}\right) + C_3\left(\frac{r}{r_d}\right)^2 + C_4\left(\frac{r}{r_d}\right)^3 + C_5\left(\frac{r}{r_d}\right)^4 + C_6\left(\frac{r}{r_d}\right)^5 \quad (2)$$

onde

r = posição radial no combustível.

r_d = raio externo da vareta combustível

C_1, \dots, C_6 = coeficientes dependentes dos parâmetros que afetam o perfil de temperatura, tais como potência, condutividade térmica, etc; tendo inclusive valores diferentes caso a posição radial r esteja dentro da região reestruturada ou não do combustível.

A variação térmica da espessura do anel i será portanto:

$$\delta r_i - \delta r_i^0 = \theta(T_i) \cdot \delta r_i^0$$

tal que:

$$\delta r_i = \delta r_i^0 [1 + \theta(T_i)]$$

onde

δr_i^0 = espessura radial inicial da zona anular i;

δr_i = espessura radial final da zona anular i

Sendo R_b o raio final do combustível e R_a o raio final do canal central, a espessura final do combustível é dada por:

$$R_b - R_a = \sum_{i=1}^{2N-2} \delta r_i = \sum_{i=1}^{2N-2} \delta r_i^0 + \sum_{i=1}^{2N-2} \theta(T_i) \cdot \delta r_i^0$$

$$R_b - R_a = r_b - r_a + \sum_{i=1}^{2N-2} \theta(T_i) \cdot \delta r_i^0$$

O raio final do combustível é dado por:

$$R_b = r_b + (R_a - r_a) + \sum_{i=1}^{2N-2} \theta(T_i) \cdot \delta r_i^0$$

onde

$R_a - r_a$ = variação térmica do raio do canal central, e, conforme [2], é dada por:

$$R_a - r_a = \theta(T_{2N-2}) \cdot r_a \quad (3)$$

e $\theta(T_{2N-2})$ é a deformação térmica do anel $2N - 2$.

O raio final será então expresso por (figura 1b):

$$R_b = r_b + r_a \cdot \theta(T_{2N-2}) + \sum_{i=1}^{2N-2} \theta(T_i) \cdot \delta r_i^0 \quad (4)$$

2.1.1

Expansão Livre para outros Combustíveis

A alteração em relação ao modelo anterior para outros combustíveis, que o UO_2 e $UO_2 + PuO_2$ (até 5%), está no cálculo de $\theta(T_i)$, que no caso será dado por:

$$\theta(T_i) = \alpha_1(T_i) \cdot \Delta T = \alpha_1(T_i) \cdot (T_i - T_0) \quad (5)$$

onde o coeficiente de expansão térmica α_1 é obtido numa tabela de referência fornecida pelo usuário do código.

—Portanto as variações radiais do combustível devido à expansão térmica serão dadas por:

$$\Delta r_a = R_a - r_a = \theta(T_{2N-2}) \cdot r_a \quad (6)$$

$$\Delta r_b = R_b - r_b = \Delta r_a + \sum_{i=1}^{2N-2} \theta(T_i) \cdot \delta r_i^0 \quad (7)$$

onde Δr_a é a variação do raio do canal central e Δr_b é a variação do raio externo do combustível.

3. A EXPANSÃO TÉRMICA NA ESTRUTURA DE ELEMENTOS FINITOS

O modelo mecânico depende do perfil de temperatura e este por sua vez da geometria da vareta. Então, na primeira iteração do primeiro intervalo de tempo-potência do histórico de potência introduzido no código, a expansão térmica radial do revestimento é aproximada pelo modelo sumarizado abaixo [2]:

O incremento do raio interno do revestimento é dado por:

$$\Delta r_c = r_c \cdot \alpha_2 (T_{avg}) \cdot (T_{avg} - T_o) \quad (8)$$

onde

r_c = raio interno inicial do revestimento;

$T_{avg} = \frac{T_d + T_c}{2}$ = temperatura média através do revestimen
to;

T_c = temperatura na superfície interna do revestimento;

T_d = temperatura na superfície externa do revestimento;

α_2 = coeficiente de expansão térmica do revestimento.

(5)

Nos intervalos de tempo-potência subsequentes, a expansão térmica do revestimento, bem como as deformações de outras origens, é calculada pelo modelo de elementos finitos do código [3].

Na estrutura do código, a vareta combustível é sempre dividida em regiões axiais, como mostrado na figura 2. O cálculo mecânico

através dos elementos finitos usa um modelo radial e um axial. A montagem radial (figura 3) é aplicada ao centro da região axial, enquanto a montagem axial simula a vareta como um todo (figura 4).

3.1 Expansão Radial do Revestimento

Um sistema de numeração de nós (pontos no corpo sólido) e graus de liberdade (deslocamentos dos nós) para o modelo radial do revestimento é mostrado na figura 5. A equação de equilíbrio para esta montagem será:

$$[K] \cdot \{r\} = \{R\} \quad (9)$$

onde:

$\{R\}$ = vetor carga nodal global,

$\{r\}$ = vetor deslocamento nodal global (incôgnita);

$[K]$ = matriz de rigidez ou matriz de transformação que relaciona cargas aplicadas aos nós e os deslocamentos nodais produzidos.

O elemento básico do modelo é o triângulo mostrado na figura 6 e contém 3 nós e 6 graus de liberdade (DOF's), entendendo-se por graus de liberdade os deslocamentos axiais e radiais dos nós.

Uma matriz de transformação $[B]^*$ pode ser desenvolvida para relacionar os deslocamentos dos pontos nodais do elemento $\{q\}$ com as deformações do elemento $\{\epsilon_0\}$.

Para o elemento isolado a equação de equilíbrio é:

$$[k] \cdot \{q\} = \{Q\} \quad (10)$$

onde:

$\{Q\}$ = vetor carga nodal do elemento;

$\{q\}$ = vetor deslocamento nodal do elemento;

$[k]$ = matriz de rigidez do elemento.

* A barra indica que a matriz é avaliada em relação ao centro do elemento.

A matriz de rigidez do elemento é dada por:

$$[k] = 2 \cdot \pi \cdot \bar{r} \cdot A \cdot [\bar{B}]^T \cdot [C] \cdot [\bar{B}]$$

onde

A = área do triângulo;

\bar{r} = posição radial do centro do elemento;

[C] = matriz de constantes elásticas materiais;

$[\bar{B}]^T$ = matriz transposta de $[\bar{B}]$.

O vetor carga nodal do elemento é expresso por:

$$\{Q\} = 2 \cdot \pi \cdot \bar{r} \cdot A \cdot [\bar{B}]^T \cdot [C] \cdot \{\epsilon_0\}$$

$\{\epsilon_0\}$ = vetor de deformação

O vetor de deformação $\{\epsilon_0\}$ tem origem nas cargas devido à pressão interna e externa da vareta, nas cargas térmicas, nas cargas resultantes do comportamento plástico e de fluência. Aqui serão considerados somente as cargas térmicas.

Devido a estrutura cilíndrica da vareta e supondo o material isotrópico tem-se:

$$\{\epsilon_0\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_r \\ \epsilon_\phi \\ \epsilon_z \\ \gamma_{rz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \theta \\ \theta \\ \theta \\ 0 \end{Bmatrix}$$

ϵ_r - deformação radial
 ϵ_ϕ - deformação circunferencial
 ϵ_z - deformação axial
 γ_{rz} - deformação cisalhante

sendo que θ é a deformação térmica e é dada por:

$$\theta(\bar{T}) = \alpha_2(\bar{T}) \cdot (\bar{T} - T_0)$$

onde \bar{T} é a temperatura no centro do elemento

* A constantes elásticas na matriz [C] são também avaliadas em termos de \bar{T} .

De acordo com as regras de montagem do método dos elementos finitos [3], introduz-se a matriz de rigidez do elemento $[k]$ na matriz de rigidez global $[K]$, o vetor carga térmica nodal $\{Q\}$ no vetor carga nodal global $\{R\}$ e então resolve-se o sistema de equilíbrio global (equação 9).

O vetor $\{r\}$ contém os deslocamentos axiais e radiais dos nós da montagem radial. Os deslocamentos radiais dos pontos nodais da superfície interna do revestimento correspondem à variação Δr_c do raio interno do revestimento na altura do contorno axial central da região axial (figura 5).

Aplicando-se o modelo às regiões axiais, o raio interno do revestimento ao longo da vareta será:

$$R_c(j) = r_c(j) + \Delta r_c(j) = r_c(j) + r_{\text{radial}}(\text{nó interno}) \quad (11)$$

onde j indica a região axial, r_c é o raio interno inicial do revestimento, R_c é o raio interno final e r_{radial} é a componente radial do vetor de deslocamento $\{r\}$ associada ao nó interno do revestimento. O vetor carga $\{R\}$ deverá conter somente as cargas térmicas para que r_{radial} seja a variação do raio interno devido a expansão térmica.

3,2

Expansão Axial do Combustível e Revestimento

No modelo axial a vareta combustível é modelada através de uma única montagem de elementos finitos. Um sistema de numeração de pontos nodais para a montagem axial do combustível e revestimento é mostrado na figura 4. Semelhantemente ao modelo radial, a montagem axial é constituída de elementos básicos triangulares e do mesmo modo está sujeita a um sistema de equilíbrio da forma:

$$[K'] \cdot \{r'\} = \{R'\} \quad (12)$$

O procedimento de cálculo é o mesmo delineado anteriormente e a expansão axial do combustível e revestimento serão dadas pelos deslocamentos axiais dos pontos nodais no topo da coluna combustível e no topo do revestimento (como anteriormente, o vetor $\{R'\}$ deverá conter somente cargas térmicas). Em relação a figura 4 tem-se:

DETR. PD-073/79

$$\Delta h = h - h_0 = r'_{axial} \text{ (n\~o 19)} \quad (13)$$

$$\Delta H = H - H_0 = r'_{axial} \text{ (n\~o 12)} \quad (14)$$

onde

Δh = alongamento térmico do revestimento;

h_0, h = altura inicial e final do revestimento;

ΔH = alongamento térmico da coluna combustível;

H_0, H = altura inicial e final da coluna combustível;

r'_{axial} (n\~o do topo) = componente axial do vetor de deslocamento $\{r'\}$ associada ao n\~o do topo.

3.3

Expansão Térmica Radial com Contato Combustível-Revestimento

No caso de contato combustível-revestimento em alguma região axial da vareta, o modelo de expansão térmica descrito na seção 2 não pode mais ser aplicado a esta região axial do combustível. Neste caso, o modelo radial descrito na seção 3.1 é aplicado ao sistema de combustível e revestimento combinados, como mostrado na figura 3b.

Deve-se ressaltar que não somente as cargas térmicas têm efeito na alteração da geometria da vareta, mas ainda as cargas citadas na seção 3.1 e neste caso de contato também as cargas de pressão interfacial combustível-revestimento.

4.

OS VOLUMES VAZIOS E A EXPANSÃO TÉRMICA

As alterações geométricas da vareta afetam principalmente a espessura do "gap", que afeta acentuadamente a condutância do "gap" e portanto o perfil de temperatura, e os volumes vazios ("gap", "plenum", "dishes" e canal central), que por sua vez afetam a pressão gasosa interna da vareta.

O efeito da expansão térmica no volume do "gap" (V_{gap})

DETR.PD-073/79

do "plenum" (V_{pl}) e do canal central (V_{cc}) pode ser estimado através das variações geométricas descritas nas seções 2 e 3, mas não se consegue avaliar, através destas variações, o efeito da expansão no volume dos "dishes" (V_{dh}).

É suposto então que o combustível tenha um núcleo plástico circunvizinhado por uma zona anular com fissuras mas rígida. A extensão do comportamento plástico do combustível é determinada pelo estado de tensão e pela temperatura, e, no caso do UO_2 , é admitido o valor $T_{plas} = 1200^\circ C$, como temperatura externa desta região plástica. Como mostrado na figura 7, uma região axial do combustível é constituída pelo empilhamento de pastilhas, de modo que a expansão térmica axial da região será governada pela posição radial $r' > r_{dh}$ (r_{dh} = posição radial da borda do "dish") da pastilha que apresente maior temperatura T , onde $T \leq T_{plas}$:

O modelo para cálculo do efeito da expansão térmica no volume dos "dishes", conforme [2], pode ser assim sumarizado:

Inicialmente, a partir do perfil radial de temperatura na região axial, determina-se a temperatura na borda do "dish" (T_{dh}) e a posição radial r_{plas} correspondente a T_{plas} . Caso $T_{dh} \leq T_{plas}$, a expansão axial da região axial j será dada por:

$$\Delta l_j = \theta(T_{dh}) \cdot l_j^0 \quad (15a)$$

onde:

l_j^0 = comprimento inicial da região axial j ;

θ = deformação térmica do combustível (equação 1 ou 5)

e a posição radial de referência para a expansão axial da região é:

$$r' = r_{dh}$$

Caso $T_{dh} > T_{plas}$ tem-se:

$$\Delta l_j = \theta(T_{plas}) \cdot l_j^0 \quad (15b)$$

$$r' = r_{plas} (> r_{dh})$$

O combustível é dividido em 50 anéis concêntricos de espessura $\delta r = (r_b - r_a)/50$, de modo que o volume do anel i normalizado em relação ao volume da região axial da vareta será dado por:

$$v_i = \left(\frac{r_a + i \cdot \delta r}{r_d} \right)^2 - \left(\frac{r_a + (i-1) \cdot \delta r}{r_d} \right)^2$$

$$v_i = \left(\frac{r_i}{r_d} \right)^2 - \left(\frac{r_{i-1}}{r_d} \right)^2$$

onde

r_a = raio do canal central;

r_d = raio externo da vareta;

r_i = $r_a + i \cdot \delta r$ = raio externo do anel i ;

r_{i-1} = $r_a + (i-1) \delta r$ = raio interno do anel i .

O anel mais interno m , que satisfaça a condição $r_{m-1} = r_a + (m-1) \delta r > r'$, governa a expansão térmica axial do combustível pois $r' = r_{dh}$ ou $r' = r_{plas}$. A temperatura média na região delimitada por este anel de referência é dada por:

$$\bar{T}' = \frac{\sum_{i=1}^m T_i \cdot v_i}{\sum_{i=1}^m v_i} \quad (16)$$

onde T_i é a temperatura em cada anel i (equação 2).

A deformação térmica axial da região interna ao anel de referência será dada pela equação 1 ou 5 com $T = \bar{T}'$; e a expansão térmica axial pela relação:

$$\Delta l_j = \theta(\bar{T}') \cdot (l_j^0 - l_{dhj}^0) \quad (17)$$

onde

l_j^0 = comprimento inicial da região axial j;

l_{dhj}^0 = comprimento inicial dos "dishes" dentro da região axial j, sendo dado pela relação:

$$l_{dhj}^0 = F_{dh} \cdot l_j^0 \cdot V_c / V_c' \quad (18)$$

onde

$F_c = \frac{\text{volume total dos "dishes"}}{\text{volume total do combustível}}$ = fração da coluna combustível que é volume dos "dishes" (dado de entrada);

$V_c = \Pi \cdot (r_b^2 - r_a^2) \cdot H_o$ = volume total da coluna combustível, excetuando o volume total do canal central;

$V_c' = \Pi \cdot r'^2 \cdot H_o$ = volume total da região delimitada pelo anel m.

Portanto, o volume dos "dishes" dentro da região axial j após a expansão térmica será:

$$V_{dh} = V_{dh}^0 + \Delta V_{dh} \quad (19)$$

onde

$V_{dh}^0 = \pi(r'^2 - r_a^2) l_{dhj}^0$ = volume inicial dos "dishes" na região j;

$\Delta V_{dh} = \pi(r'^2 - r_a^2) \cdot (\Delta l_j - \Delta l_j')$ = variação dos volumes dos "dishes" devido a expansão térmica.

5.

A PRESSÃO GASOSA E A EXPANSÃO TÉRMICA

No código Capcon-3, a pressão gasosa interna da vareta é calculada por:

$$P = n \cdot R \cdot T / V \quad (20)$$

onde

R = constante dos gases;

n = número total de moles do gás de enchimento e gases de fissão

V = volume vazio

T = temperatura

A razão $\frac{V}{T}$ é dada pela relação:

$$\frac{V}{T} = \frac{V_{\text{gap}}}{T_{\text{gap}}} + \frac{V_{\text{pl}}}{T_{\text{pl}}} + \frac{V_{\text{cc}}}{T_{\text{cc}}} + \frac{V_{\text{dh}}}{T_{\text{dh}}} \quad (21)$$

onde V_{gap} , V_{pl} , V_{cc} e V_{dh} são os volumes vazios da vareta definidos anteriormente (seção 4) e T_{gap} , T_{pl} , T_{cc} e T_{dh} as temperaturas características associadas a cada um destes volumes.

Desde que a vareta combustível é dividida em regiões axiais, muda-se a equação 21 para:

$$\frac{V}{T} = \frac{V_{\text{pl}}}{T_{\text{pl}}} + \sum_j \left(\frac{V_{\text{gap}}}{T_{\text{gap}}} \right)_j + \left(\frac{V_{\text{cc}}}{T_{\text{cc}}} \right)_j + \left(\frac{V_{\text{dh}}}{T_{\text{dh}}} \right)_j \quad (22)$$

Considerando somente a expansão térmica, a estimativa de cada um destes termos será dada por:

5.1

"Gap"

O volume do "gap" na região axial j é dado por

$$(V_{\text{gap}})_j = \pi [(r_c + \Delta r_c)^2 - (r_b + \Delta r_b)^2] l_j^0$$

onde

r_b = raio externo inicial do combustível

Δr_b = variação térmica de r_b na região axial j (equação 7);

r_c = raio interno inicial do revestimento;

Δr_c = variação térmica de r_c na região axial j (equação 8 ou 11)

l_j^0 = comprimento inicial da região axial j

No caso de contato combustível-revestimento, V_{gap} é dado pelo volume vazio entre as rugosidades das superfícies em contato:

$$(V_{gap})_j = 2 \cdot \pi \cdot r_b \cdot l_j^0 \cdot c_o \cdot (R_1 + R_2)$$

onde

R_1, R_2 = rugosidades superfícies do combustível e revestimento

$c_o = 3,69$ = constante empírica

A temperatura característica do "gap" é dada por:

$$(T_{gap})_j = (T_b + T_c) / 2$$

onde

T_b = temperatura superficial do combustível na região axial j (equação 2)

T_c = temperatura superficial interna do revestimento na região axial j (dada por uma relação para o revestimento semelhante a equação 2).

5.2

Canal Central

Devido ao comportamento plástico do combustível a alta temperatura ($>1200^\circ\text{C}$), não são consideradas as variações do raio do canal central devidas à expansão são térmica, tal que

$$(V_{cc})_j = \pi \cdot r_a^2 \cdot l_j^0$$

onde r_a é o raio do canal central na região axial j , cuja variação é determinada principalmente pela reestruturação do combustível. A temperatura T_{cc} é dada pela equação 2 com $r = r_a$.

Deve-se observar neste ponto que a variação Δr_a dada pela equação 6 é usada somente para estimativa de Δr_b (equação 7) e ainda que θ (T_{2N-2}), admitida neste caso para o raio r_a , é a deformação térmica do anel mais externo do combustível no modelo de expansão livre, e, portanto, é um valor mínimo de deformação.

5.3

"Dish"

O volume total dos "dishes" dentro da região axial j , $(V_{dh})_j$, é dado pela equação 19 e a temperatura característica é $T_{dh} = \bar{T}$, dada pela equação 16.

5.4

"Plenum"

O volume final do "plenum" é dado por

$$V_{pl} = V_{pl}^0 + \pi \cdot r_c^2 \cdot (\Delta H - \Delta h)$$

onde

V_{pl}^0 = volume inicial do "plenum" (dado de entrada);

Δh = variação na altura do revestimento (equação 13);

ΔH = variação na altura da coluna combustível (equação 14).

e $T_{pl} = T_s$ onde T_s é a temperatura de saída do refrigerante.

6.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS DA EXPANSÃO DIAMETRAL

Notley et al [4], a partir de vários testes em varetas combustíveis, determinaram a expansão diametral do UO_2 em função da temperatura central. Utilizando os dados fornecidos nas referências [4, 5, 6] e aplicando o modelo de expansão livre do Gapcon foi obtida a curva mostrada na figura 8.

Na figura 8 é mostrado também o resultado de Notley para

a expansão diametral livre do UO_2 . A discordância entre o resultado de Notley e o obtido através do modelo do Gapcon deve-se principalmente às diferenças nas expressões usadas para a integral da condutividade e de formação térmica do UO_2 , como mostrado nas figuras 9 e 10.

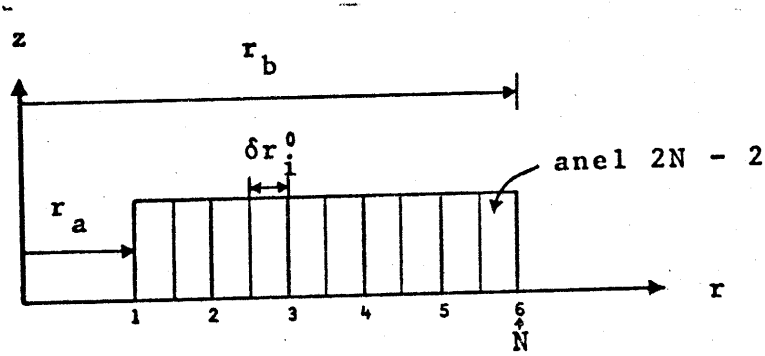
A partir de resultados como da figura 8, Notley et al [4] concluíram que o modelo de expansão livre corresponde a uma situação ideal e é um limite superior para os resultados experimentais.

Ainda conforme Notley um melhor ajuste aos dados experimentais será obtido admitindo-se o comportamento plástico do núcleo do combustível. A expansão térmica do núcleo plástico será acomodada nos vazios internos ("dishes" e talvez porosidade) enquanto o volume interno vazio disponível for suficiente.

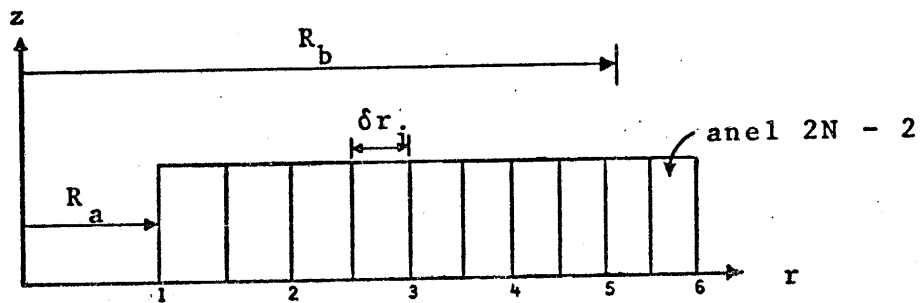
REFERÊNCIAS

- [1] LAMEIRAS, F.S e SABIONI, A.C.S - Descrição e Análise do Modelo para Cálculo Térmico do Código GAPCON-THERMAL III - Belo Horizonte, CDTN, 1979 (DETR.PD 081/79).
- [2] Programa Gapcon-Thermal-3 - Listagem de 11.06.79
- [3] DIAS, M.S. Descrição e Análise do Modelo do Cálculo Mecânico do Gapcon-Thermal-3. Belo Horizonte, CDTN, 1980 (DETR.PD 105/80).
- [4] NOTLEY, M.J.F et al. The Longitudinal and Diametral Expansions of UO_2 Fuel Elements. Ontario, 1969. (AECL-2143)
- [5] NOTLEY, M.J.F et al. Zircaloy Sheathed UO_2 Fuel Elements Irradiated at Values of $\int K.d\theta$ Between 40 and 83 w/cm. Ontário, 1970. (AECL-1676)
- [6] NOTLEY, M.J.F. The Thermal Conductivity of Columnar Grains in Irradiated UO_2 Fuel Elements. Ontario, 1963. (AECL-1822)

DETR.PD-073/79



(a) antes da deformação térmica



(b) após a deformação térmica

FIGURA 1: Estrutura para o modelo de expansão livre do combustível.

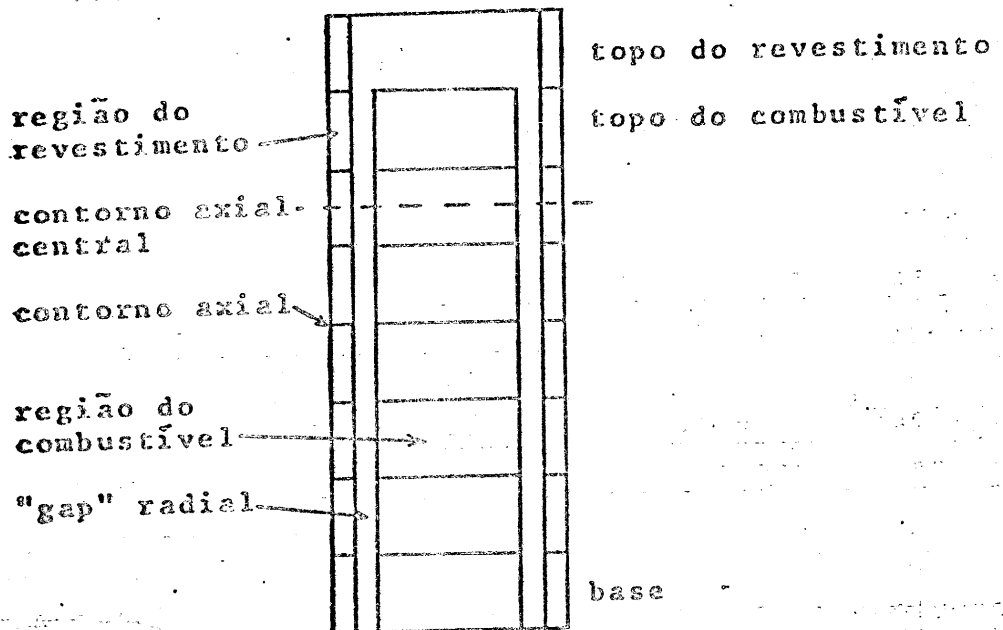


FIGURA 2: Divisão da vareta combustível em regiões axiais.

DETR. PD-073/75

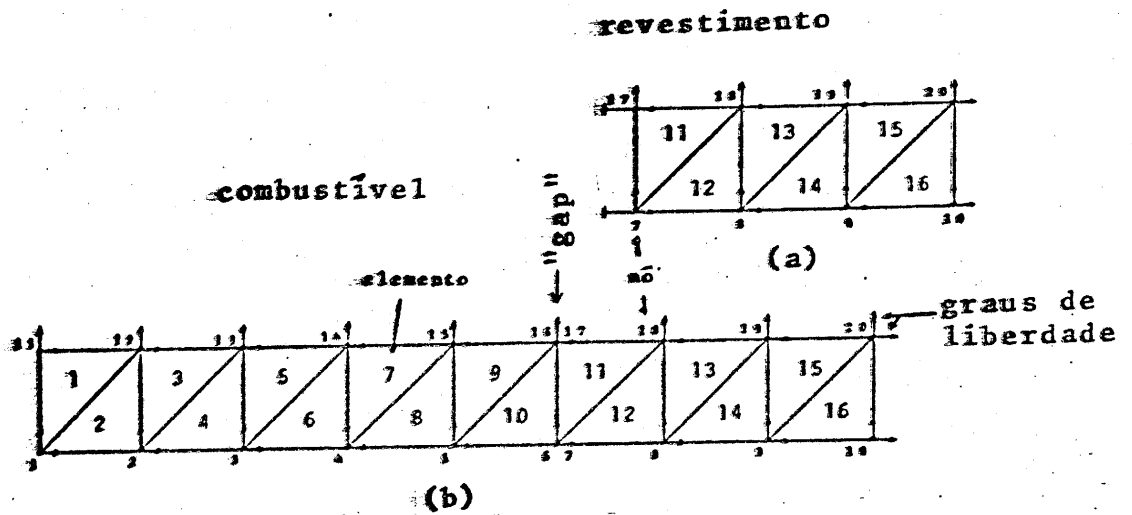


FIGURA 3: Estrutura de elementos finitos - Modelo Radial
 (a) montagem radial do revestimento
 (b) montagem radial do sistema combinado

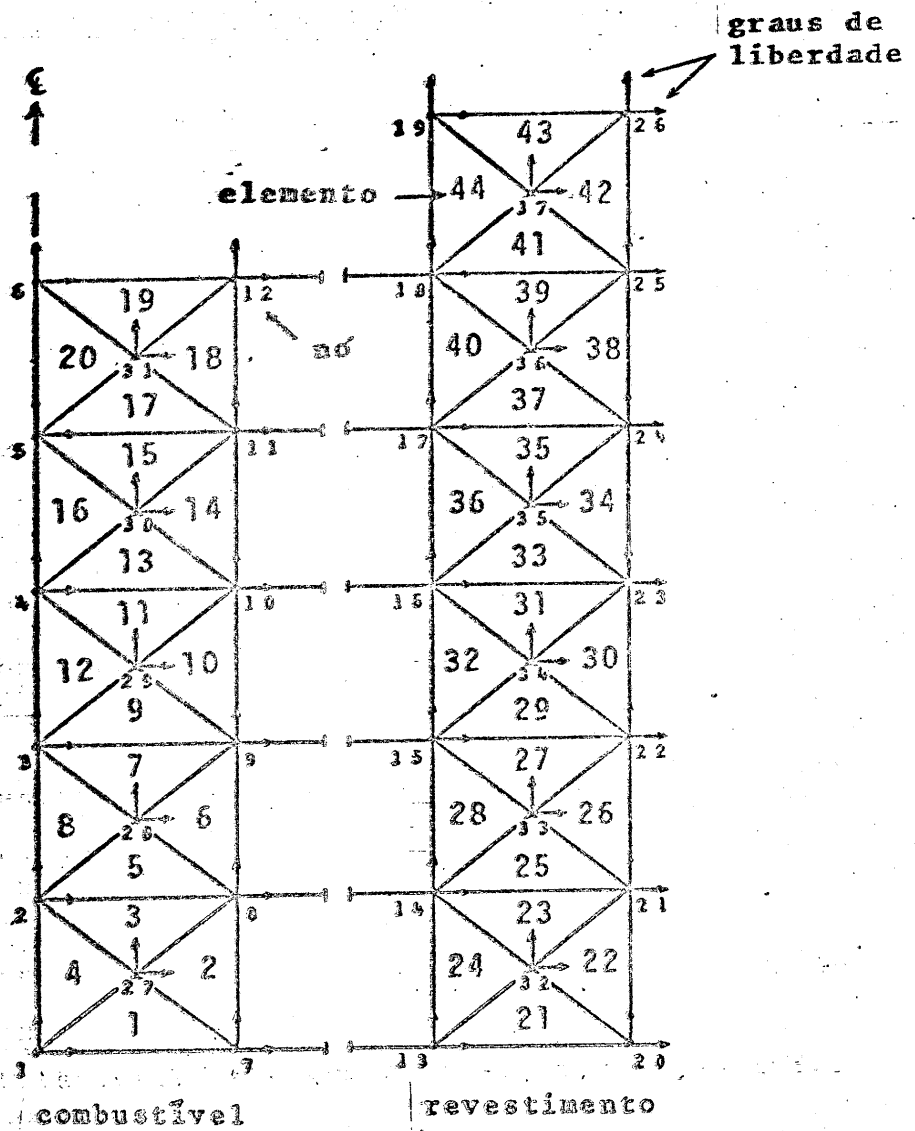


FIGURA 4: Estrutura de elementos finitos - Modelo Axial

DETR.PD-373/79

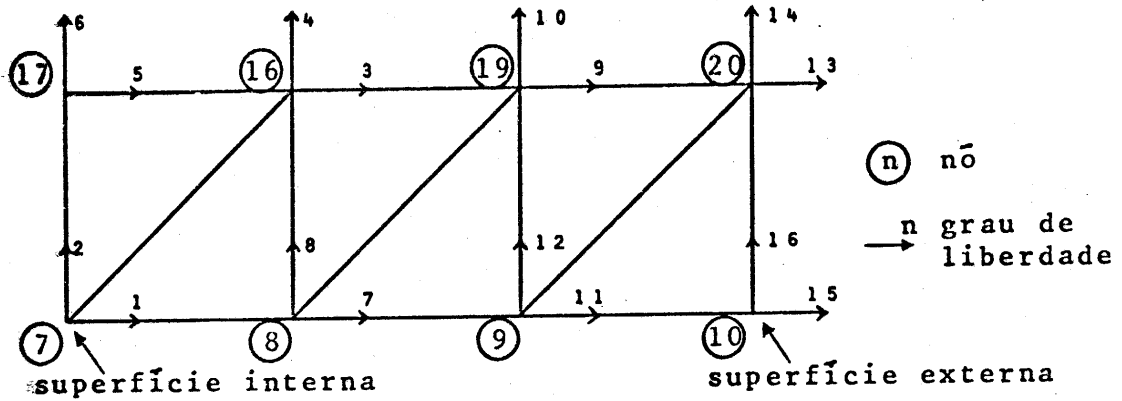


FIGURA 5: Sistema de numeração de referência de nós e graus de liberdade da montagem radial do revestimento.

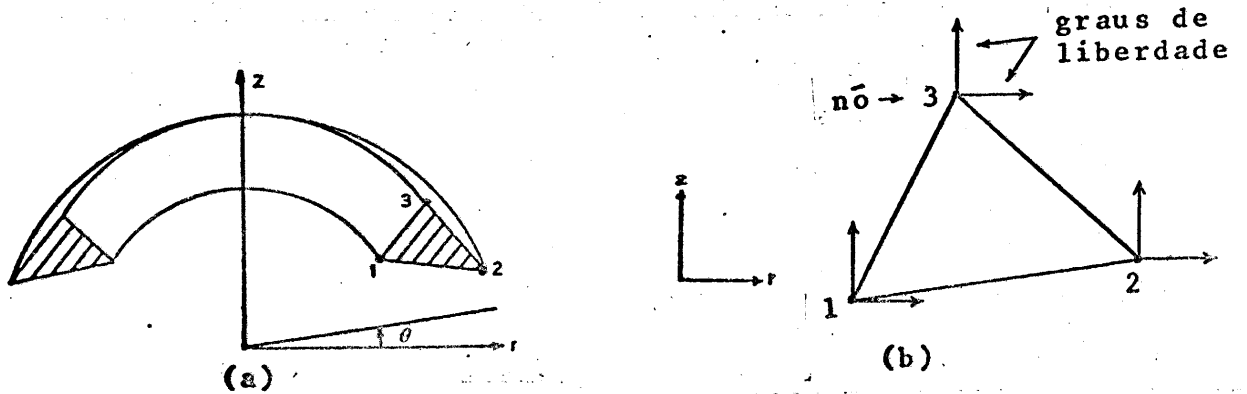


FIGURA 6: a) Elemento anular eixo-simétrico usado nos modelos de análise de tensão e de deformação.
b) Aproximação bi-dimensional = elemento básico.

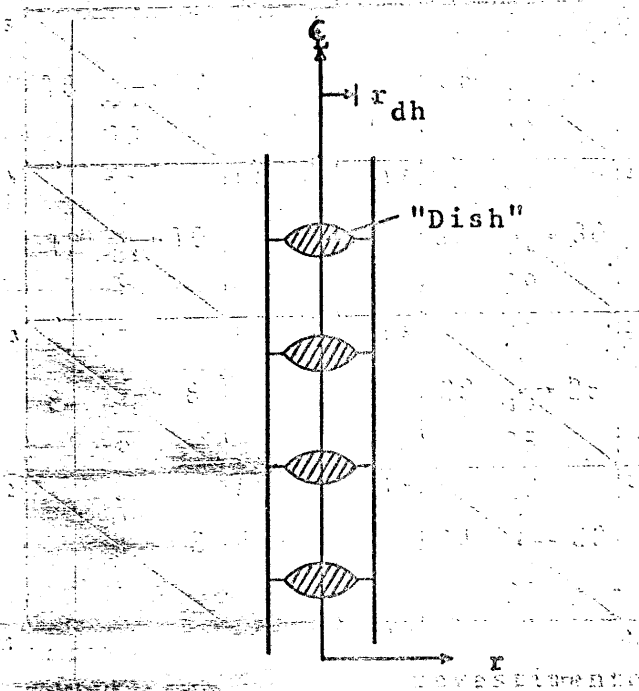


FIGURA 7: Empilhamento de pastilhas numa região axial do combustor.

DETR.PD-573/79

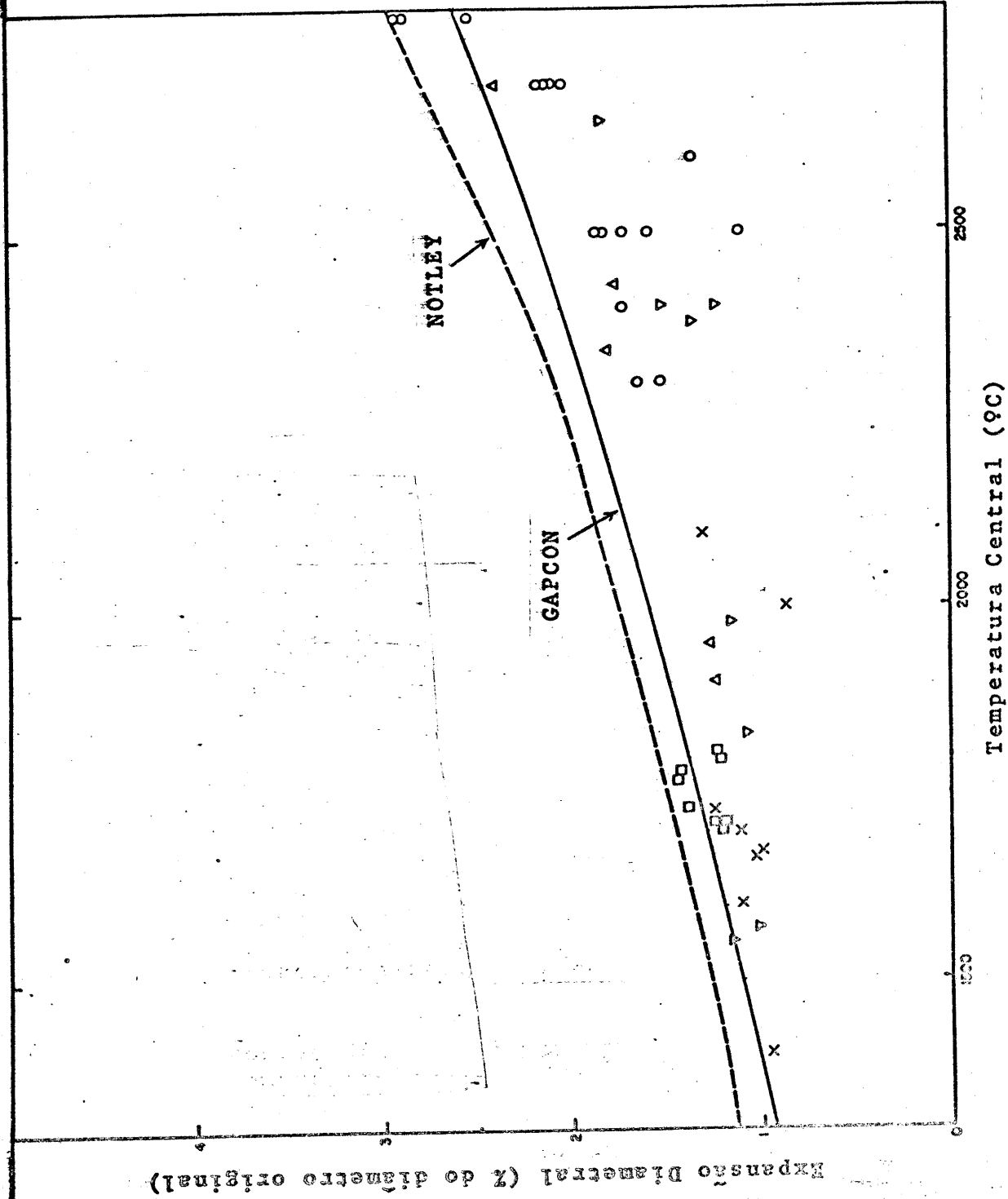


FIGURA 8: Expansão diâmetral do UO₂.

DETR.PD-073/79

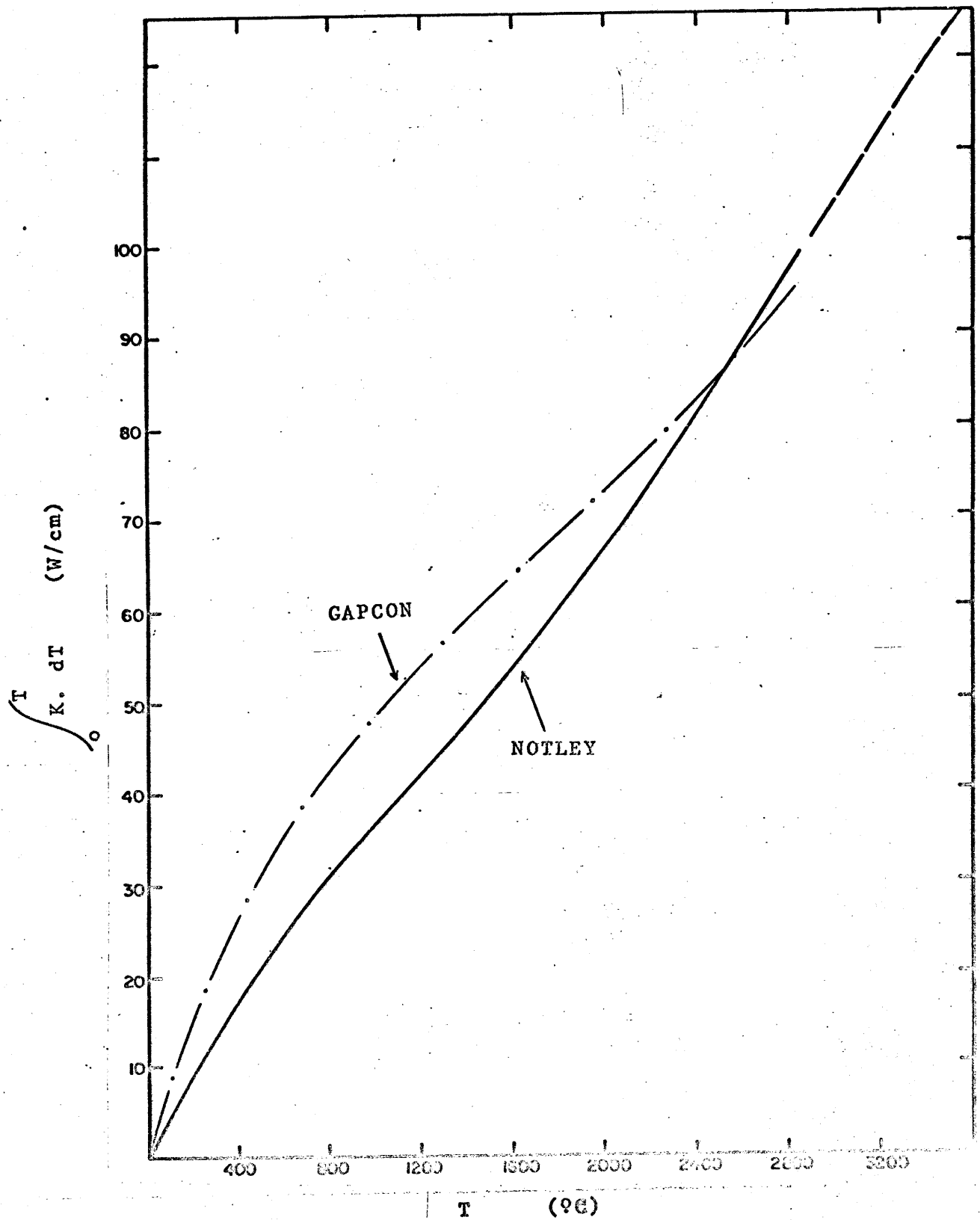


FIGURA 9: Integrais da condutividade térmica do UO_2 (95% DT) usada pelo GAPCON (relação de Lions) e NOTLEY.

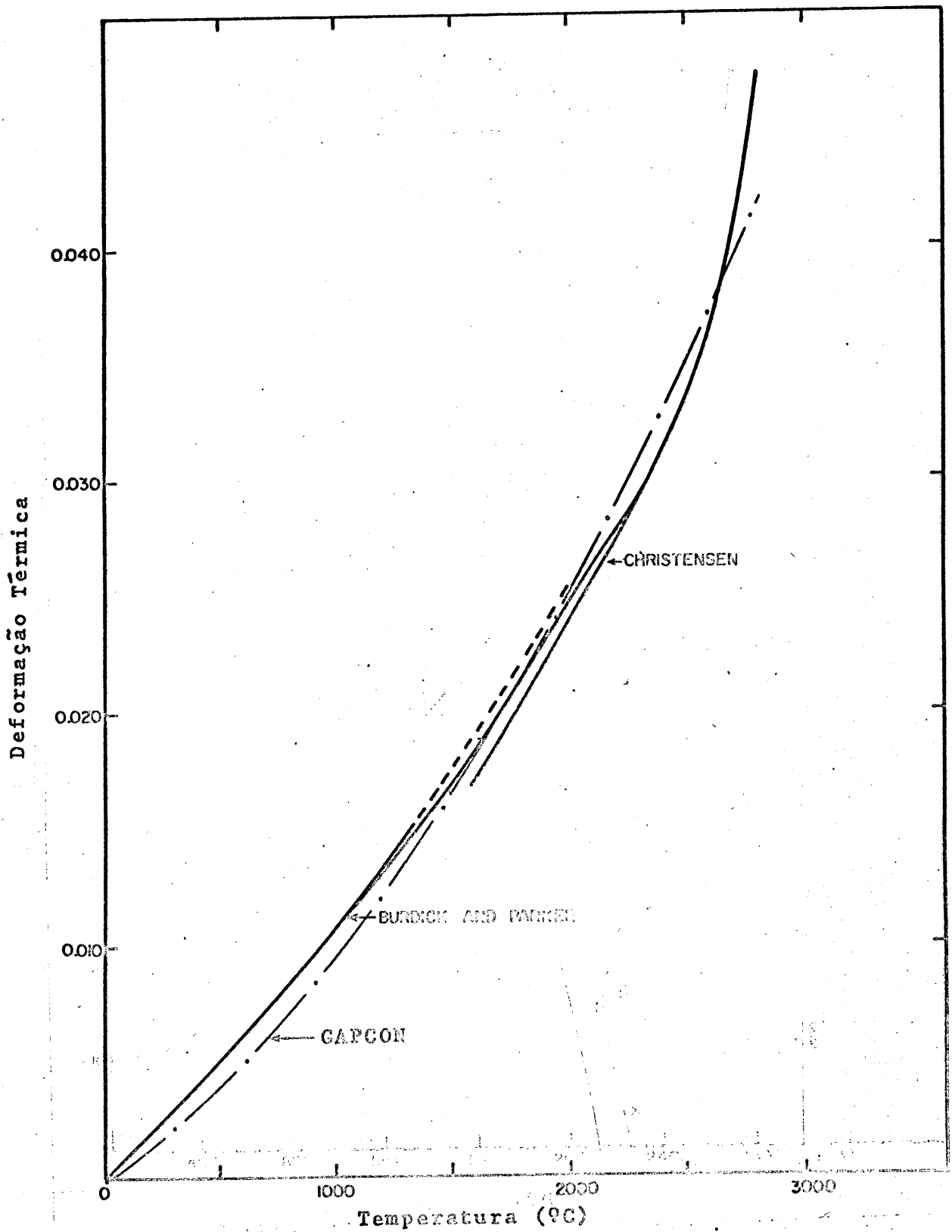


FIGURA 10: Deformações térmicas do UO_2 usadas pelo GAPCON (relação de Conway) e NOTLEY (resultados de Christensen e Burdick-Parker).