

TITULO ANÁLISE DO MODELO DE INCHAMENTO DO CÓDIGO GAPCON-THERMAL-3

<p>NOTAS CORRELATAS</p>	<p>OBJETIVO</p> <p>Analisar o modelo de Geithoff por comparação com outros modelos existentes.</p>																		
<p>LISTA DE DISTRIBUIÇÃO</p> <p>SUPED (1)</p> <p>ATEC.PD ()</p> <p>DETR.PD (2)</p> <p>DIAAC.PD ()</p> <p>DIECB.PD (1)</p> <p>DIFNU.PD ()</p> <p>DISCO.PD ()</p> <p>DITES.PD ()</p> <p>LABFRE.PD ()</p> <p>LABTEH.PD ()</p> <p>AUTOR(ES) (1)</p> <p>SEDOE.PD (1)</p> <p>OUTROS</p>	<p>RESUMO E CONCLUSÕES</p> <p>Fez-se uma apresentação de três modelos de inchamento: modelo de Geithoff (do código GAPCON-THERMAL-3) modelo de Greenwood-Speight e lei (FT)^{3/2}.</p> <p>Do ponto de vista quantitativo todos três modelos dão bons resultados, sendo compatíveis. Mas o modelo de Greenwood-Speight e lei (FT)^{3/2} são mais elaborados que o modelo de Geithoff, pois os mesmos têm uma base teórica, ao contrário deste último.</p> <p>ÍNDICE</p> <table style="width:100%; border: none;"> <tr><td>1. Introdução</td><td style="text-align: right;">2/20</td></tr> <tr><td>2. Descrição do Fenômeno</td><td style="text-align: right;">2/20</td></tr> <tr><td>3. Apresentação de Modelos</td><td style="text-align: right;">3/20</td></tr> <tr><td>4. Programa de Cálculo MOD3</td><td style="text-align: right;">11/20</td></tr> <tr><td>5. Comparação Qualitativa e Quantitativa dos Modelos</td><td style="text-align: right;">13/20</td></tr> <tr><td>6. Conclusão</td><td style="text-align: right;">14/20</td></tr> <tr><td>Referências Bibliográficas</td><td style="text-align: right;">15/20</td></tr> <tr><td>Tabelas</td><td style="text-align: right;">16/20</td></tr> <tr><td>Figuras</td><td style="text-align: right;">19/20</td></tr> </table>	1. Introdução	2/20	2. Descrição do Fenômeno	2/20	3. Apresentação de Modelos	3/20	4. Programa de Cálculo MOD3	11/20	5. Comparação Qualitativa e Quantitativa dos Modelos	13/20	6. Conclusão	14/20	Referências Bibliográficas	15/20	Tabelas	16/20	Figuras	19/20
1. Introdução	2/20																		
2. Descrição do Fenômeno	2/20																		
3. Apresentação de Modelos	3/20																		
4. Programa de Cálculo MOD3	11/20																		
5. Comparação Qualitativa e Quantitativa dos Modelos	13/20																		
6. Conclusão	14/20																		
Referências Bibliográficas	15/20																		
Tabelas	16/20																		
Figuras	19/20																		
<p>Nº. CÓPIAS 6</p>																			



AUTOR(ES)	VISTO	DATA	APROVAÇÃO	VISTO	DATA
L.C.M. Pinto	<i>[Signature]</i>	31.01.80	CHEFE DO LAB. OU GRUPO	_____	_____
			CHEFE DA DIVISÃO	<i>[Signature]</i>	07.02.80
			CHEFE DO DEPARTAMENTO	<i>[Signature]</i>	13.02.80
CLASSIFICAÇÃO			TAREFA		21.01

ANÁLISE DO MODELO DE INCHAMENTO DO CÓDIGO
GAPCON-THERMAL 3

1. INTRODUÇÃO

A instabilidade dimensional de combustíveis nucleares é um dos fatores mais importantes no controle do tempo de vida e desempenho dos elementos combustíveis. Do ponto de vista econômico é desejável que os elementos combustíveis possam atingir altas queimas, tanto nos reatores rápidos como nos térmicos. Entretanto, a instabilidade dimensional vai implicar em interação entre combustível e revestimento que compromete a integridade das varetas combustíveis. Assim, o estudo desta interação tem sido intensificado e, em geral, considera-se que o inchamento, ao lado da expansão térmica diferencial entre o UO_2 e o revestimento torna-se um fator importante para queimas superiores a 10.000 Mwd/ton.

Com o crescente aumento da potência nos reatores nucleares e a necessidade de queimas cada vez maiores, o estudo do inchamento foi intensificado, existindo na atualidade inúmeros modelos de inchamento bem como códigos computacionais desenvolvidos para previsão de inchamento e liberação de gases de fissão.

Os fatores de projeto que podem influenciar a interação pastilha-revestimento estão estreitamente relacionados com o inchamento. Em geral, considera-se a folga diametral combustível-revestimento como o fator mais importante. A forma, dimensões e densidade das pastilhas são colocadas em segundo plano e as propriedades mecânicas do revestimento, em terceiro.

Finalmente, nosso objetivo neste trabalho é a análise do modelo de inchamento do código GAPCON-THERMAL-3, seja por comparação com os outros modelos ou por comparação com os poucos dados experimentais existentes na literatura corrente.

2. DESCRIÇÃO DO FENÔMENO

O processo de fissão nos combustíveis nucleares conduz à formação de átomos e gases inertes e outros produtos de fissão, geralmente chamados de produtos de fissão "sólidos". De um modo geral considera-se que 0,25 a 0,30 átomos de gases nobres (Xe, Kr) são produzidos por átomo de combustível.

Existem evidências [1] de que os gases inertes são praticamente insolúveis nos sólidos cristalinos. Isto quer dizer que uma vez introduzidos num sólido, terão forte tendência a precipitar e formar bolhas, sem se tornarem intersticiais ou ocupar defeitos na rede [2].

A formação de bolhas, aliada a diferença em volume dos produtos de fissão para os átomos originais, dá origem ao fenômeno de "inchamento" de combustíveis nucleares, induzido pela irradiação de neutrons. Contudo, os primeiros trabalhos sobre inchamento de combustíveis nucleares consideravam somente a diferença do volume inicial para o volume final na fissão, não supondo a existência de bolhas e sua contribuição ao inchamento [3].

Os modelos atuais sobre inchamento de combustíveis nucleares têm abordado o problema do ponto de vista de formação, coalescência e difusão de bolhas. Estes são os modelos mais teóricos. Os modelos usados em códigos computacionais são modelos muito simples sendo empíricos ou semiempíricos e se interessam apenas em estimar valores de inchamento coerentes com a realidade não se interessando pelos processos ou fenômenos que possam ocorrer com as bolhas, como, por exemplo, migração sob gradiente de temperatura, coalescência, etc.

Trabalhos mais recentes sobre inchamento [4,5,6,7] consideram o fenômeno de uma forma global e macroscópica. Global, porque não distinguem o inchamento "sólido" do inchamento devido aos gases de fissão, isto é, formação de bolhas. Macroscópica, porque não consideram os fenômenos intrínsecos referentes à formação, coalescência, migração e liberação das bolhas de gás de fissão. Os valores mais usuais para a taxa de inchamento são em torno de 1,0% a 1,6% para 10.000 Mwd/ton. O valor comumente adotado [8] para o inchamento devido aos produtos gasosos de fissão é em torno de 0,35% para cada 10^{20} fissões/cm³, isto correspondendo à 0,86% para 10.000 Mwd/ton.

3. APRESENTAÇÃO DE MODELOS

Serão apresentados aqui três modelos de inchamento, para efeito de comparação e análise do modelo de inchamento do GAPCON-THERMAL. Os modelos serão apresentados tais como foram formulados originalmente pelos autores, portanto, não daremos nenhuma elucidação dos modelos, mas somente por ora. No capítulo final de "análise e conclusões" os modelos deverão ser detalhados para que se possa fazer uma análise

comparativa tanto do ponto de vista quantitativo quanto qualitativo. Estes são os modelos que serão apresentados:

1. Modelo de GEITHOFF, que é o mesmo do GAPCON-THERMAL-3
2. Modelo de GREENWOOD-SPEIGHT, usando os códigos CYCRO + FIGRO
3. Lei (F.T.)^{3/2}, vide [3]

3.1

Modelo de GEITHOFF

Este modelo leva em conta a acomodação de inchamento pelo consumo da porosidade inicial de fabricação do combustível, de forma que o inchamento final restante será dado pela expressão,

$$\Delta V = \left[h_f V_f f + h_c V_2 \right] \frac{BU}{10.000} - (1-f) \left(0,8V_1 + 0,5V_2 + 0,3V_3 \right) \quad (1)$$

onde:

ΔV = Variação do volume devido ao inchamento

f = Densidade fracional

h_f = Taxa de inchamento (1,6% $\Delta V/V$)/10.000 Mwd/ton

V_f = Volume do combustível por unidade de comprimento

h_c = Inchamento adicional no combustível entre 1300 e 1700 °C, (0,4% $\Delta V/V$)/10.000 Mwd/ton

V_1 = Volume do combustível por unidade de comprimento, acima de 1700 °C.

V_2 = Idem, entre 1300 e 1700 °C.

V_3 = Idem, temperaturas abaixo de 1300 °C.

BU = Queima do combustível, Mwd/ton

3.2

Modelo de GREENWOOD-SPEIGHT

Ao contrário do modelo anteriormente apresentado, que é puramente empírico, passaremos, a apresentar um modelo com bases teóricas que é usado nos códigos CYCRO e FIGRO.

O modelo de Greenwood-Speight é formulado a partir das se-

guintes hipóteses (8):

- 1º) Os átomos de gás produzidos na fissão formam bolhas esféricas com volumes iguais.
- 2º) As bolhas se agrupam em malhas cúbicas.
- 3º) Existe uma temperatura limite acima da qual todo gás produzido é liberado. Abaixo desta temperatura todo gás produzido não é liberado.
- 4º) O desenvolvimento da teoria é feita para um combustível com densidade de 100% da teórica.

Vamos supor que L seja a distância entre os centros das bolhas e V seja o volume do combustível e considerando-se a 2ª hipótese tem-se

$$N = \frac{V}{L^3} \quad (2)$$

sendo N o número de bolhas esféricas.

Pode-se então calcular o volume, V_g , ocupado pelo gás que forma as bolhas. Pela 1ª hipótese as bolhas são esféricas e iguais, supomos com raio r , então

$$V_g = \frac{4}{3} \pi r^3 N ; \quad (3)$$

usando o valor de N da eq. (2) teremos

$$V_g = \frac{4}{3} \pi r^3 \left(\frac{V}{L^3} \right) \quad (4)$$

Para se determinar a pressão no interior das bolhas usa-se a lei de Laplace, isto é,

$$P_g = \frac{2\sigma}{r} + P_h \quad (5)$$

sendo σ a tensão superficial do combustível, P_g pressão do gás no interior das bolhas e P_h a pressão externa existente na superfície do material.

Tirando-se o valor de r da expressão (4) e substituindo-o na equação (5) obtem-se

$$P_g = \frac{2\sigma}{L} \left(\frac{3}{4\pi} \frac{V_g}{V} \right)^{-1/3} + P_h \quad (6)$$

Pode-se então substituir esta pressão na equação dos gases perfeitos, ou na equação de Van der Waal, obtendo-se uma equação em V_g/V , que quando resolvida dá o valor de inchamento em termos fracionais.

A justificativa para uso da equação de Van der Waal é o facto do volume em que o gás está encerrado ser pequeno e também a pressão ser muito grande, no caso de varetas combustíveis de irradiação.

Isso fará com que haja interações entre moléculas por estarem muito próximas, sendo portanto necessário o uso da equação de Van der Waal, que é a seguinte:

$$\left(P_g + \frac{m^2 a}{V_g^2} \right) \left(\frac{V_g}{m} - b \right) = R_2 T \quad (7)$$

sendo m o nº de moles de gás de fissão; R_2 constante universal dos gases (ergs/mol °K); a e b são constantes características do gás. Como cada fissão produz cerca de 0,30 átomos de gás de fissão obtém-se

$$m = \frac{0,3 F V}{N_a \cdot 10^{-20}} \quad (8)$$

sendo F = queima em unidades de 10^{20} fissões por cm^3 e N_a é o nº de Avogadro. Combinando as equações (6), (7) e (8) obtém-se

$$R_2 T = \left[\frac{2\sigma}{L} \left(\frac{3}{4\pi} \frac{V_g}{V} \right)^{-1/3} + P_h + a \left(\frac{0,3 F}{N_a \cdot 10^{-20}} \right)^2 \left(\frac{V_g}{V} \right)^{-2} \right] \times \left[\frac{N_a \cdot 10^{-20}}{0,3 F} \frac{V_g}{V} - b \right] \quad (9)$$

O inchamento fracional resultante poderia ser determinado pela solução desta equação para V_g/V . Mas como L varia com o tempo de irradiação é necessário primeiro encontrar-se a função $L = L(t)$.

Por considerações estatísticas, pela aplicação do modelo de Montecarlo à geração de bolhas, Greenwood-Speight chegaram à conclusão de que

$$L = 2 \left(\frac{\sigma \Omega}{\beta K T} \right)^{1/5} \left[\left(\frac{9 a' 6 v_{eff} Z}{16\pi} \right) \exp \left(- \frac{Q_s}{R_1 T} \right) \right]^{2/15} \cdot t^{-1/15} \quad (10)$$

Calcularam também o tempo necessário para a estabilização do nº de bolhas de gás de fissão, tendo encontrado

$$t_e = 0,7 \left(\frac{z}{D_g} \right)^{5/6} \left(\frac{\sigma \Omega}{KT} \right)^{4/3} \left[\left(\frac{9 v_d a' f z}{16 \pi} \right) \exp \left(- \frac{Q_s}{R_1 T} \right) \right]^{1/3} \beta^{-1/2} \quad (11)$$

onde:

Ω = Volume atômico

β = Número de átomos de gases de fissão produzidos por cada átomo e por segundo

K = Constante de Boltzmann

v_d = Frequência de Debye

f = Fator de entropia

z = Número de centros de nucleação com os quais as bolhas entram em contato depois de terem difundido uma distancia igual ao próprio diâmetro

Q_s = Energia de ativação para a difusão superficial

a' = Separação entre átomos

t = Tempo

R_1 = Constante dos gases perfeitos (cal/mol. °K)

t_i = Tempo decorrido para se alcançar equilíbrio na formação de bolhas

D_g = Coeficiente de difusão dos átomos de gás de fissão

O valor de D_g é obtido pela expressão

$$D_g = D_0 \exp \left(- \frac{Q}{R_1 T} \right) \quad (12)$$

sendo que o valor de D_0 varia com a temperatura da seguinte forma:

$$D_0 = \begin{cases} 6,6 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{seg} & T > 1.135 \text{ }^\circ\text{K} \\ 10^{-19} \text{ cm}^2/\text{seg} & T \leq 1.135 \text{ }^\circ\text{K} \end{cases}$$

$$Q = \begin{cases} 71.700 \text{ cal/mol.g} & T > 1.135 \text{ }^\circ\text{K} \\ 0,0 & T \leq 1.135 \text{ }^\circ\text{K} \end{cases}$$

O parâmetro β é calculado supondo-se que F_V seja a taxa de fissão em fissões/cm³.s, e calculando-se que em 1 cm³ de UO₂ existem cerca de

244×10^{20} moléculas.

Com isso, tem-se

$$\beta = \frac{0,3 F_V}{244 \times 10^{20}} \quad (13)$$

Finalmente combinando-se as equações (10) e (11) e levando-se o valor de $L = L(t)$ na equação (9) obtém-se

$$\left[C_1 F_V^{1/6} \left(\frac{V_g}{V} \right)^{-1/3} \left(\frac{T}{10^3} \right)^{1/9} \exp \left(\frac{C_2}{T} \right) + \frac{P_h}{10^4} + 1,036 F^2 \left(\frac{V_g}{V} \right)^{-2} \right] \times \left[\frac{2,41536}{F} \left(\frac{V_g}{V} \right) - 6,173 \times 10^3 \right] = T \quad (14)$$

Os valores das constantes C_1 e C_2 são dependentes da temperatura,

$$\begin{array}{lll} T \leq 1.135 \text{ } ^\circ\text{K}, & C_1 = 20,7438 & \text{e} & C_2 = 5.091,19 \\ T > 1.135 \text{ } ^\circ\text{K}, & C_1 = 3,54108 & \text{e} & C_2 = 7.096,9 \end{array}$$

A solução da equação (14) em V_g/V para uma dada temperatura T só é possível por processos iterativos uma vez que não se consegue explicitar V_g/V em função de T . O valor de V_g/V obtido pela equação (14) é o inchamento fracional devido aos gases de fissão.

Considera-se neste modelo que a partir de uma certa temperatura todo gás é liberado não havendo, portanto, inchamento. Esta temperatura limite é função da queima F sendo dada pela equação

$$T_{eg} = B_1 + B_2 F + B_3 F^2 \quad (15)$$

onde as constantes tem os valores:

$$B_1 = 2.930, \quad B_2 = -22,667 \quad \text{e} \quad B_3 = 0,32667$$

com os quais a temperatura será obtida em $^\circ\text{F}$.

O valor de V_g/V obtido pela equação (14) refere-se a combustível 100% denso, isto é, densidade igual a $10,97 \text{ g/cm}^3$. O inchamento real $\Delta V/V$ será obtido pela expressão

$$\frac{\Delta V}{V} = K \cdot \frac{V_g}{V} \quad (16)$$

sendo K a fração da densidade teórica.

A solução, por processo iterativo, da equação (14) é dada no programa em FORTRAN denominado MOD3 que será apresentado mais adiante.

3.3

Lei (FT)^{3/2}

Este modelo de cálculo leva em conta a influência da queima e da temperatura cuja dependência é a potência $3/2$ sendo comumente designada de "lei (FT)^{3/2}".

As suposições feitas no desenvolvimento deste modelo são as seguintes:

- a) O número de bolhas é fixo
- b) O gás obedece à lei dos gases ideais
- c) As bolhas são esféricas
- d) A pressão gasosa dentro das bolhas é balanceada unicamente pela contenção da tensão superficial
- e) 0,3 átomos de gases (Xe, Kr) são produzidos para cada átomo do combustível fissionado

Supondo-se constante o número de bolhas e também o espaçamento entre elas chega-se a seguinte expressão para o inchamento:

$$\frac{\Delta V}{V} = \text{constante} \times (FT)^{3/2} \quad (17)$$

onde F é a queima do combustível e T é a temperatura. A obtenção desta equação pode ser feita assim [3] :

Vamos supor que o espaçamento entre bolhas seja ℓ . Sendo V o volume inicial do combustível, calcula-se

$$N = V/\ell^3 \quad (18)$$

que é o nº de bolhas presentes.

Estamos supondo que houve uma saturação de maneira que o número de bolhas e espaçamento ℓ estejam fixos, havendo influência apenas da temperatura e queima do combustível. Sendo r o raio de cada bolha, obtem-se o volume ocupado pelas bolhas:

$$\Delta V = \frac{4}{3} \pi r^3 \times N = \frac{4}{3} \pi r^3 V/\ell^3 \quad (19)$$

A pressão de equilíbrio nas bolhas é calculada como no modelo de Greenwood-Speight, sendo a soma de dois termos. Um se refere a tensão superficial, γ , do material combustível. O outro termo está associado com pressões devidos à presença de forças externas sobre o combustível.

Assim:

$$P_g = \frac{2\gamma}{r} + P_{ext} \quad (20)$$

Tirando-se o valor de r da equação (19) e levando-se na equação (20) obtém-se:

$$P_g = \frac{2\gamma}{\ell} \left(\frac{3}{4\pi} \frac{\Delta V}{V} \right)^{-1/3} + P_{ext} \quad (21)$$

Esta é uma expressão geral que permite calcular a pressão gasosa supondo-se que sejam fixos os espaçamentos entre bolhas e o número de bolhas. Supondo-se o comportamento dos gases como dos gases ideais, tem-se

$$P_g V_g = mRT \quad (22)$$

onde:

m = Número de moles de gás no volume V

R = constante universal dos gases

T = Temperatura do gás

Negligenciando-se a pressão externa P_{ext} e combinando-se as equações (8), (20) e (22), sendo V_g igual à ΔV , teremos:

$$\frac{\Delta V}{V} = K (FT)^{3/2} \quad (23)$$

onde:

$$K = \left(\frac{0,3 R \ell}{2 \gamma N_0} \right)^{3/2} \cdot \frac{3}{4\pi}^{1/2} \quad (24)$$

F = Queima, fissões/cm³

T = Temperatura, °K

N_0 = Número de Avogadro

4. PROGRAMA DE CÁLCULO MOD3

Este programa de cálculo foi desenvolvido por nós com o objetivo de análise e comparação dos três modelos apresentados. MOD3 tem como base o programa HINCHA [8] que calcula o inchamento pelo modelo de Greenwood-Speight. Portanto, MOD 3 é o próprio programa HINCHA acrescentando-se a ele os dois outros modelos de cálculos, lei $(FT)^{3/2}$ e modelo de Geithoff.

Vamos passar a descrever o esquema de cálculo de MOD 3.

O programa começa com a leitura dos dados de entrada KAS, BU, PI, PM, HAM, D, PRCDH, R, RV, RVC, H, PH, T(N), RAO(N), sendo definidos assim:

VARIÁVEL	SIGNIFICADO	UNIDADE
BU	Queima do Combustível	MWd/ton
PI	Porosidade inicial	fração
PM	Porosidade mínima permissível	fração
HAM	Inchamento axial máximo	fração
D	Fração da densidade teórica	fração
PRCDH	Porcentagem de concavidade	%
R	Raio da pastilha de UO ₂	cm
RV	Raio interior da vareta	cm
RVC	Raio do vazio central	cm
H	Altura da coluna combustível	cm
PH	Pressão externa na matriz do UO ₂	bar
T(N)	Vetor temperatura, dimensão N	°C
R(N)	Vetor posição, N valores	in.

A variável KAS pode assumir 3 valores distintos. Se KAS = 1 o programa calculará o inchamento pelo modelo de Greenwood-Speight conforme calculava o programa original HINCHA. Se KAS = 2 o programa MOD 3 calculará o inchamento pelo modelo de GEITHOFF e para KAS = 3 o cálculo será feito pela lei $(FT)^{3/2}$. Caso se deseje rodar o programa e obter-se os cálculos para os três modelos para uma só rodada é só fazer-se KAS = 1,2,3.

O programa MOD 3 está portanto dividido em três partes sendo a 1^a parte a mais difícil porque exige cálculos iterativos para so-

lução da equação (14).

O combustível é dividido em 10 partes sendo anéis cilíndricos concêntricos de mesma espessura. A equação (14) é resolvida para cada anel separadamente. Logo no início do programa é calculada a temperatura de liberação dos gases de fissão TLG. Se a temperatura em um dado anel for superior à TLG então o inchamento daquele anel será considerado nulo. Para obter-se o inchamento gasoso total na pastilha faz-se uma média aritmética ponderada em relação ao volume, sendo feita assim:

Seja V_i o volume do anel i e HGi o inchamento fracional do mesmo anel i , tem-se o inchamento médio devido aos gases:

$$HMG = \frac{\sum_{i=1}^{10} V_i \times HGi}{V} \quad (25)$$

sendo V o volume da coluna do combustível. Depois calcula-se o inchamento médio total HMT que é a soma

$$HMT = HMG + HS \quad (26)$$

sendo HS o inchamento devido aos produtos sólidos de fissão que é calculada assim:

$$HS = 0,0035 \times F \quad (27)$$

sendo F já definido anteriormente, a queima em unidades de 10^{20} fissões por centímetro cúbico.

Tudo o que foi dito até aqui será executado em MOD3 caso $KAS = 1$. Para KAS igual a 2 ou 3 o programa saltará para o local correspondente ao modelo 2 ou 3.

Em seguida, para todos os modelos, MOD 3 considera a acomodação de inchamento, existindo as seguintes possibilidades:

- a) Eliminação de porosidade
- b) Variações axiais de dimensão
- c) Variações radiais de dimensão

Depois de serem consideradas todas estas acomodações de inchamento MOD 3 imprime o inchamento resultante, HRES. As figuras 1... e 2 mostram a saída do programa MOD 3 para os três modelos apresentados aqui. MOD 3 utiliza uma sub-rotina para interpolação linear denominada TERP, sendo a mesma utilizada pelo código GAPCON.

5. COMPARAÇÃO QUALITATIVA E QUANTITATIVA DOS MODELOS

Do ponto de vista qualitativo nota-se grande diferença entre os modelos, notadamente do modelo de GEITHOFF para os outros dois. O modelo de GEITHOFF é um modelo semiempírico não tendo uma base teórica como os outros dois modelos.

Não leva em conta o efeito da temperatura no fenômeno de inchamento e nem tece considerações teóricas quanto à formação de bolhas, coalescência, etc.

Do ponto de vista qualitativo nota-se, marcadamente, que os modelos de Greenwood-Speight e a lei $(FT)^{3/2}$ são semelhantes e mais completos que o modelo de GEITHOFF. ~~... não tem tratamento matemático para~~

Para análise do problema de ponto de vista quantitativo vamos recorrer às saídas do programa MOD 3 : Tabelas 1,2 e 3. Nestas Tabelas temos cálculos de inchamento para uma queima de 10.000 Mwd/ton. Para esta queima temos os seguintes resultados:

Modelo de Greenwood-Speight	1,648 %
Modelo de Geithoff	1,036 %
Lei $(FT)^{3/2}$	1,028 %

A literatura corrente [4,5,6] indica valores de inchamento em torno de 1% para 10.000 Mwd/ton. Desta forma, podemos ver que tanto o modelo de Geithoff quanto a lei $(FT)^{3/2}$ dão bons resultados para a taxa percentual de inchamento.

Também o modelo de Greenwood-Speight não está totalmente fora da realidade existindo autores que indicam taxas de 1,6% para

10.000 Mwd/ton, por exemplo [9]. Mas poderíamos considerar este modelo como sendo um modelo de segurança, bom para ser usado em cálculos de acidentes pois prevê valores mais altos para o inchamento que os outros dois modelos.

Pela Figura 1 podemos notar que o modelo de Geithoff é linear com a queima ao contrário da lei $(FT)^{3/2}$ e modelo de Greenwood-Speight. Até cerca de 10.000 Mwd/ton os três modelos têm comportamento semelhante mas depois as diferenças são marcantes. Quanto ao modelo de Greenwood-Speight nota-se que aproximadamente à 30.000 Mwd/ton há uma queda na curva para depois continuar com o mesmo comportamento anterior, conforme podemos ver pela linha tracejada. A queda se deve às novas constantes de cálculo assumidas depois de 30.000 Mwd/ton [8].

Em geral os diversos autores estudam o inchamento principalmente antes de 10.000 Mwd/ton, considerando-se que até 2.000 Mwd/ton o inchamento é mascarado pela densificação.

A Figura 2 se refere à cálculos de inchamento nesta faixa de queima, entre 2.000 e 10.000 Mwd/ton. Inicialmente, a lei $(FT)^{3/2}$ fornece valores ligeiramente inferiores ao modelo de Geithoff e a situação se inverte após 10.000 Mwd/ton pois a lei $(FT)^{3/2}$ continua crescendo lentamente com a potência $3/2$ da queima, enquanto o modelo de Geithoff continua linear. O modelo de Greenwood-Speight é quase linear com uma inclinação em torno de 1,6%/10.000 Mwd/ton.

6. CONCLUSÃO

Diante do que foi exposto aqui podemos concluir que todos três modelos apresentados são bons, isto é não estão em desacordo com valores usuais para a taxa de inchamento percentual, que é entre 1% e 1,6% para 10.000 Mwd/ton.

No entanto, o modelo de Greenwood-Speight bem como a lei $(FT)^{3/2}$ parecem ser mais completos, ao contrário do modelo de Geithoff usado no código GAPCON, que é um modelo empírico. Conforme referência [3] é interessante observar-se que a lei $(FT)^{3/2}$ pode ser obtida como um caso particular do modelo de Greenwood-Speight.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NICHOLS, F.A. Behavior of gaseous fission products in oxide fuel elements, Pittsburgh, PA., Bettis Atomic Power Laboratory, 1966 (WAPD-TM-570).
- [2] SAYLES, C.W. and MAHLMEISTER, J.E. A Systematic Approach to the prediction of fuel pin lifetimes, in: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CERAMIC NUCLEAR FUELS, Washington, May 3-8, 1969. Proceedings.... Columbus, Ohio, American Society, 1969. p. 244-252.
- [3] PINTO, L.C.M. Determinação das condições de inchamento no UO₂ sob irradiação. Tese de Mestrado do Curso de Pós-graduação em Ciências e Técnicas Nucleares da U.F.M.G. Março de 1975.
- [4] STEHLE, H.; ASSMANN, H; WUNDERLICH, F. Uranium Dioxide Properties for LWR Fuel Rods. Nuclear Engineering and Design, 33 (1975) 230-260.
- [5] BRIAN, R.T. Frost Theories of Swelling and Gas Retention in Ceramic Fuels Nuclear Applications & Technology Vol.9 August 1970.
- [6] ZIMMERMANN, H. Estimate of Pressure Buildup in Sinter Pores of UO₂ Fuel Pellets (EURFNR-668).
- [7] GALBRAITH, K.P. e outros
GAPEXX: A Computer Program for predicting Pellet-to-Claadding Heat Transfer for Coefficients (XN-73-25) August 13, 1973.
- [8] JIMÉNEZ, R. LUQUI HINCHA - Programa FORTRAN IV para determinar Hinchamientos en barras Combustibles cilíndricas de UO₂ sometidas a um flujo de irradiación neutrônica en reactores nucleares. (J.E.N. 308) Madrid 1975.
- [9] GEITHOFF, D. e outros
"Irradiation Performance of Fast Reactor Fuels", Presented at International Symposium on Plutonium Fuels Technology , AIME Symposium 1967 Nuclear Metallurgy 13, 1968.

CALCULO DE INCHAMENTO CASO 1

CALCULO DE INCHAMENTO PELO MODELO DE GREENWOOD-SPEIGHT, SENDO O MESMO DOS CODIGOS CYGRD-1 E FGRD

Q U E I M A	F.	10000.00	MND/TON
POROSIDADE INICIAL DE FABRICACAO	PI	5.00	8
POROSIDADE MINIMA PERMISSIVEL	PM	4.00	8
RAIO DA PASTILHA	R	.46482	CM
RAIO INTERIOR DA VARETA	RV	.47371	CM
DENSIDADE REAL	D	95.00	8
INCHAMENTO AXIAL MAXIMO	HAM	2.00	8
INCHAMENTO POR PRODUTOS SOLIDOS DE FISSAO	HS	.862	8
ESPESSURA DE CADA ANEL	K	.046482	CM
TEMPERATURA DE LIBERACAO DE GASES	TLG	1853.10	<
SOMA DOS VOLUMES DOS ANEIS	SV	193.440	CC
COMPRIMENTO DA VARETA COMBUSTIVEL	H	284.988	CM
INCHAMENTO MEDIO DEVIDO AOS GASES	HMG	.786	8
INCHAMENTO MEDIO TOTAL	HMT	1.648	8
INCHAMENTO MEDIO TOTAL REAL	HMTR	1.565	8
INCHAMENTO ACOMODADO NA POROSIDADE	HP	.783	8
INCHAMENTO AXIAL	HA	.391	8
INCHAMENTO RADIAL	HR	.391	8
INCHAMENTO MAXIMO RADIAL	HMR	3.862	8
INCHAMENTO RESTANTE	HRES	0.000	8
RAIO FINAL DA PASTILHA	RF	.46573	CM

PERFIL DE TEMPERATURAS, GRAUS CENTIGRADOS

1835.00 1805.00 1726.00 1605.00 1445.00 1256.00 1049.00 834.00 623.00 425.00 249.00

TEMPERATURA MEDIA DE CADA ANEL, GRAUS KELVIN

2093.00 2038.50 1938.50 1798.50 1624.00 1425.50 1214.50 1001.50 797.00 610.00

VOLUME DE CADA ANEL, CENTIMETROS CUBICOS

1.9344 5.8032 9.6720 13.5408 17.4096 21.2784 25.1472 29.0161 32.8849 36.7537

INCREMENTO DE VOLUME POR CADA ANEL, CENT. CUBICOS

0.00000 0.00000 0.00000 .27392 .23065 .19760 .18514 .19229 .20935 .23149

INCHAMENTO GASOSO DE CADA ANEL, FRACIONAL

0.00000 0.00000 0.00000 .02023 .01325 .00929 .00735 .00663 .00637 .00630

TABELA 1 - Saída do programa MOD3 aplicado à vareta combustível-teste DT50, cálculos referentes ao modelo de Greenwood-Speight, caso 1.

CALCULO DE INCHAMENTO CASO 2

CALCULO DE INCHAMENTO PELO MODELO DE GEITHOFF, SENDO O MESMO USADO NO CODIGO GAPCON-2 BEM COMO NA NOVA VERSAO GAPCON-3

QUEIMA	F	10000.00	MWD/TON
POROSIDADE INICIAL DE FABRICACAO	PI	5.00	8
POROSIDADE MINIMA PERMISSIVEL	PM	4.00	8
RAIO DA PASTILHA	R	.46482	CM
RAIO INTERIOR DA VARETA	RV	.47371	CM
DENSIDADE REAL	D	95.00	8
INCHAMENTO AXIAL MAXIMO	HAM	2.00	8
INCHAMENTO POR PRODUTOS SOLIDOS DE FISSAO	HS	.862	8
ESPESSURA DE CADA ANEL	X	.046482	CM
TEMPERATURA DE LIBERACAO DE GASES	TLG	1853.10	8
SOMA DOS VOLUMES DOS ANEIS	SV	193.440	CC
COMPRIMENTO DA VARETA COMBUSTIVEL	H	284.988	CM
INCHAMENTO MEDIO DEVIDO AOS GASES	HMG	.174	8
INCHAMENTO MEDIO TOTAL	HMT	1.036	8
INCHAMENTO MEDIO TOTAL REAL	HMR	.984	8
INCHAMENTO ACOMODADO NA POROSIDADE	HP	.492	8
INCHAMENTO AXIAL	HA	.246	8
INCHAMENTO RADIAL	HR	.246	8
INCHAMENTO MAXIMO RADIAL	HMR	3.862	8
INCHAMENTO RESTANTE	HRES	0.000	8
RAIO FINAL DA PASTILHA	RF	.46539	CM

PERFIL DE TEMPERATURAS, GRAUS CÉNTIGRADOS

1835.00 1805.00 1726.00 1605.00 1446.00 1256.00 1049.00 834.00 623.00 425.00 249.00

POSICOES RADIAIS, CENTIMETROS

.0350 .0788 .1227 .1666 .2105 .2543 .2982 .3421 .3860 .4298 .4737

TABELA 2 - Saída do programa MOD3 aplicado à vareta combustível-teste DT50, cálculos referentes modelo de Geithoff, caso 2.

CALCULO DE INCHAMENTO CASO 3

CALCULO DE INCHAMENTO PELO MODELO COMUMENTE DENOMINADO DE LEI (F.T)^{3/2}, SENDO F A QUEIMA E T A TEMPERATURA

QUEIMA	F	10000.00	MWD/TON
POROSIDADE INICIAL DE FABRICACAO	PI	5.00	g
POROSIDADE MINIMA PERMISSIVEL	PM	4.00	g
RAIO DA PASTILHA	R	.46482	CM
RAIO INTERIOR DA VARETA	RV	.47371	CM
DENSIDADE REAL	D	95.00	g
INCHAMENTO AXIAL MAXIMO	HAM	2.00	g
INCHAMENTO POR PRODUTOS SOLIDOS DE FISSAO	HS	.862	g
ESPESSURA DE CADA ANEL	X	.046482	CM
TEMPERATURA DE LIBERACAO DE GASES	TLG	1853.10	K
SOMA DOS VOLUMES DOS ANEIS	SV	193.440	CC
COMPRIMENTO DA VARETA COMBUSTIVEL	H	284.988	CM
INCHAMENTO MEDIO DEVIDO AOS GASES	HMG	.166	g
INCHAMENTO MEDIO TOTAL	HMT	1.028	g
INCHAMENTO MEDIO TOTAL REAL	HMTR	.976	g
INCHAMENTO ACOMODADO NA POROSIDADE	HP	.488	g
INCHAMENTO AXIAL	HA	.244	g
INCHAMENTO RADIAL	HR	.244	g
INCHAMENTO MAXIMO RADIAL	HMR	3.862	g
INCHAMENTO RESTANTE	HRES	0.000	g
RAIO FINAL DA PASTILHA	RF	.46539	CM

PERFIL DE TEMPERATURAS GRAUS CENTIGRADOS

1835.00	1805.00	1726.00	1605.00	1446.00	1256.00	1049.00	834.00	623.00	425.00	249.00
---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	--------	--------	--------	--------

TEMPERATURA MEDIA DE CADA ANEL GRAUS KELVIN

2093.00	2038.50	1938.50	1798.50	1624.00	1425.50	1214.50	1001.50	797.00	610.00
---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	--------	--------

VOLUME DE CADA ANEL CENTIMETROS CUBICOS

1.9344	5.8032	9.6720	13.5408	17.4096	21.2784	25.1472	29.0161	32.8849	36.7537
--------	--------	--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

INCREMENTO DE VOLUME POR CADA ANEL CENT. CUBICOS

0.00000	0.00000	0.00000	.01918	.02771	.03755	.04874	.05852	.06458	.06452
---------	---------	---------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

INCHAMENTO GASOSO DE CADA ANEL FRACIONAL

0.00000	0.00000	0.00000	.00142	.00159	.00178	.00194	.00202	.00196	.00176
---------	---------	---------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

TABELA 3 - Saída do programa MOD3 aplicado à vareta combustivel-teste DT50, cálculos referentes à lei (FT)^{3/2}, caso 3.

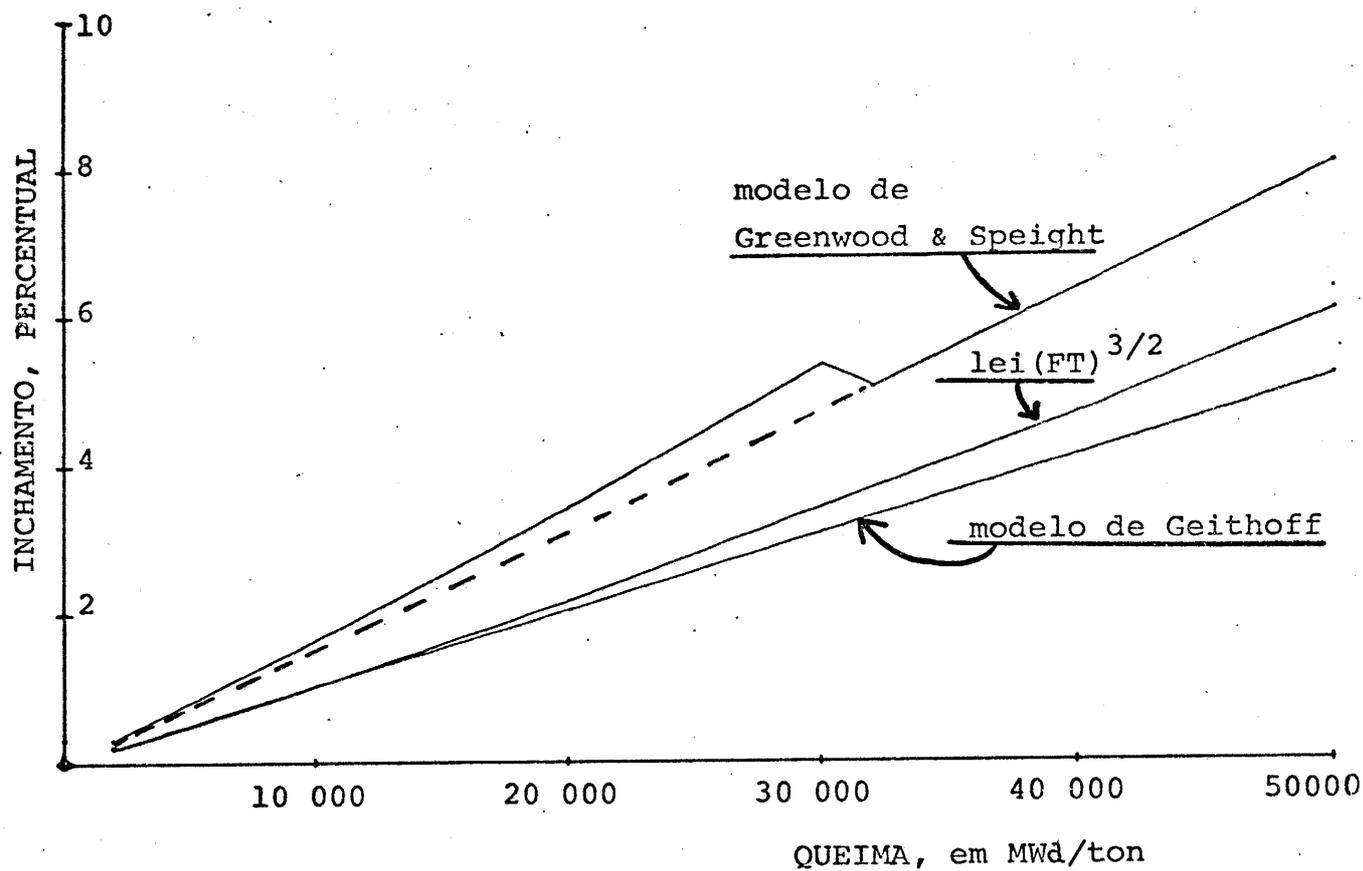


FIG. 1 - Comparação entre modelos de inchamento conforme cálculos do programa MOD3

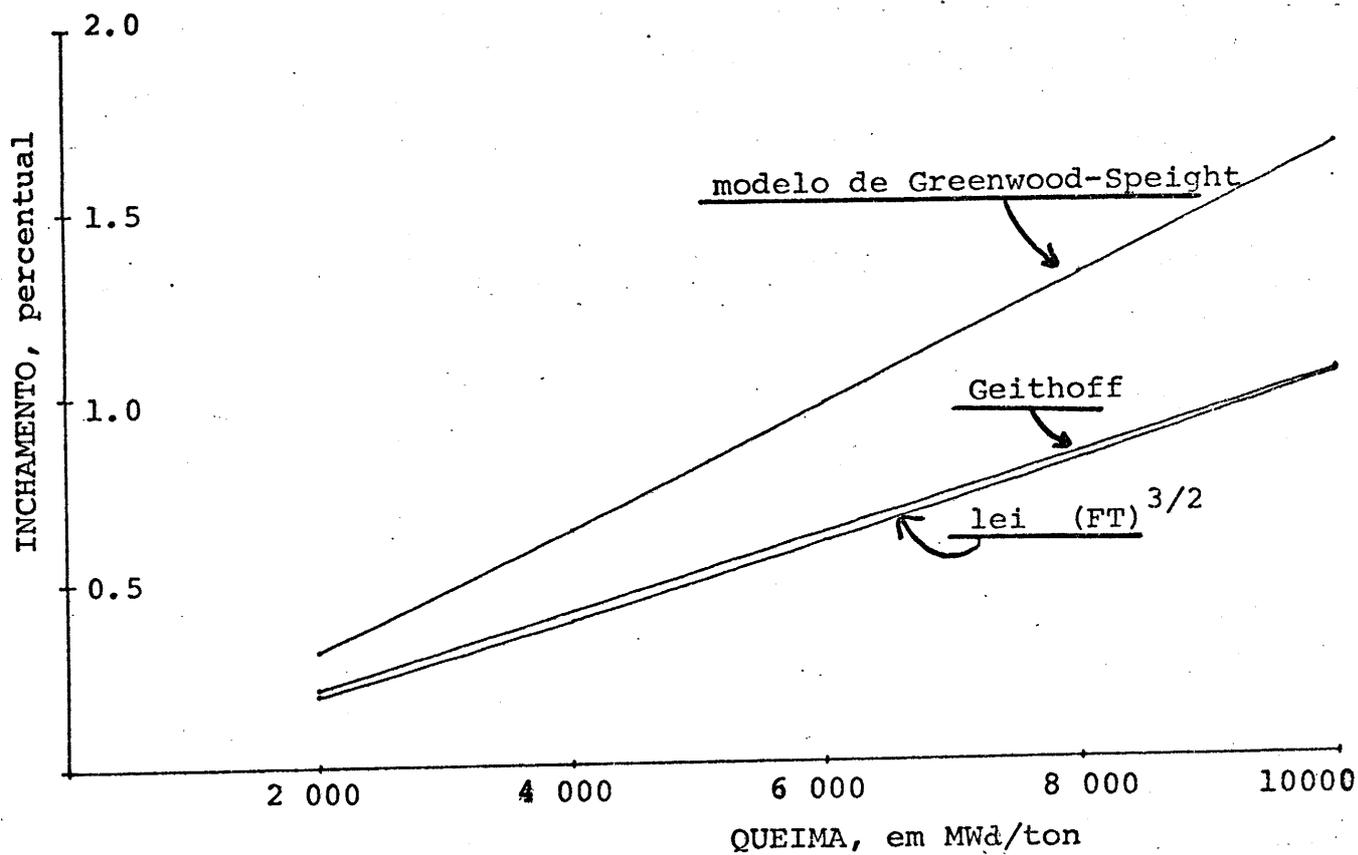


FIG. 2 - Comparação entre modelos de inchamento conforme cálculos do programa MOD3