

COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DO COMBUSTÍVEL UO_2 SOB FORMA PLANA E CILÍNDRICA PARA REATORES À ÁGUA PRESSURIZADA

José Eduardo Rosa da Silva
José Augusto Perrotta

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IPEN-CNEN-SP

RESUMO

É comparada a utilização e desempenho do UO_2 em elementos combustíveis tipo placa e em elementos combustíveis com varetas cilíndricas, para reatores nucleares de potência tipo PWR. São feitas análises comparativas nos aspectos neutrônicos, termo-hidráulicos, termo-mecânicos e de comportamento sob irradiação. Os resultados obtidos nestas análises confirmam o potencial de utilização do UO_2 , sob as duas formas estudadas, como combustível de alto desempenho para reatores de potência tipo PWR, podendo alcançar queimas superiores a 30.000 MWd/tonU.

INTRODUÇÃO

Os reatores nucleares, empregados para a pesquisa e geração de potência, têm utilizado diferentes tipos de materiais combustíveis com variado detalhamento mecânico dos elementos combustíveis.

Devido às excelentes características de comportamento sob irradiação, por possuir uma tecnologia de fabricação bem conhecida e também à grande vantagem da utilização do combustível com baixos enriquecimentos (3 a 10% do isótopo físsil U-235), este trabalho se propôs a comparar a utilização do UO_2 para uso em PWR. Duas configurações principais de elementos combustíveis (EC) estão em uso atualmente:

1) Em EC com varetas combustíveis, contendo o UO_2 sinterizado sob a forma de pastilhas cilíndricas;

2) Em EC do tipo placa, contendo o UO_2 sinterizado sob a forma de plaquetas de pequena espessura.

A forma mais comum de utilização do material combustível no interior de reatores de potência comerciais tem sido através de varetas combustíveis cilíndricas. O UO_2 é preparado na forma de pastilhas cilíndricas sinterizadas, que são colocadas no interior de tubos metálicos de revestimento e seladas através de processos especiais de soldagem.

Uma maneira de utilização do UO_2 em placas combustíveis tem sido através da montagem de um conjunto de plaquetas planas de pequena espessura, de UO_2 sinterizado, em compartimentos individualizados e estanques, revestidos por duas chapas metálicas externas de zircaloy. A primeira utilização desse tipo de combustível foi no reator americano Shippingport (núcleo 2) e mais recentemente nos reatores franceses de pesquisa Osiris e de potência CAS. A figura 1 mostra um EC composto de varetas típico de PWR e um EC de placas.

As diferenças básicas entre os dois tipos de elemento estão na densidade de potência, na área de transferência de calor, nos processos de fabricação e no comportamento sob irradiação.

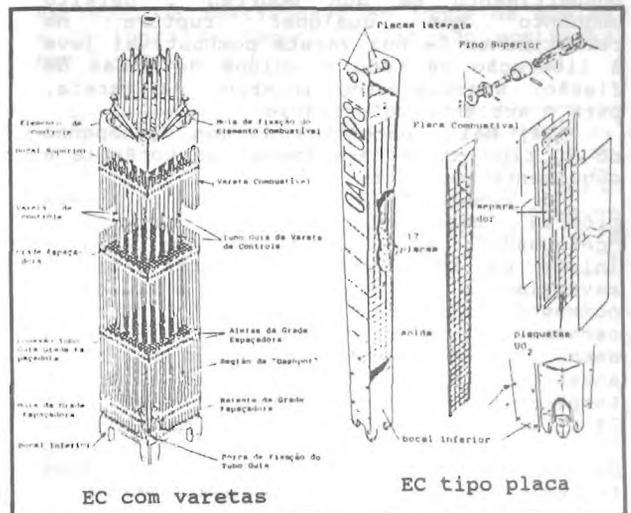


Figura 1- Elemento combustível de varetas típico de PWR e elemento combustível tipo placas

A geometria cilíndrica permite acomodar maior quantidade de combustível por unidade de volume do núcleo, permitindo a utilização do combustível com baixos enriquecimentos. Já, a configuração de placa permite uma maior área de transferência de calor por unidade de volume de combustível, possibilitando maiores densidades de potência e reatores mais compactos.

As diferenças geométricas e construtivas do combustível tipo placa fazem com que este tipo de combustível apresente características de funcionamento diferentes daquelas existentes em varetas combustíveis. O combustível tipo placa se distingue do combustível em varetas pelas seguintes características: (a) pela geometria plana; (b) pela ausência de volume livre ou "plenum", exceto a porosidade aberta do material combustível e as tolerâncias de montagem, (c) por um combustível com revestimento colapsado e um bom contato entre o material combustível e

o revestimento; (d) pela compartimentalização das plaquetas combustíveis na placa combustível de forma estanque e independente umas das outras; (e) montado em EC com canais fechados de passagem de água (sem escoamento transversal).

Estas características geométricas e construtivas fazem com que sejam esperadas diferenças de desempenho do combustível tipo placa em relação à vareta tais como:

(1) Redução da temperatura de trabalho do combustível. A geometria plana e a pequena espessura das plaquetas de UO_2 do combustível tipo placa permitem que, de certa forma, seja compensada a baixa condutividade térmica do UO_2 , possibilitando combinar alta potência específica com baixa temperatura.

(2) Redução da liberação de gases de fissão devido às menores temperaturas de operação na placa.

(3) Redução da contaminação da água do circuito primário devido a eventual falha (ruptura) do revestimento. No combustível tipo placa haverá somente a liberação dos produtos de fissão contidos no compartimento em que ocorreu o defeito enquanto que qualquer ruptura no revestimento de uma vareta combustível leva à liberação de todo o volume de gases de fissão, acumulado no interior da vareta, para o ambiente do primário.

(4) Maior potencial de bom desempenho do EC tipo placa para rampas de potência e seguimento de carga.

O combustível tipo placa pela sua própria característica de combustível "colapsado", está, desde a fabricação e início de utilização no reator, com o revestimento em contato com a plaqueta combustível de UO_2 . As melhores características de transferência de calor dessa forma de combustível, como analisadas anteriormente, permitem obter menores temperaturas que na vareta cilíndrica. Isto leva a deformações diferenciais entre combustível e revestimento menores no caso da placa, e pela forma plana da placa, leva também a menores tensões no revestimento.

METODOLOGIA DE ABORDAGEM UTILIZADA

A comparação dos dois tipos de EC é feita, neste trabalho, para um reator do tipo PWR. As características operacionais desse reator (potência, vazão e temperatura de entrada do refrigerante), bem como as características geométricas e de materiais para o EC com varetas foram adotadas com base no reator Angra-1 /1/.

Para efeito de comparação, atribuiu-se tanto à vareta quanto à placa, um comprimento ativo nominal de um metro. Para a vareta combustível foi conservada a potência linear média e máxima (18,0 kW/m e 42,0 kW/m) do reator Angra-1, com distribuição cossenoidal de potência, que não representa uma condição real de operação, mas uma condição hipotética para a realização da comparação. A tabela 1 mostra os dados da vareta combustível de comparação e do EC composto por estas varetas.

A definição das dimensões externas do elemento combustível tipo placa foi feita adotando-se a hipótese de substituição do núcleo do reator, constituído por elementos combustíveis com varetas cilíndricas, por um núcleo constituído por elementos combustíveis do tipo placa. Assim, cada EC, composto por varetas combustíveis, é

Tabela 1 - Dados da Vareta Combustível e do EC Base de Comparação

| | |
|---|-------|
| Diâmetro externo da vareta (mm) | 9,50 |
| Espessura do revestimento (mm) | 0,572 |
| Material do revestimento | Zry-4 |
| Diâmetro da pastilha (mm) | 8,19 |
| Altura ativa (mm) | 1000 |
| Altura do "plenum" (mm) | 80 |
| Comprimento total da vareta | 1100 |
| Densidade da pastilha (% da DT) | 95 |
| Enriquecimento (% em peso de U-235) | 2,6 |
| Pressão interna do gás (MPa) (He) | 3,103 |
| Espaço entre centros de varetas (mm) | 12,32 |
| Arranjo do EC | 16x16 |
| Espaço entre centros de EC's (mm) | 198,2 |
| Temp. de entrada do refrig. ($^{\circ}C$) | 287,5 |
| Pressão do refrigerante (MPa) | 15,49 |
| Vazão mássica do refrig. no EC (Kg/h.m ²) x 10E+6 | 12,55 |

substituído por um conjunto formado por dois EC's do tipo placa. Nesta substituição, por hipótese, foram mantidas as seguintes características gerais do reator:

- Potência térmica total;
- Dimensões do contorno do núcleo;
- Vazão do refrigerante no núcleo;
- Temperatura de entrada do refrigerante no núcleo.

Foram definidas duas placas combustíveis com espessuras diferentes, para se obter parâmetros de comparação com a vareta combustível. A tabela 2 mostra os dados referentes às placas combustíveis de comparação e do EC correspondente.

Tabela 2 - Dados das Placas Combustíveis e dos EC's de Comparação

| | |
|--|----------|
| Largura da placa combustível (mm) | 91 |
| Espes. da placa combustível (mm) | 2,25/4,8 |
| Espessura do revestimento (mm) | 0,4 |
| Material do revestimento | Zry-4 |
| Largura da plaqueta de UO_2 (mm) | 20 |
| Altura da plaqueta de UO_2 (mm) | 20 |
| Espes. da plaqueta de UO_2 (mm) | 1,45/4,0 |
| Largura do separador entre plaquetas (mm) | 2 |
| Material do separador entre plaquetas | Zry-4 |
| Largura ativa da placa (mm) | 80 |
| Comprimento ativo da placa (mm) | 900 |
| Plaquetas de UO_2 por placa | 180 |
| Arranjo das plaquetas na placa | (4x45) |
| Densidade da plaqueta (% da DT) | 95 |
| Dimensões do EC (seção transversal). (mm x mm) | 183x91 |

ANÁLISES COMPARATIVAS

Para se obter parâmetros de comparação do EC tipo placa necessitou-se, inicialmente, determinar o número de placas e espessura dos canais de refrigeração.

Foram feitos cálculos neutrônicos, a nível de célula unitária, para se verificar a influência da espessura da plaqueta combustível de UO_2 e das dimensões dos canais de refrigeração na reatividade do sistema. Estes cálculos foram feitos para espessuras da plaqueta de UO_2 de 1,45 mm e 4,00 mm. A parametrização das quantidades

de placas combustíveis no EC e das espessuras dos canais de refrigeração foi feita em função da adoção de dimensões externas fixas do EC tipo placa. O cálculo paramétrico a nível de célula unitária foi feito com o programa espectral HAMMER-TEC (versão IPEN) /1/.

Determinadas as características gerais do EC tipo placa foram feitas várias análises comparativas entre os tipos de EC. Efetuaram-se cálculos neutrônicos com células unitárias para verificar a variação da reatividade com a queima. Foram analisados os aspectos termo-hidráulicos tais como perdas de carga ao longo do canal de refrigeração e margens de fluxo de calor crítico para as potências impostas ao núcleo em análise. Foram verificados também os aspectos termo-mecânicos através do programa ANSYS /1/ e na vareta combustível através do programa FRAPCON-1 /1/. O fenômeno da liberação de gases de fissão é comparado para as duas formas do combustível. Resultados da pressão interna da vareta ao longo da queima foram fornecidos pelo programa FRAPCON-1. Para o combustível tipo placa, os cálculos de liberação de gases de fissão ao longo da queima, foram efetuados através de correlações contidas no MATPRO-11 /1/. As pressões internas devido aos gases de fissão, obtidas para cada tipo de combustível, são comparadas.

RESULTADOS OBTIDOS

Análise Neutrônica O objetivo desta análise foi verificar as dimensões apropriadas dos canais de refrigeração da placa combustível de forma a se ter uma relação água /urânio adequada. Foram construídas curvas de variação da constante de multiplicação K-infinito em função da espessura do canal de refrigeração, mostradas na figura 2, para duas espessuras de plaqueta (1,45 mm e 4,00 mm). O critério adotado para definição da relação água/urânio (espessura do canal de refrigeração e número de placas do EC) foi o de reator submoderado, de forma a se ter coeficiente de reatividade de moderador negativo, sendo mantidas fixas as dimensões externas do elemento e a espessura de revestimento.

Para as espessuras de núcleo de 1,45 mm e 4,00 mm, foram adotados os canais de refrigeração correspondentes aos E.C de 34 e 17 placas combustíveis, pois encontravam-se numa faixa segura de submoderação e, também, possuem características próximas daquelas utilizadas nos reatores OSIRIS e CAP./1,3/

Uma vez determinado o número de placas para cada EC (com plaquetas de 1,45 mm e 4,00 mm), verificou-se para cada caso, a evolução do K-infinito ao longo da queima para vários níveis de enriquecimento do combustível (de 6% a 10%) e comparou-se com os valores obtidos para a vareta combustível contendo UO₂ enriquecido a 2,1 %, 2,6 % e 3,1 %.

Comparou-se também a célula da placa e da vareta para a condição de mesma quantidade inicial de Urânio-235. Para isto ocorrer, para a vareta com 2,6% de enriquecimento, há necessidade dos seguintes enriquecimentos para placa: 4,48 % para 1,45 mm e 3,25 % para 4,00 mm. As curvas de

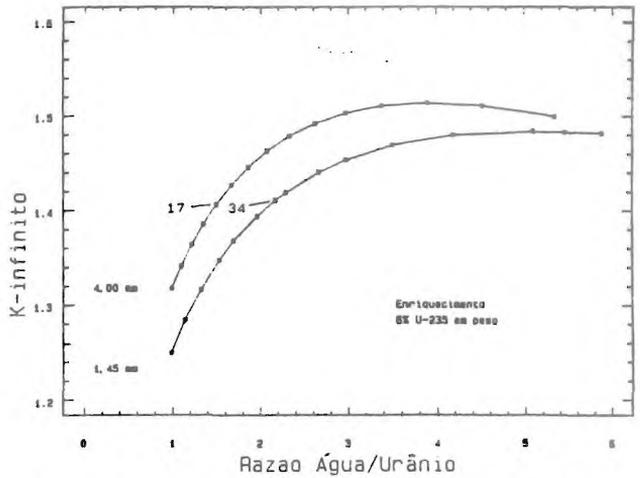


Figura 2- Curvas de Moderação Para Combustível Tipo Placa. (K-infinito x Razão Água/Urânio). Plaquetas de UO₂ com espessuras de 1,45 mm e 4,00 mm. /1/

variação da reatividade ao longo da queima e ao longo do tempo obtidas são mostradas nas figuras 3 e 4.

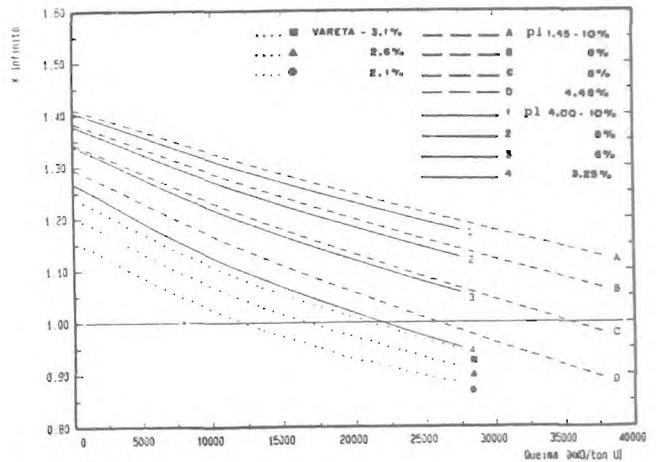


Figura 3- Variação da Reatividade ao Longo da Queima

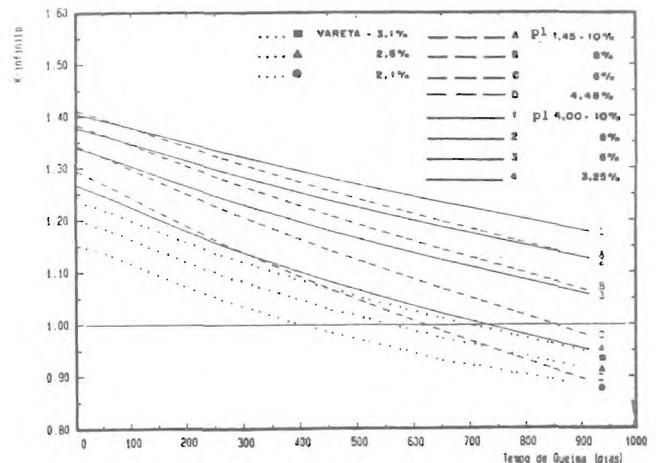


Figura 4- Variação da Reatividade ao Longo do Tempo.

Análise Termo-Hidráulica. Foram determinados, para cada tipo de combustível, as distribuições de temperatura no combustível e canal de refrigeração, os valores de perda de pressão através dos EC's, os valores de velocidade crítica de escoamento em que podem ocorrer situações de colapso das placas, e os valores da relação de fluxo crítico de calor (DNB) comparados ao fluxo de calor existente.

Os resultados de temperaturas centrais do combustível, obtidos para os casos representativos de máxima potência linear na vareta combustível e na placa combustível são:

| | T_c combust. (°C) |
|-------------------------|---------------------|
| Vareta combustível | 1814 |
| Placa combustível | |
| plaqueta UO_2 1,45 mm | 427 |
| plaqueta UO_2 4,00 mm | 925 |

A distribuição de temperaturas ao longo da plaqueta de UO_2 e do revestimento, obtida para o caso de máxima potência linear local da plaqueta combustível de espessura 1,45 mm é mostrada na figura 5.

Para os EC's em comparação, verificou-se a influência da forma geométrica do elemento na queda de pressão ao longo do comprimento da vareta ou placa combustível, sem considerar as perdas de pressão nos bocais de entrada e saída do elemento combustível.

Os valores de perda de pressão por metro de comprimento de EC obtidos foram:

| | |
|--------------|-------------------|
| EC varetas | $P = 0,46$ bar/m |
| EC 34 placas | $P = 0,385$ bar/m |
| EC 17 placas | $P = 0,253$ bar/m |

A passagem de água através dos elementos combustíveis induz vibrações. Estas vibrações não podem gerar deformações nas varetas ou placas de modo a prejudicar as dimensões dos canais de refrigeração e criar problemas locais de transferência de calor.

Os valores de velocidade crítica obtidos e as velocidades existentes para cada EC tipo placa foram:

| | Veloc. Crítica (m/s) | Veloc. Existente (m/s) |
|--------------|----------------------|------------------------|
| EC 34 placas | 19,7 | 5,65 |
| EC 17 placas | 64,2 | 5,93 |

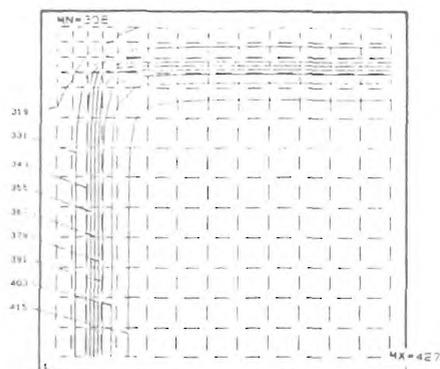


Figura 5- Distribuição de Temperaturas na plaqueta de UO_2 1,45 mm. (q' max. local = 161 kW/m)

Para o presente trabalho utilizou-se a correlação desenvolvida por Jens e Lottes ("ANL - Argonne National Laboratory") /1/ para o cálculo do fluxo de calor crítico ao longo dos EC's com varetas e do tipo placa. A tabela 3 apresenta as principais características e resultados obtidos nas verificações termo-hidráulicas efetuadas para os EC's em comparação.

Tabela 3-Dados e Resultados Termo-Hidráulicos Obtidos para os EC's em Comparação

| Tipo de E.C. Características | EC com varetas | EC Placas | |
|---|-----------------|----------------|--------------|
| | | 2EC/CONJ | 2EC/CONJ |
| No. de varetas ou placas | 235 var EC16x16 | 34 pl (2x17) | 68 pl (2x34) |
| Forma do comb. | past. Cilínd. | plaqueta | plaqueta |
| Dimensão do combust. (mm) | 8,19 (diám.) | 20x20x 4,0 | 20x20x 1,45 |
| Quant. UO_2 por metro EC (Kg/m) | 127,5 | 102,1 | 74,0 |
| Área de transf. de calor (cm^2) | 70140 | 48960 | 97920 |
| Área transf. calor/quant. comb. ($cm^2/KgUO_2$) | 550 | 480 | 1320 |
| Potência espec. (MW/ton U) | 37,61 | 47,55 | 65,59 |
| Potência linear (q') média/max (kW/cm) | 180/420 | 1382/3220 | 691/1610 |
| Fluxo de calor (q'' max exist.) (W/cm^2) | 140,73 | 201,25 | 100,62 |
| Dens. potência (q'') média/max (W/cm^3) | 342,00/796,86 | 432,00/1006,25 | 596/1388 |
| Fluxo crit. de calor (W/cm^2) ($q''_c = DNB$) | 566 | 629 | 612 |
| MDNBR | 4,0 | 3,1 | 6,1 |

Análise Termo-Mecânica O propósito desta análise foi o conhecimento dos níveis de tensões existentes nos revestimentos dos EC's tipo vareta e tipo placa. Foram verificadas as tensões devidas aos carregamentos de pressão externa do refrigerante, pressão interna, aos gradientes térmicos no revestimento e às restrições de expansões térmicas diferenciais entre o revestimento e o combustível.

Os resultados de tensões foram obtidos, para os dois casos de potência, tanto no período inicial de operação como após uma queima de 35.000 MWD/ton U.

As tensões no revestimento obtidas para a vareta combustível foram:

| | Caso | Máxima Tensão |
|-------------------------------|------------------|---------------|
| | | Equiv. (MPa) |
| Início Operação | Potência Média | 77,55 |
| | Pico de Potência | 88,04 |
| Após queima de 35.000 MWD/t U | Potência Média | 75,87 |
| | Pico de Potência | 46,10 |

As máximas tensões atuantes no início de vida (tensões circunferenciais) são de compressão, enquanto que, após a queima de 35.000 MWD/ton U para o caso de pico de

potência, estas tensões são de tração, já que existe interação pastilha-revestimento.

Os valores máximos de tensão equivalentes obtidos, estão abaixo da tensão de escoamento do material na temperatura de operação.

Para o caso da placa, foram calculadas as expansões térmicas das plaquetas e obtidos os níveis de tensão para início de vida e após uma queima de 35.000 MWD/ton U, tendo sido impostas as deformações correspondentes à variação dimensional do combustível devido à soma dos efeitos de densificação e de inchamento ocorridos nesta queima. A figura 6 apresenta a distribuição de tensões na plaqueta combustível de 1,45 mm, na posição de máxima potência.

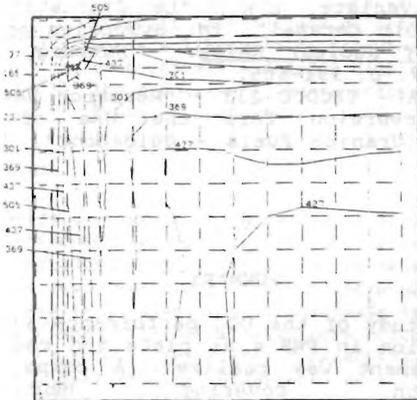


Figura 6- Distribuição de Tensões (MPa) na plaqueta de 4,00mm ($q_{\text{max local}}=322 \text{ kW/m}$)

Os níveis de tensões obtidos para o revestimento nos dois casos de espessura de placa ultrapassam o limite de escoamento do material na temperatura de operação. Algumas maneiras de diminuir estas tensões, podem ser através da adoção de : (1) uma folga de montagem (a frio) entre o combustível e a grelha interna da placa, de forma a acomodar os acréscimos dimensionais do combustível devido à expansão térmica e à variação devido à soma dos efeitos de densificação e de inchamento ao longo da queima desejada, sem imposição de deformação ao revestimento; (2) cantos arredondados na moldura interna e utilização de plaquetas combustíveis contendo chanfros e arredondamentos adequados nas suas bordas, para evitar concentrações de tensões.

Análise de Fenômenos na Plaqueta

Verificou-se que para as temperaturas existentes no combustível tipo placa ($t_{\text{max}} = 925,3 \text{ }^\circ\text{C}$, espessura 4,00mm, para o caso de pico de potência), não devem ocorrer mudanças microestruturais no material quando comparadas às mudanças existentes em pastilhas combustíveis, onde as temperaturas são bem superiores acarretando uma distribuição diferenciada da forma e tamanho dos grãos.

A variação dimensional do combustível ao longo da queima é o resultado da superposição dos efeitos da densificação e do inchamento ocorridos neste período de

queima. A variação dimensional do combustível devido à soma dos efeitos de densificação e de inchamento ocorridos após uma queima de 35.000 MWD/ton U foi de +0,44%, que é um valor baixo. Os resultados, representados na figura 7, mostraram uma predominância inicial do fenômeno de densificação, levando o combustível, já no início da queima, a uma redução na sua porosidade inicial.

Estes resultados demonstram que, devido às menores temperaturas de operação, ocorrem menores taxas de inchamento ao longo da queima no combustível placa.

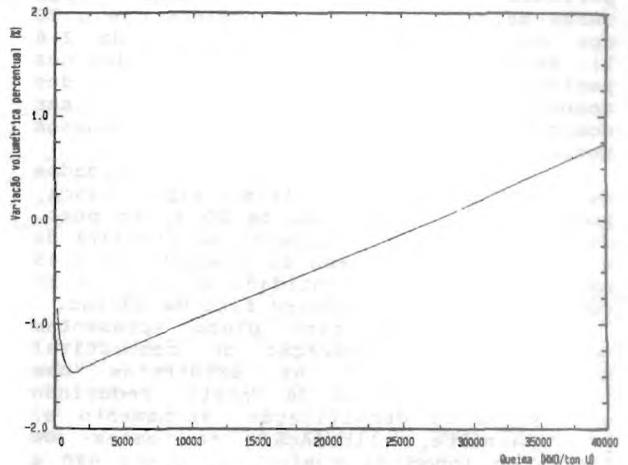


Figura 7- Variação Dimensional da Plaqueta Combustível ao Longo da Queima, devido à Soma dos Efeitos de Densificação e Inchamento.

Os resultados obtidos para liberação de gases de fissão apresentados na figura 8, mostraram que, para os níveis de temperaturas existentes nos combustíveis tipo placa em estudo, para queimas até 30.000 MWD/ton U, a liberação percentual de gases é muito pequena (menor que 0,25%). Para uma queima de 35.000 MWD/ton U, apresenta-se um valor de 0,8%. Para queimas superiores a 35.000 MWD/ton U, a fração dos gases que são liberados aumenta de forma expressiva, causando um grande aumento na pressão interna do compartimento do combustível tipo placa.

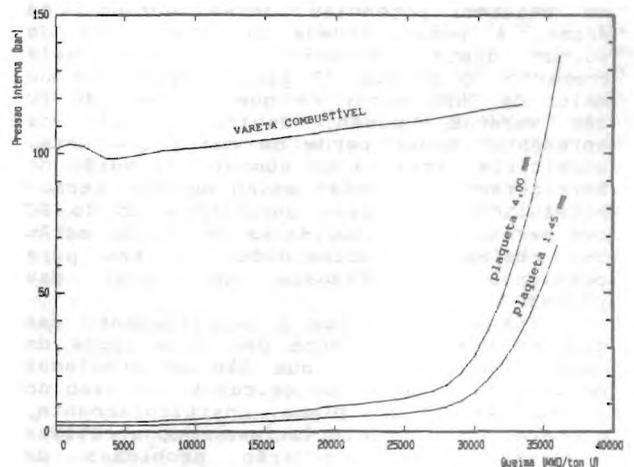


Figura 8-Evolução da Pressão Interna ao Longo da Queima. Potência Máxima.

CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas dos EC's analisados foram:

(1) Os elementos combustíveis tipo placa apresentam melhores características de reatividade que o EC constituído por varetas, mesmo na condição de igual quantidade inicial de U-235. Os resultados obtidos para os combustíveis tipo placa (enriquecimentos de 6 a 10 % em peso de U-235) mostram que é possível se obter queimas superiores a 30.000 MWD/ton U e períodos de queima cerca de duas a três vezes maiores que aqueles obtidos com o EC com varetas (enriquecimento médio de 2,6 %). Nestes casos, as altas reatividades nos períodos iniciais de queima dos combustíveis tipo placa, podem ser compensadas com utilização de venenos queimáveis.

(2) Utilização de menores quantidades de combustível nos EC's tipo placa, podendo-se obter redução de 20 %, em peso, de UO_2 no caso de utilização de plaqueta de 4,00 mm e 42 % no caso de plaqueta de 1,45 mm, em relação à quantidade de UO_2 do EC com varetas para um volume fixo de núcleo.

(3) Os EC's tipo placa apresentam temperaturas de operação do combustível muito menores que as existentes nas pastilhas cilíndricas da vareta, reduzindo os efeitos de densificação, inchamento e, principalmente, liberação de gases de fissão ao longo da queima. No placa não é necessário se prever espaço vazio especial para a acomodação desses gases, até um valor de queima igual a 35.000 MWD/ton U. Este efeito, juntamente com sua característica de combustível compartimentalizado, fará com que exista menores níveis de atividade da água do circuito primário quando da ocorrência de eventual ruptura do revestimento.

(4) Ocorrência de menores perdas de carga ao longo dos EC's tipo placa do que para o EC de varetas cilíndricas, exigindo assim menores potências de bombeamento do refrigerante e viabilizando, de forma melhor, operações em circulação natural.

(5) Os EC's tipo placa apresentam maior densidade de potência que o EC com varetas. O EC com 34 placas apresenta margem termo-hidráulica (DNBR) superior aos casos do EC com 17 placas e EC com varetas. Isto significa a possibilidade de retirada de maiores potências desse núcleo, ou mesmo, a possibilidade de diminuição do volume deste, tornando o reator mais compacto. O EC com 17 placas apresenta um valor de DNBR menor do que no caso do EC com varetas, porém, devido o fato de apresentar menor perda de carga que este, permitiria, através do aumento da vazão do refrigerante, aumentar estas margens termo-hidráulicas a valores superiores ao do EC com varetas. As velocidades do fluido estão bem abaixo das velocidades limites para ocasionar instabilidade estrutural das placas.

(6) Comparando-se o comportamento das tensões no revestimento dos dois tipos de combustível, nota-se que não há problemas de utilização em ambos os casos. No caso do combustível tipo placa, particularmente, adotando-se características construtivas adequadas, não ocorrerão problemas de concentrações de tensões. Isto indica que os EC's tipo placa apresentam um maior

potencial de bom desempenho para rampas de potência e seguimento de carga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /1/ Da Silva, J.E.R., "Comparação do Desempenho do Dióxido de Urânio Sinterizado Sob Forma Plana e Cilíndrica Para Reatores A Água Pressurizada", Msc. Thesis, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, SP, Brasil, 1989.
- /2/ Perrotta, J.A., "Comportamento da Barra Combustível de um Reator Tipo PWR em Seguimento de Carga", Msc Thesis, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1980.
- /3/ Chagrot, M.R., "Caramel Low Enrichment Fuel for Research Reactors". Nuclear Europe, Vol. 6, pp 22-27, 1985.
- /4/ Benveniste, E.R., "Le Combustible a Plaques Dit Caramel". In: Symposium on the Safety of Nuclear Ships. - Hamburg, 5-9, Dec. 1977. p. 591-605.
- /5/ IAEA - TECDOC 233 - "Research Reactor Core Conversion Form the Use of Low Enriched Uranium Fuels - Guidebook". IAEA, 1980.

SUMMARY

A study of the UO_2 performance and its utilization in PWR's as plate and rod type fuel element was realized. A comparative evaluation covering neutronic, thermohydraulic, thermomechanical and fuel performance aspects is presented. The results obtained for the forms studied confirm the potential for good performance of UO_2 in PWR's. Burnups up to 30.000 MWD/tonU can be achieved.