

## COMPORTAMENTO DA BARRA COMBUSTÍVEL DE UM REATOR TIPO PWR EM SEGUIMENTO DE CARGA

José Augusto Perrotta  
Gilberto Gomes de Andrade

### RESUMO

É analisado o comportamento da barra combustível de um reator nuclear PWR quando operando em ciclos normais de potência excluindo-se casos de acidentes. Foi desenvolvido um código cujo objetivo principal é a análise mecânica do revestimento empregando para tal o método de elemento finito. Foram simuladas rampas e ciclos de potência supondo a existência de rachaduras na pastilha quando da interação pastilha-revestimento. Como resultado do estudo, recomenda-se um procedimento de operação da barra combustível em ciclos de potência.

### 1.0. INTRODUÇÃO

Dentre as falhas encontradas recentemente em barras combustíveis (BC) de reatores PWR, a maioria ocorreu devido à interação pastilha-revestimento (IPR). É conhecido que depois de algum tempo de permanência, de alguns tipos de BC, dentro de reatores PWR, o revestimento de zircaloy fica em contato com a pastilha combustível (PC). A partir deste ponto, deve ser feita uma melhor análise na potência a ser imposta ao reator para que não venha a danificar o revestimento da BC e liberar produtos de fissão para o refrigerante.

Na análise de seguimento de carga, o objetivo principal é acompanhar o comportamento do revestimento de zircaloy ao longo de uma curva diária de potência e ao longo dos vários ciclos realizados durante a sua permanência no reator. Para tal devem ser verificados os efeitos de rampas de potência sobre este revestimento, a mudança de suas características mecânicas ao longo dos ciclos e a influência do seu tempo de permanência dentro do reator. Fatores que têm influência na limitação do desempenho da BC em ciclos de potência são:

- na PC: deformação das arestas e abertura de rachaduras;
- no revestimento: corrosão sob tensão (fator mais limitante),

fadiga mecânica e corrosão interna e externa.

A análise do desempenho da BC pode ser feita utilizando dados estatísticos obtidos com a experiência de operação de vários reatores de potência ou pesquisa, ou através de códigos determinísticos que analisam de maneira total ou parcial os fenômenos envolvidos na operação da BC dentro do reator. A figura 1 mostra a complexidade da interdependência dos parâmetros envolvidos numa simulação de BC.

Foi desenvolvido para este trabalho um código ("ARBEF"), determinístico, o qual caracteriza a interação mecânica da PC e o revestimento de zircaloy, possibilitando a simulação de diferentes rampas de potência, e dando os fundamentos necessários para a análise da BC em seguimento de carga. Este código utiliza o método de elementos finitos para a análise mecânica do revestimento (elasticidade, plasticidade e viscoplasticidade) possibilitando a verificação de pontos de concentração de tensões e deformações neste revestimento de zircaloy devido às rachaduras existentes na PC.

A tabela 1 mostra a comparação de resultados deste código com outros, para uma BC de Angra I.

## 2.0. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Das considerações assumidas no modelo de cálculo, a deformação lenta do revestimento é o fator mais importante da análise das rampas de potência, pois a relaxação de tensões no revestimento, ou seja, a transformação de deformações elásticas em deformações plásticas ao longo do tempo, em concorrência com a expansão térmica da pastilha e a expansão térmica do próprio revestimento, é que ditará o estado de tensão no revestimento, ao final de uma rampa de potência. (Não é considerada a deformação lenta da pastilha).

A expressão, empírica, assumida para a taxa de deformação lenta é dependente da tensão atuante, do nível de fluxo neutrônico, e do tempo de referência de operação. Para tempos de referência menores que 1000 horas, obtem-se taxas na região de "creep primário", e para tempos acima deste valor a taxa permanece praticamente constante, ou seja, região de "creep secundário".

rio". A figura 2 mostra a variação do raio interno do revestimento para as condições de temperatura e pressão interna e externa semelhantes às existentes para a mesma curva do FSAR de Angra I.

A consideração de rachaduras na pastilha, mantendo como parâmetros a configuração de cálculo e as condições de atrito entre pastilha e revestimento, leva à determinação de pontos de máxima tensão na superfície interna do revestimento, servindo esta tensão para a análise das limitações devido à corrosão sob tensão e para a determinação do número de ciclos admissível sem ocasionar trincas por fadiga mecânica.

Foram simuladas várias rampas de potência, partindo-se de uma condição conhecida, variando-se a taxa de incremento de potência e o coeficiente de atrito entre pastilha e revestimento. O número de rachaduras e o ângulo da abertura destas foram vinculados ao número de elementos assumidos na superfície interna do revestimento. As figuras 3 e 4 mostram a variação das tensões máximas interna.

Verifica-se das figuras, que a consideração de rachaduras na PC e um coeficiente de atrito da ordem de 0.5 (obtido na bibliografia pesquisada) aumentam consideravelmente as tensões no revestimento. Está também assinalada a tensão limite para a corrosão sob tensão, verificando-se que as rampas de potência, quando existe o contato entre pastilha e revestimento, e consideradas rachaduras na pastilha, ficam bastante limitadas. Deve-se mencionar, também, que no cálculo das tensões máximas no revestimento, não está sendo considerada a hipótese da existência de trincas na superfície interna do revestimento. A existência de uma trinca nas regiões de tensões máximas aumentaria mais ainda o valor destas tensões.

As figuras 5 e 6 mostram um ciclo de potência e a variação da tensão tangencial máxima na superfície interna do revestimento ao longo do ciclo. Pode-se descrever o comportamento da barra submetida ao ciclo analisado por:

- a condição inicial é de não contato da PC com o revestimento, e as tensões existentes são decorrentes da pressão interna e externa atuantes sobre o revestimento;
- quando a BC é submetida à rampa de potência, o revestimento e a pastilha entram em contato, e o revestimento começa a sofrer

tensões de tração a partir de um certo ponto;

- a tensão máxima atingida ao final da rampa é dependente da taxa de variação da potência, notando-se também um aumento considerável com a suposição de rachaduras na pastilha, e atrito entre pastilha e revestimento;

- quando mantida a potência constante no nível 100% de potência, as tensões no revestimento começam a relaxar e o valor desta relaxação depende do nível de tensão alcançada;

- quando se retorna à potência inicial de 50%, nota-se que a pastilha perde contato com o revestimento num raio maior do que o existente na rampa de potência do ciclo anterior. Isto ocorre devido à transformação de deformações elásticas em deformações plásticas durante a relaxação verificada no revestimento ao longo de todo o período em que houve contato da pastilha com o revestimento.

- permanecendo algum tempo na potência mais baixa, onde não há contato da pastilha com o revestimento, este tende a se deformar para dentro, devido à deformação lenta ao longo do tempo, pois a pressão externa é maior do que a interna.

- quando se subir novamente ao nível de 100% de potência, o ciclo se repete.

Nota-se que a cada ciclo de potência, deste exemplo, o valor da tensão máxima é menor que o valor da tensão máxima no ciclo anterior. Isto, no entanto, só ocorre se o tempo de permanência nas potências mais baixas for tal que a deformação do revestimento não seja suficiente para devolver as condições do ciclo anterior antes da nova rampa de potência. Caso este tempo permita uma deformação maior do que a deformação permanente adquirida durante a rampa anterior, a tensão alcançada ao final da nova rampa de potência será maior do que a do ciclo anterior. As figuras 7 e 8 mostram este efeito em que a relação entre o tempo de contato e não contato da PC com o revestimento permite um aumento da tensão máxima interna do revestimento à cada ciclo.

Estes exemplos mostram o efeito de condicionamento de descondicionamento da BC a um nível de potência. O condicionamento da BC a uma dada potência estaria ligado às tensões máximas interna do revestimento abaixo de um certo nível de tensão, tensão esta que não possibilitasse qualquer dano à barra. (Como por e-

xemplo a tensão limite para ocorrência de corrosão sob tensão).

### 3.0. CONCLUSÕES

Da análise de ciclos de potência possíveis de ocorrer em uma usina nuclear, verifica-se a necessidade de se impor um critério de operação da BC nestes ciclos, a fim de se limitarem as tensões para evitar corrosão sob tensão, como também aumentar o número de ciclos sem que ocorra fadiga mecânica. Este procedimento, tendo como base os resultados anteriores, pode ser descrito da seguinte forma:

- antes de iniciar os ciclos de potência, subir à potência máxima dos ciclos através de uma rampa limite, baseada na tensão máxima interna, supondo rachaduras na pastilha, um coeficiente de atrito igual a 0.5, e limitando esta tensão pela tensão de Vindeem e Lunde ( $300 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ ) para corrosão sob tensão;
- permanecer nesta potência algumas horas (+ 24 horas) a fim de relaxar tensões até um valor próximo ao limite de Busby para corrosão sob tensão ( $165 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ ) para longos períodos;
- a partir deste ponto, começar a operação em ciclos de potência.

### 4.0. REFERÊNCIAS

- 1) J. A. Perrotta - "Comportamento da Barra Combustível de um Reator Tipo PWR em Seguimento de Carga" - Tese de Mestrado IME- Outubro/1980.

TABELA 1 : Comparação dos resultados do código.

	ARBEF	FRAP.S1	GAPCON-2	FSAR
Temperatura no refrig <sub>erante</sub> (°K)	574	574	585	
Temperatura externa no revestimento (°K)	592	609	602	
Temperatura interna no revestimento (°K)	613	631	625	
Temperatura média no revestimento (°K)	602	620	614	~ 615
Temperatura da superfície da pastilha (°K)	778	669	790	~ 800
Temperatura central da pastilha (°K)	1174	942	1179	~ 1150
Temperatura média da pastilha (°K)	965	832	975	~ 980
Diâmetro externo do revestimento (m)	$9,511 \times 10^{-3}$	$9,510 \times 10^{-3}$	$9,509 \times 10^{-3}$	
Diâmetro interno do revestimento (m)	$8,365 \times 10^{-3}$	$8,367 \times 10^{-3}$	$8,366 \times 10^{-3}$	
Diâmetro da pastilha (m)	$8,246 \times 10^{-3}$	$8,234 \times 10^{-3}$	$8,233 \times 10^{-3}$	
Tensão tangencial na superfície externa do revestimento (N/m <sup>2</sup> )	$-52,97 \times 10^6$	$-53,97 \times 10^6$	-	
Tensão tangencial na superfície interna do revestimento (N/m <sup>2</sup> )	$-76,83 \times 10^6$	$-75,86 \times 10^6$	-	
Pressão interna (N/m <sup>2</sup> )	$8,79 \times 10^6$	$8,70 \times 10^6$	$7,90 \times 10^6$	

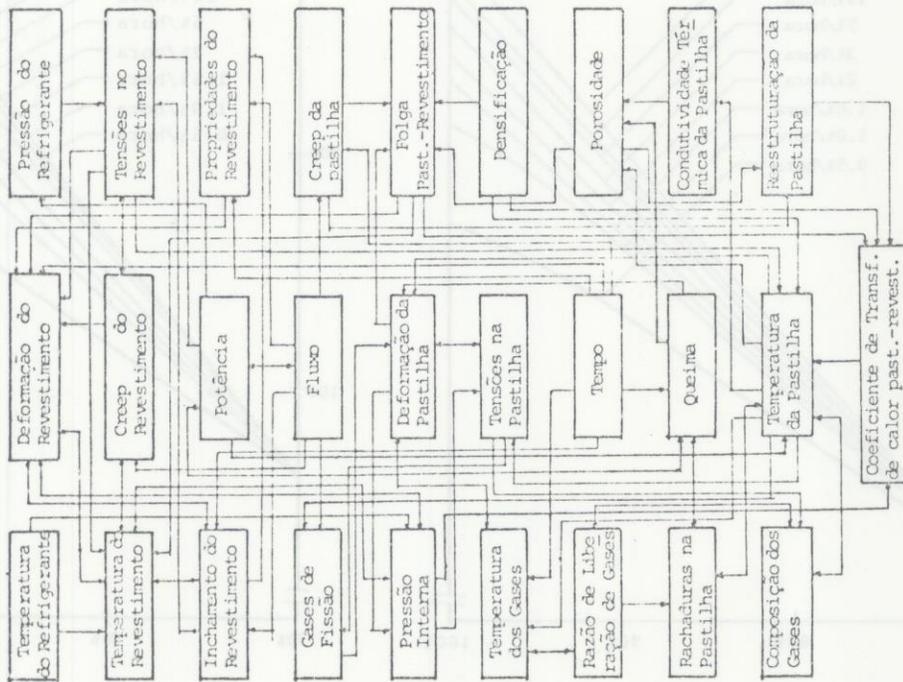


Figura 1 : Interação entre parâmetros na barra combustível.

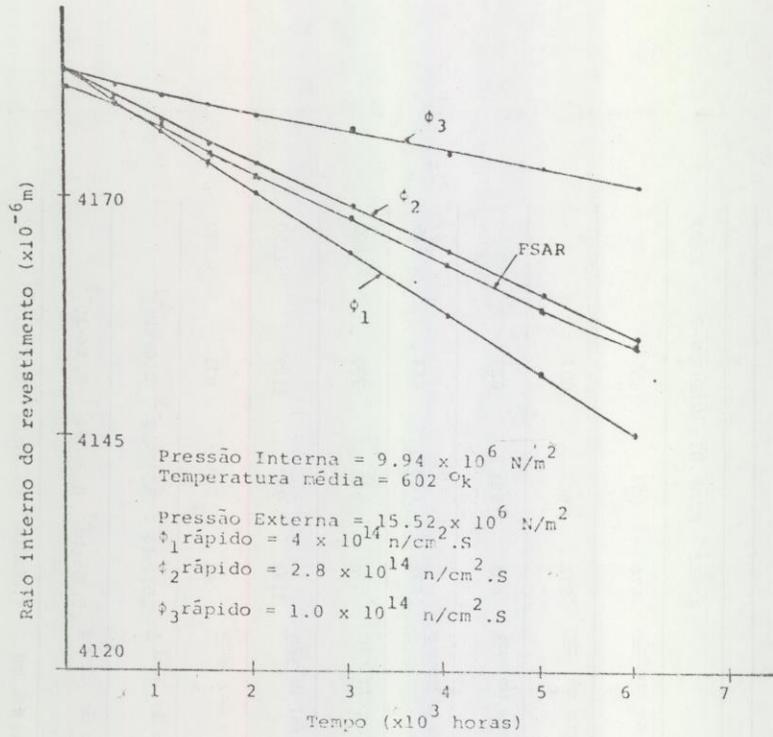


Figura 2 : Variação do raio interno do revestimento em períodos longos (somente creep secundário).

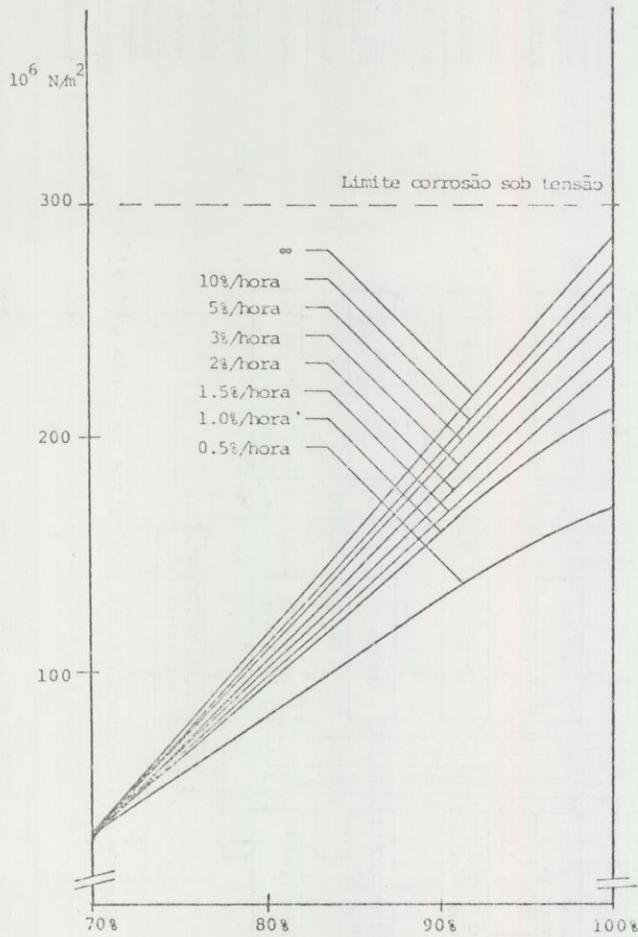


Figura 3 : Valor de tensão para diferente rampas . 3 rachaduras na pastilha por quadrante,  $10^0$ , coeficiente de atrito = 0.0 .

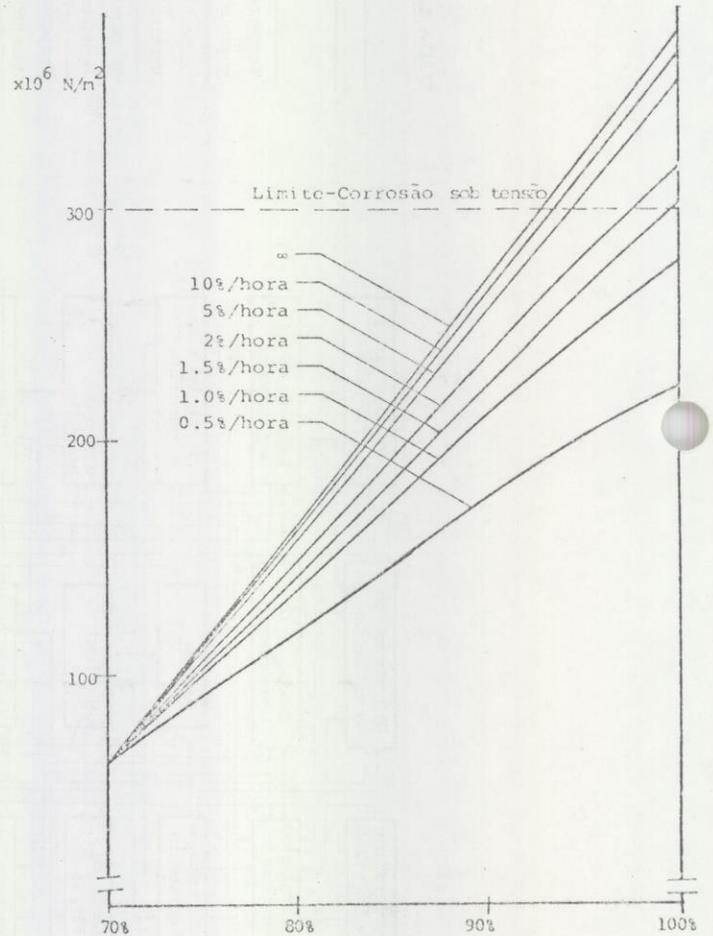


Figura 4 : Valor de tensão para diferentes rampas. 3 rachaduras na pastilha por quadrante,  $10^0$ , coeficiente de atrito = 0.5 .

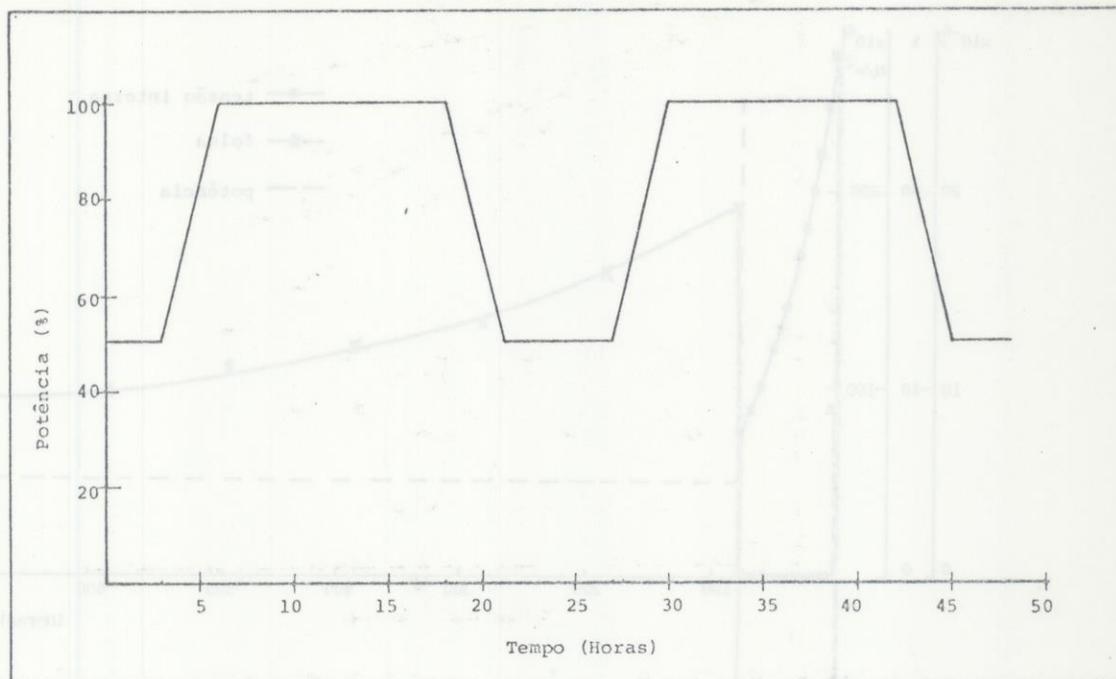


Figura 5 : Exemplo de ciclo de potência nº 3.

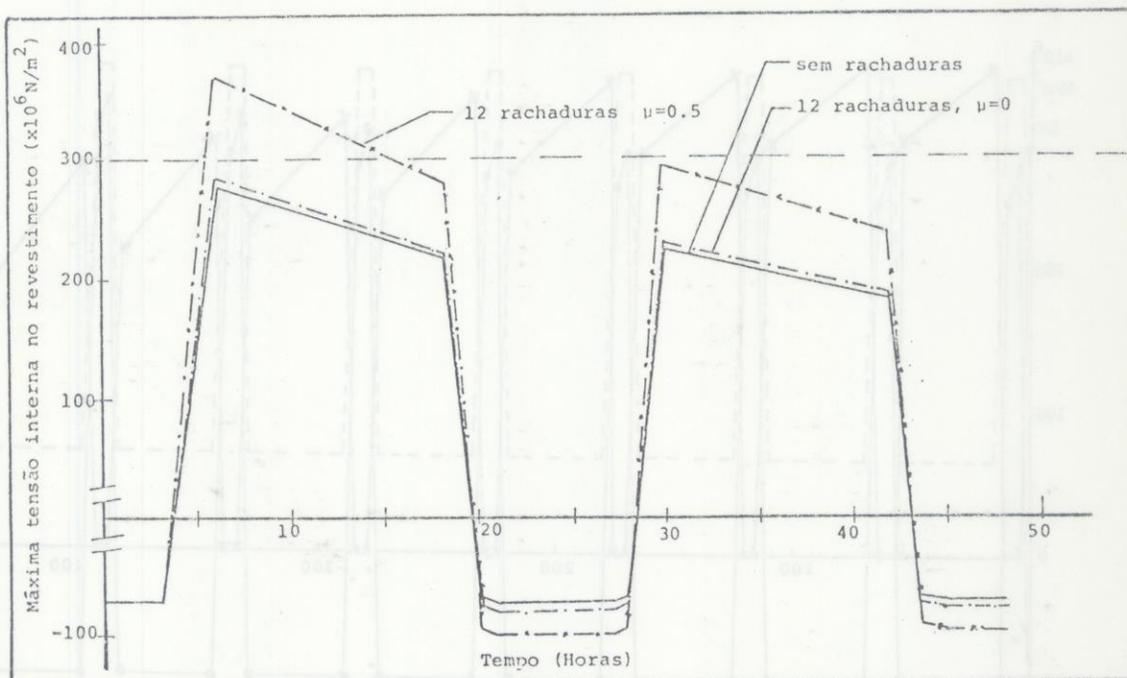


Figura 6 : Exemplo do ciclo de potencia nº 3 , folga inicial entre pastilha e revestimento =  $9.3 \times 10^{-6} \text{ m}$  à 20% de potência.

