



7º SIMPÓSIO BRASILEIRO  
SOBRE TUBULAÇÕES E VASOS DE PRESSÃO

7<sup>TH</sup> BRAZILIAN SYMPOSIUM ON PIPING AND PRESSURE VESSELS

FLORIANÓPOLIS, 07 - 09 DE OUTUBRO DE 1992

TRABALHO Nº



PP. 351-358

MODELAGEM DA INTERAÇÃO PASTILHA-REVESTIMENTO DE PWRs

Armando Margotto Esteves e Antonio Teixeira e Silva

IPEN-CNEN/SP

SUMÁRIO

A interação termo-mecânica que pode ocorrer entre a pastilha de dióxido de urânio ( $UO_2$ ) e o revestimento de varetas combustíveis de reatores a água leve pressurizada é modelada com os programas computacionais FRAPCON-1 e ANSYS. O programa de desempenho do combustível FRAPCON-1 analisa o comportamento da vareta combustível sob irradiação e gera as condições iniciais e de contorno para modelagens localizadas, térmicas e mecânicas, da vareta em elementos finitos bi e tri-dimensionais com o ANSYS. Na modelagem mecânica, um fragmento de pastilha é alocado na folga pastilha-revestimento da vareta. Dois tipos de materiais de revestimento de varetas combustíveis são analisados: zircaloy e aço inoxidável austenítico.

SUMMARY

The pellet-cladding interaction that can occur in a PWR fuel rod design is modelled with the computer codes FRAPCON-1 and ANSYS. The fuel performance code FRAPCON-1 analyzes the fuel rod irradiation behavior and generates the initial conditions for the localized fuel rod thermal and mechanical modellings in two and three-dimensional finite elements with ANSYS. In the mechanical modelling, a pellet fragment is placed in the fuel rod gap. Two types of fuel rod cladding materials are considered: Zircaloy and austenitic stainless steel.

## 1. Introdução

Desde a sua constatação a aproximadamente duas décadas, a interação mecânica que pode ocorrer entre a pastilha de  $UO_2$  e o revestimento (PCI - "Pellet Cladding Interaction") tem se estabelecido como o principal mecanismo causador de falhas em varetas combustíveis durante a irradiação em reatores a água leve pressurizada (PWR - "Pressurized Water Reactor") [1].

Entre os principais fenômenos que ocorrem na pastilha e que induzem à sua interação com o revestimento da vareta incluem-se a expansão térmica, a formação de trincas devido ao elevado gradiente de temperatura e a ciclagem térmica e o inchamento devido aos produtos de fissão, fenômenos estes que ocasionam o aumento do diâmetro da pastilha combustível. Em varetas com revestimento de zircaloy, devido à elevada pressão externa e à alta fluência térmica e induzida pela irradiação, o revestimento tende a se comprimir auxiliando ainda mais para que o contato ocorra. Após o contato, a pastilha tende a impor a sua deformação ao revestimento, desenvolvendo tensões trativas e deformações que podem levar, auxiliadas por um meio corrosivo, à formação de trincas no revestimento.

Estudos desenvolvidos para varetas combustíveis com revestimento de aço inoxidável austenítico em operação normal de PWRs [2] tem demonstrado que a PCI ocorre em um tempo de irradiação maior do que o observado para varetas combustíveis com revestimentos de zircaloy. A razão para isto, é a maior expansão térmica e a menor fluência térmica e sob irradiação apresentada pelo aço-inox que tende a manter a folga pastilha-revestimento aberta durante praticamente todo o período de irradiação. Entretanto, trabalhos recentes [3] têm demonstrado que fragmentos desconectados da pastilha podem se alojar na folga pastilha-revestimento, e assim, uma interação mecânica localizada pode ocorrer a qualquer tempo de irradiação da vareta. Visando à análise deste fenômeno, uma modelagem da PCI é desenvolvida com os programas computacionais FRAPCON-1 [4] e ANSYS [5].

Em uma primeira fase, a análise é desenvolvida pelo programa de desempenho FRAPCON-1 para toda a extensão da vareta visando a observação dos vários fenômenos na pastilha e no revestimento que levam à esta interação. A seguir, com as condições iniciais e de contorno geradas pela análise de desempenho, uma análise

termo-mecânica localizada da vareta combustível é desenvolvida através de modelos em elementos finitos bidimensionais (nos planos transversal e longitudinal) e tridimensionais com o ANSYS. Nesta análise, é prevista a alocação de um fragmento de pastilha na folga pastilha-revestimento da vareta.

## 2. Análise de desempenho da vareta combustível

O programa computacional de desempenho FRAPCON-1 simula os vários fenômenos da vareta combustível sob irradiação em condição de estado estacionário para um dado histórico de potência do reator. A análise é executada para vários nós ao longo da vareta e os diversos fenômenos são axisimetricamente simulados no plano transversal para cada nó axial. Os dados de entrada consistem do histórico e da densidade local de potência na vareta, da geometria da vareta e das condições de temperatura e pressão no núcleo do reator. Como resultado, obtêm-se, por exemplo, a distribuição radial e axial de temperaturas na vareta, a pressão dos gases internos e as tensões e deformações de membrana no revestimento da vareta.

O programa FRAPCON-1 não apresenta a opção de tratar deterministicamente varetas combustíveis com revestimento de aço-inox. Para isto, foi necessário desenvolver a adequação deste programa para que considerasse este tipo de revestimento, sendo gerado a versão FRAPCON-1/aço [6].

## 3. Análise termo-mecânica por EFs da PCI

Os valores de tensão e deformação obtidos da análise de desempenho são valores médios. Para a análise de fenômenos de natureza pontual, como a alocação de um fragmento de pastilha na folga, uma abordagem mais localizada deve ser desenvolvida. Para isto, é utilizado o programa baseado no MEF, ANSYS [5], para proceder localmente as análises térmica e mecânica da vareta combustível. Uma análise bidimensional é realizada para a obtenção da discretização das malhas mais apropriadas à construção dos modelos e para o desenvolvimento de um estudo paramétrico, que busca identificar a influência e a relevância dos fatores mais predominantes na análise da PCI. As conclusões desta avaliação são utilizadas para o desenvolvimento de uma análise tridimensional do problema.

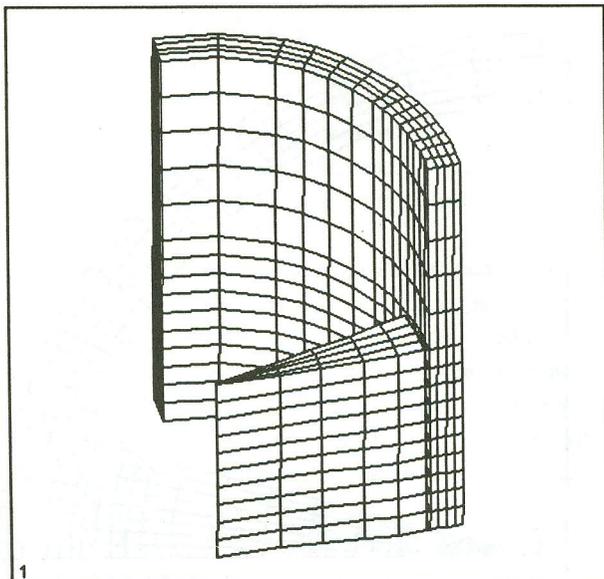


FIGURA 3 - Modelo estrutural tridimensional de vareta combustível.

No modelo mecânico bidimensional transversal havia dúvida de qual hipótese de estado plano a ser considerada para modelar a pastilha e o revestimento da vareta combustível. Assim, uma análise paramétrica do modelo mecânico transversal combinando as diversas hipóteses foi realizada e comparada aos modelos mecânicos longitudinal e tridimensional para a avaliação da hipótese de estado plano mais apropriada a ser aplicada na pastilha e no revestimento.

Em princípio, as condições de contorno da análise mecânica bi e tri-dimensionais foram dadas pela consideração de pastilha íntegra, onde todas as condições de simetria eram impostas. Após o processamento destes modelos constatou-se que, mesmo para baixas potências de operação, as dilatações térmicas diferenciais na pastilha provocaram elevadas tensões trativas, as quais excediam a tensão de ruptura do material cerâmico. Este fato causou o trincamento da pastilha que foi representado nos modelos pela alteração e liberação das condições de contorno impostas à pastilha.

Para o revestimento foram admitidos os materiais zircaloy e aço-inox, os quais foram executados para os regimes elástico, plástico e de fluência.

#### 4. Conclusões

A aplicação da modelagem para uma vareta combustível cilíndrica típica de PWR levou às seguintes conclusões:

- 1) A análise de desempenho mostrou que varetas de aço-inox apresentam uma característica geométrica mais estável do que varetas de zircaloy e exibem sob irradiação maiores folgas entre a pastilha e o revestimento, menores pressões internas, maiores tensões e menores deformações no revestimento. A simulação da vareta com revestimento de zircaloy mostrou a existência do contato pastilha-revestimento a queimas elevadas, mas os níveis de tensão e deformação obtidos estavam abaixo dos limites de projeto estipulados para varetas combustíveis de PWRs. A mesma vareta com revestimento de aço-inox não apresentou o contato pastilha-revestimento nos níveis de queima observados.
- 2) Na análise térmica foi simulado o contato térmico entre a pastilha e o revestimento com fragmento alocado. Somente pequenas variações de temperatura foram observadas, demonstrando que o contato térmico provocado pelo fragmento não é um fator relevante na análise da PCI.
- 3) A alocação do fragmento na folga resultou no desenvolvimento de pontos de concentração de tensões que levaram à plasticidade nos dois materiais de revestimento, mas não foram suficientes para causar a sua ruptura. Entretanto, as componentes de tensão trativas obtidas podem levar à corrosão sob tensão nos dois tipos de vareta. A consideração da fluência no revestimento não modificou sensivelmente os níveis de tensão atingidos pela plasticidade nos dois materiais.
- 4) A modelagem bidimensional transversal com as hipóteses de estado plano de deformação na pastilha e estado plano de

deformação com coeficiente de expansão térmica nulo no revestimento apresentou resultados compatíveis com os obtidos na análise tridimensional, mostrando um caráter bidimensional transversal da PCI.

#### REFERÊNCIAS

- [1] PERROTTA, J.A.; Fuel Pin Behaviour of a Pressurizer Water Reactor With Load Following, Tese de Mestrado, INIS-BR-113, IME, Oct. 1980.
- [2] TEIXEIRA e SILVA, A.; PERROTTA, J.A.; Some Aspects of the Use of Zircaloy and Stainless Steel as Clad for PWR Fuel Rods, International Symposium on Improvements in Water Reactor Fuel Technology and Utilization, IAEA-SM-288/5P, Stockholm, 15-19 Sept. 1986.
- [3] PASUPATHI, V.; KLINGENSMITH, R.W.; Investigation of Stainless Steel Clad Fuel Rod Failures and Fuel Performance in the Connecticut Yankee Reactor, EPRI-NP-2119, 1981.
- [4] BERNA, G.A.; BOHN, M.P.; COLEMANN, D.R.; FRAPCON-1: A Computer Code for the Steady State Analysis of Oxide Fuel Rods, Idaho National Engineering Laboratory, CDAP-TR-78-032-R1, Nov. 1978.
- [5] De SALVO, G.J.; SWANSON, J.A.; ANSYS - Engineering Analysis System User's Manual, Swanson Analysis Systems, Inc.
- [6] TEIXEIRA e SILVA, A.; ESTEVES, A.M.; Desempenho sob Irradiação de Varetas Combustíveis com Revestimento de Aço Inoxidável em PWRs, 5º-SIBRAT/ Simpósio Brasileiro Sobre Tubulações e Vasos de Pressão, 1º Simpósio Latinoamericano Sobre Tuberias y Recipientes de Presión, Salvador, 25-28 Out. 1988.