



I Congresso Geral de Energia Nuclear

Rio de Janeiro, 17 a 20 de Março de 1986

ANAIS - PROCEEDINGS

ADEQUAÇÃO DO CÓDIGO FRAP-T4 PARA ANÁLISE DE VARETAS COMBUSTÍVEIS DE REATORES PWR COM REVESTIMENTO DE AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO

Antonio Teixeira e Silva

Divisão de Mecânica, Estruturas e Análise de Confiabilidade-RTM
Departamento de Tecnologia de Reatores-RT
IPEN-CNEN/SP
São Paulo - SP

Sumário

O FRAP-T4 (Fuel Rod Analysis Program-Transient) é um código em FORTRAN-IV que descreve o comportamento de uma vareta combustível de um reator PWR, com revestimento de zircaloy, em condições hipotéticas de transientes, estendendo-se de transientes operacionais suaves à LOEAs ("Loss of coolant accidents") e RIAs ("reactivity initiated accidents"). Ele analisa a interligação dos efeitos térmicos, mecânicos, gás interno e propriedades materiais no comportamento da vareta combustível.

Ao código FRAP-T4 está acoplado o subcódigo de propriedades materiais "MATPRO", que fornece as propriedades físicas, químicas e mecânicas para o combustível, gás interno e revestimento de zircaloy.

Para a utilização do FRAP-T4 na análise e comparação do comportamento em regimes transientes (e acidentes) de varetas combustíveis com revestimento de zircaloy e aço inoxidável austenítico, foram adequadas no "MATPRO" as propriedades materiais do zircaloy para aço inoxidável austenítico.

Abstract

Fuel Rod Analysis Program-Transient (FRAP-T4) is a FORTRAN-IV computer code which can be used to solve for the transient response of a light water reactor zircaloy fuel rod during accidents such as a loss-of-coolant accident or a reactivity initiated accident. The coupled effects of mechanical, thermal, internal gas, and material property response on the behavior of the fuel rod are considered.

FRAP-T4 is coupled to a material property subcode, MATPRO, which is used to provide gas, fuel, and zircaloy cladding properties to the FRAP-T computational subcodes.

Using the FRAP-T4 to solve for the transient response of a light water reactor fuel rod with zircaloy and austenitic stainless steel claddings, zircaloy material properties on the subcode MATPRO had to be modified for austenitic stainless steel material properties.

1. INTRODUÇÃO

Investigações detalhadas da interligação dos efeitos térmicos, mecânicos, gás interno e propriedades materiais no comportamento de uma vareta combustível são efetuadas por códigos de desempenho do combustível, que simulam o comportamento tanto do revestimento como das pastilhas ao longo de um histórico de potência.

Os códigos da série FRAP-T ("A Computer Code for the Transient Analysis of Oxide Fuel Rods") /1/ descrevem o comportamento de uma vareta combustível em condições hipotéticas de transientes, estendendo-se de transientes operacionais suaves a LOCAs ("Loss of Coolant accidents") e RIAs ("reactivity initiated accidents"). Eles estão restritos à análise de varetas combustíveis refrigeradas a água, contendo combustíveis de óxido e revestimento de zircaloy. Os dados de entrada dependentes da queima ("burn-up") são fornecidas por um código de desempenho do combustível, que analise o comportamento da vareta combustível em regime permanente, como o FRAP-S /2/ / FRAPCON /3/ ("A Computer Code for the Steady State Analysis of Oxide Fuel Rods"). Se o FRAP-S/FRAPCON não está disponível, o FRAP-T tem a opção de gerar as condições iniciais para a simulação. Ao código FRAP-T está acoplado o subcódigo de propriedades materiais MATPRO ("A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior") /4/, que fornece as propriedades físicas, químicas e mecânicas para o combustível, gás interno e revestimento de zircaloy da vareta combustível.

A discussão do comportamento de uma vareta combustível com revestimento de aço inoxidável em reatores de água leve é apropriada, porque a questão aço versus zircaloy foi reaberta após o acidente de Three Mile Island. Aço inoxidável foi o material escolhido para encaminhamento do combustível nos primeiros reatores de água leve. Nessas aplicações, dois tipos de aço foram utilizados: AISI 304 e 348. A partir dos anos 60, os aços foram substituídos nos reatores comerciais por ligas de zircônio. A utilização em larga escala de revestimentos de zircaloy foi feita, principalmente devido à sua melhor economia de neutrons e, implicações de segurança, devido as reações zircaloy-vapor, só foram verificadas muito mais tarde, durante considerações de acidentes hipotéticos de perda de refrigerante (LOCA), que levaram a se estabelecer limites para a temperatura e o nível de oxidação do revestimento /5/. Após o acidente de Three Mile Island, as principais preocupações com o zircaloy são a evolução e características da bolha de hidrogênio formada de suas reações com vapor e o grau e a extensão dos danos no núcleo do reator, que resultam de sua excessiva oxidação e possíveis reações com o UO_2 . A questão é saber se o aço comporta melhor ou pior em uma situação de acidente.

Um dos modos de se comparar o comportamento dos revestimentos de zircaloy e aço em condições de acidente é utilizar códigos computacionais em regime transiente, que simulam o comportamento da vareta combustível nessas situações.

A maioria dos códigos de análise de transientes desenvolvidos pela indústria nuclear simulam o comportamento de uma vareta combustível com revestimento de zircaloy. Para simular o comportamento de uma vareta combustível de aço, torna-se necessária a adequação desses códigos.

O código escolhido para adequação foi o FRAP-T4 /1/ da série FRAP-T. Duas razões levam à sua escolha: 1) a disponibilidade de compra desse código; 2) a estratégia desenvolvida em um trabalho anterior /6/, onde os códigos da série FRAP-S/FRAPCON foram adequados para aço e com eles desenvolvido um estudo comparativo em termos de desempenho entre o zircaloy e o aço. Como os códigos da série FRAP-S/FRAPCON geram os parâmetros operacionais em regime permanente requeridos como condições iniciais para os códigos da série FRAP-T e, além disso, ambas as séries de códigos tem subcódigos e características de entrada-saída comuns, a escolha de um código da série FRAP-T é quase que direta.

A adequação do FRAP-T4 consistiu em substituir no seu subcódigo de proprie

dades materiais MATPRO as propriedades do revestimento de zircaloy para aço. O aço escolhido para adequação foi o tipo AISI 348.

2. ADEQUAÇÃO DO CÓDIGO FRAP-T4

Nã adequação do código FRAP-T4, foram modificadas as subrotinas que tratam das propriedades materiais do revestimento de zircaloy para aço. Essas propriedades para o zircaloy são reunidas no MATPRO-9 /4/. O MATPRO é o maior subcódigo do FRAP-T4 e cada uma de suas subrotinas define uma única propriedade do material.

Quatorze propriedades para o zircaloy foram modificadas para aço: 1) capacidade de calor específico; 2) condutividade térmica; 3) emissividade; 4) expansão térmica axial; 5) expansão térmica diametral; 6) módulo de elasticidade; 7) tensão versus deformação; 8) deformação versus tensão; 9) limites mecânicos; 10) razão de Poisson; 11) módulo de elasticidade transversal; 12) dureza; 13) propriedades físicas; 14) oxidação do revestimento. Cada uma das propriedades é função da temperatura. Além disso, algumas propriedades são funções da tensão, tempo de irradiação fluência de neutrons rápidos e encruamento do material.

As propriedades para o aço foram obtidas de diferentes literaturas. Cada correlação que representa uma propriedade é derivada ou de dados experimentais e a interpolação linear desses dados ou de uma correlação semi-empírica empregando uma expressão analítica proposta pela teoria, com constantes determinadas por comparação de dados.

Além das propriedades materiais, modificou-se no FRAP-T4 o subcódigo FRAIL, que é composto de diferentes subrotinas que verificam através de modelos probabilísticos, a possibilidade de falhas (perda de integridade) da vareta combustível.

As diferenças entre as propriedades do zircaloy e do aço refletem-se no comportamento da vareta combustível, tanto em regime permanente, quanto em regime de transiente (e acidentes).

As principais vantagens de se utilizar zircaloy em comparação com aço são a sua mais baixa seção de choque de absorção para neutrons térmicos e sua mais alta temperatura de fusão. Uma menor absorção de neutrons térmicos permite que núcleos com varetas de zircaloy operem com mais baixos custos de enriquecimento do que núcleos com varetas de aço. Uma maior temperatura de fusão permite o revestimento de zircaloy suportar maiores tensões que o de aço durante acidentes extremos nos quais a temperatura do revestimento pode exceder 1200°C. Entretanto, um dos limites impostos e aceito para o revestimento de varetas de reatores PWRs é que sua temperatura não deve exceder 1200°C.

Apesar dos fatores listados acima, existem várias vantagens adicionais em se usar o aço em PWRs. O aço possui uma condutividade térmica maior que o zircaloy e sua expansão térmica é cerca de três vezes maior. Além disso, sua deformação por fluência ("creep") é menor que aquela para o zircaloy. O principal resultado dessas comparações é que as varetas combustíveis de aço podem manter a folga entre pastilha e revestimento ("gap") aberta por um período maior do que as varetas de zircaloy /6/. Os aços oferecem uma maior integridade do que o zircaloy durante acidentes de perda de refrigerante, nos quais, a temperatura do revestimento permanece abaixo de 1200°C. Sob essas condições, o aço exibe uma taxa de reação metal-água mais baixa que o zircaloy e o calor gerado na reação é, também, menor.

Para o mesmo peso de revestimento, o hidrogênio liberado na reação com o aço é 2/3 do liberado com o zircaloy. O potencial de fragilização devido à solubilidade do oxigênio no metal é quase nenhum para o aço e a resistência mecânica e a ductilidade do aço são melhores que as do zircaloy para as temperaturas envolvidas na análise de acidentes. Disso resulta uma menor deformação do revestimento e menor "ballooning" local (e menor bloqueamento do refrigerante). Além disso, o aço é menos susceptível à corrosão sob tensão pelo produto de fissão iodo,

mais é susceptível à corrosão sob tensão externa pelo refrigerante. Em consequência disso, a formação de rachaduras no revestimento, do lado do combustível, é menos provável e mais altas concentrações de produtos de fissão podem ser toleradas em varetas de aço. Porém, a corrosão sob tensão acelerada pelo meio refrigerante é relevante e deve ser levada em consideração quando se verificar perda de integridade da vareta combustível.

A maioria dos fenômenos citados acima são levados em consideração no código FRAP-T4 versão zircaloy e fenômenos semelhantes foram incorporados no código, quando da sua adequação para a versão aço.

O estudo do comportamento da vareta combustível em regimes transientes (e acidentes) com as duas versões permitirá estabelecer conclusões e comparações à respeito da utilização de zircaloy e aço inoxidável como revestimento em reatores de água leve.

3. BIBLIOGRAFIA

- /1/ SIEFKEN, L.J.; BOHN, M.P.; DEARIEN, J.A.: FRAP-T4 - A Computer Code for the Transiente Analysis of Oxide Fuel Rods, Report N° CDAP-TR-78-027, July 1978, Idaho National Engineering Laboratory, EG e G Idaho, Inc.
- /2/ DERIEN, J.A. et al: FRAP-S: A Computer Code for the Steady-State Analysis of Oxide Fuel Rods, Report I-309-13.0, August 1975, Idaho National Engineering Laboratory.
- /3/ BERNA, G.A.; BOHN, M.P.; COLEMANN, D.R.: FRAPCON-1: A Computer Code for the Steady-State Analysis of Oxide Fuel Rods, Report N° CDAP-TR -78-032-R1 November 1978, Idaho National Engineering Laboratory.
- /4/ MACDONALD, P.E. et al: MATPRO-Version 09 - A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior, ANCR-1263, February 1976.
- /5/ ADRIAN ROBERTS, J.T.: Structural Materials in Nuclear Power Systems, New York and London, Plenum Press 1981.
- /6/ TEIXEIRA E SILVA, A.; PERROTA, J.A.: Alguns aspectos da utilização de zircaloy e aço inoxidável austenítico como material de revestimento de varetas combustíveis de reatores PWR, Anais do V ENFIR-ITAIPAVA.