



ANAIS		PROCEEDINGS
	5º SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE TUBULAÇÕES E VASOS DE PRESSÃO 1º SIMPÓSIO LATINOAMERICANO SOBRE TUBERIAS Y RECIPIENTES DE PRESION	
	SALVADOR 25 - 28 DE OUTUBRO 1988	
TRABALHO Nº 10		PP. 147-162

DESEMPENHO SOB IRRADIAÇÃO DE VARETAS COMBUSTÍVEIS COM
REVESTIMENTO DE AÇO INOXIDÁVEL EM PWRs

ANTONIO TEIXEIRA E SILVA e ARMANDO MARGOTTO ESTEVES
Divisão de Engenharia do Núcleo
Departamento de Tecnologia de Reatores
IPEN-CNEN/SP

SUMÁRIO

O desempenho sob irradiação de varetas combustíveis com revestimento de aço inoxidável austenítico é simulado em regime de operação normal de reatores de água leve pressurizada com os códigos de desempenho do combustível das séries FRAP. Estes códigos, originalmente desenvolvidos para a modelagem do comportamento termo-mecânico de varetas combustíveis com revestimento de zircaloy, são modificados para modelar varetas combustíveis com revestimento de aço inoxidável. O comportamento termo-mecânico sob irradiação de varetas combustíveis com revestimento de aço inoxidável tipo 348 e zircaloy é comparado.

SUMMARY

The steady state irradiation performance of austenitic stainless steel clad pressurized water reactor fuel rods is modeled with fuel performance codes of the FRAP series. These codes, originally developed to model the thermal-mechanical behavior of zircaloy clad fuel rods, are modified to model stainless steel clad fuel rods. The irradiation thermal-mechanical behavior of type 348 stainless steel and zircaloy clad fuel rods is compared.

1. Introdução

Aço inoxidável austenítico foi o material escolhido para revestimento do combustível nos primeiros reatores de água leve pressurizada (PWRs). A partir dos anos sessenta, os aços foram substituídos nos reatores comerciais por ligas de zircônio, devido à sua menor seção de choque de absorção para nêutrons térmicos e à sua maior temperatura de fusão. Uma menor absorção de nêutrons térmicos permite que núcleos com combustíveis revestidos de zircaloy operem com menores custos de enriquecimento do que núcleos com combustíveis revestidos de aço. Maior temperatura de fusão permite ao zircaloy manter uma maior integridade (melhor resistência mecânica) do que o aço, durante acidentes extremos nos quais as temperaturas do revestimento podem exceder 1200°C.

Apesar dos fatores acima, existem algumas vantagens em se utilizar aços em PWRs /1/. Durante operação normal e transientes controlados, o aço é mais resistente do que o zircaloy e é, então, menos susceptível a danos devidos à interação mecânica entre a pastilha combustível e o revestimento. O aço é, também, menos susceptível do que o zircaloy à corrosão sob tensão por produtos de fissão gerados no combustível. Em consequência, a formação de trincas na parede interna do revestimento é menos provável e maiores concentrações de produtos de fissão podem ser toleradas em varetas de aço. Durante acidentes de perda de refrigerante, onde as temperaturas do revestimento permanecem abaixo de 1200°C, o aço exibe uma taxa de reação metal-vapor, uma quantidade de hidrogênio liberada e um calor de reação menor do que o zircaloy. O potencial de fragilização por oxigênio é quase nulo para o aço e a sua resistência mecânica e ductilidade são melhores do que as do zircaloy. Disto resulta uma menor deformação do revestimento e menor bloqueio do canal de refrigeração.

Após o acidente de Three Mile Island, implicações de segurança levaram ao estabelecimento de limites de projeto para a temperatura e o nível de oxidação do revestimento. Com a imposição do limite de temperatura do revestimento em 1200°C, a maior temperatura de fusão do zircaloy não constituía uma vantagem adicional sobre o aço e foi repensada a sua utilização em PWRs. No caso, a utilização do aço não levaria em conta aspectos econômicos e, sim, aspectos de segurança.

Os aços inoxidáveis austeníticos utilizados como revestimento nos primeiros reatores eram dos tipos AISI 304, 347 e 348. Com exceção de pequenas falhas isoladas, o seu desempenho em PWRs tinha sido excelente. Apesar disto, somente esforços limitados tinham sido feitos para modelar o comportamento termo-mecânico de varetas combustíveis com revestimento de aço.

Nos últimos anos, investigações detalhadas da interligação dos efeitos térmicos, mecânicos, gás interno e propriedades materiais no comportamento da vareta combustível em PWRs tem sido efetuadas por códigos de desempenho do combustível, que simulam o comportamento tanto das pastilhas combustíveis como do revestimento de zircaloy ao longo de um histórico de potência. De todos os códigos disponíveis, somente FCODE-BETA/SS /2/ possui opção para tratar, em

regime de operação normal. varetas combustíveis com revestimento de aço 304. Devido à natureza proprietária deste código, a Divisão de Engenharia do Núcleo do IPEN-CNEN/SP concluiu que esforços deveriam ser aplicados na modelagem termo-mecânica de varetas combustíveis com revestimento de aço inoxidável e uma ênfase particular foi dada ao tipo 348. Para a modelagem da vareta de aço 348 foram escolhidos os códigos de desempenho do combustível da série FRAP (FRAP-S1 /3/, FRAPCON-1 /4/ e FRAPCON-2 /5/). Como estes códigos estão restritos à análise de varetas de zircaloy, eles tiveram que ser adequados para a análise de varetas de aço.

Este trabalho focaliza alguns aspectos do comportamento sob irradiação em operação normal de varetas de aço inoxidável em PWRs. A seção 2 descreve a construção dos códigos FRAP versões aço (FRAP/SS), por reproduzir os modelos termo-mecânicos contidos nos códigos FRAP versões zircaloy (FRAP/ZR) por modelos válidos para varetas de aço 348. A seção 3 verifica a sensibilidade dos modelos de FRAP/SS por comparar seus resultados de simulação com dados experimentais descritos no FUELS DATA /6/ para varetas de aço instrumentadas. A seção 4 verifica o comportamento termo-mecânico sob irradiação de uma vareta de aço 348 através de simulações com FRAP-SS e compara estes resultados com os obtidos da simulação com FRAP-ZR de uma vareta de zircaloy de mesmas características e dimensões, sujeitas ao mesmo histórico de potência.

2. Construção de FRAP/SS

A construção de FRAP/SS consistiu em reproduzir os modelos termo-mecânicos de FRAP/ZR por modelos válidos para a análise de varetas de aço 348. Os modelos reproduzidos representam propriedades e fenômenos típicos do revestimento da vareta combustível. A tabela 1 lista os modelos substituídos na versão aço. Eles foram selecionados com base na simplicidade de cálculo e na sua validade sob condições operacionais de PWRs.

As distinções entre o desempenho de varetas de aço e zircaloy podem ser verificadas pela comparação das propriedades destes materiais /11/. As mais importantes estão sumarizadas na tabela 2.

O Aço 348 exibe uma condutividade térmica maior e um coeficiente de expansão térmica cerca de três vezes maior do que o zircaloy. Este último fator garante que varetas de aço mantenham uma folga pastilha-revestimento aberta por um tempo muito maior do que varetas de zircaloy.

Deformações por fluência do zircaloy resultam da combinação de fluências térmica e sob irradiação, as quais sob condições normais de operação, são da mesma ordem de grandeza. Para varetas de aço nas mesmas condições, somente fluência sob irradiação é significativa e a taxa de fluência do zircaloy pode ser cerca de quatro vezes maior do que a do aço 348. Esta diferença reflete-se, também, no tempo relativo para fechamento da folga pastilha-revestimento nos dois tipos de vareta.

Em condições operacionais, zircaloy é altamente resistente ao inchamento de vazios, mas exibe um considerável crescimento axial. Ao contrário do zircaloy, aço 348 não apresenta crescimento aniso-

Tabela 1: Modelos do revestimento da vareta combustível modificados em FRAP/ZR para construção de FRAP/SS

MODELO	MODIFICAÇÃO E REFERÊNCIA
Expansão térmica	Novo modelo /7/
Condutividade térmica	Novo modelo /7/
Módulo de elasticidade	Novo modelo /7/
Razão de Poisson	Novo Modelo /7/
Fluência térmica	Deletado
Fluência sob irradiação	Novo modelo /3/
Crescimento axial	Deletado
Inchamento	Novo modelo /8/
Oxidação	Deletado
Condutância da folga pastilha-revestimento	Novo fator de emissividade /9/ e correlação de dureza Meyer /10/

Tabela 2: Comparação das propriedades do aço inox 348 /7/, /12/ e zircaloy /13/, /14/.

PROPRIEDADES	ZIRCALOY	AÇO INOX 348
Ponto de fusão (K)	2098	1673
Seção de choque de absorção (b)	Zr-0.19 (térmico) Zr-15.1 (rápido)	2.8 (térmico) 6.8 (rápido)
Condutividade térmica (w/m K)	16.8 (630 K)	19.1 (630 K)
Coefficiente de expansão térmica ($10^{-5}/K$)	6.7 (300 a 1000K)	18.5 (300 a 900K)
Módulo de elasticidade (10^9 N/m ²)	77 (630 K)	172 (630 K)
Fluência sob irradiação (%)	0.3 (100MPa, T=640K, $\phi t = 3 \times 10^{21}$ n/cm ²)	0.8 (80MPa, T=630K, $\phi t = 1 \times 10^{23}$ n/cm ²) 0.045 (extrapolado) para $\phi t = 3 \times 10^{21}$ n/cm ² 0.024-0.9 (33000 MWD/TU médio)
Fluência em testes fora do reator (%)	0.8 (1000h, 150MPa, 644 K) 0.6 (1000h, 140MPa, 644 K)	1.0 (10000h, 220MPa, 816 K)

trópico, mas é susceptível ao inchamento de vazios.

O aço 348 possui um módulo de elasticidade maior do que o zircaloy e, durante a interação pastilha-revestimento, as deformações atingidas no revestimento de aço serão significativamente menores, quando comparadas àquelas do revestimento de zircaloy.

Uma discussão completa de cada modelo selecionado para FRAP/SS é apresentada nas referências da tabela 1.

3. Validação de FRAP/SS

Uma vez construído FRAP/SS, o próximo passo é verificar a sensibilidade de seus modelos por comparar seus resultados de simulação com dados experimentais obtidos para varetas de aço conhecidas. Em se tratando de códigos originais, um grande número de comparações seriam necessárias. Modelos para o combustível, folga e revestimento deveriam ser sujeitos à verificação. Esse não é o caso de FRAP/SS, porque todos os modelos para o combustível e para a folga pastilha-revestimento tinham sido exaustivamente verificados para FRAP/ZR /15/, /16/, /17/, /18/. Desde que os mesmos modelos são utilizados em FRAP/SS, nenhuma comparação é necessária. Além disso, os únicos dados experimentais encontrados na literatura para comparação dos resultados de FRAP/SS foram os dados da temperatura central do combustível para três varetas de aço instrumentadas denominadas WCAP-2923 no FUELS DATA. Como estes dados não são tão completos como aqueles que foram utilizados para verificar FRAP-ZR, alterações nos modelos do combustível e da folga não são justificadas. A figura 1 apresenta os resultados experimentais e simulados com FRAP-SS para a temperatura central do combustível em função da potência linear para uma das varetas WCAP-2923. Como mostrado nesta figura, de acordo com o código escolhido da série FRAP/SS, os resultados simulados subestimam ou superestimam os dados experimentais. Resultados similares foram obtidos para as outras duas varetas instrumentadas.

A comparação acima não é suficiente para demonstrar a capacidade de simulação de FRAP/SS e mais dados seriam necessários para comparação. Entretanto, as diferenças entre valores medidos e calculados não são devidas as modificações introduzidas nos modelos do revestimento (tabela 1). Estas modificações não geram incertezas nos resultados. As incertezas estão associadas aos modelos utilizados em FRAP/ZR para simular os diversos fenômenos que ocorrem na vareta com combustível durante irradiação. Modelos tais como os da liberação de gases de fissão, dos fenômenos no combustível e da condutância da folga entre pastilha e revestimento levam a maiores incertezas nos resultados dos diferentes códigos.

4. Comparação do Desempenho sob Irradiação de Varetas de Aço Inoxidável e Zircaloy

O desempenho sob irradiação de varetas de aço 348 em regime de operação normal foi simulado com FRAP/SS. Paralelamente, estes resultados foram comparados com resultados obtidos para varetas de zircaloy, simuladas com FRAP/ZR sob o mesmo histórico de potência. O objetivo da comparação foi verificar se as diferenças no desempenho

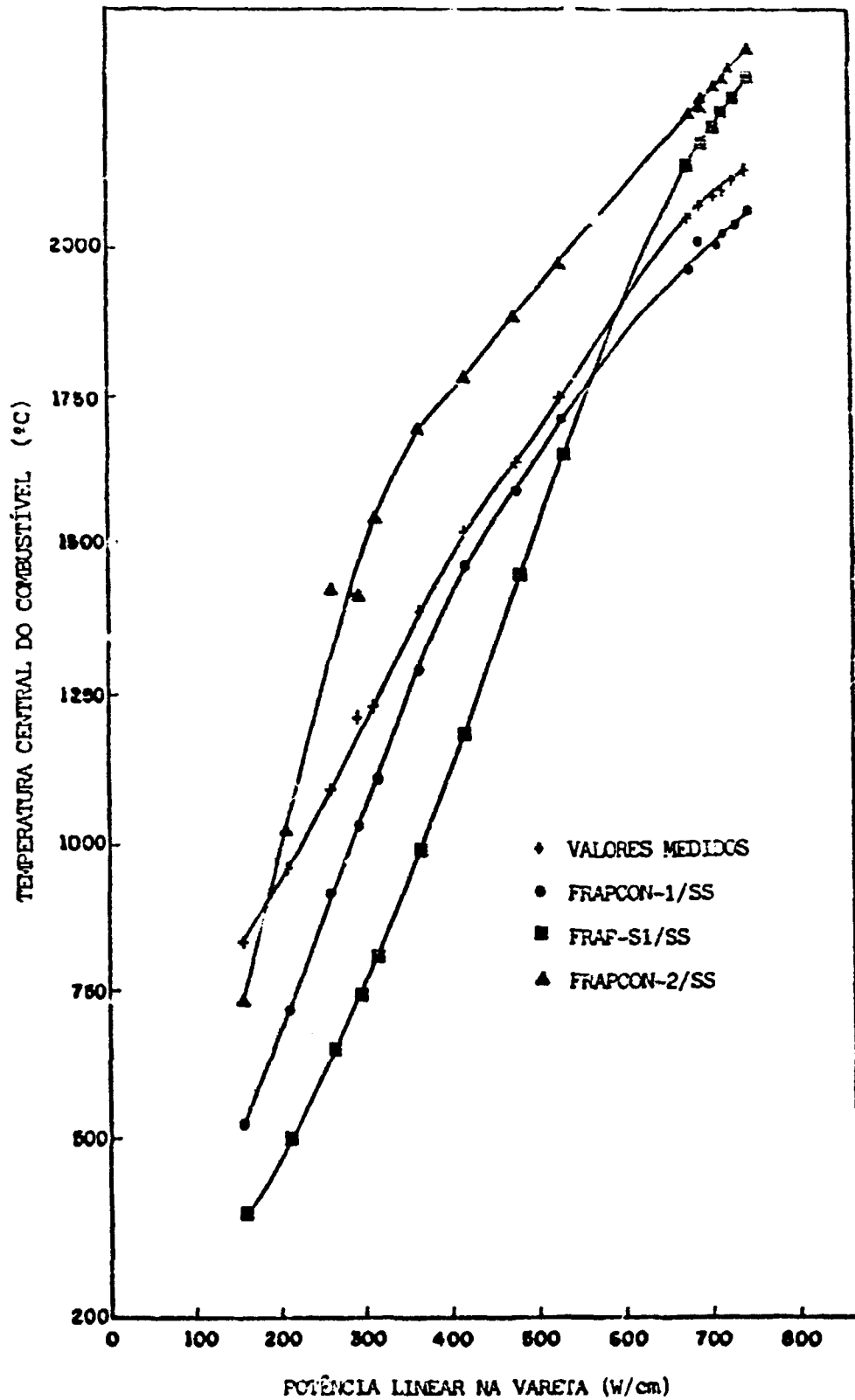


Figura 1: Temperatura central do combustível em função da potência linear na vareta. Valores calculados com FRAP/SS e medidos para a vareta WCAP-2923.

destas varetas eram consistentes com as conhecidas diferenças nas propriedades materiais dos dois tipos de revestimento.

A vareta combustível selecionada para apresentação neste trabalho foi a da Central Angra-1. Ela foi escolhida porque os códigos da série FRAP/ZR podem prever com certa precisão /18/ os resultados de seu desempenho, apresentados no FSAR Angra 1 /19/. O mesmo projeto de vareta foi simulado com FRAP/SS. Uma vareta de aço inoxidável e uma vareta de zircaloy foram usadas na análise e designadas, respectivamente, de SS e ZR.

A tabela 3 apresenta as especificações de projeto da vareta de Angra-1. O histórico de potência analisado foi tomado dos ciclos 1, 2 e 3 de Angra-1. Uma distribuição axial cossenoidal de potência foi usada na simulação. A potência linear e a queima máximas e médias são apresentadas na figura 2. A temperatura média no revestimento, a espessura diametral da folga pastilha-revestimento, a temperatura central no combustível, a pressão de contato pastilha-revestimento, a tensão de membrana primária efetiva no revestimento, a deformação total do revestimento, o diâmetro do combustível e a pressão do gás na folga são comparadas nas tabelas 4 e 5 no ponto de máxima potência axial para os dois tipos de vareta. O diâmetro interno do revestimento, o diâmetro do combustível, a temperatura central do combustível e a pressão interna do gás são representadas graficamente em função do tempo para as varetas de aço e zircaloy nas figuras 3, 4 e 5.

Divergências no comportamento das varetas ZR e SS no início da irradiação resultam dos diferentes coeficientes de expansão térmica dos dois materiais. Como apresentado na tabela 2, o aço 348 exibe um coeficiente de expansão térmica maior do que o zircaloy. O principal resultado desta comparação é que a vareta SS mantém uma folga pastilha-revestimento maior do que a vareta ZR (figura 3). Desde que a composição do gás na folga é idêntica nas duas varetas, a pressão interna, a condutância da folga e a temperatura do combustível são governadas principalmente pela espessura da folga. As temperaturas no centro do combustível são maiores e a pressão interna do gás são menores na vareta SS (figura 4 e 5). Apesar das maiores temperaturas no combustível, as temperaturas médias no revestimento de aço são menores do que no revestimento de zircaloy (tabela 4 e 5), porque a condutividade térmica do aço é maior do que a do zircaloy.

A fluência do zircaloy sob irradiação é acentuada. Em termos de desempenho, isso leva a uma grande deformação do revestimento, possibilitando o fechamento da folga em 12 000 hs na vareta ZR (figura 3). Como o aço apresenta uma fluência menor do que o zircaloy, folgas mais largas são mantidas por um tempo maior e maiores temperaturas e menor pressão interna persistem na vareta SS. A altas queimas, a espessura da folga é controlada principalmente pelo inchamento do combustível devido a produtos de fissão na vareta SS. O inchamento leva à interação pastilha-revestimento em 20000 hs.

O estado de tensão compressiva inicial nos dois revestimentos (tabela 4 e 5) é devido à pressão externa do refrigerante. As tensões de membrana primária efetivas na vareta SS são maiores, porque a pressão interna nesta vareta é menor do que na vareta ZR. Nesta úl-

Tabela 3: Especificação de projeto da vareta combustível de Angra-1.

Diâmetro da pastilha UO_2 (mm)	8.192
Diâmetro interno do revestimento (mm)	8.357
Diâmetro externo do revestimento (mm)	9.500
Densidade do combustível (% da densidade teórica)	95.0
Enriquecimento (% em peso U-235)	2.6
Comprimento da coluna de pastilha (mm)	3657.6
Pressão interna do gás (MPa)	3.103(He)
Pressão do refrigerante (MPa)	15.494
Temperatura de entrada do refrigerante (°C)	287.5

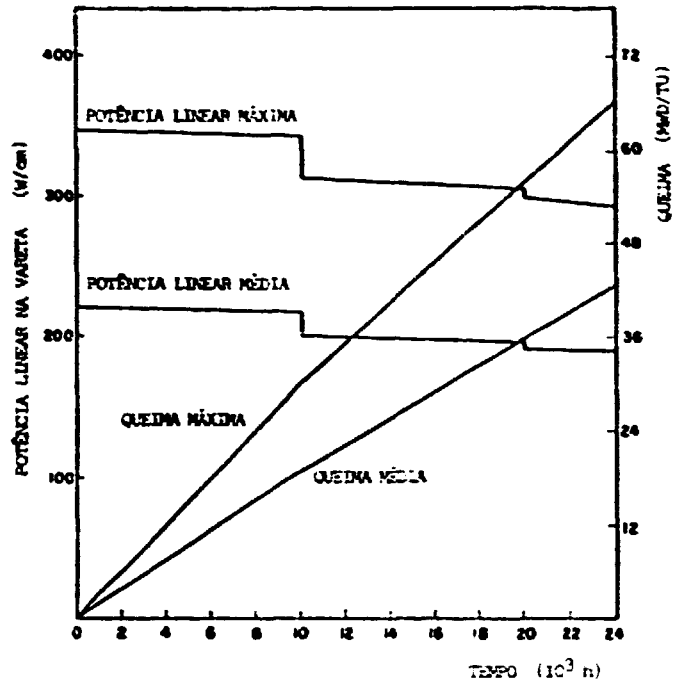


Figura 2: Potência linear e queima máximas e médias na vareta combustível em função do tempo.

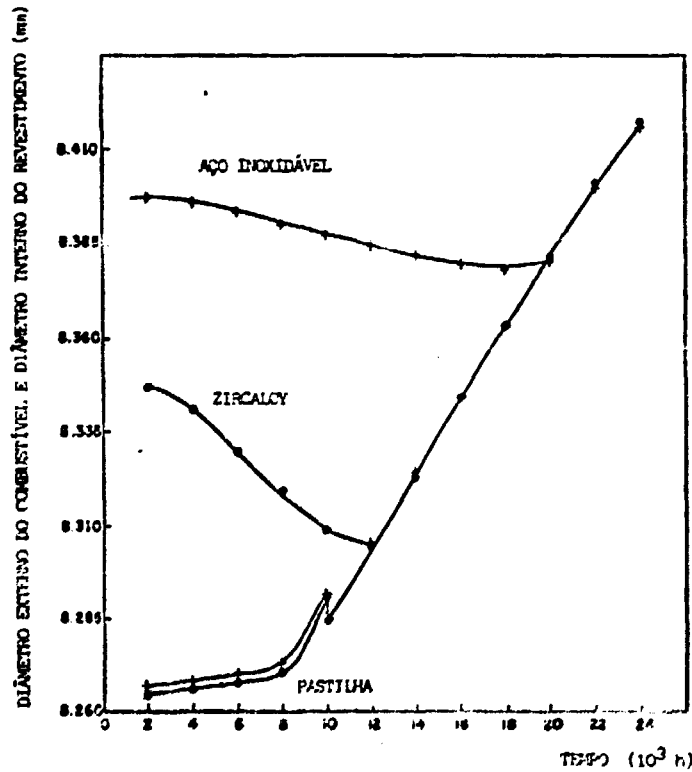


Figura 3: Diâmetro do combustível e diâmetro interno do revestimento para as varetas de aço inox e zircaloy em função do tempo no ponto de máxima potência.

Tabela 4: Resultados da simulação com FRAP/ZR para a vareta de zircaloy.

TEMPO (HORAS)	QUEIMA (MAD/TU)	POTÊNCIA (W/cm)	TEMP. MED. REV. (C)	FOLGA (μm)	TEMP. COND. COND. (C)	COND. (MPa)	TENSÃO REV. EF. (MPa)	DEFORM. (PCT)	DIAM. EXT. COND. (mm)	PRESSÃO INT. (MPa)
1	0.	0.	340.	0.0154	294.	-	-32.12	-0.108	0.8208	6.06
2	2000.	9894.	340.1	0.0082	1237.	-	-49.70	-0.343	0.8256	8.95
3	4000.	11982.	340.1	0.0074	1200.	-	-47.99	-0.410	0.8287	9.24
4	6000.	17931.	338.6	0.0062	1171.	-	-44.95	-0.542	0.8299	9.64
5	8000.	23880.	336.9	0.0049	1148.	-	-41.60	-0.659	0.8271	10.07
6	10000.	29783.	335.3	0.0038	1132.	-	-37.41	-0.768	0.8251	10.52
7	10000.01	29783.	335.1	-	1035.	-	-39.32	-0.790	0.8286	10.38
8	12000.	35189.	337.1	-	1029.	4.35	-1.57	-0.825	0.8208	10.53
9	14000.	40560.	335.1	-	1016.	14.70	80.34	-0.807	0.8325	11.29
10	16000.	45915.	334.1	-	1002.	24.21	87.41	-0.370	0.8346	11.62
11	18000.	51268.	334.1	-	1003.	33.39	98.12	-0.132	0.8356	11.98
12	20000.	56467.	295.3	-	972.	43.92	96.58	0.073	0.8382	12.20
13	22000.	61666.	295.3	-	971.	53.90	98.53	0.306	0.8422	12.47
14	24000.	66738.	288.1	-	950.	63.48	98.94	0.510	0.8419	12.88

Tabela 5: Resultados da simulação com FRAP/SS para a vareta de aço inox 348.

TEMPO (HORAS)	QUEIMA (MAD/TU)	POTÊNCIA (W/cm)	TEMP. MED. REV. (C)	FOLGA (μm)	TEMP. COND. COND. (C)	COND. (MPa)	TENSÃO REV. EF. (MPa)	DEFORM. (PCT)	DIAM. EXT. COND. (mm)	PRESSÃO INT. (MPa)
1	0.	0.	388.	0.0162	294.	-	-76.86	-0.057	0.8208	5.49
2	2000.	9894.	363.	0.0128	1748.	-	-58.96	-0.112	0.8267	7.79
3	4000.	11982.	364.	0.0128	1217.	-	-57.68	-0.129	0.8298	7.98
4	6000.	17948.	364.	0.0124	1183.	-	-55.88	-0.163	0.8278	8.22
5	8000.	23880.	364.	0.0113	1171.	-	-53.85	-0.196	0.8279	8.49
6	10000.	29782.	364.	0.0096	1151.	-	-51.27	-0.228	0.8292	8.82
7	10000.01	29783.	364.	0.0101	1050.	-	-51.71	-0.229	0.8286	9.63
8	12000.	35188.	368.	0.0080	1040.	-	-49.41	-0.254	0.8326	9.82
9	14000.	40560.	368.	0.0068	1020.	-	-48.18	-0.279	0.8328	9.27
10	16000.	45915.	369.	0.0057	1008.	-	-46.71	-0.300	0.8346	9.54
11	18000.	51268.	369.	0.0045	1001.	-	-43.07	-0.326	0.8368	9.89
12	20000.	56467.	357.	-	968.	7.19	14.08	-0.308	0.8386	10.15
13	22000.	61666.	358.	-	964.	29.75	189.05	-0.096	0.8409	10.45
14	24000.	66738.	357.	-	943.	21.24	201.83	0.107	0.8417	10.84

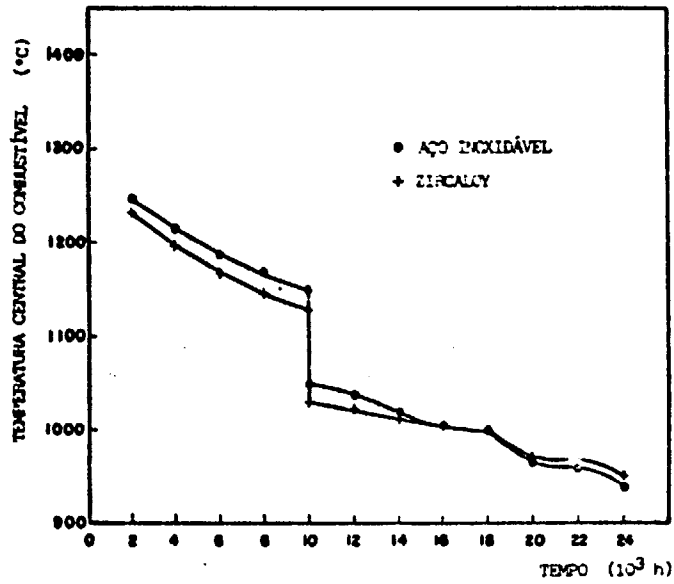


Figura 4: Temperatura central no combustível em função do tempo no ponto de máxima potência na vareta.

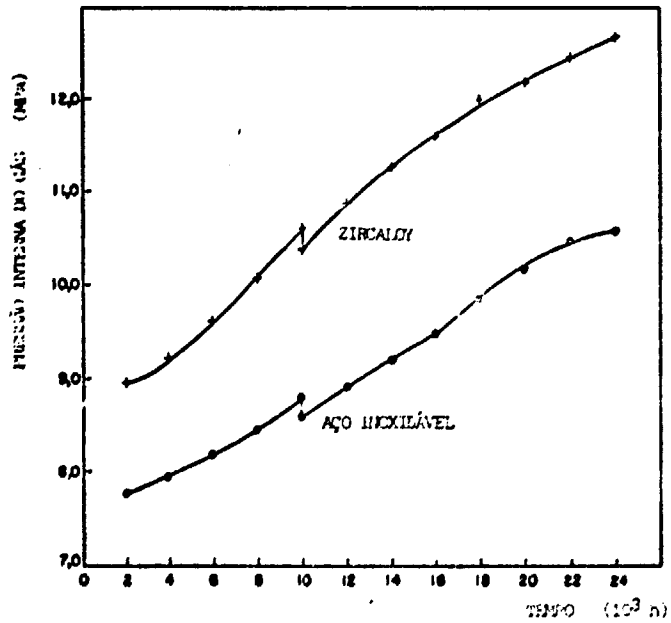


Figura 5: Pressão interna do gás na vareta em função do tempo.

tima, o contato pastilha-revestimento coloca o revestimento em tração em 14000 hs, permanecendo até o final da irradiação. O revestimento de aço entra em contato com a pastilha em 20000 hs e permanece em tração somente as últimas 4000hs de irradiação. Nos últimos anos, as falhas que ocorreram em varetas combustíveis de PWRs comerciais foram devidas, principalmente, à interação pastilha-revestimento. Esta interação provoca deformações e tensões no revestimento que não alcançam, na maioria das vezes, condições mecânicas de ruptura, mas são suficientes para provocar trincas por corrosão sob tensão /3/. Quando do contato pastilha-revestimento, como a rigidez do zircaloy é bem menor do que a da pastilha de UO_2 , esta última tende a impor a sua deformação sobre o revestimento. No entanto, devida à alta fluência do zircaloy, o revestimento tende a relaxar tensões, transformando deformações elásticas em deformações permanentes. Em consequência, o zircaloy pode sofrer grandes deformações sem atingir tensões elevadas, mas as taxas de deformações devem estar abaixo de certos limites para que as tensões não atinjam a tensão para corrosão sob tensão /20/. Para o aço, a sua rigidez é da mesma ordem da pastilha de UO_2 . Isto implica numa concorrência de deformações entre a pastilha e o revestimento quando da interação. Nesse caso, é importante analisar as características plásticas da pastilha, pois a reação do revestimento sobre ela é significativa /21/. Conclui-se deste fato que são obtidas deformações no revestimento de aço abaixo das observadas com revestimento de zircaloy, mas as tensões alcançadas serão da mesma ordem ou maiores no revestimento de aço (tabelas 2 e 3). Como a interação pastilha-revestimento ocorre num tempo de irradiação posterior para a vareta de aço, os gradientes de deformação da pastilha sobre o revestimento são menores.

As temperaturas no combustível são praticamente iguais nas duas varetas (figura 4). Isto indica que para uma condição de análise de acidentes não se tem muita variação na energia armazenada na pastilha entre os dois tipos de vareta.

As tensões no revestimento fornecidas por FRAP/SS e FRAP/ZR são as de membrana primária efetivas, devido somente aos carregamentos de pressão e calculadas para as dimensões nominais do revestimento. As tensões devido aos outros carregamentos na vareta não são consideradas nos códigos. Estes carregamentos incluem:

- a) a força de pré-compressão da mola de fixação das pastilhas combustíveis;
- b) os gradientes radiais e axiais de temperatura no revestimento;
- c) a força axial de fixação da vareta na grade espaçadora do elemento combustível;
- d) as forças induzidas pelo fluido refrigerante.

A mola na vareta combustível sustenta a coluna de pastilhas durante manuseio e transporte da vareta e fornece um espaço vazio ("plenum") para acomodar os gases de fissão liberados. No caso da vareta ZR, ao se elevar a potência no reator, a expansão axial da coluna de pastilhas é maior do que a expansão axial do revestimento. Isto acarreta numa diminuição do comprimento do "plenum" e, consequentemente, no aumento da força da mola. No caso da vareta SS, como

a expansão axial do revestimento é maior do que a das pastilhas, o "plenum" aumenta e a força da mola diminui. Quando a coluna de pastilhas densifica sob irradiação no reator, a força da mola diminui nas duas varetas. Com a irradiação prolongada, devido ao inchamento do combustível, a coluna de pastilhas aumenta, o comprimento do "plenum" diminui e a força da mola aumenta novamente. Como as temperaturas nas varetas SS e ZR são praticamente iguais, a força da mola na vareta de aço será menor durante a irradiação, devido à maior expansão térmica do aço, acarretando uma menor tensão axial no revestimento.

As tensões de flexão geradas pela ovalização do tubo de revestimento, devido a tolerâncias que ocorrem nos seus diâmetros, dependem da diferença de pressão externa e interna na vareta /22/. Varetas de aço sofrem maiores tensões com a ovalização do tubo, devido à menor pressão interna durante a irradiação.

As tensões devido a gradientes térmicos radiais e azimutais /23/ dependem de propriedades do revestimento, tais como: módulo de elasticidade, coeficiente de expansão térmica, condutividade térmica e coeficiente de Poisson. A condutividade térmica do aço é maior do que a do zircaloy, fornecendo menores quedas de temperatura no revestimento da vareta SS. Entretanto, as tensões geradas devido aos gradientes de temperatura são proporcionais ao módulo de elasticidade e ao coeficiente de expansão térmica do material, os quais para o aço 348 são muito maiores do que na vareta ZR.

As varetas combustíveis são fixadas no elemento combustível pelo sistema mola-batente das grades espaçadoras. Os tubos guias de varetas de controle são fixados através de luvas soldadas a estas grades. Como as varetas combustíveis estão a temperaturas maiores do que os tubos guias, elas irão deslizar nas grades, gerando forças axiais no revestimento devido ao atrito. O valor destas forças irá depender do material da grade e do revestimento.

A vareta combustível pode vibrar no reator devido ao escoamento do refrigerante /24/. Desvios no escoamento puramente axial, uniforme e constante, tais como, fluxo cruzado, turbulências e bolhas de vapor exercem forças radiais na vareta. Isto resulta na flexão da vareta nas regiões entre as grades espaçadoras. Para varetas de aço e zircaloy de mesma geometria, as tensões de flexão geradas no tubo são praticamente iguais.

Na faixa de solda tampão da vareta-tubo de revestimento, as deformações no revestimento são impedidas pelo tampão, que para efeito de análise é concebido como um corpo rígido. Consequentemente, a parede do tubo é flexionada. Para varetas de aço e zircaloy, essas tensões dependem do gradiente de pressão no tubo, e maiores tensões serão obtidas na vareta SS.

Com exceção dos carregamentos de temperatura, os carregamentos descritos acima fornecem valores baixos de tensão nas varetas SS e ZR quando comparadas as obtidas devido ao gradiente de pressão, calculadas com FRAP-SS e FRAP-ZR. As tensões devido aos gradientes de temperatura podem ser no revestimento da vareta de aço da mesma ordem de magnitude das tensões devido aos gradientes de pressão. O projeto da vareta de aço deve levar em conta esses aspectos e verifi-

car se a combinação das tensões acima não ultrapassam os limites de tensão estipulados para varetas combustíveis /25/.

5. Conclusões

Os resultados comparativos do comportamento sob irradiação de varetas combustíveis com revestimentos de aço inoxidável e zircaloy, obtidos da simulação com códigos de desempenho do combustível em regime de operação normal de PWRs, refletem as diferenças entre as propriedades dos dois materiais e mostram que varetas de aço possuem uma característica geométrica mais estável do que varetas de zircaloy. Varetas de aço exibem maiores temperaturas no combustível, maiores folgas entre a pastilha e o revestimento, menores pressões internas, maiores tensões e menores deformações no revestimento. O revestimento de aço interage com a pastilha apenas uma pequena fração de sua vida e, neste caso, a sua probabilidade de falha deve ser menor quando comparada com aquela dos revestimentos de zircaloy, em varetas de mesma geometria. Durante a interação, as tensões no revestimento de aço são maiores e as deformações menores do que no revestimento de zircaloy. Este último, devido à sua alta fluência, tende a relaxar tensões.

REFERÊNCIAS

- /1/ S.M. Stoller Corporation, An Evaluation of Stainless Steel Cladding for Use in Current Design LWRs, EPRI NP-2642, Electric Power Research Institute, 1982.
- /2/ SMITH, R.V.; WAS, G.S., FCODE-BETA/SS: A Fuel Performance Code for Stainless Steel Clad Pressurized Water Reactor Fuel, Nuclear Technology, Vol. 69, 198-209, May 1985.
- /3/ DEARIEN, J.A. et al, FRAP-S: A Computer Code for the Steady-State Analysis of Oxide Fuel Rods, Report I-309-13-1, Idaho National Engineering Laboratory, August 1975.
- /4/ BERNA, G.A.; BOHN, M.P., COLEMAN, D.R., FRAPCON-1: A Computer Code for the Steady State Analysis of Oxide Fuel Rods, Report CDAP-TR-78-032-R1, Idaho National Engineering Laboratory, November 1978.
- /5/ BERNA, G.S. et al, FRAPCON-2: A Computer Code for the Calculation of Steady State Thermal-Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods, NUREG/CR - 1845, January 1981.
- /6/ LAATS, E.T., HAMPTON, N.J., CHAMBERS, R. - Fuel Code Assesment Data Sample Report, EGG-CAAP-5114, February, 1980.
- /7/ PECKNER, D., BERNSTEIN, I.M., Handbook of Stainless Steels, McGraw-Hill Book Company, 1977.
- /8/ BEESTON, J.M., Mechanical and Physical Properties of Irradiated Type 348 Stainless Steel, Effects of Radiation on Materials: Tenth Conference, ASTM STP 725 pp. 303-325, 1981.
- /9/ SULLY, A.H. et al., Some Measurements of the Total Emissivity of Metals and Pure Refractory Oxides and Variation of Emissivity with Temperature, Brit. J. Appl.3, 97-101, 1952.
- /10/ BEYER, C.E., et al., GAPCON-Thermal-2: A Computer Program for Calculating the Thermal Behavior of an Oxide Fuel Rod, BNWL-1898 NRC 1 and 3, Battelle Pacific Northwest Laboratories,

November, 1975.

- /11/ YOSHIMOTO, A., Efeitos de Elementos de Liga, Impurezas e Fatores Microestruturais em Aços Inoxidáveis Austeníticos, Utilizados em Varetas Combustíveis de Reatores Nucleares, Anais do II Congresso Geral de Energia Nuclear, vol.1, 335-344, Rio de Janeiro, Abril 1988.
- /12/ PASUPATHI, V., Investigations of Stainless Steel Clad Fuel Rod Failures and Fuel Performance in the Connecticut Yankee Reactor, EPRI 2119, 1981.
- /13/ HAGRMAN, O.L., REYMANN, G.A., MATPRO-version 11: A Handbook of Material Properties for Use in the Analysis Water Reactor Fuel Rod Behavior, NUREG/CR-04 97, TREE-1280 R3, EGG Idaho, Inc., February, 1979.
- /14/ BUSBY, C.C., Halogen Stress Corrosion Cracking of Zircaloy 4 Tubing, Journ. Nucl. Mat., 55 pp 64-82, 1975.
- /15/ COLEMAN, D.R., FRAP-S1: A Computer Code for Steady State Analysis of Oxide Fuel Rods, Volume 3, Model Verification Report, Idaho National Engineering Laboratory, RAM-238-75 Outubro, 1975.
- /16/ LAATS, E.T. et al, Independent Assessment of the Steady State Fuel-Rod Analysis Code FRAPCON-1, CAAP-TR-050, May, 1979.
- /17/ COLEMAN, D.R., Evaluation of Power Reactor Fuel Rod Analysis Capabilities, NUREG/CR - 3416, Volume 2 R3, September, 1983.
- /18/ CHAPOT, J.L.C., SACCO, E., Estabelecimento de uma Metodologia de Cálculo do Comportamento de Barras Combustíveis, Anais do III ENFIR, INIS-BR-95, Itaipava, Dezembro 1982.
- /19/ Final Safety Analysis Report Angra 1 Nuclear Power Plant, Westinghouse Nuclear Energy System, Furnas Centrais Elétricas S.A., Rio de Janeiro, 1976.
- /20/ ANDRADE, G.G., PERROTTA, J.A., Comportamento da Barra Combustível de um Reator Tipo PWR em Seguimento de Carga, Anais do III ENFIR, INIS-BR-95, Itaipava, Dezembro, 1982.
- /21/ BASOMBRIIO, F.G., Simulation of the Thermomechanical Effects, Originated on a Fuel Pin, with a Cracked Pellet by Different Power Ramp Velocities, Using a Two Dimensional Finit Element Model, Nuclear Eng. Design 74(1982) 247-252.
- /22/ TIMOSHENKO, S.P., GERE, J.M., Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill International Book Company, 2nd edition, 1961.
- /23/ GOODIER, J.N., Thermal Stress and Deformation, Design Data and Methods, Journal of Applied Mechanics 24, 1957.
- /24/ PAIDOUSSIS, M.P., An Experimental Study of Vibration of Flexible Cylinders Induced by Nominally Axial Flow, Nuclear Science and Engineering 35, 127-138, 1969.
- /25/ SILVA, A.T., ESTEVES, A.M., Metodologia de Projeto de Varetas Combustíveis de Reatores de Água Leve Pressurizada, Anais do II Congresso Geral de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, Abril, 1988.