

ALGUNS ASPECTOS DA UTILIZAÇÃO DE ZIRCALOY E AÇO INOXIDÁVEL
AUSTENÍTICO COMO MATERIAL DE REVESTIMENTO DE VARETAS COM-
BUSTÍVEIS DE REATORES PWR

Antonio Teixeira e Silva

José Augusto Perrotta

Departamento de Tecnologia de Reatores - RT
Div. de Mecânica, Estruturas e Análise de Confiabilidade-RTM
IPEN-CNEN/SP

SUMÁRIO:

O comportamento sob irradiação de varetas combustíveis de reatores de água leve foi simulado com códigos de desempenho do combustível. Dois tipos de revestimento foram analisados: zircaloy e aço inoxidável austenítico. Para essa análise, os códigos de desempenho do combustível, originalmente com revestimento de zircaloy, foram adequados para aço inoxidável austenítico.

Os resultados da simulação para os dois tipos de revestimento são apresentados, comparados e discutidos.

1. Introdução

Aço inoxidável austenítico foi o material escolhido para encamisamento 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 inoxidáveis foram substituídos nos reatores comerciais por ligas de zircônio, devido à sua menor absorção de neutrons. Após o acidente no reator de "Three Mile Island", a questão aço inoxidável versus zircaloy foi reaberta⁽¹⁾ e, desde então, diferentes estudos tem sido conduzidos enfocando os aspectos da utilização de zircaloy e aço inoxidável austenítico como material de revestimento do combustível em reatores.

Investigações detalhadas dos fenômenos físicos e químicos que ocorrem no interior 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 de desempenho do combustível, implantados no IPEN-CNEN/SP, analisam o comportamento de varetas combustíveis com revestimento de zircaloy.

Com o objetivo de verificar alguns aspectos da utilização de zircaloy e aço inoxidável como material de revestimento de varetas combustíveis de reatores PWR, dois estudos foram conduzidos. O primeiro consistiu em adequar os códigos originalmente com opção para revestimento de zircaloy para revestimento de aço inoxidável austenítico do tipo AISI-348. Na adequação foram modificadas as subrotinas que tratam das propriedades materiais do revestimento. Dois códigos de desempenho do combustível foram adequados para aço inoxidável: FRAPCON-1⁽²⁾ e MARS⁽³⁾. Aliado à isso, foram comparadas as propriedades materiais dos aços AISI 304 e 316, contidas respectivamente, nos códigos GAPCON-THERMAL-2⁽⁴⁾ e FRAP-S1⁽⁵⁾ com as propriedades do aço AISI 348. Com o código FRAPCON-1 (opção aço) foi desenvolvida uma simulação para uma barra combustível irradiada com resultados (dados) experimentais conhecidos obtidos do código FUELS DATA⁽⁶⁾. O segundo estudo consistiu em comparar, em termos de desempenho, o comportamento de uma vareta combustível em condições estacionárias de operação, utilizando zircaloy e aço inoxidável como material de revestimento. Com os resultados obtidos pode-se verificar as variações nos diversos parâmetros da vareta ao longo da queima.

2. Adequação dos Códigos de Comportamento do Combustível

Na adequação dos códigos de comportamento do combustível foram modificadas as subrotinas que tratam das propriedades materiais do revestimento.

No código FRAPCON-1, essas propriedades para o zircaloy são reunidas no MATPRO-9⁽⁷⁾. O MATPRO é o maior subcódigo do FRAPCON-1 e cada uma de suas subrotinas define uma única propriedade do material.

Nove propriedades no MATPRO para o zircaloy foram modificadas para aço inoxidável 348: capacidade de calor específico, expansão térmica axial e diametral, emissividade, dureza Meyer, razão de Poisson, fluência, crescimento axial devido à irradiação, módulo de elasticidade e relação tensão-deformação na região plástica. As propriedades em função da temperatura foram obtidas de diferentes literaturas para o aço inoxidável. Algumas delas são ainda funções do fluxo, do tempo de irradiação e da tensão no revestimento.

A adequação do MARS consistiu em estender as propriedades acima à este código.

Para os códigos GAPCON-THERMAL-2 e FRAP-S1 não foi efetuada nenhuma mudança nas propriedades. Esses códigos possuem opção, respectivamente, para aço inoxidável 304 e 316. Suas propriedades foram apenas comparadas com aquelas do aço inoxidável 348.

Cinco propriedades são utilizadas para o revestimento nos dois códigos acima: módulo de elasticidade, razão de Poisson, coeficiente de expansão térmica linear, condutividade térmica e dureza Meyer.

Com exceção do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson, não se notam diferenças significativas entre as propriedades dos aços 304, 316 e 348. Os valores do módulo de elasticidade são praticamente iguais para os aços 304 e 348. Os do aço 316 são menores e afastam-se significativamente dos outros aços com o aumento da temperatura, indicando uma menor rigidez desse material. Esse material apresenta também um maior coeficiente de Poisson. Entretanto, dentro da faixa de temperaturas atingida no revestimento em condições estacionárias de operação, as diferenças nessas propriedades não são significativas para os diferentes tipos de aço e essas e todas as outras propriedades originais foram conservadas nos códigos GAPCON-THERMAL-2 e FRAP-S1. Todos os códigos implantados podem ser utilizados indistintamente para os três tipos de aço.

Diferentes estudos foram conduzidos com os códigos adequados para verificação de seus modelos. Um desses estudos foi a compa-

-ração dos resultados simulados com o FRAPCON-1 para a vareta combustível WCAP-2923 do código FUELS DATA. Esse código é um banco de dados experimentais de combustível e foi desenvolvido para ser utilizado no programa de verificação de modelos dos códigos da série FRAP (Fuel Rod Analysis Program): FRAPCON e FRAP-S.

O código FRAPCON-1 contém dois modelos para o cálculo da condutância da folga entre combustível e revestimento: O modelo "cracked pellet geometry"⁽⁷⁾ é uma adaptação do modelo de Ross e Stoute⁽⁸⁾. Os dois modelos foram testados para a vareta acima.

A figura 1 apresenta os valores experimentais e simulados para a temperatura central do combustível em função da potência linear para a vareta WCAP-2923. Esses valores mostram que o FRAPCON-1 está subestimando a temperatura central do combustível embora, para potências mais altas, os valores simulados e os dados experimentais se aproximam.

As discrepâncias entre os resultados experimentais e simulados não advêm da adequação das propriedades do revestimento. Essas modificações não geram incertezas nos resultados. As incertezas estão associadas aos modelos usados nos códigos para a simulação dos diversos fenômenos que ocorrem na vareta combustível durante a irradiação. Modelos de fenômenos tais como os da liberação de gases de fissão e da condutância da folga entre pastilha e revestimento levam a maiores incertezas nos resultados dos diferentes códigos.

3. Comparação de Desempenho Entre Varetas de Zircaloy e Aço Inoxidável Austenítico

A substituição de revestimento de aço inoxidável por zircaloy nas varetas cilíndricas com pastilhas combustíveis de UO_2 sintetizadas foi adotada pela vantagem econômica que trouxe ao ciclo do combustível, uma vez que a experiência acumulada com varetas combustíveis de revestimento de aço, em PWR, era muito boa⁽⁹⁾.

Nos últimos anos, as falhas que ocorreram em varetas combustíveis de reatores PWR 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 fraturas por corrosão sob tensão. Em consequência destas características, as rampas de potência em reatores comerciais são limitadas a valores baixos para evitar falhas nas varetas combustíveis⁽¹⁰⁾.

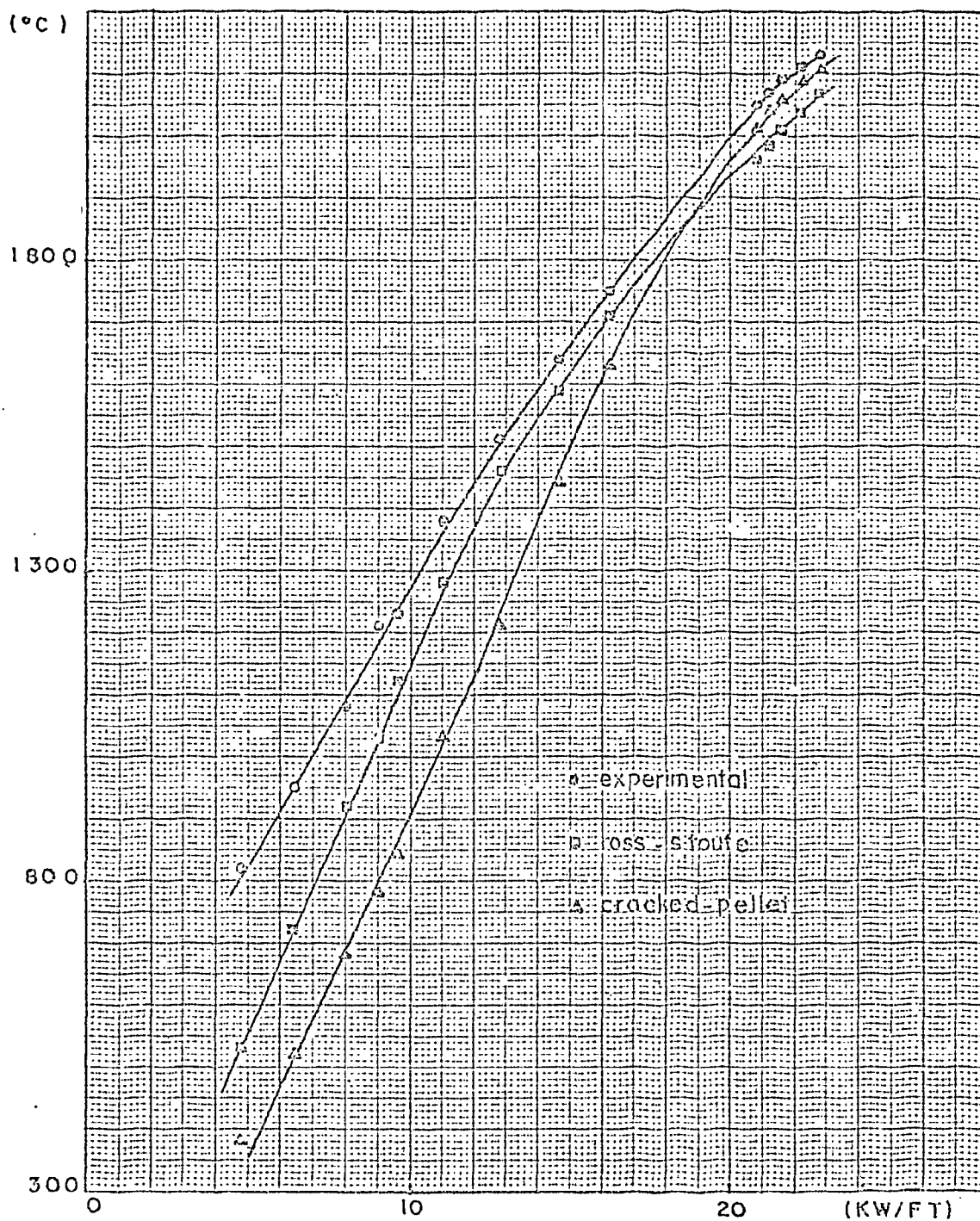


Figura 1 : Temperatura central da pastilha versus potência linear para a vareta WCAP-2923. Resultados experimentais e simulados com o FRAPCON-1.

Os aspectos do desempenho do combustível sob condições estacionárias, rampas de potência e também em condições de acidente, principalmente após TMI2, reabrem a discussão de se utilizar aço inoxidável como material de revestimento em varetas combustíveis de PWR⁽¹⁾.

Alguns aspectos comparativos entre revestimento de zircaloy e aço inoxidável são discutidos neste trabalho, utilizando os códigos de desempenho do combustível sob condições estacionárias de operação.

A tabela 1 compara algumas propriedades do aço AISI 348 com o zircaloy 4, sendo também anotadas algumas propriedades do UO₂.

Verifica-se desta tabela que, em termos de comportamento térmico, o aço possui uma condutividade térmica maior que o zircaloy e sua expansão térmica é três vezes maior. Estes fatores, para uma mesma geometria de vareta, levam a um aumento da folga entre pastilha e revestimento, uma vez que o revestimento de aço expande mais do que o revestimento de zircaloy. É visto também que o aço é bem mais rígido do que o zircaloy, o que acarreta uma menor deformação neste material devido ao gradiente de pressão sobre o revestimento.

O balanço desses efeitos é apresentado nas figuras 3, 4 e 5 e nas tabelas 2 e 3, onde estão anotadas as simulações de uma vareta de aço e uma de zircaloy, com mesma geometria, mesmo histórico de potência e uma distribuição axial cossenoidal de potência (figura 2).

Para o início do histórico a vareta com revestimento de aço apresenta uma folga pastilha-revestimento maior e temperaturas na pastilha também maiores. Nota-se que a pressão interna dos gases aumenta menos na vareta de aço do que na vareta de zircaloy, pois o volume livre para os gases é maior devido à maior folga pastilha-revestimento.

A fluência ("CREEP") do zircaloy com a irradiação é acentuada. Em termos de desempenho, isto representa um "creepdown" acentuado do revestimento, possibilitando um fechamento da folga entre pastilha e revestimento. Os dados referentes ao "creep" do aço para as condições existentes em PWR não são muito abundantes na literatura, mas nota-se que para condições semelhantes às do zircaloy sua deformação por "creep" é menor (Tabela 1). Da figura 4 nota-se a tendência de menor deformação do revestimento de aço com a irradiação. Para o aço são apresentadas três taxas diferentes de "creep", mas a tendência é de um fechamento da folga pastilha-revestimento para tempos de irradiação bem maiores do que para o zircaloy. Nota-se que a atuação do inchamento ("swelling") do combustível é preponderante no caso do aço para o fechamento da folga, enquanto no caso do zircaloy

PROPRIEDADES	ZIRCALOY-4	AÇO INOX AISI 348	UO ₂
Fusão (°C)	~1700	~1400	~2700
Seção de choque de absorção(barn)	2r-0.19 térmico 2r-15.1 rápido	2.8 térmico 6.8 rápido	
Condutividade térmica (W/M °K)	~12 (300 °K) ~18 (900 °K)	~15 (300 °K) ~23 (600 °K)	
Coefficiente de Expansão Térmica (10 ⁻⁶ /°K)	6.7 (300 a 1000 °K)	16.0(300 a 400 °K) 18.5(300 a 900 °K)	12.6(2500 °K) 9.6(1300 °K) 7.8(800 °K)
Módulo de Elasticidade (10 ⁹ N/m ²)	90 (300 °K) 70 (600 °K)	200(300 °K) 140(800 °K)	150(2500 °K) 170(1300 °K) 180(800 °K)
Limite de Escoamento (10 ⁶ N/m ²)	~220(650 °K) re-cristalizado ~430(650 °K) stress-relieved	~250(300 °K) ~160(600 °K)	
Limite de Resistência (10 ⁶ N/m ²)	~330(650 °K) re-cristalizado ~500(650 °K) stress-relieved	~500(600 °K)	
Alogamento total(%)	20-35 (300 °K) 20-50 (600 °K)	> 40(300 °K) ~ 37(800 °K)	
Limite de escoamento após fluência 2x10 ²² n/cm ² (10 ⁶ N/m ²)		~850(700 °K)	
Limite de Resistência após fluência 22x10 ²² n/cm ² (10 ⁶ N/m ²)		~850(700 °K)	
"CREEP" Por Irradiação (%)	0.3(100MPa, T=640 °K ϕt=3x10 ²¹ n/cm ²)	0.8(80MPa, T=630 °K ϕt=1x10 ²³ n/cm ²) 0.045(extrapolado para ϕt=3x10 ²¹ n/cm ²) 0.24-0.9 (53000 MPa/TU médio)	
"CREEP" Fora do Reator (%)	0.8(1000h, 150MPa, 644 °K) 0.6(1000h, 140MPa, 644 °K)	1.0 (10000h, 220MPa, 816 °K)	

Tabela 1 : Comparação das Propriedades do Aço AISI 348^(11,12), Zircaloy-4^(7,13) e UO₂⁽⁷⁾.

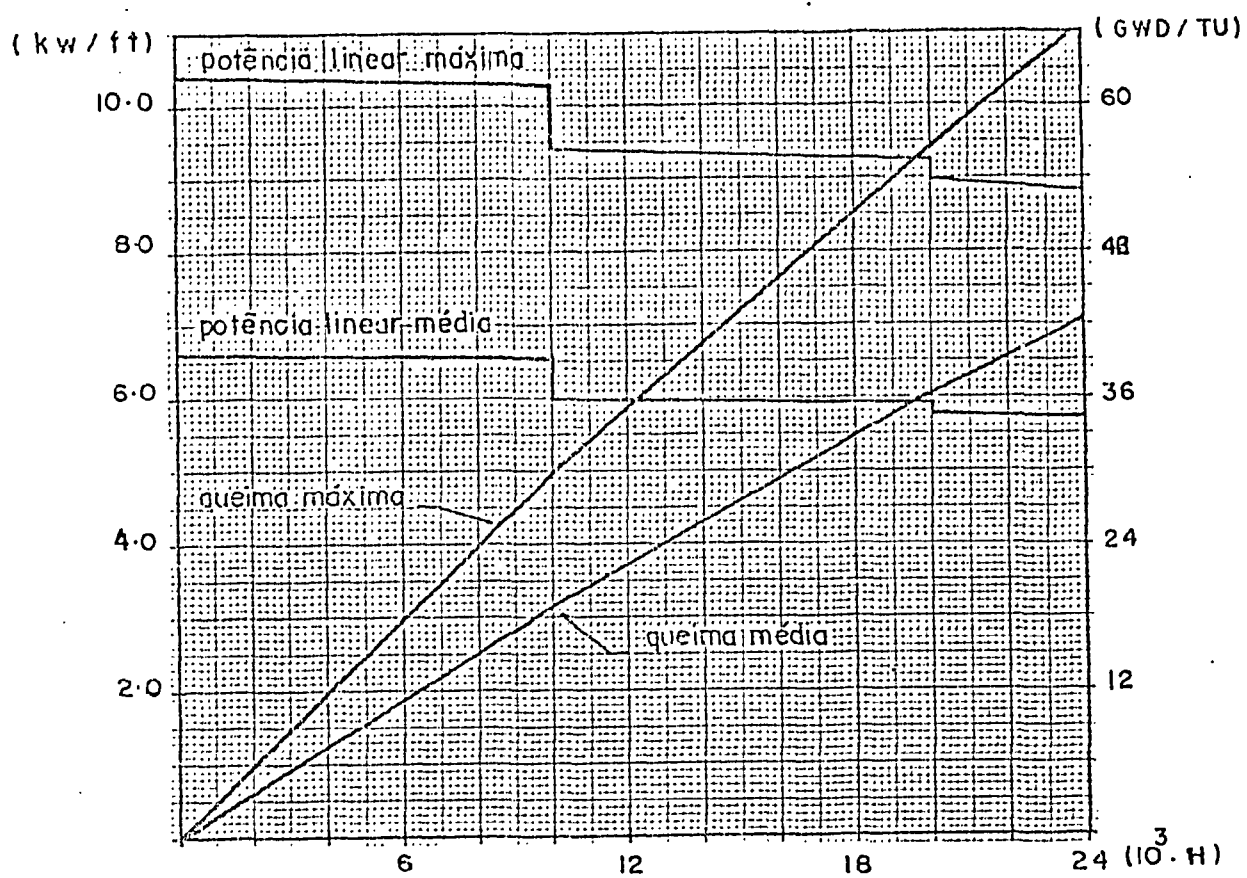


FIGURA 2- EXEMPLO DE HISTÓRICO DE POTÊNCIA

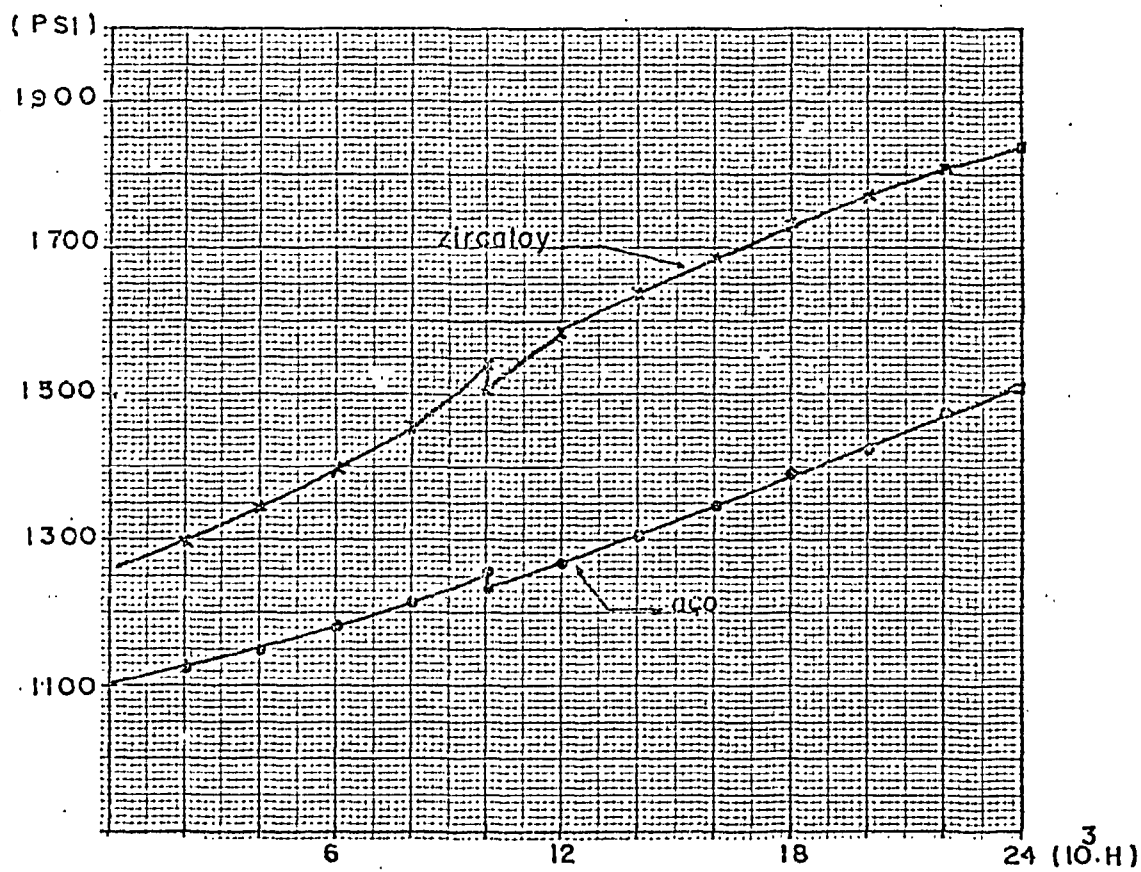


FIGURA 3 - COMPARAÇÃO DA PRESSÃO INTERNA

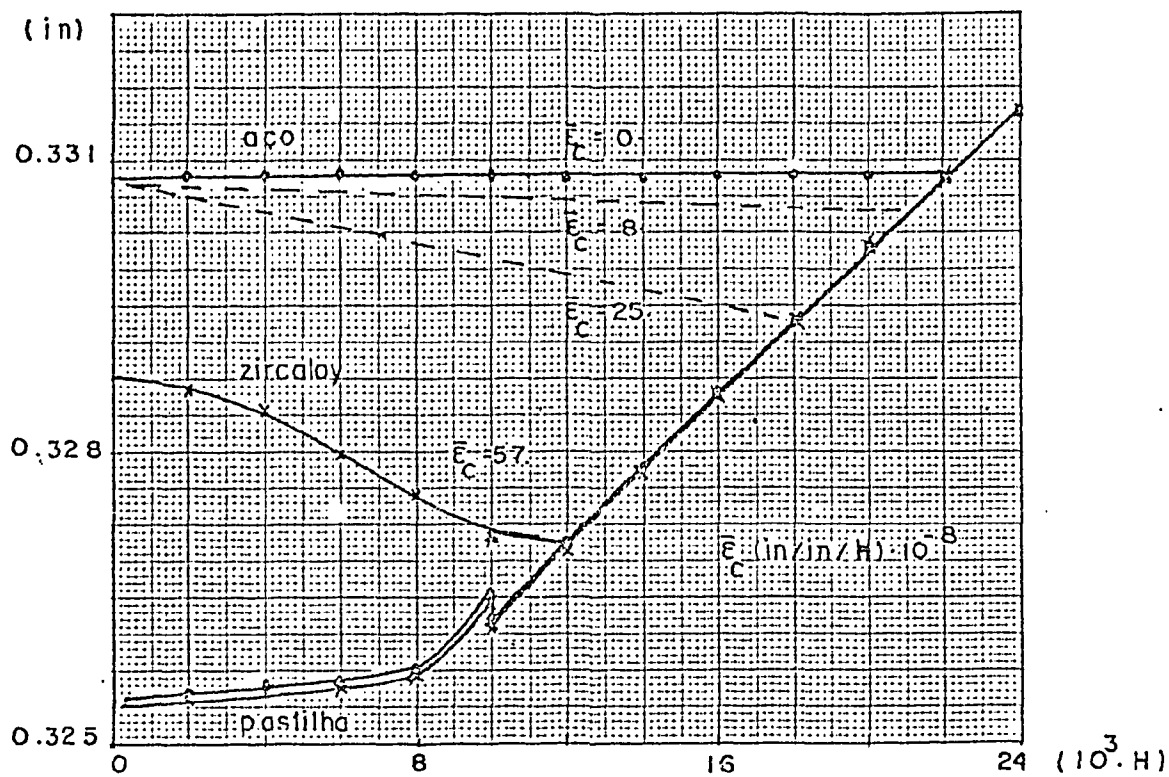


FIGURA 4 - COMPARAÇÃO DOS DIÂMETROS

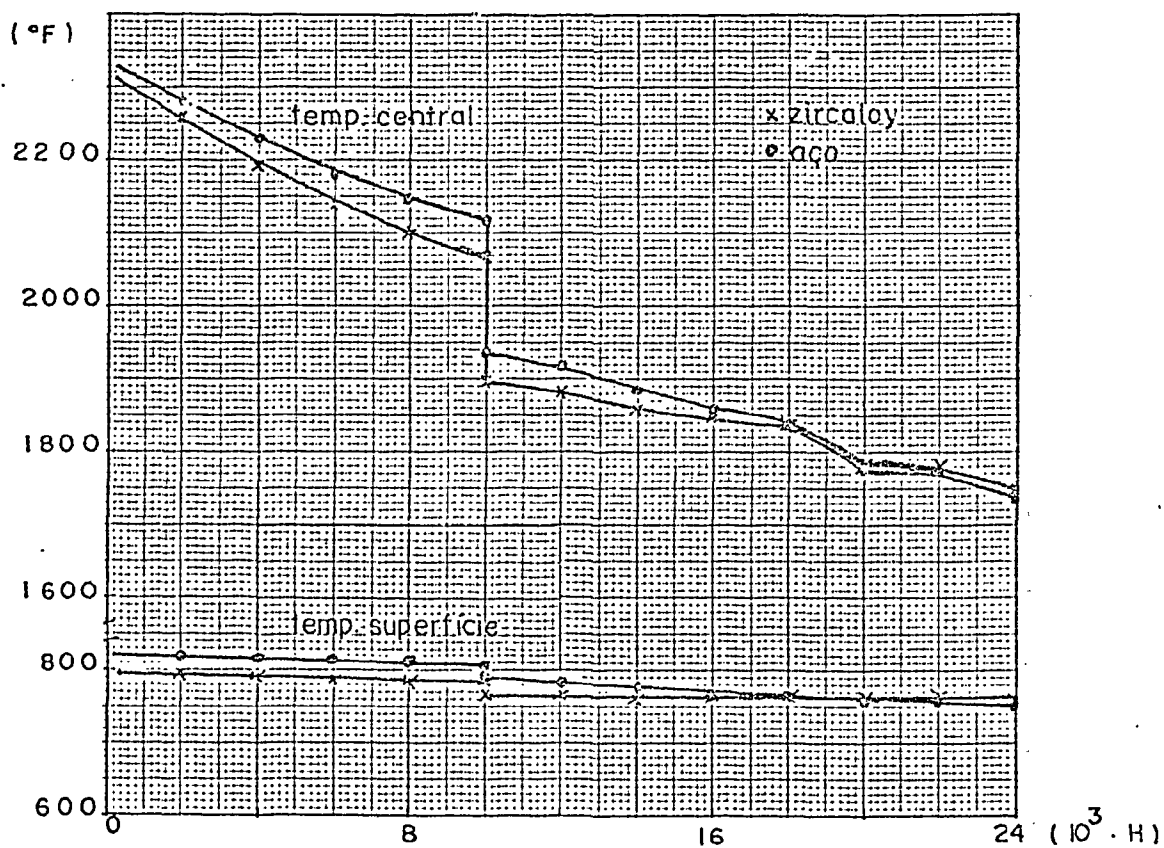


FIGURA 5 - COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS NA PASTILHA

TIME	BURNUP	POWER	CLAD TEMP (F)	GAP	GAP	FUEL TEMP (F)	CONT.	CLAD STRESS (PSI)	FUEL CD	STRAIN	FGAS
HOURS	MWD/TU	KW/FT	CC. AVG ID.	MILS (F)	DD. AVG CEN	PSI	IC. OC. EFF INCH	PCT	PSI		
1 0.	0.	0.10	551. 551. 551.	6.05	552. 553. 557. 562.	0.	-12938. -11576. -10461.	0.32217	-C.105	275.	
2 2000.	5974.	10.35	655. 692. 729.	3.22	763. 797.1441.2257.	0.	-11753. -6745. -7269.	0.32541	-C.340	1298.	
3 4000.	11999.	10.35	655. 692. 730.	2.73	751. 792.1419.2172.	0.	-11498. -6525. -6961.	0.32547	-C.410	1341.	
4 6000.	17943.	10.32	655. 692. 730.	2.43	759. 783.1399.2139.	0.	-11034. -6142. -6520.	0.32553	-C.542	1398.	
5 8000.	23887.	10.27	656. 693. 720.	1.91	758. 795.1385.2099.	0.	-10526. -5718. -6034.	0.32564	-C.669	1461.	
610000.	29731.	10.22	656. 693. 730.	0.72	757. 785.1374.2070.	0.	-9893. -5195. -5427.	0.32642	-C.788	1540.	
710000.	25793.	9.39	648. 682. 716.	0.93	742. 767.1294.1895.	0.	-10030. -5567. -5704.	0.32620	-C.790	1506.	
812000.	35199.	9.36	648. 682. 716.	-0.16	741. 766.1287.1884.	532.	-4474. -731. -285.	0.32679	-C.825	1577.	
914000.	40560.	9.30	648. 682. 716.	-0.54	740. 764.1277.1861.	2133.	7767. 9926. 11654.	0.32777	-C.607	1638.	
1016000.	45915.	9.27	649. 682. 716.	-0.61	740. 765.1273.1847.	2410.	10309. 12132. 14130.	0.32858	-C.370	1689.	
1118000.	51268.	9.27	650. 683. 717.	-0.61	742. 766.1271.1835.	2374.	10415. 12221. 14232.	0.32934	-C.122	1734.	
1220000.	56567.	9.00	648. 681. 713.	-0.59	737. 762.1245.1742.	2309.	10237. 11977. 14010.	0.33001	C.073	1770.	
1322000.	61866.	9.00	649. 681. 714.	-0.59	738. 763.1248.1780.	2307.	10528. 12229. 14292.	0.33076	C.306	1809.	
1424000.	67338.	8.73	647. 679. 711.	-0.58	735. 759.1229.1742.	2246.	10332. 11985. 14051.	0.33145	C.510	1840.	

Tabela 2 : Resultados para a vareta de Zircaloy-4.

TIME	BURNUP	POWER	CLAD TEMP (F)	GAP	GAP	FUEL TEMP (F)	CONT.	CLAD STRESS (PSI)	FUEL CD	STRAIN	FGAS
HOURS	MWD/TU	KW/FT	CC. AVG ID.	MILS (F)	DD. AVG CEN	PSI	IC. OC. EFF INCH	PCT	PSI		
1 0.	0.	0.10	551. 551. 551.	7.15	552. 553. 557. 561.	0.	-13747. -12082. -11112.	0.32317	-C.057	796.	
2 2000.	5994.	10.33	655. 686. 712.	5.37	767. 817.1468.2280.	0.	-21726. -157. -8609.	0.32547	-C.048	1121.	
3 4000.	11933.	10.35	655. 687. 712.	5.32	766. 813.1448.2229.	0.	-21946. -4. -8434.	0.32553	-C.047	1149.	
4 6000.	17943.	10.32	655. 687. 712.	5.25	765. 814.1434.2182.	0.	-21248. 146. -8204.	0.32560	-C.046	1180.	
5 8000.	23887.	10.27	656. 687. 719.	5.15	767. 815.1425.2150.	0.	-20976. 331. -7942.	0.32571	-C.045	1214.	
610000.	29731.	10.22	656. 687. 719.	4.38	763. 807.1407.2113.	0.	-20522. 587. -7601.	0.32648	-C.043	1258.	
710000.	25793.	9.39	648. 677. 706.	4.58	740. 790.1325.1937.	0.	-19949. -318. -7807.	0.32634	-C.044	1231.	
812000.	35199.	9.36	648. 677. 706.	3.30	744. 782.1309.1919.	0.	-19605. -79. -7505.	0.32702	-C.043	1269.	
914000.	40560.	9.30	649. 677. 706.	3.04	739. 773.1289.1893.	0.	-19245. 119. -7216.	0.32779	-C.041	1307.	
1016000.	45915.	9.27	649. 678. 706.	2.29	736. 767.1276.1857.	0.	-18856. 371. -6905.	0.32856	-C.040	1349.	
1118000.	51268.	9.27	650. 678. 707.	1.51	735. 764.1269.1839.	0.	-18344. 661. -6570.	0.32933	-C.038	1382.	
1220000.	56567.	9.00	648. 675. 703.	0.84	731. 759.1241.1778.	0.	-18026. 650. -6317.	0.32999	-C.037	1423.	
1322000.	61866.	9.00	649. 676. 704.	0.05	732. 760.1244.1775.	0.	-17652. 966. -5956.	0.33076	-C.035	1473.	
1424000.	67338.	8.78	647. 674. 701.	-0.57	727. 753.1220.1734.	4150.	15375. 29401. 26083.	0.33141	C.117	1506.	

Tabela 3 : Resultados para a vareta de Aço Inoxidável.

o efeito do "creep" predomina.

A largura da folga entre pastilha-revestimento durante a irradiação é a principal diferença entre os dois tipos de vareta. Na vareta com revestimento de aço há uma menor probabilidade de interação pastilha-revestimento, podendo-se ter queimas da ordem de 50000 MWD/TU sem que haja esta interação. Isto representa quase 3 ciclos de queima da vareta dentro do reator.

No caso da utilização de rampas de potência, a expansão térmica da pastilha será maior do que a do revestimento de zircaloy devido ao maior gradiente térmico atingido e do maior coeficiente de expansão térmica (tabela 1). Quando do contato pastilha-revestimento, como a rigidez do zircaloy é bem menor do que a do UO_2 , a pastilha tende a impor toda a sua deformação sobre o revestimento. No entanto, devido ao alto "creep" 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 para tal as taxas de deformações, ou seja, rampas de potência, devem estar abaixo de certos valores, para que as tensões não atinjam a tensão para corrosão sob tensão. (0.3 a 0.75 da tensão de escoamento)⁽¹⁰⁾.

Para o aço inox, 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. Para este caso é importante analisar as características plásticas da pastilha, pois a reação do revestimento sobre ela é significativa⁽¹⁴⁾. 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). No entanto, como a ocorrência da interação pastilha revestimento se dá num tempo de irradiação posterior para o aço, os gradientes de deformação da pastilha sobre o revestimento são menores.

Da figura 5 nota-se que as temperaturas atingidas na pastilha são praticamente iguais nas duas varetas. Isto indica que para uma condição inicial de análise de acidentes não se tem muita variação na energia armazenada na pastilha entre os dois tipos de vareta. Entretanto, análises com códigos de acidente não foram efetuadas neste trabalho para comparar o comportamento dos dois materiais.

De um modo geral, as características mecânicas e químicas são mais estáveis para o aço do que para o zircaloy até a temperatura de 1200 °C (limite para PWR). Os pontos de comparação entre o zircaloy e o aço até 1200°C são ⁽¹⁾ :

i) o aço possui uma taxa de reação com vapor ou água menor que o zircaloy e o calor gerado na reação também é menor. Acima de 1200°C estas características se invertem; ii) para o mesmo peso de revestimento o hidrogênio liberado na reação com o aço é 2/3 do liberado na reação com o zircaloy; iii) o potencial de fragilização devido a solubilidade do oxigênio no metal é quase nenhum para o aço; iv) a resistência mecânica e a ductilidade do aço são melhores que os do zircaloy para as temperaturas envolvidas na análise de acidentes. Isso leva a uma menor deformação do revestimento de aço em relação ao revestimento de zircaloy, o que possibilita um fechamento menor dos canais de refrigeração.

4. Conclusões

Dos gráficos obtidos com a utilização de códigos de comportamento combustível em estado estacionário nota-se que em termos de desempenho, varetas com revestimento de aço têm uma característica geométrica mais estável do que varetas de zircaloy. A probabilidade de falha por interação pastilha-revestimento deve ser menor para varetas de aço inoxidável com mesma geometria das varetas de zircaloy.

Como trabalho futuro fica proposto a comparação dos dois materiais utilizando códigos de análise de varetas combustíveis para condições de acidente.

5. Bibliografia

- (1) - ADRIAN ROBERTS, J.T.: Structural Materials in Nuclear Power Systems. New York and London, Plenum Press (1981)
- (2) - BERNA, G.A.; BOHN, M.P., COLEMAN, D.R.: FRAPCON-1: A Computer Code for the Steady-State Analysis of Oxide Fuel Rods. Idaho National Engineering Laboratory. Report n° CDAP-TR-78-032-R1 (November 1978)
- (3) - STEGEMANN, D., WIWSENACK, W.: Modeling Fuel Element Performance of Light Water Reactors. Institut für Kerntechnik, Technische Universität Hannover (1978).
- (4) - BEYER, C.E. et al: GAPCON-THERMAL-2: A Computer Program for Calculating the Thermal Behavior of an Oxide Fuel Rod. Pacific Northwest Laboratories, BNWL - 1898 - NRC1 and 3 (November 1975).
- (5) - DERIEN, J.A. et alii. FRAP-S: A Computer Code for the Steady-State Analysis of Oxide Fuel Rods. Idaho National Engineering Laboratory. Report I-309-13.0 - (August 1975)
- (6) - Fuel Code Assesment Data Sample Report. Idaho National Engineering Laboratory. EG&G-CAP-5114 - (February 1980)
- (7) - HAGRMAN, D.L. et alii. MATPRO-VERSION 09: A Handbook of Materials Properties for use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior. Idaho National Engineering Laboratory. TREE-NUREG-1005, (December - 1976).
- (8) - ROSS, A.M., STOUT, R.L.: Heat Transfer Coefficient Between UO_2 and Zircaloy-2. AECL-1552 (June 1962).
- (9) - SIMMAD, M.T.: Fuel Element Experience in Nuclear Power Reactors. Gordon and Breach Science Publishers, New York - London - Paris (1971)
- (10) - ANDRADE, G.G., PERROTTA, J.A.: Comportamento da barra Combustível de um reator tipo PWR em seguimento de Carga. III ENFIR, Itaipava (Dezembro 1982).

- (11.)- BESTON, J.M.: Mechanical and Physical Properties of Irradiated Type 348 Stainless Steel - Tenth Conference ASTM-1981, p. 303-325.
- (12.)- PASUPATHI, V.: Investigation of Stainless Steel Clad Fuel Rod Failures and Fuel Performance in the Connecticut Yankee Reactor. EPRI N° 2119 (November 1981)
- (13.)- BUSBY, C.C.: Halogen Stress Corrosion Cracking of Zircaloy-4 tubing. J.N.M. 55 (1975) - p. 64-82.
- (14.)- BASOMBRIO, 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 Finite Element Model. Nucl. Eng. Design 74 (1982) 247-252.