

ANÁLISE DE DESEMPENHO DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR

Antonio Teixeira e Silva e Claudia Giovedi

Outubro 2023

MÓDULO 4

SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL E O DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES (ATF)

MÓDULO 4

SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL E O DESENVOLVIMENTO DE COMBUSTÍVEIS TOLERANTES A ACIDENTES (ATF)

PARTE 1

SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL

ELEMENTO DE COMBUSTÍVEL



ESQUELETO:

- Bocais (Superior e Inferior)
- Tubos Guia
- Grades Espaçadoras

Varetas Absorvedoras

Varetas de Combustível

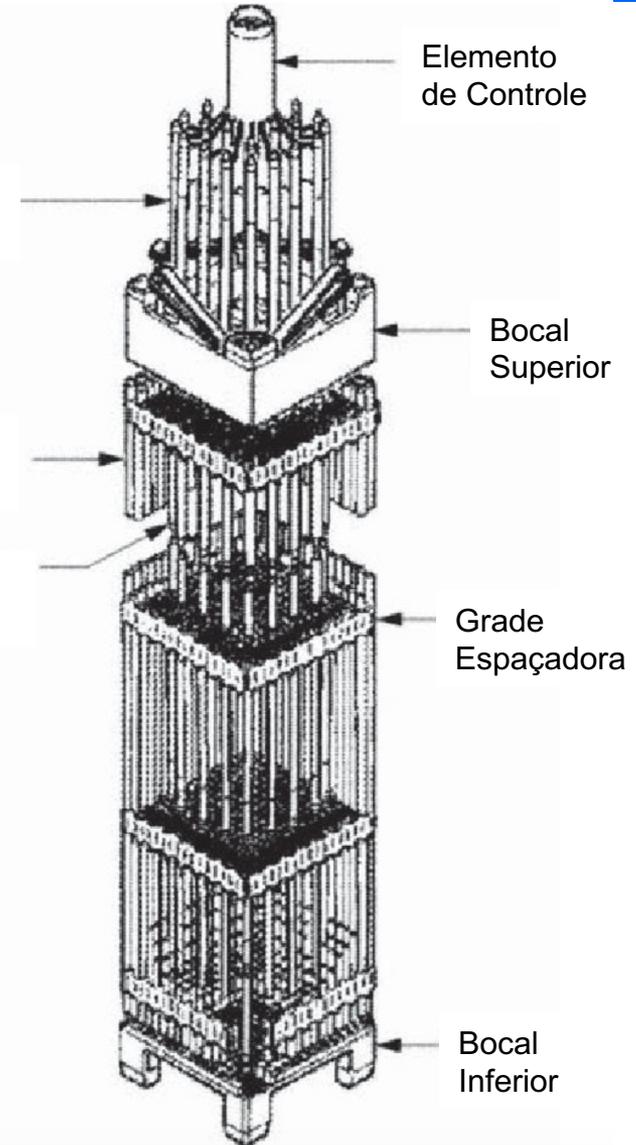
Tubos Guia

Elemento de Controle

Bocal Superior

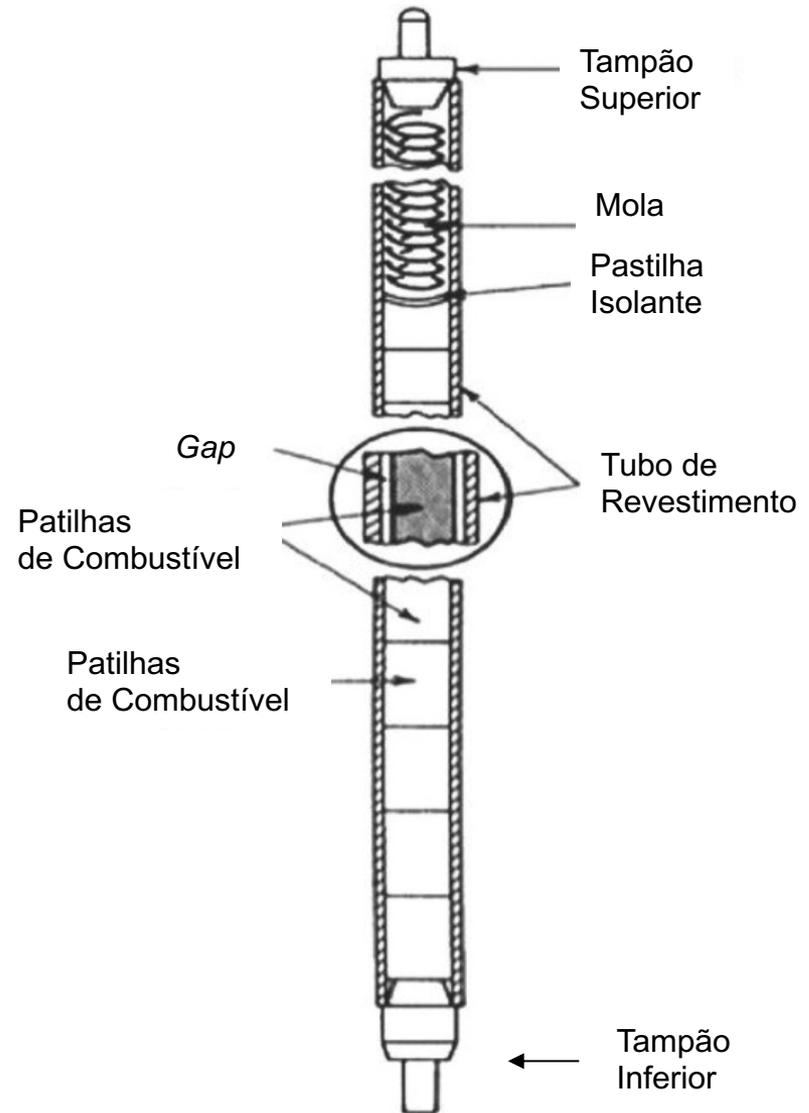
Grade Espaçadora

Bocal Inferior



SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL

VARETA DE COMBUSTÍVEL



COMPONENTES:

- Tubo de Revestimento
- Tampões de Extremidades (Superior e Inferior)
- Pastilhas Isolantes (Al_2O_3)
- Pastilhas de Combustível (UO_2)
- Mola

SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL – MATERIAL DE REVESTIMENTO

Aço inoxidável austenítico foi o material escolhido para o revestimento do combustível nos primeiros PWR.

A partir dos anos sessenta, os aços-inox 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-inox.***

Uma ***maior temperatura de fusão permite ao Zircaloy manter uma maior integridade (melhor resistência mecânica) do que o aço inox durante acidentes extremos nos quais as temperaturas do revestimento podem exceder 1200°C.***

Apesar dos fatores acima, existem algumas vantagens em se utilizar aço-inox em PWR.

Durante operação normal e transientes controlados, o ***aço inox é mais resistente do que o Zircaloy*** e é então ***menos susceptível a danos devidos à interação mecânica entre a pastilha de combustível e o revestimento.***

SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL – MATERIAL DE REVESTIMENTO

O *aço inox* 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 inox*.

Durante *acidentes de perda de refrigerante primário*, onde as *temperaturas do revestimento permanecem abaixo de 1200°C*, a maior temperatura de fusão do *Zircaloy* não constitui uma vantagem adicional sobre o *aço-inox*.

A utilização do aço-inox não leva em conta aspectos econômicos, mas sim aspectos de segurança.

Com exceção de pequenas falhas isoladas, o seu desempenho em *PWR* tinha sido excelente.

Apesar disto, há poucos estudos para modelar o comportamento termo-mecânico de varetas de combustível com revestimento de aço-inox devido à sua substituição por ligas à base de zircônio ainda nos anos 1960.

SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL – MATERIAL DE REVESTIMENTO LIGAS À BASE DE FERRO

Os aços inoxidáveis austeníticos utilizados como revestimento nos primeiros reatores eram do tipo AISI 304, 347 e 348.

A utilização dos aços austeníticos da série 300 em aplicações nucleares deve-se à sua maior resistência a corrosão intergranular.

AISI 348: Fe, 0.08% C, 2% Mn, 1% Si, 17-19% Cr, 9-13% Ni, 0,045% P, 0,03% S, 0,2% Cu, 0,7% Nb, 0,1% Ta, 0,2% Co.

No AISI 348, o menor teor de carbono associado à adição de tântalo e de nióbio previnem a corrosão e a precipitação intergranular de carboneto metálico, tipo $M_{26}C_6$, nas regiões de contornos de grãos, evitando o esgotamento de cromo.

SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL – MATERIAL DE REVESTIMENTO LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

O **ZIRCÔNIO** foi escolhido como elemento base para o material de revestimento do combustível nuclear pelo programa nuclear da Marinha americana devido à sua muita baixa seção de choque para a absorção de nêutrons, bem como devido à boa resistência à corrosão e propriedades mecânicas.

No entanto, desde o início verificou-se a necessidade de adicionar elementos de liga para assegurar o bom desempenho sob irradiação, mesmo considerando-se que a adição de elementos de liga poderia alterar a economia de nêutrons no reator.

Assim, o desenvolvimento das ligas à base de zircônio levou em conta a adição de elementos de liga até um total máximo de 3%, de modo a não comprometer de forma significativa a baixa absorção de nêutrons do zircônio.

Os estudos mostraram que a adição de elementos de liga em proporções bastante baixas afetam de modo significativo a cinética de corrosão da liga, melhorando o seu desempenho.

Esses estudos vêm ocorrendo ao longo dos últimos 70 anos e observa-se que a taxa de corrosão das ligas à base de zircônio sofreu redução de aproximadamente 2 ordens de grandeza devido à adição de elementos de liga no intervalo de 2 a 3% em peso. Isso também contribuiu para melhorar o processo de fabricação da liga.

**SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL – MATERIAL DE REVESTIMENTO
LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO**



Tubos de liga à base de zircônio utilizados como material de revestimento de combustível nuclear

SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

As ligas à base de zircônio são usadas em quase todos os reatores de nêutrons térmicos refrigerados a água leve ou pesada, o que representa mais de 95% dos reatores nucleares em todo o mundo (431 reatores de água leve ou pesada em operação considerando 448 reatores nucleares em operação em todo o mundo em 2017 (Fonte IAEA)).

A maioria dos elementos de combustível PWR, VVER e BWR é feita de ligas de zircônio. No caso de PWR, os tubos de revestimento, os tubos-guia, bocais e as grades são feitos de ligas à base de zircônio. Para o reator VVER, que é um projeto russo de reator de água pressurizada, os componentes estruturais do elemento de combustível (bocais, tubo central) e o revestimento da vareta de combustível são feitos de ligas à base de zircônio.

No caso do BWR, os tubos de revestimento e as estruturas externas são feitos de ligas à base de zircônio. No PHWR (reator pressurizado refrigerado a água pesada), que são reatores do tipo CANDU, originalmente projetados no Canadá, ligas à base de zircônio são usadas para revestimento de combustível e estruturas do elemento de combustível, mas também para componentes estruturais importantes do núcleo do reator, especialmente os tubos de pressão.

SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL – MATERIAL DE REVESTIMENTO LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

Desde o início da sua utilização como material de revestimento nos anos 1960, o **Zircaloy**, uma liga de zircônio com estanho, apresentou comportamento bastante satisfatório.

As primeiras ligas à base de zircônio desenvolvidas apresentavam teor de estanho ente 1,5 e 2%, sendo suficiente para reduzir a taxa de corrosão do revestimento, melhorar as propriedades mecânicas e compensar os efeitos deletérios de impurezas de nitrogênio na taxa de corrosão.

Os principais tipos de **Zircaloy** desenvolvidos foram:

Zircaloy-2: Zr, 1,5% Sn, 0,14% Fe, 0,10% Cr, 0,06% Ni (BWR)

Zircaloy-4: Zr, 1,5% Sn, 0,2% Fe, 0,10% Cr (PWR)

Nas décadas de 1970 e 1980, com a extensão do tempo de vida do combustível atingindo queimas mais altas, verificou-se que a taxa de corrosão do **Zircaloy-4** em condições de altas queimas cresce. Além disso, a absorção de hidrogênio como parte do processo de corrosão leva à fragilização pela precipitação de hidreto. Isso levou a indústria a desenvolver ligas à base de zircônio-nióbio.

SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL – MATERIAL DE REVESTIMENTO LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

Os principais tipos de ligas **Zr-Nb** desenvolvidos foram:

ZIRLO (Westinghouse): Zr, 0,5-2,0 Nb, 0,7-1,5% Sn, 0,07-0,14% Fe, 0,03-0,14% Ni/Cr

Optimized ZIRLO (Westinghouse): Zr, 1,0% Nb, 0,7% Sn, 0,1% Fe
(maior resistência à corrosão com excelente estabilidade dimensional)

M5 (AREVA): Zr, 0,8-1,2 Nb

A adição de nióbio reduz drasticamente a absorção de hidrogênio durante o processo de corrosão e previne (ou retarda) a ocorrência de corrosão acelerada em altas queimas, possibilitando assim que se atinja altas queimas e uma maior economia no uso do combustível.

Além da maior resistência à corrosão, as ligas à base de zircônio contendo nióbio apresentam maior resistência à fluência por irradiação.

Ao longo do tempo, os componentes de elementos de combustível fabricados com aço inoxidável, como as grades espaçadoras, foram sendo substituídos por ligas à base de zircônio.

*Ref: IAEA-TECDOC-684, “Corrosion of Zirconium Alloys in Nuclear Power Plants”
IAEA-TECDOC-996, “Waterside Corrosion of Zirconium Alloys in Nuclear Power Plants”*

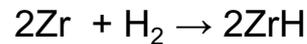
A Tabela 1 apresenta uma comparação entre as principais propriedades materiais dos dois tipos de revestimento (Zircaloy e aço-inox) e do material cerâmico da pastilha de UO_2 .

O Zircaloy possui excelente resistência a corrosão em meio aquoso e em muitos outros meios corrosivos ácidos e alcalinos.

Os principais agentes corrosivos do Zircaloy são os produtos de fissão que atuam na parede interna do revestimento, especialmente o Cs e o I, tidos como os responsáveis pelo mecanismo de clivagem transgranular que propaga a trinca durante a PCI.

O revestimento de **Zircaloy** pode ter uma taxa de corrosão acentuada e **sofre fragilização** devido à **captura de hidrogênio** incorporado na **forma de hidretos**.

Do lado interno da vareta, a corrosão ocorre devido à liberação de moléculas de hidrogênio retidos nos poros do combustível durante a fabricação.



Do lado externo, a fonte é o próprio meio aquoso de refrigeração. Além disto, as condições de pressão e temperatura na parede externa da vareta induzem a formação de uma camada oxidada, onde parte do hidrogênio também é absorvida pelo revestimento.

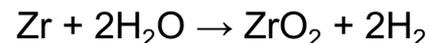


Tabela 1: Comparação das Principais Propriedades Materiais do Zircaloy, Aço Inox e UO₂

Propriedade/Material	Zircaloy-4	AÇO	UO ₂
Fusão (°C)	1821	1415	2865
Sq. Chq. Abs. (barns)			-
σ térmico	0,19	2,8	-
σ rápido	15,1	0,8	
Cond. Térm. (K) [W/cm·C]			
25°C	0,0127	0,0143	,0086
350°C	0,0168	0,0185	,0050
1000°C			,0028
2000°C			,0024
Exp.Térm. (α) [10 ⁻⁶ /°C]			
25°C	4,08(tg)	15,88	5,61
350°C	5,58(ax)	17,50	7,20
1000°C	8,91(tg)	-	9,55
2000°C	5,58(ax)	-	12,97
	-		
	-		
Mod.Elast.(E) [10 ³ MPa]			
25°C	98,	200,	189,
350°C	77,	176,	182,
1000°C	-	-	168,
2000°C	-	-	147,
Módulo de Poisson (ν)			
25°C	0,299	0,300	0,316
350°C	0,276,	0,300	0,316
Lim.Escoam.(σ _y)[MPa]			
25°C	665, (rel)	238,	-
350°C	416, (rec)	182,	-
	311, (rel)		
	174 (rec)		
Lim.Resist.(σ _y)[MPa]			
25°C	741, (rel)	603	-
350°C	522, (rec)	426	-
	340, (rel)		
	212, (rec)		
Tx.Def.Fluên.(ε)[/hr]			
φ=1. E ¹⁴ n/cm ² .s			
350°C	1,95E-5	3,64E-7	
T=1000hs			
σ=220MPaj			

Um problema encontrado em aços inoxidáveis austeníticos é a sensitização, que é formação de carbonetos de cromo do tipo $M_{23}C_6$ em contornos de grão.

Esta reação leva ao empobrecimento da matriz adjacente ao contorno de grão, tornando esta região susceptível à corrosão, podendo ocorrer um trincamento do tipo intergranular.

A forma de se diminuir a sensitização é reduzir o valor de carbono do aço-inox para um teor abaixo de 0,03% em peso ou estabilizar o carbono em forma de carbonetos do tipo MC que sejam mais estáveis do que os de cromo, como titânio ou o nióbio.

No caso de varetas de combustível de aço inoxidável austenítico, o principal agente corrosivo é o próprio meio aquoso de refrigeração que atua na parede externa do revestimento e relacionado, na maioria das vezes, à condição sensitizada.

Assim, em reatores nucleares refrigerados a água, a corrosão sob tensão de aços inoxidáveis austeníticos está associada à existência ou não de sensitização e à química da água, como o teor de oxigênio proveniente da radiólise e do cloro.

Em reatores de água pressurizada, o teor de oxigênio é mantido abaixo de 10 ppb, sendo que este controle é dado pela adição de hidrogênio à água.

Para este teor de oxigênio, a concentração de cloro pode atingir até o mesmo teor de oxigênio sem que teoricamente ocorra o trincamento.

O níquel é o principal elemento de liga que influi na resistência à corrosão sob tensão de aços inoxidáveis austeníticos, onde a menor resistência ao trincamento é encontrada para teores de aproximadamente 7 e 8% em peso e a imunidade é atingida para teores acima de 30% em peso (ligas Fe-Cr-Ni).

Outros elementos de liga como molibdênio e cromo também melhoram a resistência à corrosão sob tensão.

Além dos elementos de liga e do meio corrosivo, a tensão afeta o trincamento por corrosão sob tensão.

Existem limiares de tensão que dependem do tipo de aço-inox e do meio corrosivo, abaixo dos quais, o trincamento não ocorre.

Como há uma variação muito grande dos limiares de tensão para cada tipo de material, estes são embutidos nos limites de projeto.

É também verificado que o ***trabalho a frio altera a susceptibilidade de um aço inoxidável austenítico à corrosão sob tensão. Trabalhos a frio menores que aproximadamente 20%, aumentam a susceptibilidade e acima de 20% diminuem.***

O hidrogênio pode estar presente em aços inoxidáveis austeníticos como impureza intersticial.

Parece que a influência fragilizante do hidrogênio à temperatura ambiente em aços inoxidáveis austeníticos é menor do que aquela encontrada em aços inoxidáveis martensíticos e ferríticos.

No entanto, pressupõe-se que o hidrogênio pode atuar de alguma forma na corrosão sob tensão pela sua migração até a ponta de uma trinca.

Em temperaturas de operação de PWR (acima de 300°C), não é encontrado o efeito fragilizante do hidrogênio devido, possivelmente, à sua alta mobilidade.

O efeito fragilizante é maior a temperaturas abaixo de 100 °C e não são formados hidretos como os encontrados em revestimentos de Zircaloy.

A Tabela 2 apresenta uma comparação das principais características de corrosão do Zircaloy e do aço inoxidável austenítico, quando utilizados como material de revestimento em PWR.

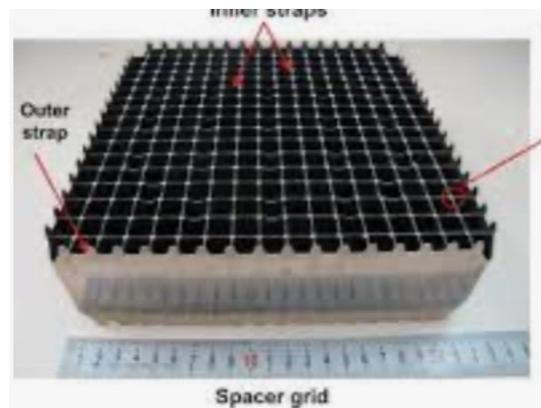
Tabela 2: Características Metalúrgicas do Zircaloy e do Aço Inoxidável como Materiais de Revestimento de Vareta Combustível de PWR

Características	ZIRCALOY-4	ACO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO
Corrosão generalizada em água	Boa resistência à oxidação pela formação de uma <u>camada protetora de óxido de zircônio</u> .	Boa resistência à oxidação pela formação de <u>uma camada protetora de óxido de cromo</u> .
Corrosão sob tensão	Pode sofrer corrosão sob tensão devido aos produtos de fissão Cs e I em pontos de PCI	Pode sofrer <u>corrosão sob tensão</u> onde o teor de oxigênio e cloro é alto em pontos de PCI
Corrosão intergranular		Pode sofrer corrosão intergranular por <u>sensitização</u> e/ou presença de P, Si em contorno de grão.
<u>Fragilização</u> por hidrogênio	Absorve <u>hidrogênio</u> formado nas reações de oxidação (de 20% a 30%). Formação de hidretos.	<u>Não é problemática nas temperaturas de operação</u> .
Crescimento axial	Crescimento no eixo C (Zr possui estrutura HC) sob irradiação de nêutrons	Não ocorre.
Inchamento	Não ocorre.	Começa a tornar significativo para fluências neutrônicas acima de $1.E22 \text{ n/cm}^2$ ($E>0, 1 \text{ MeV}$)
<u>Fluência</u> devido à irradiação	Possui comportamento mais acentuado do que o aço-inox austenítico	Começa a tornar significativo para fluências neutrônicas acima de $1.E22 \text{ n/cm}^2$ ($E>0, 1 \text{ MeV}$)
<u>Fragilização por Hélio</u>	Não ocorre.	Leva à fragilização em fluências neutrônicas acima de $1.E22 \text{ n/cm}^2$ ($E>0, 1 \text{ MeV}$)

SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL – MATERIAL DE REVESTIMENTO LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

PRINCIPAIS CAUSAS DE FALHAS EM PWR

Os principais mecanismos de falha de combustível têm sido desgaste por *debris* e atrito grade-vareta, assim o projeto dos elementos de combustível evoluiu no sentido de aumentar a resistências a essas causas de falha. A resistência a *debris* foi abordada por meio da introdução de filtros nos bocais inferiores ou por meio de grades de proteção adicionais combinadas com tampões de extremidade de metal sólido longo e revestimento de óxido protetor na extremidade inferior das varetas de combustível. A mudança para grades de ligas à base de zircônio e a introdução de novos projetos de grade, destinados a melhorar o desempenho termohidráulico do elemento de combustível, ocasionalmente levaram à ocorrência de atrito significativo entre a grade e a vareta de combustível com falha de combustível. Assim, os projetos de grade têm sido continuamente aprimorados para reduzir esse problema.



REF: “Review of Fuel Failures in Water Cooled Reactors”, IAEA (2010).

SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL – MATERIAL DE REVESTIMENTO LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

PRINCIPAIS CAUSAS DE FALHAS EM PWR

Mudanças recentes em projetos e materiais não levaram a novos mecanismos de falha de combustível, mas surgiram novos problemas que levaram a novas modificações de projeto. Um dos principais problemas era o impacto da distorção do elemento durante a operação, o que fazia com que o atrito da vareta de controle dentro dos conjuntos aumentasse, levando à inserção incompleta da vareta de controle durante o desligamento.

Os projetos de combustível PWR mais recentes agora oferecem uma ampla gama de opções, proporcionando facilidade de uso e flexibilidade na operação. Recursos como grades de mistura de fluxo intermediário para melhorar o desempenho térmico, venenos integrais como gadolínio para ajudar a atingir altas queimas, bocais superiores removíveis para facilitar o reparo e opções de enriquecimento variável dentro do conjunto para eficiência ideal de nêutrons agora estão disponíveis.

SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL – MATERIAL DE REVESTIMENTO LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

PRINCIPAIS CAUSAS DE FALHAS EM PWR

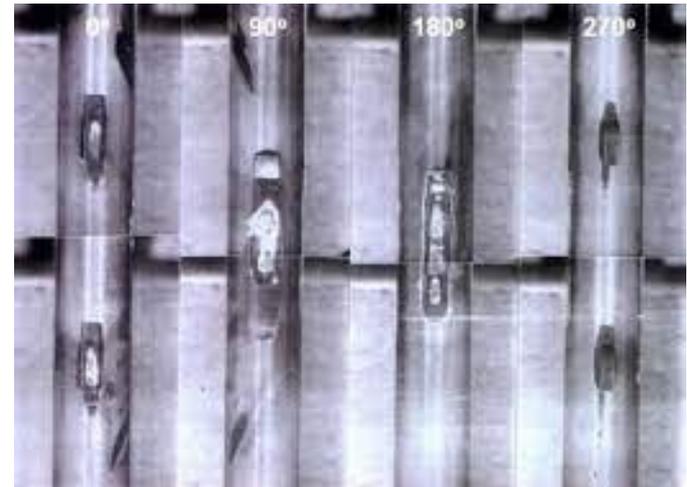
Atrito grade-vareta é o mecanismo de falha da vareta de combustível dominante em PWR em todo o mundo, atingindo até 65% nos Estados Unidos da América, 39% na França e 37% na Europa (excluindo a França). A segunda causa mais comum são as falhas relacionadas a *debris*, que representam 6%, 11% e 18%, respectivamente, para as três regiões. A terceira maior causa são as falhas relacionadas à fabricação (~5%), que são mais ou menos uniformemente distribuídas por regiões e no tempo.

Falhas relacionadas com crude/corrosão não são típicas para PWR. Atualmente, a média mundial para este tipo de falha é de 4%, principalmente devido a um grande número de falhas na República da Coreia entre 1994-2006, onde 40 de um total de 90 varetas falharam devido à corrosão do revestimento Zry-4 (assim, os números da República da Coreia somam 44% do total). Algumas falhas aleatórias relacionadas à corrosão também foram observadas nos EUA, embora nenhuma falha desse tipo tenha sido observada em outros países. Dois casos isolados de falhas do tipo PCI-SCC foram observados em PWR dos EUA, e cinco falhas relacionadas ao manuseio em todo o mundo.

SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL – MATERIAL DE REVESTIMENTO LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

PRINCIPAIS CAUSAS DE FALHAS EM PWR

- A taxa de falha de combustível média mundial (1994–2006) é de 13,8 Elementos de Combustível (EC) com vazamento por 1000 EC descarregados
- As falhas variam de 17 em 1994-1996 a 9,5 em 2004-2006, aumentando em 1995 e 2001 para 20,5
- O aumento da taxa em 1995 deveu-se a falhas de combustível por atrito grade-vareta em várias plantas na Europa e uma falha maciça de fabricação de combustível em uma fábrica nos EUA
- O aumento em 2001 também foi devido a falhas massivas de combustível (atrito grade-vareta em uma planta nos EUA e atrito específico no nível da grade inferior em uma planta na França)
- As falhas devido ao atrito grade-vareta foram maiores (~ 75%) em 1999–2002



SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL – MATERIAL DE REVESTIMENTO LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

DETECÇÃO DE FALHAS EM PWR

A avaliação da atividade do refrigerante em plantas em operação é o primeiro passo para a avaliação da confiabilidade do combustível. O monitoramento da atividade de determinados isótopos de produtos de fissão no refrigerante fornece informações úteis sobre o desempenho do combustível em operação. A partir dos dados obtidos, é possível identificar o tempo durante um ciclo operacional em que ocorreram as falhas de combustível, para estimar o número e o tipo de falhas.

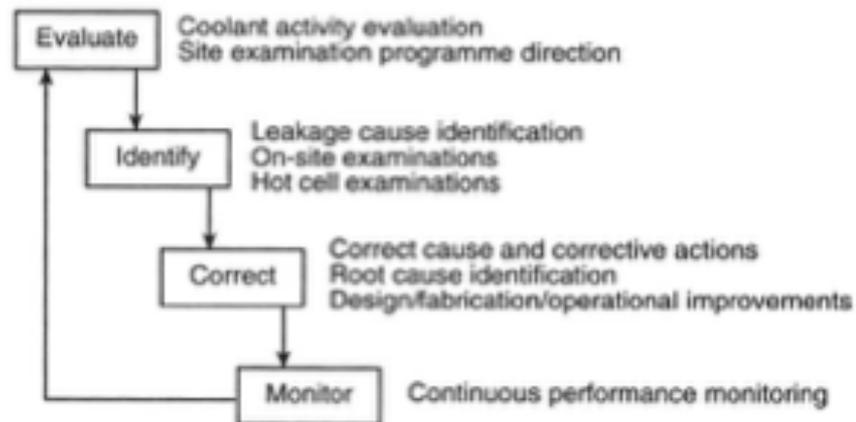
A caracterização qualitativa e quantitativa do combustível defeituoso é geralmente baseada em três famílias químicas de nuclídeos que não produzem depósitos significativos nas paredes do circuito e para os quais as correlações entre a liberação da vareta falhada e a atividade são facilmente estabelecidas. Os radionuclídeos dessas famílias que são fáceis de identificar usando espectrometria gama e que podem ser usados no diagnóstico de falhas de combustíveis são:

- Gases nobres: ^{133}Xe , $^{133\text{m}}\text{Xe}$, ^{135}Xe , ^{138}Xe , $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{87}Kr , ^{88}Kr
- Iodo: ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I
- Césio: ^{134}Cs , ^{136}Cs , ^{137}Cs

SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL – MATERIAL DE REVESTIMENTO LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

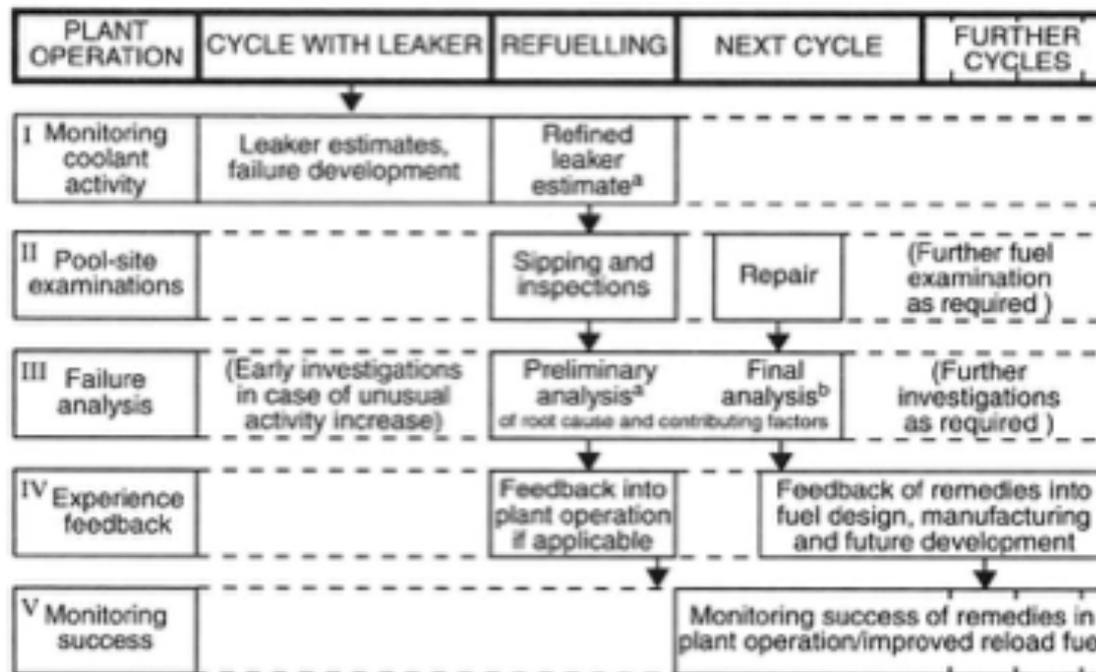
DETECÇÃO DE FALHAS EM PWR

Como resultado de sua estabilidade química, o escape de gases nobres de fissão é governado apenas por fatores físicos, como difusão e tamanho do defeito. Em contraste, o escape de outros produtos de fissão é influenciado por seu comportamento químico e físico, incluindo: solubilidade, volatilidade, afinidade química etc. Os isótopos do iodo, em particular, podem ser facilmente 'aprisionados' no *gap* entre o combustível e o revestimento, e só será liberado para o refrigerante se água ou vapor entrarem no *gap*.



SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL – MATERIAL DE REVESTIMENTO LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

DETECÇÃO DE FALHAS EM PWR



^a Based on sipping and inspections; ^b Based on detailed examination during repair.

SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

MECANISMOS E CAUSAS RAIZ DAS FALHAS

Atrito Grade-Vareta

O atrito entre a grade e a vareta tem sido a maior causa de falha de combustível para os PWR. As principais causas dessa falha foram identificadas como suporte insuficiente da vareta de combustível no elemento devido ao projeto e/ou fabricação inadequados, vibração da vareta de combustível devido à instabilidade elástica do fluido causada por fluxo cruzado no elemento de combustível e fluxo induzido no elemento de combustível com vibração das varetas.



SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

MECANISMOS E CAUSAS RAIZ DAS FALHAS

Atrito Grade-Vareta

Os dados de campo indicam que a extensão de falhas devido ao atrito grade-vareta depende de:

- Extensão da vibração induzida pelo fluxo causada pelo projeto do combustível e/ou condições de operação específicas da planta;
- Condições de suportação da vareta na grade;
- Área de contato inicial entre a grade e a vareta; e
- O material da grade.

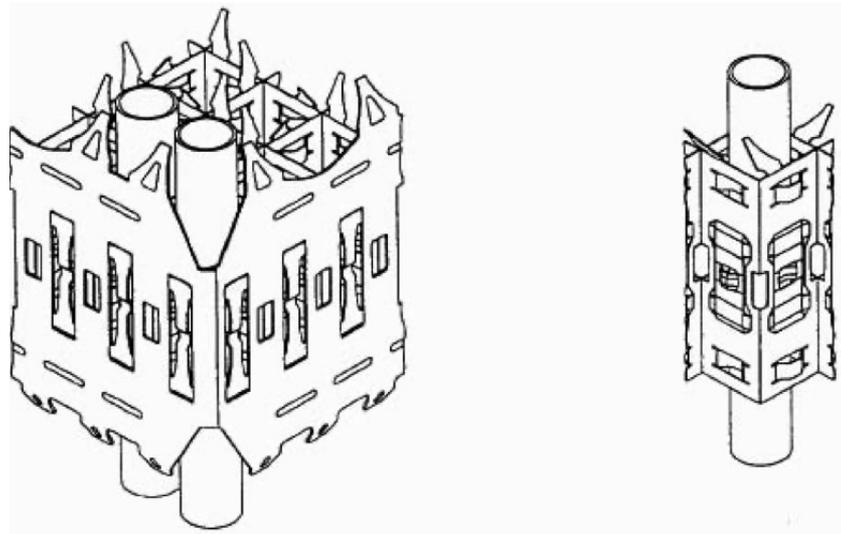
Além disso, uma maior vibração induzida por fluxo, uma maior folga entre a grade e a vareta, uma menor área de contato inicial entre a grade e a vareta, e tubo de revestimento menos rígidos, contribuem para uma maior probabilidade de ocorrência de atrito.

SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

MECANISMOS E CAUSAS RAIZ DAS FALHAS

Atrito Grade-Vareta

Ações corretivas: Modificações na estrutura da grade e no projeto de molas



SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

MECANISMOS E CAUSAS RAIZ DAS FALHAS

Atrito Grade-Vareta

Exemplo: falha de combustível de Angra 1.

Após o desligamento prematuro de Angra 1 em 1993 por causa da alta atividade no sistema de refrigeração do reator durante o ciclo 4, a inspeção revelou que 17 de 121 elementos de combustível falharam devido ao atrito entre a grade e a vareta. Os elementos de combustível foram fabricados pela INB (Industrias Nucleares Brasileiras) de acordo com projeto e transferência de tecnologia da Siemens. O dano parecia ser causado pela perda prematura da força da mola da grade espaçadora. A Siemens presumiu que as perdas estavam presentes antes que o combustível estivesse no reator e provavelmente ocorreram quando as varetas de combustível foram inseridas no esqueleto, possivelmente em combinação com os carregamentos decorrentes das atividades de transporte para o local. Assim, a causa raiz seria o projeto de mola inadequado. A Siemens então desenvolveu um novo projeto de mola, cujas principais características eram um novo formato e uma maior força inicial. Apesar da maior força da mola da grade, novas falhas por atrito ocorreram nos elementos de combustível dois ciclos depois. O novo projeto da mola, com novo formato e maior força inicial como características principais, não corrigiu o problema, pois a principal causa era a vibração induzida pelo fluxo, a qual está diretamente relacionada ao projeto da aleta misturadora (forma e orientação), que não havia sido alterado. A força da mola mais alta alterou as características de vibração (amplitudes e frequências), levando a forte interação entre a grade e a vareta no ciclo 6.

SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

MECANISMOS E CAUSAS RAIZ DAS FALHAS

Atrito com *debris*

O atrito com *debris* é um mecanismo comum de falha de combustível em todos os tipos de reatores de potência. Vários tipos de *debris* que circulam no refrigerante, principalmente cavacos de usinagem da estrutura do núcleo, projetam-se através da placa de amarração inferior e danificam a parte inferior da vareta ou ficam presos mais acima nas grades, causando atrito na parede do revestimento.

Debris metálicos soltos podem circular no sistema do reator e ficar presos no elemento de combustível. Normalmente, os *debris* ficam presos entre as varetas de combustível e uma grade espaçadora, geralmente a inferior, e com menos frequência em grades espaçadoras mais acima no elemento. As partículas de *debris* vibram sob a influência do fluxo de refrigerante e causam erosão por atrito no revestimento.



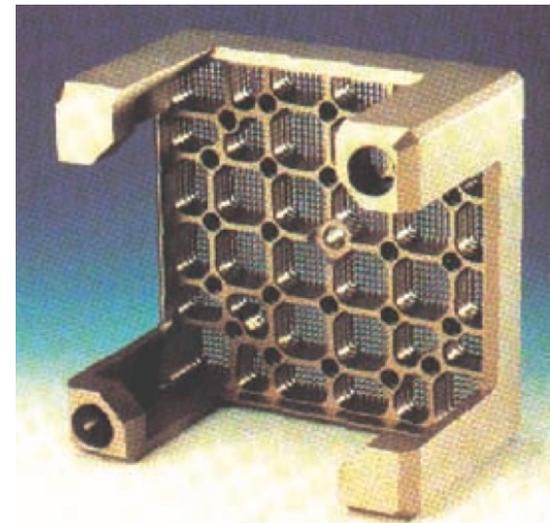
SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

MECANISMOS E CAUSAS RAIZ DAS FALHAS

Atrito com debris

Os *debris* normalmente incluem aparas e cavacos, como os resultantes de operações de trabalho em metal realizadas durante a manutenção do sistema primário. Em alguns casos, objetos grandes, como ferramentas, parafusos, porcas, cliques de metal, conectores elétricos, pedaços de fios, partes de bombas ou válvulas defeituosas, peças de juntas e lâminas de serra foram encontrados em elementos de combustível danificados.

Ações corretivas: Bocais com filtros de *debris*

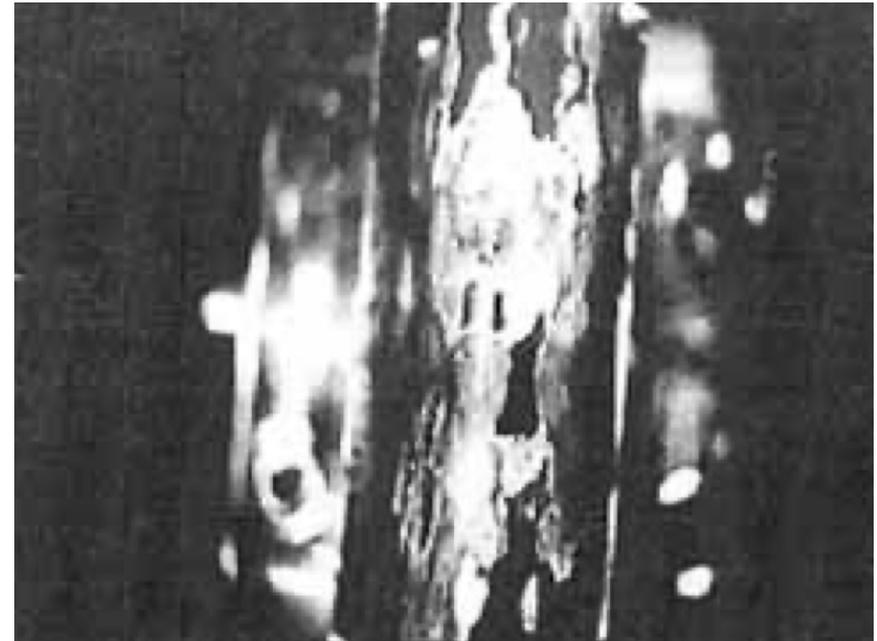


SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

MECANISMOS E CAUSAS RAIZ DAS FALHAS Corrosão

Em PWR, a corrosão é uniforme na superfície do revestimento e é a corrosão uniforme excessiva que leva à falha do revestimento, o que é muito raro em condições normais de operação. Essas falhas são devidas a: fluxo de calor anormalmente alto excedendo os limites de fluxo de calor e de corrosão de queima, ou problemas de química da água que levam a depósitos excessivos de crud.

A corrosão uniforme do revestimento do combustível é uma das principais limitações no uso de Zircaloy-4 em PWR. Com o aumento da queima, foram observadas reduções significativas na margem para limites de corrosão do revestimento de Zircaloy-4. O desenvolvimento de revestimentos avançados, como M5 pela AREVA ou ZIRLO pela Westinghouse, foi necessário para atingir os objetivos de queima de muitas plantas operando em condições mais demandantes.



SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

MECANISMOS E CAUSAS RAIZ DAS FALHAS

Interação Pastilha-Revestimento (Pellet-cladding interaction (PCI))

A interação pastilha-revestimento (PCI) tem sido uma causa frequente de falha de combustível em reatores BWR e CANDU, mas é rara em PWR. A falha de PCI ocorre como resultado de um rápido aumento de potência (rampa de potência), normalmente envolvendo movimentação de varetas de controle nas proximidades. A falha de combustível por PCI foi reduzida notavelmente, principalmente como resultado de diretrizes operacionais que estão sendo seguidas e mudanças no projeto de combustível.

A falha por PCI é caracterizada pelos seguintes fatores operacionais associados a rampas de potência:

- Queima acumulado antes da rampa;
- Potência máxima da vareta durante a rampa;
- Magnitude da rampa, ou seja, incremento de potência além do nível de potência pré-irradiado;
- Taxa média de rampa de potência; e
- Tempo de permanência em alta potência.

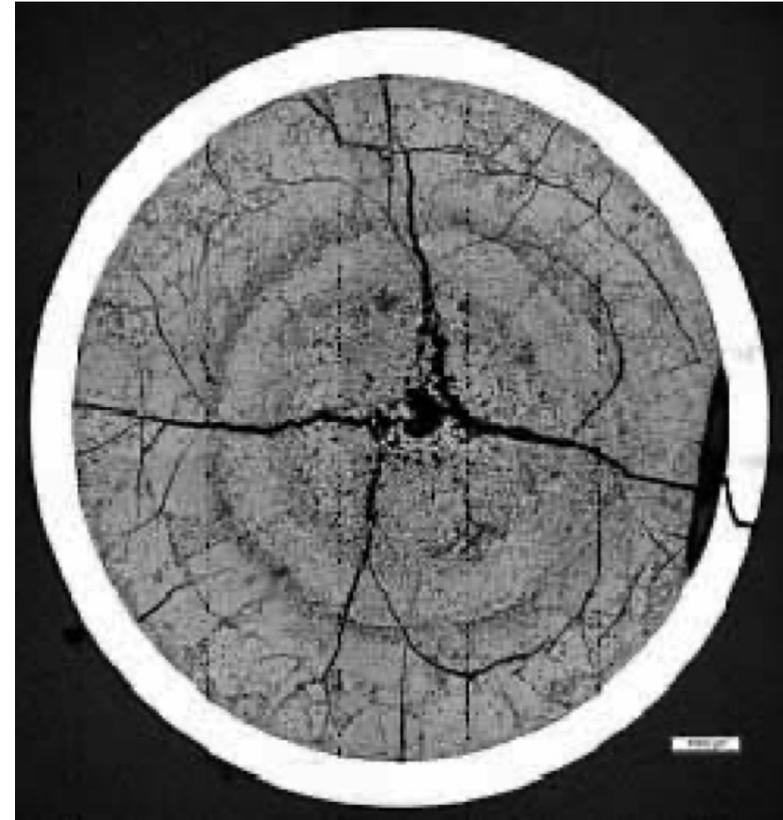
SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

MECANISMOS E CAUSAS RAIZ DAS FALHAS

Interação Pastilha-Revestimento (PCI)

As falhas devido a PCI resultam dos efeitos combinados da expansão da pastilha de combustível - especialmente nas rachaduras radiais do pellet e nas interfaces axiais entre pastilhas, levando a tensões no revestimento - e da presença de um ambiente agressivo de produtos de fissão. Uma vez que as características das falhas de PCI são bastante semelhantes às dos testes de corrosão por tensão (SCC) de zircaloy observados em laboratório, incluindo metalografia e microscopia eletrônica de varredura (MEV), o mecanismo de falha de PCI pode ser considerado induzido por produtos de fissão.

Geralmente, SCC é um processo de fratura lento que ocorre sob uma tensão de tração menor do que a tensão de fratura enfrentada pelo material original no ambiente corrosivo. Para a ocorrência de SCC, três condições fundamentais devem ser satisfeitas simultaneamente: nível e duração de tensão suficientes no material, susceptibilidade do material ao SCC e um ambiente agressivo.



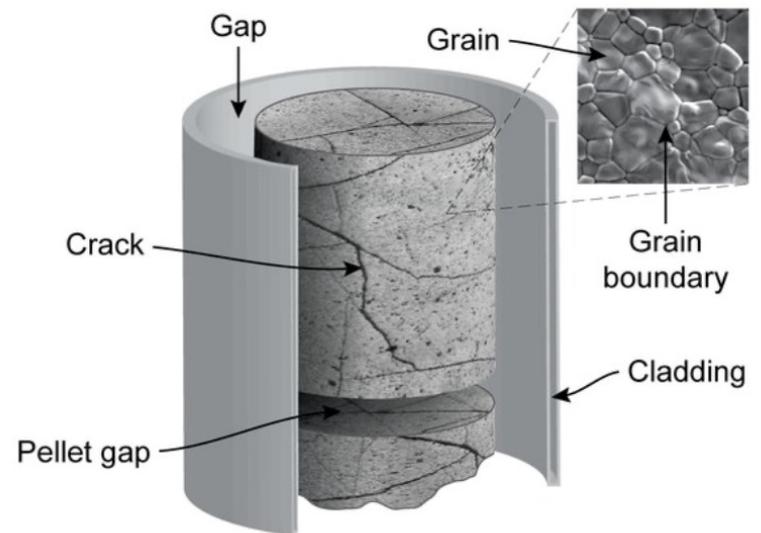
SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

MECANISMOS E CAUSAS RAIZ DAS FALHAS

Interação Pastilha-Revestimento (PCI)

Ações corretivas:

Para evitar a falha por PCI, é necessário remover pelo menos uma das condições fundamentais que causam o SCC, ou seja, tensão, suscetibilidade e ambiente agressivo). Assim, há dois tipos principais de ações: melhorar as estratégias operacionais da planta para limitar os transientes de potência e a outra é melhorar o projeto das varetas de combustível.



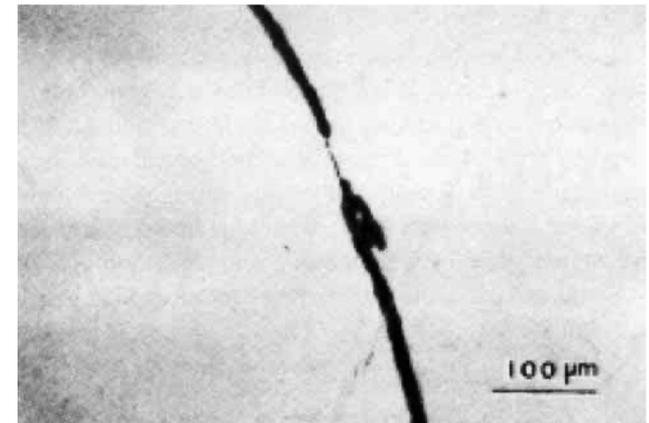
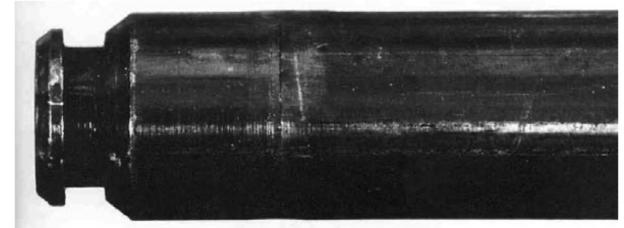
SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

MECANISMOS E CAUSAS RAIZ DAS FALHAS

Defeitos de fabricação

Os principais tipos de defeitos de fabricação são aqueles relacionados aos tampões de extremidade e a problemas de solda de nos tampões de extremidade. O número de falhas resultantes de defeitos de fabricação diminuiu ao longo dos anos devido a melhorias nos processos de fabricação.

Soldas incompletas e tampões com vazamento têm uma característica comum: o defeito primário é um pequeno orifício próximo à extremidade da vareta de combustível. Por causa do tamanho inicial do orifício, ambos os tipos tendem a limitar a quantidade de entrada de refrigerante e liberação de produto de fissão para o refrigerante. Isso significa que esses defeitos podem permanecer não detectados no núcleo até que o tamanho do furo primário aumente ou o dano secundário se desenvolva. O período de incubação para danos de hidratação secundária depende do tamanho do orifício primário inicial, temperatura do combustível etc.



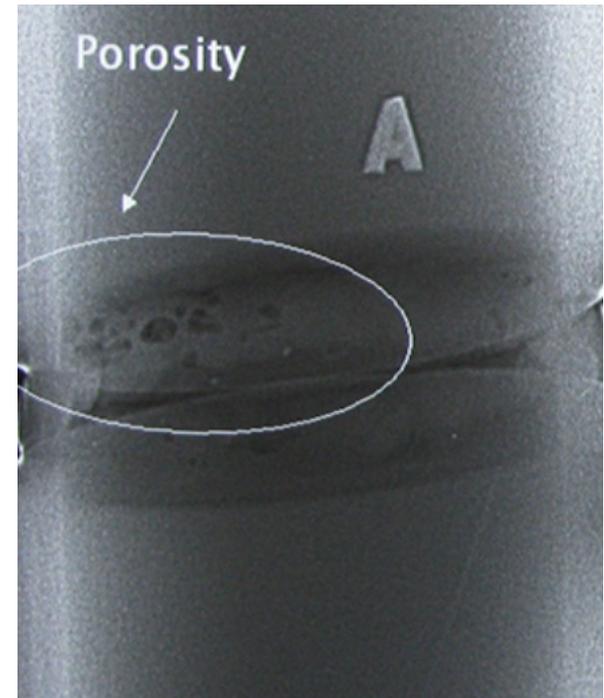
SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

MECANISMOS E CAUSAS RAIZ DAS FALHAS

Defeitos de fabricação

Ações corretivas:

Tem havido uma tendência atual para os fornecedores de combustível usarem o controle de processo automatizado para eliminar as falhas dependentes do operador durante o processo de fabricação. Os métodos de inspeção também melhoraram. Por essas razões, as falhas de combustível devido a erros de fabricação são muito baixas.



SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

MECANISMOS E CAUSAS RAIZ DAS FALHAS

Hidretação primária

A falha de combustível por meio de hidretação interna local também é conhecida como falha de explosão solar devido à sua aparência metalográfica. Na década de 1970, as fontes de hidrogênio eram principalmente umidade residual ou contaminação orgânica em pastilhas/varetas de combustível. Essa causa de falha foi praticamente eliminada por meio de melhorias no processo de fabricação. A hidretação secundária ocorre após o ingresso de vapor nas varetas.

A falha de combustível causada por hidretação local do revestimento devido principalmente a umidade ou resíduos orgânicos em varetas de combustível ocorreram frequentemente nas décadas de 1960 e 1970 tanto em BWR quanto em PWR. A hidretação local também pode ocorrer quando uma vareta de combustível falha e o vapor entra na vareta, produzindo uma fonte de hidrogênio exposta ao revestimento. Isso é considerado como hidretação secundária.

Embora a hidretação primária seja um tipo de defeito de fabricação, geralmente é tratada separadamente, uma vez que a causa da falha foi amplamente investigada e possui características comuns à hidretação secundária.

SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

MECANISMOS E CAUSAS RAIZ DAS FALHAS

Hidretação primária

Ações corretivas:

Medidas eficazes foram tomadas para prevenir a hidretação primária, incluindo secagem cuidadosa das pastilhas e do revestimento e controle rigoroso das condições ambientais durante o processo de fabricação da vareta de combustível.

Com o aumento da densidade da pastilha de combustível do PWR para 95% da densidade teórica (TD) depois que as falhas de densificação/colapso ocorreram no início dos anos 1970, houve a redução da porosidade aberta das pastilhas, o que contribuiu para diminuir a absorção de umidade. Assim, a ocorrência de falha de combustível devido à hidretação primária tornou-se rara; no entanto, ainda ocorre hoje, principalmente como resultado de erros ocasionais de controle de qualidade nos processos de fabricação.

SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

MECANISMOS E CAUSAS RAIZ DAS FALHAS

Colapso do revestimento

O colapso do revestimento devido à densificação das pastilhas de combustível formando lacunas axiais na coluna de pastilhas resultou em falha de combustível no início dos anos 1970 em muitos PWR. Esse tipo de falha foi totalmente eliminado com o ajuste da densidade das pastilhas (aumento para 95% da densidade teórica) e pré-pressurização das varetas.

SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

Fukushima Daiichi Accident

O grande terremoto do leste do Japão ocorreu em 11 de março de 2011.

Na usina nuclear de Fukushima Daiichi (NPP), operada pela Tokyo Electric Power Company (TEPCO), o terremoto causou danos às linhas de fornecimento de energia elétrica para o local, e o tsunami causou destruição substancial da infraestrutura operacional e de segurança no local. O efeito combinado levou à perda de energia elétrica interna e externa. Isso resultou na perda da função de resfriamento nas três unidades de reator em operação, bem como nas piscinas de armazenamento de combustível irradiado. As outras quatro centrais nucleares ao longo da costa também foram afetadas em diferentes graus pelo terremoto e pelo tsunami. No entanto, todas os reatores em operação nessas plantas foram desligados com segurança. Apesar dos esforços dos operadores da central nuclear de Fukushima Daiichi para manter o controle, os núcleos dos reatores das unidades 1–3 superaqueceram, o combustível nuclear fundiu e os três vasos de contenção foram rompidos. Como consequência, o hidrogênio foi liberado dos vasos de pressão, levando a explosões dentro dos prédios dos reatores nas Unidades 1, 3 e 4, danificando estruturas e equipamentos e ferindo trabalhadores da central nuclear. Os radionuclídeos foram liberados da planta para a atmosfera e depositados na terra e no oceano. Houve também lançamentos diretos no mar.

SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

Fukushima Daiichi Accident



SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

Fukushima Daiichi Accident

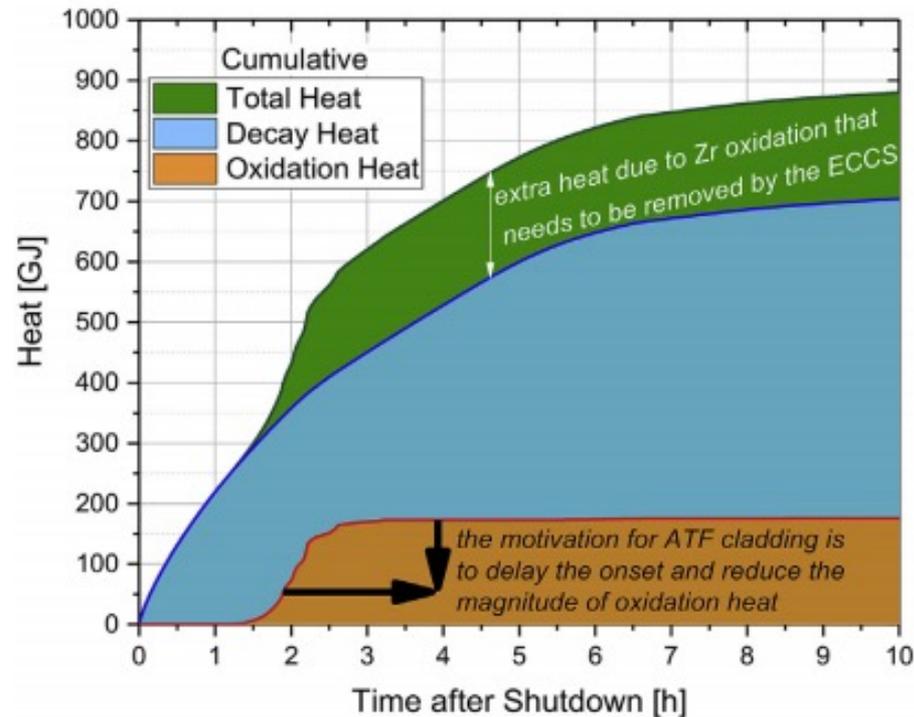
Durante acidentes severos, o resfriamento do núcleo é frequentemente interrompido e o calor de decaimento no combustível leva ao aumento da temperatura do núcleo. À medida que o núcleo vai ficando descoberto (o nível de água diminui), os processos de transferência de calor tornam-se menos eficientes, as temperaturas aumentam ainda mais e os elementos de combustível começam a experimentar degradação física e química. A degradação física ocorre primeiro (700 e 1000°C) e envolve deformação (*ballooning*) e arrebentamento (*burst*) do tubo de revestimento.

A degradação química é dominada pela oxidação do Zr pelo vapor de água, que é uma reação altamente exotérmica. Por exemplo, os ~ 125 kg de Zr presentes em cada elemento de combustível de um PWR produz cerca de 820 MJ de calor e cerca de 2700 mol de gás hidrogênio após a oxidação. Dependendo do projeto, um total de 25 a 40 toneladas de Zr presente no núcleo, quando totalmente oxidado, produz uma quantidade excessiva de calor, o que, acelera o curso da progressão do acidente e sobrecarrega o sistema de refrigeração de emergência.



SISTEMA COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL LIGAS À BASE DE ZIRCÔNIO

Fukushima Daiichi Accident



REF: K.A. Terrani, "Accident Tolerant Fuel Cladding Development: Promise, Status, and Challenges", Journal of Nuclear Materials, 501, 13-30 (2018).