

PMT3540 - Aula 11 - Corrosão-sob-tensão induzida por irradiação e outros processos de degradação

Cláudio Geraldo Schön

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

25 de novembro de 2020

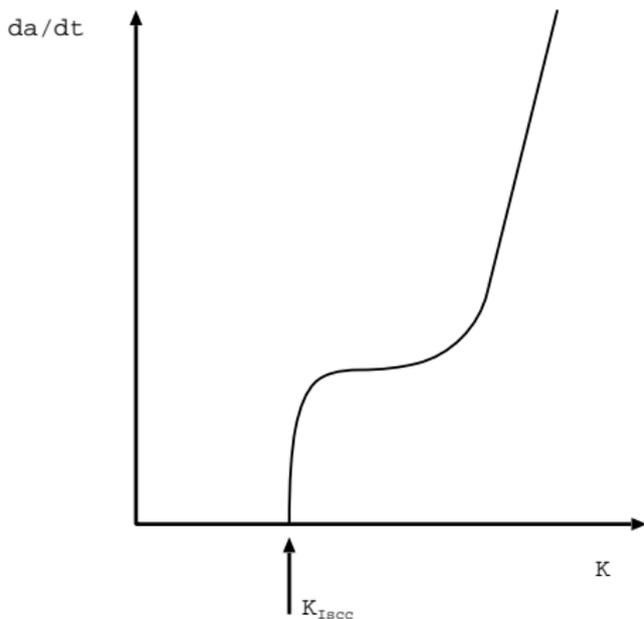
Corrosão-sob-tensão

Recordando

- Em inglês: *Stress corrosion cracking* (SCC) ou *Environmentally assisted cracking* (EAC)
- Fenômeno de degradação que ocorre em materiais sob a ação de tensões de tração na presença de um meio corrosivo específico
- A combinação material, meio corrosivo é específica, mas não há como saber previamente que condição causará SCC.
- Envolve a propagação estável de uma ou mais de uma trinca, atingindo, ou não, a criticalidade (a falha final pode resultar, por exemplo, no vazamento de líquido contido por um vaso de pressão)
- O modo de propagação pode ser intergranular, transgranular, ou misto

Corrosão-sob-tensão

Fenomenologia

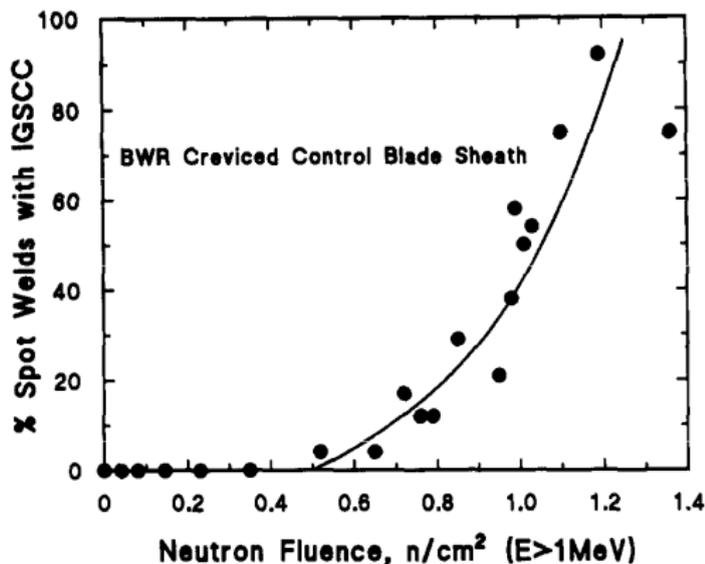
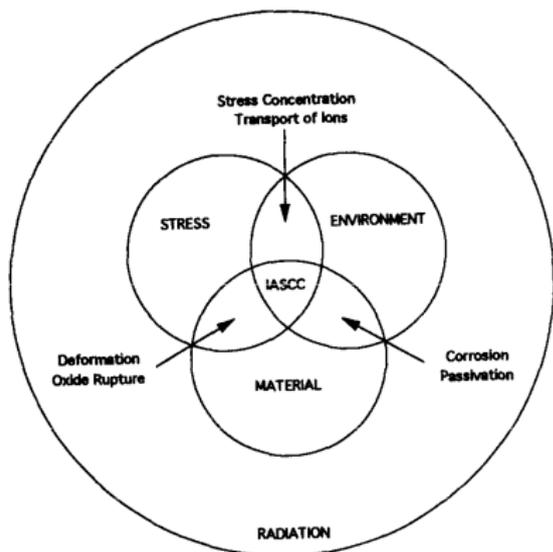


- Há um K crítico para início de propagação da trinca $\rightarrow K_{I\text{SCC}}$
- Aços inoxidáveis austeníticos são particularmente sensíveis (em meios concentrados contendo Cl^-) \rightarrow papel do Ni
- Não se pode falar de resistência de um material à SCC, a resistência sempre está associada também ao meio corrosivo

Corrosão sob tensão assistida por irradiação

Irradiation assisted stress corrosion cracking

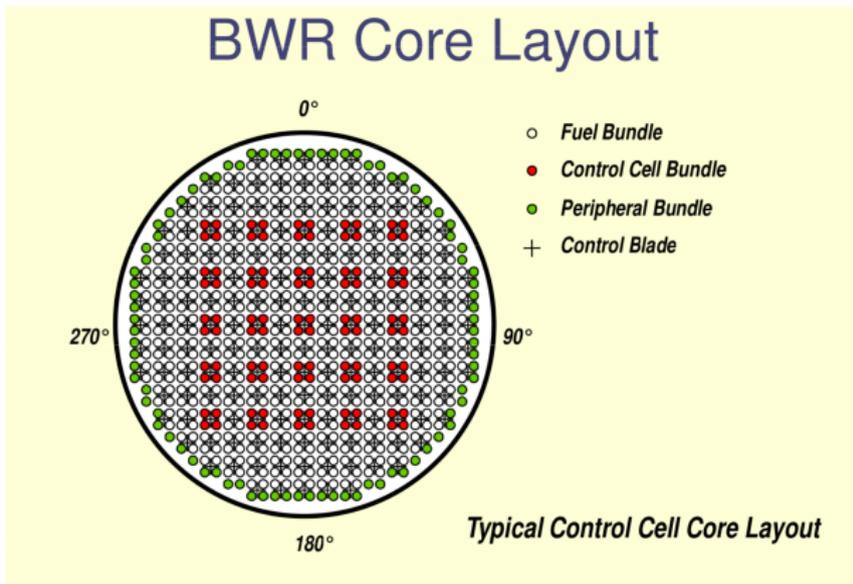
IASCC em BWR



E. A. Kenik, R. H. Jones, G. E. C. Bell "Irradiation – assisted stress corrosion cracking" *J. Nuclear Mater.* 212 – 215 (1994) 52 –

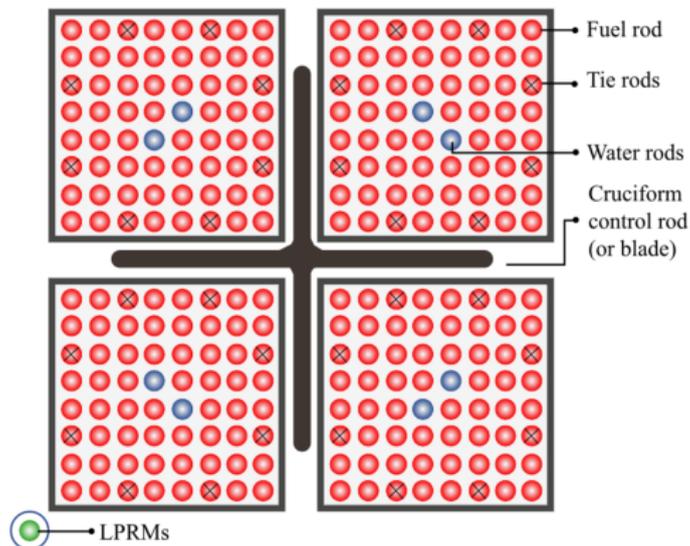
58.

Placa de controle do BWR



J. Buongiorno "BWR description" aula do curso 22.06: "Engineering Nuclear Systems" do MIT, disponível [aqui](#), acesso em 18/11/2020.

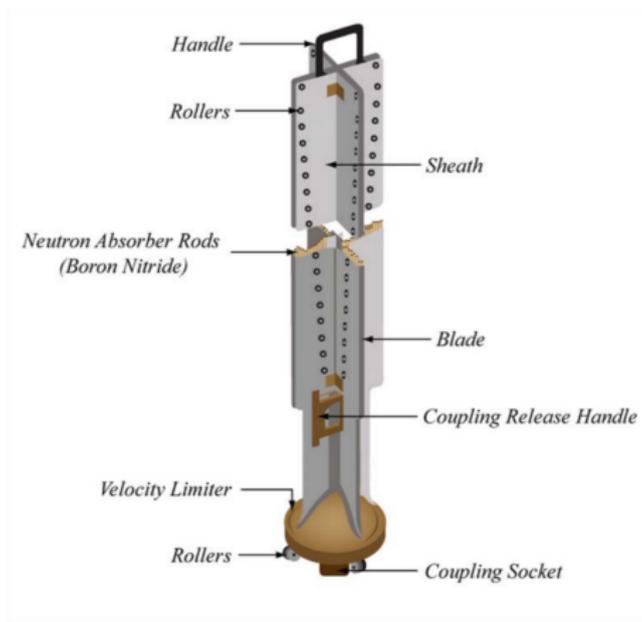
Placa de controle do BWR



2D view of four bundle module, 8 x 8 lattice, with control blade

J. Buongiorno "BWR description" aula do curso 22.06: "Engineering Nuclear Systems" do MIT, disponível [aqui](#), acesso em 18/11/2020.

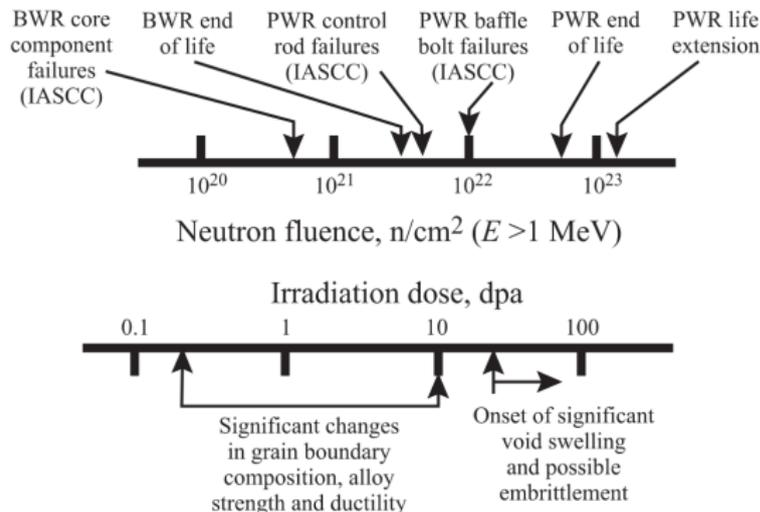
Placa de controle do BWR



J. Buongiorno "BWR description" aula do curso 22.06: "Engineering Nuclear Systems" do MIT, disponível [aqui](#), acesso em 18/11/2020.

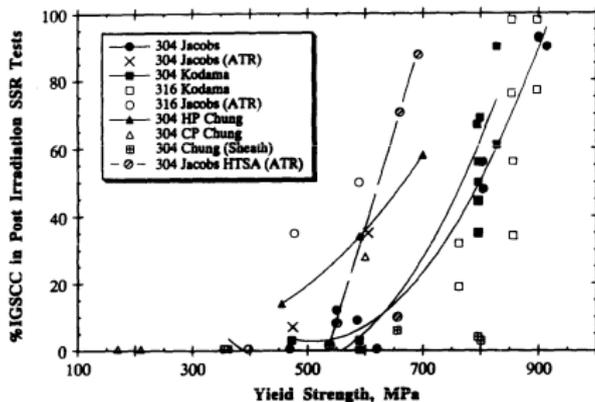
Perspectiva panorâmica das falhas em BWR

Aços inoxidáveis austeníticos em meio contendo água fervente (*Boiling water reactor*, BWR, provavelmente também no reator de vapor supercrítico), sob ação de irradiação por nêutrons.



Perspectiva panorâmica das falhas em BWR

Aços inoxidáveis austeníticos em meio contendo água fervente (*Boiling water reactor*, BWR, provavelmente também no reator de vapor supercrítico), sob ação de irradiação por nêutrons.

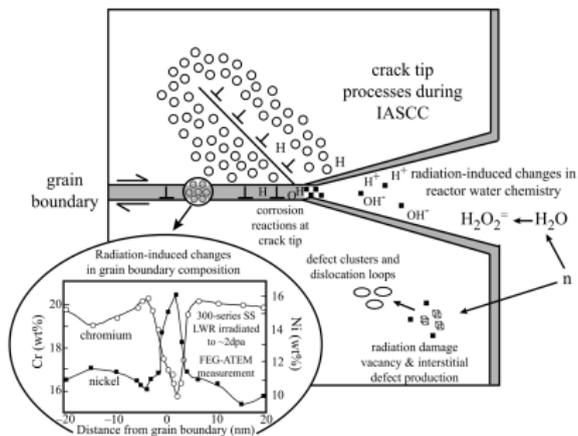


IGSCC = Corrosão-sob-tensão intergranular

E. A. Kenik, R. H. Jones, G. E. C. Bell "Irradiation – assisted stress corrosion cracking" *J. Nuclear Mater.* **212 – 215** (1994) 52 – 58.

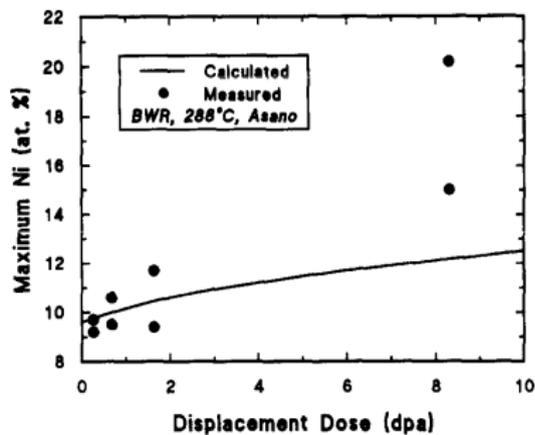
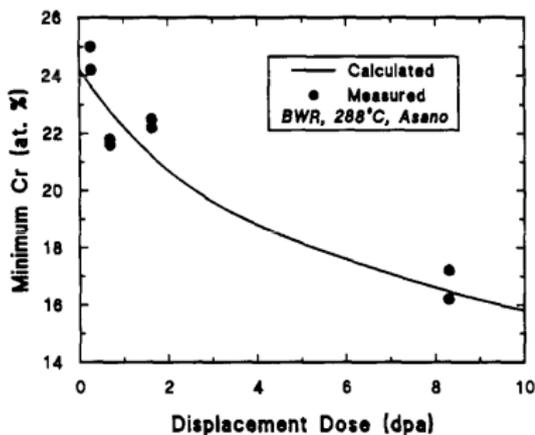
Perspectiva panorâmica das falhas em BWR

Aços inoxidáveis austeníticos em meio contendo água fervente (*Boiling water reactor*, BWR, provavelmente também no reator de vapor supercrítico), sob ação de irradiação por nêutrons.



Perspectiva panorâmica das falhas em BWR

Aços inoxidáveis austeníticos em meio contendo água fervente (*Boiling water reactor*, BWR, provavelmente também no reator de vapor supercrítico), sob ação de irradiação por nêutrons.

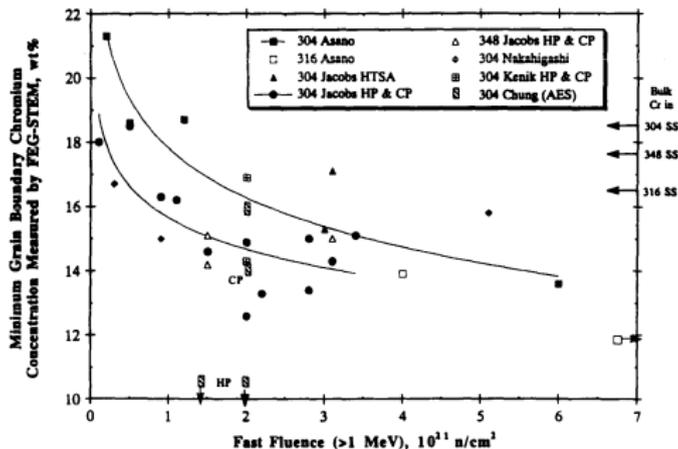


E. A. Kenik, R. H. Jones, G. E. C. Bell "Irradiation – assisted stress corrosion cracking" *J. Nuclear Mater.* **212 – 215** (1994) 52 –

58.

Perspectiva panorâmica das falhas em BWR

Aços inoxidáveis austeníticos em meio contendo água fervente (*Boiling water reactor*, BWR, provavelmente também no reator de vapor supercrítico), sob ação de irradiação por nêutrons.



E. A. Kenik, R. H. Jones, G. E. C. Bell "Irradiation – assisted stress corrosion cracking" *J. Nuclear Mater.* **212 – 215** (1994) 52 –

58.

Eletroquímica da corrosão

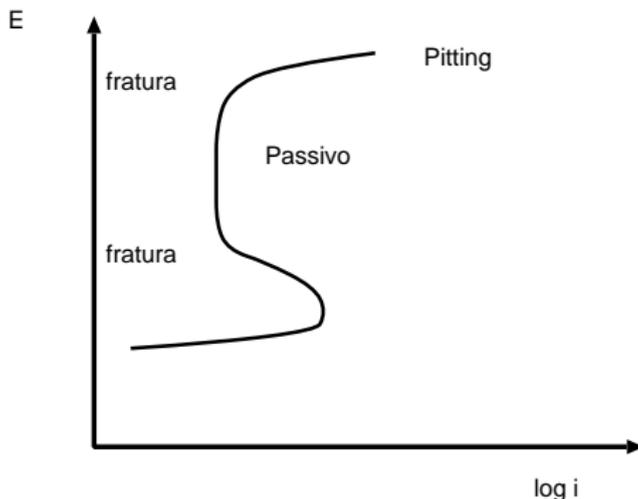
Em meios oxidantes:

$$E - E^0 = -\frac{k_B T}{nF} \ln \left(\frac{a_p}{a_r} \right)$$

onde $F = 96485 \text{ C mol}^{-1}$ é a constante de Faraday

$$\Delta G = nFE$$

Curva de polarização



O campo de tensão na ponta da trinca altera as características eletroquímicas do sistema material + eletrólito.

Irradiação e água

Efeitos da radiação em água:

- Produção de radicais livres: e^- , H^+ , OH^- , O_2H^{-3}
- Produção de moléculas: H_2O_2 , O_2 , H_2

Irradiação e água

Efeitos da radiação em água:

- Produção de radicais livres: e^- , H^+ , OH^- , O_2H^{-3}
- Produção de moléculas: H_2O_2 , O_2 , H_2

Algumas espécies são:

- Oxidantes: e^- , OH^- , H_2O_2 , O_2H^{-3}
- Redutoras: H^+ , H_2

Espécies que tem meia-vida superior a alguns segundos são H_2 e H_2O_2 (com O_2 resultando da decomposição do peróxido de hidrogênio).

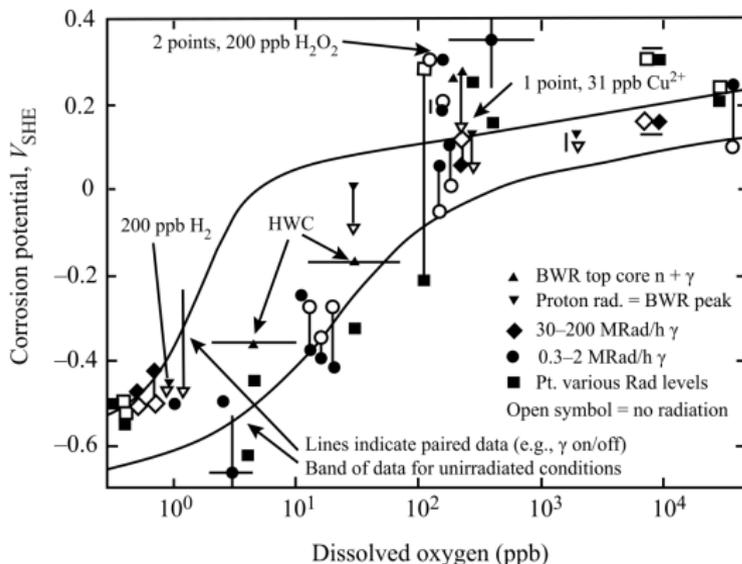
Irradiação e água

No ambiente do BWR

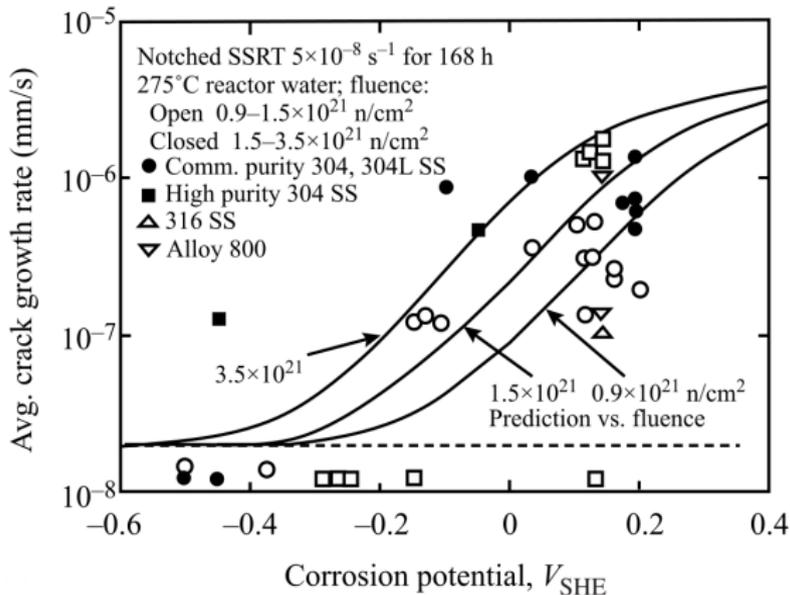
- No BWR a água está em contato com a fase vapor: H_2 particiona para a fase vapor e H_2O_2 particiona para a fase líquida
- O líquido recirculante no BWR é altamente oxidante
- Em LWRs o hidrogênio recombina com o peróxido de hidrogênio e o efeito é pequeno

Potencial de corrosão em experimentos com irradiação

Aço AISI 304 em água a 288 °C



Irradiação e crescimento de trincas

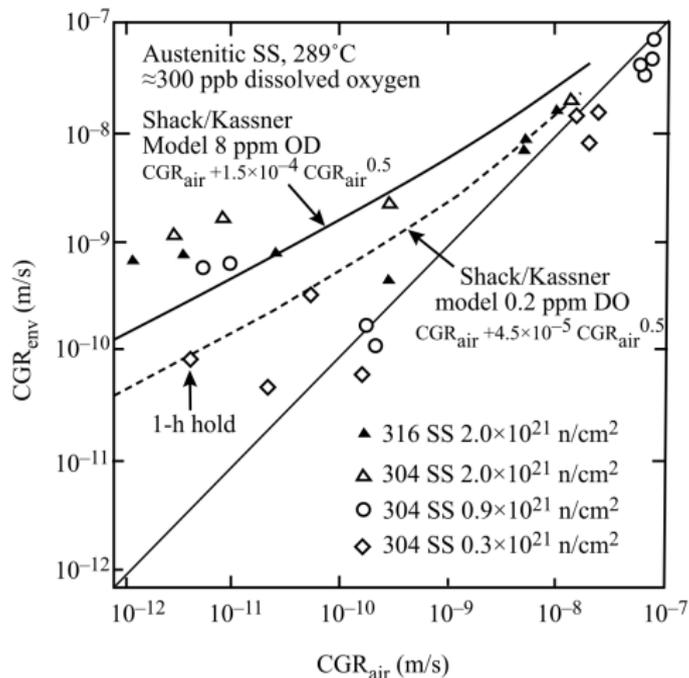


Histórico

- Primeiras observações no início da década de 1960 em revestimentos de bastões combustíveis feitos de aços austeníticos → compreensão da gravidade da observação
- Consciência da importância do fenômeno para futuras falhas em serviço
- Fratura intergranular predominava, com múltiplas trincas nucleadas no lado exposto à água
- Carbonetos não eram observados no CG
- Correlações entre tempo para falha e nível de tensão (fonte: inchamento)
- Não é limitado a qualquer tipo de reator particular (tabela 15.2 do Was)

Taxa de crescimento da trinca

Ensaio de laboratório

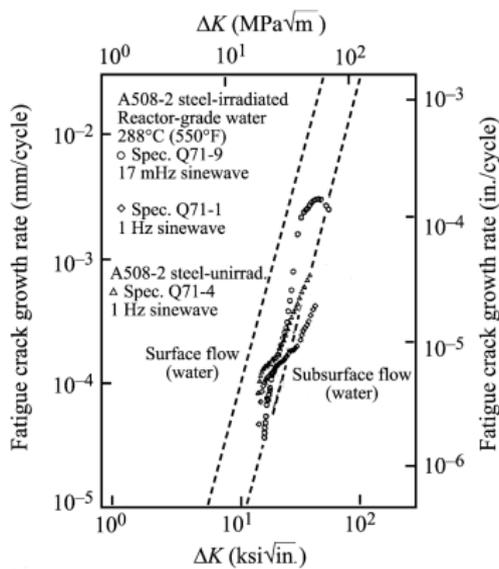


Observações

- Não há um limiar
- Fluência de radiação nem sempre correlaciona
- Inicialmente altas tensões estavam envolvidas, mas o fenômeno já foi observado em tensões e concentrações de tensão baixas
- O potencial de corrosão é fator predominante
- Presença de cloretos e sulfatos também acelera o fenômeno
- Desenhos com cavidades, deformação, temperatura, presença de carbonetos e CG aceleram o fenômeno

Fadiga de aço A533B

Fadiga não é afetada por irradiação, mas é afetada pelo ambiente (efeito secundário da irradiação sobre a água).



Mecanismos

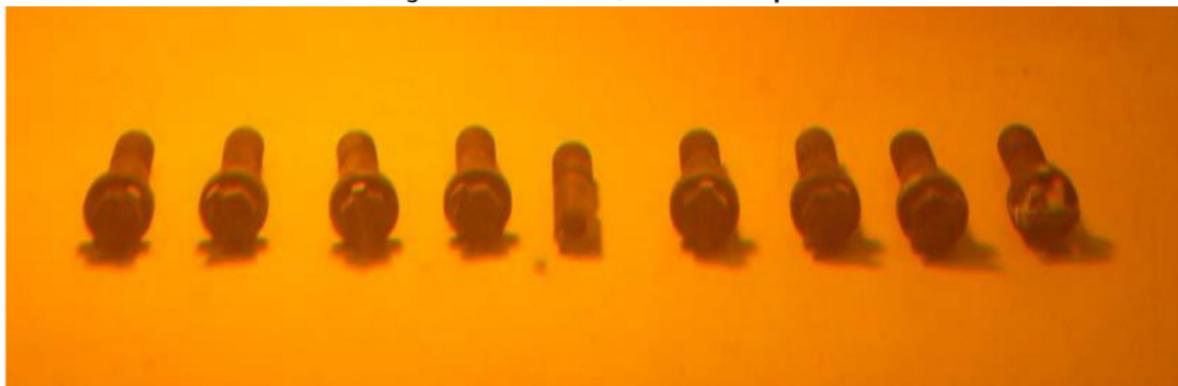
Não há consenso

- Redução do teor de cromo no CG (RIS) (+)
- Endurecimento por irradiação (+)
- Deformação localizada (+)
- Oxidação interna seletiva (+)
- Fluência por irradiação (-)

Estudo de caso

Parafusos da chicana de um reator PWR

Aço AISI 316, célula quente

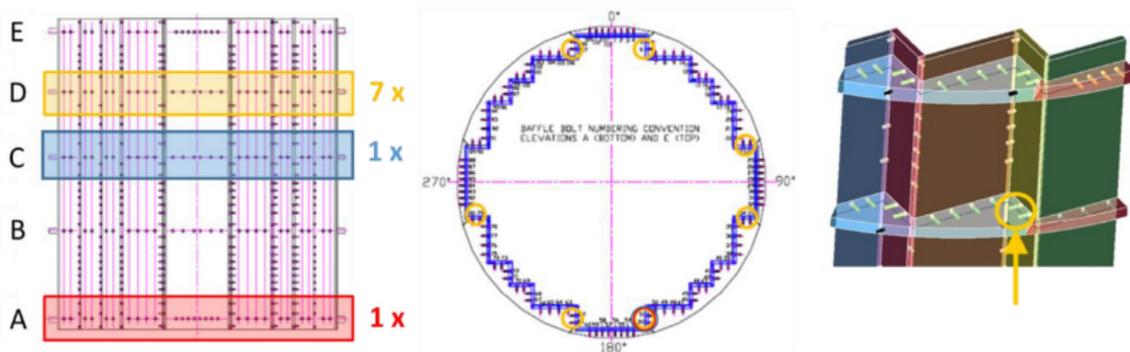


R.-W. Bosch, W. Van Rentherghem, S. Van Dyck, R. Chaouadi, R. Gérard, F. Somville "Microstructures, mechanical properties and IASCC susceptibility of stainless steel baffle bolts after 30 years operation in a PWR" *J. Nuclear Mater.* **543** (2021) 152615.

Estudo de caso

Parafusos da chicana de um reator PWR

Chicana do reator e licalização dos parafusos



R.-W. Bosch, W. Van Rentherghem, S. Van Dyck, R. Chaouadi, R. Gérard, F. Somville "Microstructures, mechanical properties and IASCC susceptibility of stainless steel baffle bolts after 30 years operation in a PWR" *J. Nuclear Mater.* **543** (2021) 152615.

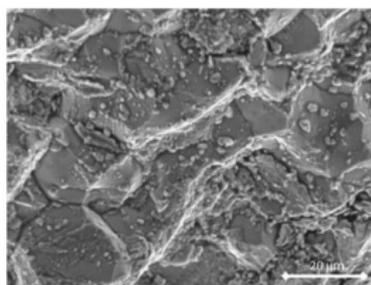
Estudo de caso

Parafusos da chicana de um reator PWR

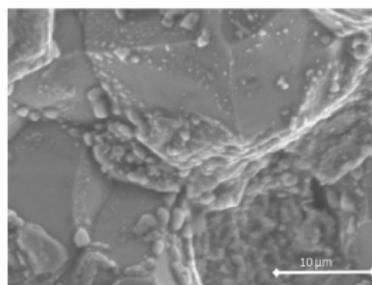
(a) líquido penetrante, (b) e (c) aspectos da fratura



(a)



(b)



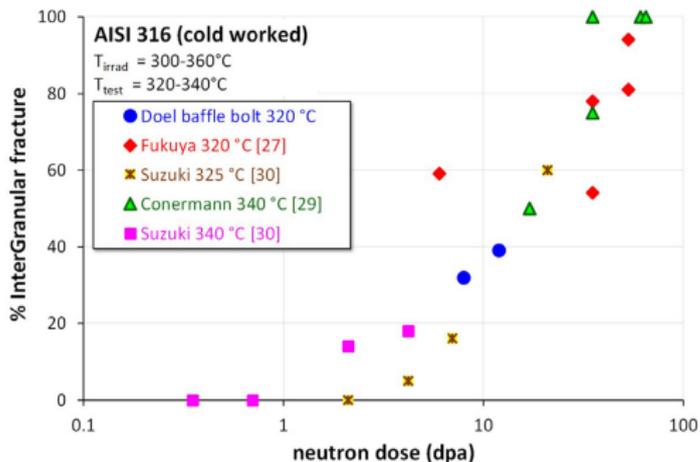
(c)

R.-W. Bosch, W. Van Rentherghem, S. Van Dyck, R. Chaouadi, R. Gérard, F. Somville "Microstructures, mechanical properties and IASCC susceptibility of stainless steel baffle bolts after 30 years operation in a PWR" *J. Nuclear Mater.* **543** (2021) 152615.

Estudo de caso

Parafusos da chicana de um reator PWR

Ensaio de SSRT (*slow strain rate test*)

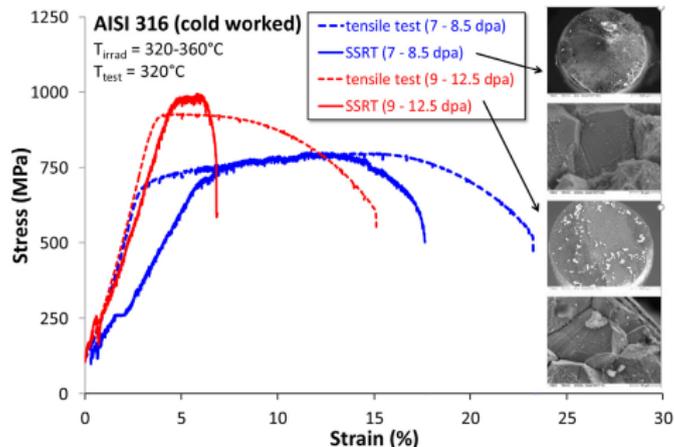


R.-W. Bosch, W. Van Rentherghem, S. Van Dyck, R. Chaouadi, R. Gérard, F. Somville "Microstructures, mechanical properties and IASCC susceptibility of stainless steel baffle bolts after 30 years operation in a PWR" *J. Nuclear Mater.* **543** (2021) 152615.

Estudo de caso

Parafusos da chicana de um reator PWR

Ensaio de SSRT (*slow strain rate test*)

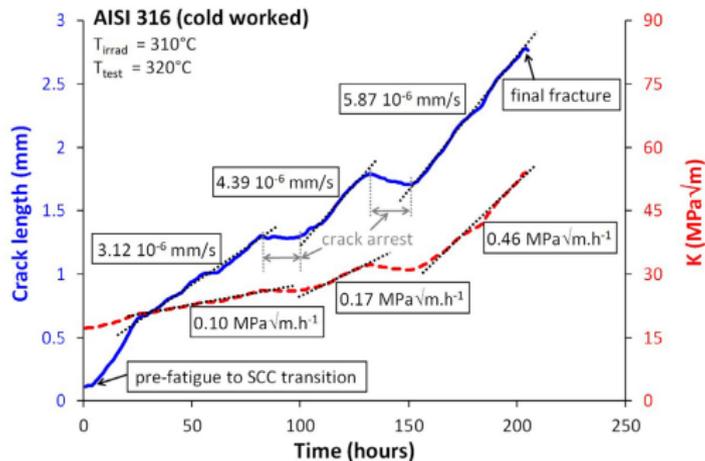


R.-W. Bosch, W. Van Rentherghem, S. Van Dyck, R. Chaouadi, R. Gérard, F. Somville "Microstructures, mechanical properties and IASCC susceptibility of stainless steel baffle bolts after 30 years operation in a PWR" *J. Nuclear Mater.* **543** (2021) 152615.

Estudo de caso

Parafusos da chicana de um reator PWR

Ensaio de crescimento de trinca (CGR)

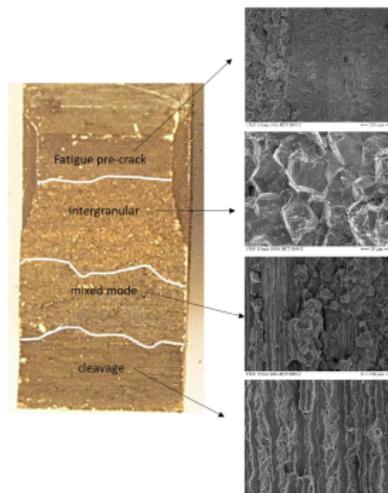


R.-W. Bosch, W. Van Rentherghem, S. Van Dyck, R. Chaouadi, R. Gérard, F. Somville "Microstructures, mechanical properties and IASCC susceptibility of stainless steel baffle bolts after 30 years operation in a PWR" *J. Nuclear Mater.* **543** (2021) 152615.

Estudo de caso

Parafusos da chicana de um reator PWR

Ensaio de crescimento de trinca (CGR)



R.-W. Bosch, W. Van Rentherghem, S. Van Dyck, R. Chaouadi, R. Gérard, F. Somville "Microstructures, mechanical properties and IASCC susceptibility of stainless steel baffle bolts after 30 years operation in a PWR" *J. Nuclear Mater.* **543** (2021) 152615.

Fim da primeira parte

Sódio como líquido refrigerante

Vantagens:

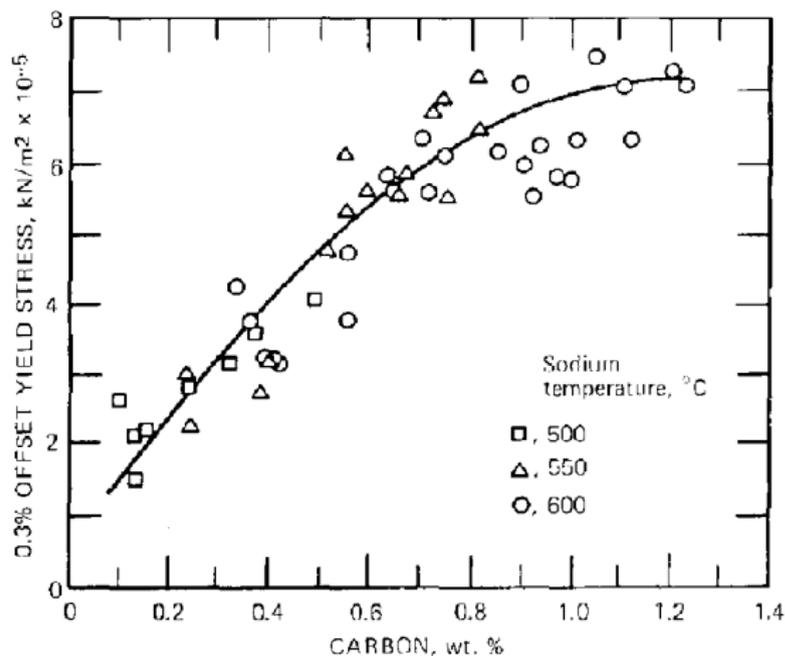
- 1 Baixa pressão de vapor → vaso de pressão menos robustos
- 2 Alta capacidade térmica → menor gradiente entre temperatura de entrada (470 °C) e de saída (650 °C)
- 3 Alta condutividade térmica muito alta → gradiente menor entre refrigerante e cladding
- 4 Ponto de ebulição elevado → não há limitação de potência
- 5 Massa atômica relativamente elevada → reduz moderação de nêutrons (interessante em reatores rápidos)
- 6 Líquido monoatômico → não há dano por irradiação
- 7 Sódio é o metal alcalino mais barato

Problemas associados ao sódio

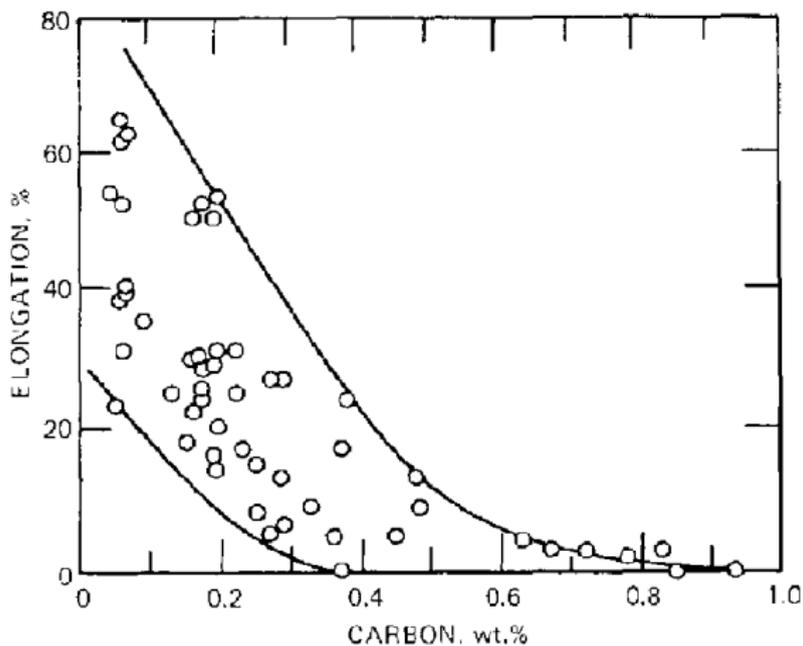
Alta reatividade e ativação neutrônica.

- Corrosão generalizada
- Lixiviação → corrosão preferencial de Ni e Cr
- Redeposição de metais dissolvidos
- Transporte de radioatividade → ^{54}Mn e ^{56}Co (produzidos por captura de n,p em Fe e Ni) e ^{60}Co (produzido por captura de nêutrons em residuais de Co) são depositados nos produtos de corrosão
- Transporte de carbono → reduz a resistência do aço
- Controle químico do sódio → Oxigênio e Hidrogênio (em ppm)
- Interação com o combustível → no caso de acidentes

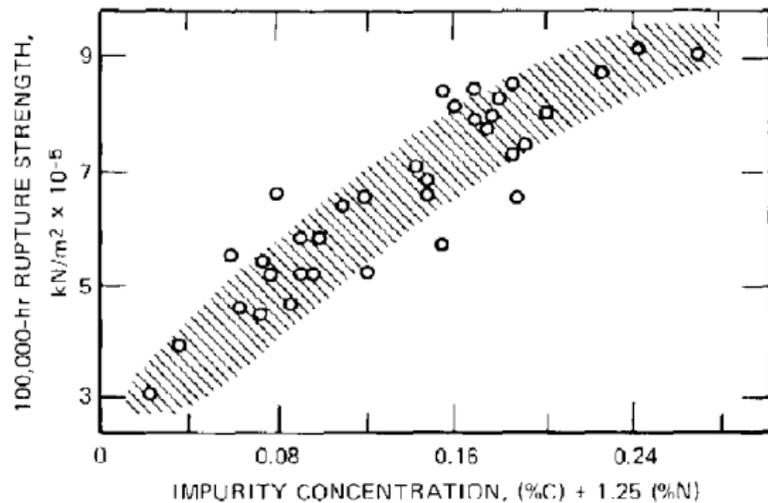
Carburização e descarburização



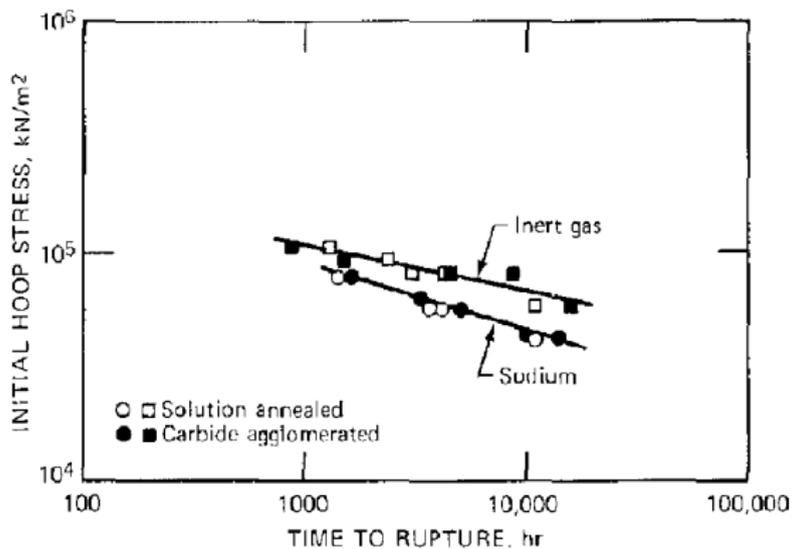
Carburização e descarburização



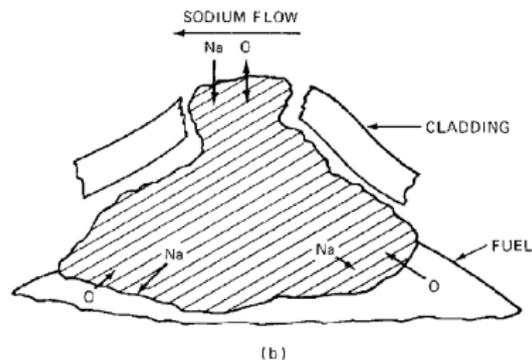
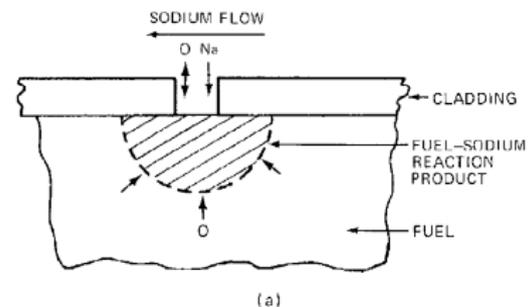
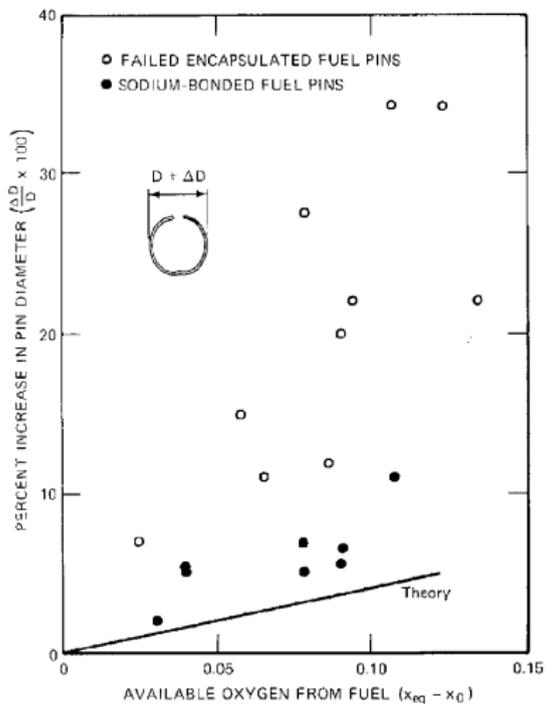
Fluência



Fluência



Interação com o combustível



Síntese

- Irradiação → dano (dpa ou fluxo)

Síntese

- Irradiação → dano (dpa ou fluxo)
- Dano (cascata) → defeitos (lacunas + intersticiais) → Difusão

Síntese

- Irradiação → dano (dpa ou fluxo)
- Dano (cascata) → defeitos (lacunas + intersticiais) → Difusão
- Defeitos → microestrutura (anéis, cavidades, bolhas, precipitados – dissolução ou precipitação

Síntese

- Irradiação → dano (dpa ou fluxo)
- Dano (cascata) → defeitos (lacunas + intersticiais) → Difusão
- Defeitos → microestrutura (anéis, cavidades, bolhas, precipitados – dissolução ou precipitação)
- Microestrutura → comportamento mecânico (resistência, ductilidade, fluência, fadiga)

Síntese

- Irradiação → dano (dpa ou fluxo)
- Dano (cascata) → defeitos (lacunas + intersticiais) → Difusão
- Defeitos → microestrutura (anéis, cavidades, bolhas, precipitados – dissolução ou precipitação)
- Microestrutura → comportamento mecânico (resistência, ductilidade, fluência, fadiga)
- Microestrutura → estabilidade dimensional (inchamento, fluência)

Síntese

- Irradiação → dano (dpa ou fluxo)
- Dano (cascata) → defeitos (lacunas + intersticiais) → Difusão
- Defeitos → microestrutura (anéis, cavidades, bolhas, precipitados – dissolução ou precipitação)
- Microestrutura → comportamento mecânico (resistência, ductilidade, fluência, fadiga)
- Microestrutura → estabilidade dimensional (inchamento, fluência)
- Microestrutura + ambiente do reator → IASCC, outros processos de degradação química

Síntese

- Irradiação → dano (dpa ou fluxo)
- Dano (cascata) → defeitos (lacunas + intersticiais) → Difusão
- Defeitos → microestrutura (anéis, cavidades, bolhas, precipitados – dissolução ou precipitação)
- Microestrutura → comportamento mecânico (resistência, ductilidade, fluência, fadiga)
- Microestrutura → estabilidade dimensional (inchamento, fluência)
- Microestrutura + ambiente do reator → IASCC, outros processos de degradação química
- Comportamento mecânico + estabilidade dimensional + degradação química → falha (previsão de vida)