



12^a Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos

COTEQ2013 - 258

**PROPOSTA DE TRANSFERÊNCIA DE METODOLOGIA DE MODELAGEM DE
CORROSÃO SOB TENSÃO DA INDÚSTRIA NUCLEAR PARA OUTRAS INDÚSTRIAS**

Omar F. Aly¹, Miguel M. Neto², Mônica M.A.M.Schwartzman³

Copyright 2013, ABENDI, ABRACO e IBP.

Trabalho apresentado durante a 12^a Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

SINOPSE

A corrosão sob tensão é um modo de degradação de vida e integridade de equipamentos e componentes (como vasos de pressão, conexões e tubos) de usinas nucleares, da indústria petroquímica, de geração de energia e outras, de complexa previsão no tempo, devido ao grande número de variáveis das quais depende. Em função disso os modelos matemáticos devem ser aplicados com critérios baseados nessas variáveis através do discernimento dos mecanismos preponderantes em cada caso de corrosão sob tensão. O trabalho propõe uma transferência de metodologia desenvolvida na área nuclear da modelagem de falhas de corrosão sob tensão em componentes de ligas de níquel de reatores nucleares em água de circuito a alta temperatura, para indústrias em geral. Essa consiste na avaliação da susceptibilidade à corrosão sob tensão de um determinado material num determinado meio por meio de ensaios de corpos de prova que representem essa condição em taxa de deformação lenta ou carga constante; estudo do material-meio no diagrama Potencial *versus* pH marcado com submodos de corrosão; investigação dos mecanismos predominantes na corrosão sob tensão; escolha de um modelo que melhor represente esse mecanismo; validação do modelo com base nos dados experimentais; comparação com casos existentes na literatura, discussão da aplicação e sugestões para sua expansão para alguns casos da indústria.

1 Pesquisador, Doutor em Ciências, Engenheiro Mecânico – IPEN/CNEN-USP

2 Pesquisador, Engenheiro Civil – IPEN/CNEN-USP

3 Pesquisadora, Engenheira Química – CDTN/CNEN-UFMG

1. INTRODUÇÃO

A corrosão sob tensão é um modo de degradação de vida e integridade de equipamentos e componentes (como vasos de pressão, conexões e tubos) de usinas nucleares, da indústria petroquímica, de geração de energia e outras, de complexa previsão no tempo, devido ao grande número de variáveis das quais depende: microestruturais (microquímica do contorno de grão, tratamento térmico, tamanho de grão, trabalho a frio e deformação plástica), mecânicas (tensão residual, tensão aplicada, deformação e taxa de deformação), ambientais (temperatura, pH, composição química do meio, pressão parcial de hidrogênio, potencial eletroquímico). Essas variáveis definem as condições necessárias para a ocorrência e a cinética da trinca (nas fases de iniciação e propagação) através da taxa de dissolução proporcional à densidade de corrente anódica combinada com a ação mecânica da tensão e deformação. Em função disso os modelos matemáticos devem ser aplicados com critérios baseados nessas variáveis através do discernimento dos mecanismos preponderantes em cada caso de corrosão sob tensão.

O objetivo desse trabalho é propor a transferência de metodologia desenvolvida na área nuclear da modelagem de falhas de corrosão sob tensão em componentes de ligas de níquel de reatores nucleares em água de circuito a alta temperatura, para indústrias em geral (como petroquímicas, energia, fabricantes de vasos de pressão, fabricantes de estruturas, entre outros). Essa metodologia consiste basicamente na avaliação da susceptibilidade à corrosão sob tensão de um determinado material num determinado meio por meio de ensaios de corpos de prova que representem essa condição em “Slow Strain Rate Test” (Ensaio de Taxa de Deformação Lenta) e/ou Carga Constante; estudo do material-meio no diagrama de Pourbaix (Potencial vs. pH) marcado com sub-modos de corrosão; investigação dos mecanismos predominantes na corrosão sob tensão (exemplos: deslizamento das camadas sub-superficiais e ruptura do filme passivo, efeito da fluência na ponta da trinca, mecanismo de oxidação interna, ação interna do hidrogênio, fragilização por hidrogênio, etc.); escolha de um modelo que melhor represente esse mecanismo; validação do modelo com base nos dados experimentais; comparação com casos existentes na literatura e discussão da aplicação. Será ilustrada com casos onde foi utilizada na área nuclear e sugerida como exemplos a sua expansão para alguns casos mais conhecidos da indústria em geral.

A metodologia proposta tem sido desenvolvida desde a Tese (1), tendo sido objeto de vários artigos de publicação de resultados e investigativos, como as referências (2), (3), (4), (5), (6), (7), entre outras, até a mais recente publicação em uma revista norte-americana de discussão de patentes (8) em que foi proposta como concepção de um aplicativo abrangente para a modelagem de corrosão sob tensão.

2. METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta compreende as seguintes etapas:

1-Alimentação de dados de um determinado material testado como corpo de prova: composição química, tratamento termomecânico, características mecânicas;

2-Alimentação de dados do meio de teste: composição química, pH, hidrogênio dissolvido, oxigênio dissolvido, temperatura. As etapas 1 e 2 devem ser feitas da forma mais rigorosa possível, pois pequenas variações nesses parâmetros podem causar resultados de ensaios muito diferentes, com espalhamento (“scattering”) dos resultados;

3-Escolha da metodologia de ensaio: as principais são SSRT, “Slow Strain Rate Test” ou Ensaio de Taxa de Deformação Lenta e CL, “Constant Load” ou Carga Constante. O SSRT é um ensaio padronizado acelerado em relação ao CL e por isso pode dar resultados diferentes. O ideal seria o CL, que normalmente reproduz as condições mais próximas às de operação, mas esse pode ser bastante lento, demorando milhares de horas e portanto custoso; já o SSRT, cujos resultados são em geral em algumas centenas de horas, tem a vantagem de indicar mais rapidamente a susceptibilidade de materiais à corrosão sob tensão (CST) e pode ser considerada uma metodologia semi-quantitativa de avaliação: por exemplo, na Tese (9) esse ensaio foi utilizado de modo a gerar resultados que processados resultaram numa estimativa de taxas de propagação de trincas por CST;

4-Escolha de um diagrama de Pourbaix (Potencial *versus* pH) adequado representando o sistema material-meio na temperatura de ensaio;

5-Sobreposição de submodos nesse diagrama de acordo com dados da literatura ou dados experimentais; as etapas 3 e 4 estão ilustradas na Figura 1: no diagrama (a) de potencial referenciado ao eletrodo padrão de hidrogênio (EPH) *versus* pH a 300 °C, são mostrados os submodos marcados sobre o mesmo, provenientes da literatura (10) e no diagrama (b) o ponto P acrescentado ao diagrama como ponto susceptível à CST de acordo com as estimativas dos ensaios realizados em (1): os submodos delimitam os principais modos de susceptibilidade a diversos tipos de corrosão e também as regiões de passividade do material para o meio e a temperatura em questão. Na Figura 1(a) os submodos I_{cst} , II_{cst} , III_{cst} , IV_{cst} , e V_{cst} , são diferentes regiões de susceptibilidade à corrosão sob tensão; II_{gen} , região de corrosão generalizada, I_{pas} , região de passividade e I_{igc} , região de corrosão intergranular.

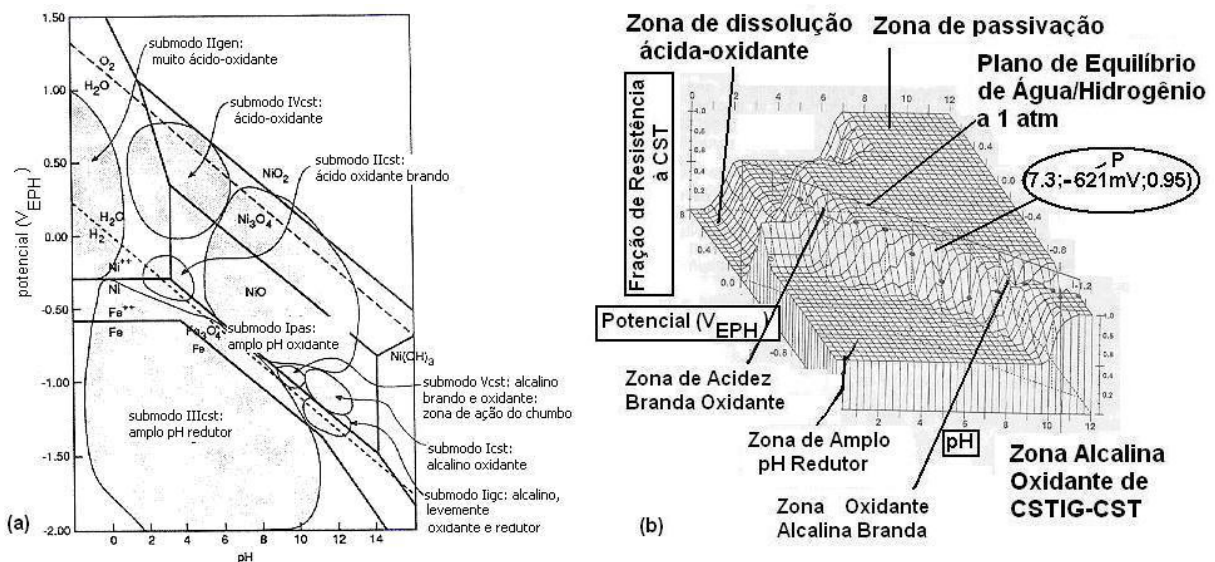


Figura 1. (a) Diagrama V_{EPH} *versus* pH marcado com os submodos encontrados na literatura (10); (b) Diagrama tridimensional tendo por base o diagrama V_{EPH} *versus* pH e ordenada a fração de resistência à CST: nele foi plotado o ponto obtido em experimento P: fração de resistência à CST ≈ 0.95 ; $V = -621mV$; $pH = 7.3$. (1).

6-Entrada de dados resultantes dos experimentos (tempo de iniciação de trincas, taxa de propagação de trincas ou outros): esses podem ser inseridos num diagrama do tipo da Figura

1(b) em que “fração de resistência à CST” é substituída por “tempo de iniciação” ou “taxa de propagação” ou outro parâmetro a ser modelado;

7-Escolha de um modelo adequado para ajustar os dados experimentais;

8-Avaliação da qualidade da regressão do item 7, considerando desvios estatísticos e avaliação de espalhamento de dados (“scattering”);

9-Comparação com outras modelagens extraídas da literatura publicada;

10-Obtenção de uma modelagem abrangente de CST incluindo a susceptibilidade e a cinética da fratura de determinada combinação de material-meio de ensaio.

No artigo publicado no 11º COTEQ (5), se detalha e se dá exemplo de aplicação dessa metodologia.

3. MODELOS DE CORROSÃO SOB TENSÃO

Esse item já foi anteriormente detalhado na Seção 3 de (5). Algumas considerações gerais, no entanto, deverão ser novamente abordadas para situar o desenvolvimento deste artigo.

A iniciação e a propagação de CST são processos muito complexos e a CST é uma modalidade de fratura assistida pelo ambiente, ao lado de corrosão sob fadiga e fragilização por hidrogênio: depende de vários parâmetros que geralmente são classificados em microestruturais, mecânicos e ambientais. Os parâmetros microestruturais são: (a) Microquímica do contorno de grão incluindo os precipitados (por exemplo, carbonetos metálicos); (b) tratamento térmico que pode causar deposição desses carbonetos em intragranulares ou intergranulares; (c) tamanho de grão e trabalho a frio ou deformação plástica que fixam o limite de escoamento. Os parâmetros mecânicos são: (d) tensão residual; (e) tensão aplicada – as tensões e a geometria podem ser expressas como o fator de intensidade de tensão; (f) deformação e taxa de deformação. Os parâmetros ambientais são: (g) temperatura; (h) atividade do cátion $[H]^+$ ou pH; (i) química da solução-meio; (j) inibidores ou poluentes em solução; (k) potencial eletroquímico; (l) pressão parcial de hidrogênio (11).

Há vários mecanismos pelos quais as variações desses parâmetros podem levar à corrosão sob tensão: dissolução e ruptura do filme de óxido passivo na interface material-meio, processo de pite e/ou corrosão por frestas iniciando a corrosão sob tensão, enfraquecimento de contornos de grãos por diversas causas como o efeito da fluência, fragilização por hidrogênio, ação do oxigênio, entre outras. Existem equações que exprimem matematicamente esses processos, como: o modelo de deslizamento das camadas sub-superficiais e ruptura do filme passivo, o modelo de mobilidade acelerada na superfície, modelos de ação da fluência, o modelo de fratura acoplada ao ambiente, o modelo por mecanismo de oxidação interna, modelos numéricos e outros semi-empíricos (1), (11).

Os modelos mais utilizados no conjunto bibliográfico dos casos de estudo que abordamos (corrosão sob tensão em ligas de níquel em água do circuito primário em alta temperatura de reatores nucleares do tipo PWR e em aços inoxidáveis em água do circuito de reatores BWR, nas referências (1) a (8)) são o modelo de dissolução por deslizamento/ruptura do filme passivo para o caso de propagação de trinca de CST (sendo o modelo de oxidação interna um

forte concorrente e complementar desse) e o modelo semi-empírico/numérico para iniciação de CST. Para quantificar a ação do hidrogênio são muito práticos os modelos numéricos do EPRI (2), (12).

4. SUGESTÕES DE EXPANSÃO PARA OUTRAS INDÚSTRIAS

Embora a metodologia utilizada para modelagem tenha se baseado em casos da indústria nuclear, a corrosão sob tensão pode atingir praticamente todas as indústrias em que existam materiais que interajam com diversos meios e em que esses estejam submetidos a tensões de tração. Entre as mais susceptíveis estão as indústrias petroquímicas e de energia, em que há grande número e tipos de equipamentos, bem como os meios em que operam são muito diversos: vasos de pressão, caldeiras, tubulações e seus acessórios, são componentes em que pode se manifestar esse tipo de fratura, que ocorre muitas vezes de maneira súbita, imprevisível. Por isso é importante que os gestores dessas indústrias fiquem atentos a esse tipo de problema e lancem mãos de todos os meios conhecidos para sua prevenção, a despeito da complexidade e dificuldade de predição desse tipo de falha. A referência (13) proporciona uma abrangente introdução dos possíveis e diversos mecanismos e modelos que regem diferentes casos de corrosão sob tensão na indústria.

Na Tabela 1 foi feita uma seleção de alguns casos mais relevantes de corrosão sob tensão na indústria, com possíveis mecanismos de danos. A determinação desses mecanismos é fundamental para que se escolham modelos adequados que possam prever essas falhas. Quando não se tem esses modelos, devem ser utilizados modelos numéricos e/ou empíricos cujos resultados podem ser restritos ou discutíveis. Para elaborar essa Tabela, utilizamos uma ferramenta que julgamos poderosa, o “Google Alerts”: entrando com uma expressão do assunto a ser pesquisado, essa ferramenta avisa o interessado via e-mail de novidades sobre o assunto em tempo real; naturalmente há restrições, pois são somente os assuntos que foram colocados em rede (nem toda informação e bibliografia estão em rede), além de publicidade, oferta de serviços e outras informações sem utilidade. Por isso é necessária uma seleção e possíveis complementações das informações pelo usuário.

Tabela 1. Materiais-Meios *versus* Aplicações *versus* Modelos de CST

Aplicações	Materiais	Meios	Modelos de CST	Observações
Petróleo & Gás: Gasodutos	Aços ferríticos	Soluções de carbonato & bicarbonato	Deslizamento- ruptura do filme	Referência (13)
Petroquímicas, Energia: Trocadores de Calor, etc.	Latão- α	Amônia	Clivagem induzida pelo filme	Referência (13)
Indústria Civil, Estruturas	Aços de Alta Resistência	Meios Aquosos com H ₂ S	Fragilização por Hidrogênio	Referência (13)
Indústrias Aeroespacial e Automotiva	Ligas 7000 de Alumínio de Alta Resistência: Ligas (CFC) de Al-Zn-Mg-Cu		Fragilização por Hidrogênio	Referência (13)

Tabela 1 (continuação). Materiais-Meios *versus* Aplicações *versus* Modelos de CST

Aplicações	Materiais	Meios	Modelos de CST	Observações
Geradores de Vapor/Caldeiras	Coletor de Alta Pressão (“Header”) de Aço AP234 WPB	Meios úmido/vapor , T=420 °C e P= 40bar	Fragilização por Hidrogênio	Referência (14)
Vasos de Pressão	Aço A516	Meio- água destilada saturada com 25% CO e 75% CO ₂ T=40 a 60 °C	Fragilização por Monóxido de Carbono	Referência (15)
Geradores de Vapor/Caldeiras em Condição Supercrítica	Ligas de Ni baixo cromo LCr	Meio de água supercrítica (SCW) T=400°C e P= 25 MPa, H ₂ dissolvido=47 e 200 cm ³ /kg.	Estudos experimentais para investigar o modelo de oxidação interna na CST (intergranular).	Referência (16)
Refinaria Petroquímica- Unidade de Alquilação	Tubulação de Monel 400	HF + oxigênio + umidade (H ₂ O)	CST transgranular na ZTA da solda da flange com o tubo. Iniciação após 9 anos. Mecanismo a investigar.	Referência (17)
Tanques de Etanol e Metanol	Aço Carbono	Meio alcoólico	CST em diversas partes de tanques como fundo, base, soldas e tubulações associadas. Iniciação por pite.	Referência (18)
Componentes eletrônicos	Latão 70-30 com proteção de revestimentos compósitos de Ni-P com nano-partículas de TiO ₂	Solução de fluoreto	Falha é inibida por barreira formada pelo Ni-P+nano-TiO ₂ contra discordâncias em movimento no material base que provocam CST.	Referência (19)

Tabela 1 (continuação). Materiais-Meios *versus* Aplicações *versus* Modelos de CST

Plataformas marítimas e equipamentos correlatos (aplicações nos projetos do Pré-Sal)	Soldas em aços de Baixa Liga de Alta Resistência (HSLA) para aplicações marítimas	Água do Mar a 5°C com diferentes teores de oxigênio dissolvido.	Iniciação por pites e dissolução anódica com diferentes teores de oxigênio e ação do hidrogênio.	Referência (20)
Indústrias de energia e petroquímicas: turbinas a vapor	Aços para forjamento de rodas de turbinas a vapor: 3NiCrMoV	Água pura aerada, água pura desaerada e água com cloreto aerada	Iniciação e evolução de pites para trinca de CST: proposto um modelo admitindo uma distribuição inicial de Weibull para pites, uma equação diferencial para a evolução da distribuição de profundidades de pites, uma equação determinística para a velocidade de crescimento de pites e um critério de transição pite-trinca de CST.	Referência (21)
Linha de metrô North East Line em Singapura- incidente em agosto de 2012	Parafusos “U-bolt” Para fixação do trilho de potência	Ação de cloraminas, cloretos e amônia- o incidente está em investigação com relatório final previsto para 2014.	Em investigação.	Referência (22)
Indústria Petroquímica-	Reatores/vasos de aços inoxidáveis austeníticos	Ação de cloretos provoca a denominada CLSCC- “Cloride Stress Corrosion Cracking”.	Vários mecanismos de iniciação como pites, corrosão por frestas.	Referência (23)

Deve-se notar na Tabela 1 que há casos em que os mecanismos de CST são identificados, casos em que esses mecanismos são supostos e casos em que há necessidade de mais estudos e pesquisa para a sua adequada identificação.

5. COMENTÁRIOS

A Tabela 1 que foi proposta pode ser estendida indefinidamente, com uso de uma poderosa ferramenta de informação e pesquisa que é o “Google Alerts”; além disso, ela abre a perspectiva de aplicação a casos de corrosão sob tensão na indústria. Cada caso é um caso diferente, visto que a CST se comporta de forma muito diferente em cada caso. Portanto, cada caso a ser estudado deve ser um projeto de pesquisa singular. No Brasil há alguns grupos de pesquisadores em instituições públicas e privadas que estudam a CST em materiais e condições específicas, como o CDTN- ver por exemplo, a referência (5), o Cenpes- Petrobras, a Coppe-RJ, o ITA-SP, entre outros. As indústrias podem se beneficiar da transferência de tecnologia proveniente desses pesquisadores para seus materiais específicos, permitindo uma melhoria da qualidade de suas aplicações específicas e evitando riscos de que seus materiais estejam envolvidos em falhas súbitas ou imprevistas em operação. Do ponto de vista histórico, a corrosão sob tensão já produziu estragos consideráveis. Vamos citar três deles: a) Colapso da Silver Bridge em dezembro de 1967, quando um olhal de suspensão da ponte sobre o rio Ohio em Point Pleasant, West Virginia, EUA (mesmo projeto da ponte Hercílio Luz em Florianópolis-SC), sofreu uma falha súbita: toda a estrutura caiu no rio matando 46 pessoas nos veículos que estavam sobre a ponte. A corrosão sob tensão no olhal, feito de aço carbono estrutural, foi iniciada por ferrugem e ainda com efeito das altas tensões mecânicas e da baixa temperatura (24); b) Acidente catastrófico em turbina a vapor da usina nuclear Hinkley Point Power Station, Inglaterra em 1969: houve ruptura de disco de rotor de baixa pressão devido a fratura frágil de corrosão sob tensão quando a turbina girava a 3200 rpm, causando destruição da máquina e lançamento de fragmentos na casa de máquinas e que poderiam ter atingido 6 operadores nas proximidades. Houve enorme prejuízo material com destruição da máquina e lucros cessantes por impedimento de operação (25); c) Acidente em Flixborough, Inglaterra em 1974, devido a uma falha num reator de oxidação de ciclohexano construído em aço doce que operava com água de resfriamento contaminada com nitratos. Isso causou corrosão por frestas que iniciou trincas de corrosão sob tensão após a ruptura do filme de óxido protetor do aço: causou 28 mortes, muitos feridos e grande prejuízo material (26). Caso o aplicativo proposto em (8) tenha condições de ser desenvolvido, ele poderá através de uma base de conhecimento armazenar casos distintos de corrosão sob tensão bem como seus modelos aplicáveis.

5.1. Sobre Simulação de Corrosão Sob Tensão

A simulação dos mecanismos de corrosão sob tensão sempre foi desejável para modelar *pari passu* esse fenômeno complexo do mundo real. O autor da referência (27) propôs um desenvolvimento de aplicativo semelhante ao Método dos Elementos Finitos. O próprio autor e sua equipe (28) desenvolveram um código para modelagem baseado no método proposto e utilizando parcialmente aplicativos da Comsol. McDonald e equipe (29) propuseram um modelo aperfeiçoado de iniciação por pites (DFA-Damage Function Analysis, Point Defect Model-PDM, Coupled Environment Pitting Model-CEPM) e crescimento de trincas por CST intergranular (DAMAGE-PREDICTOR, MPM-Mixed Potential Model, ALERT, RADIOCHEM, DAMAGE-MANAGER), integrados ao módulo tradicional CEFM - Coupled Environment Fracture Model, permitindo além da modelagem da CST intergranular, a modelagem de ações de mitigação (catalisadores, revestimentos de metais nobres). Smith (30) do laboratório norte-americano Bechtel Bettis propôs um programa de simulação de CST intergranular através do mecanismo de fragilização por hidrogênio: esse parece ser o preferido para nosso caso de estudo desenvolvido no IPEN com dados do CDTN. Infelizmente parece

que a maioria desses programas não está disponível comercialmente, daí a necessidade de desenvolvê-los. Simulação de corrosão sob tensão é um tema de desenvolvimento de tecnologia de ponta e há grandes laboratórios nos EUA, como o MIT e o ANL (Figura 2) que estão desenvolvendo pesquisas no assunto. Nesse último estão se desenvolvendo estudos utilizando supercomputador (denominado MIRA) e Simulação de Corrosão Sob Tensão em Petaescala: a Simulação MD (“Molecular Dynamics”) utiliza bilhões de átomos, para simular a influência do colapso de nano bolhas em materiais, usando supercomputador em petaescala (31). O supercomputador em petaescala permite o processamento de 10^{15} pontos flutuantes por segundo, sendo ponto flutuante um número com representação em base binária em notação científica= Mantissa x 2^{Expoente} . A simulação está revelando os mecanismos atômicos que controlam a CST em reatores nucleares e permitirá desenvolver novas tecnologias para inibir esse modo de degradação. Essas tecnologias poderão ser utilizadas na nova geração de reatores nucleares e de recipientes de lixo nuclear. A simulação demonstra os complexos processos eletroquímicos que levam à degradação das ligas de níquel e vidro de sílica. E como pequenas quantidades de impureza nesses materiais podem produzir fraturas e falhas catastróficas.

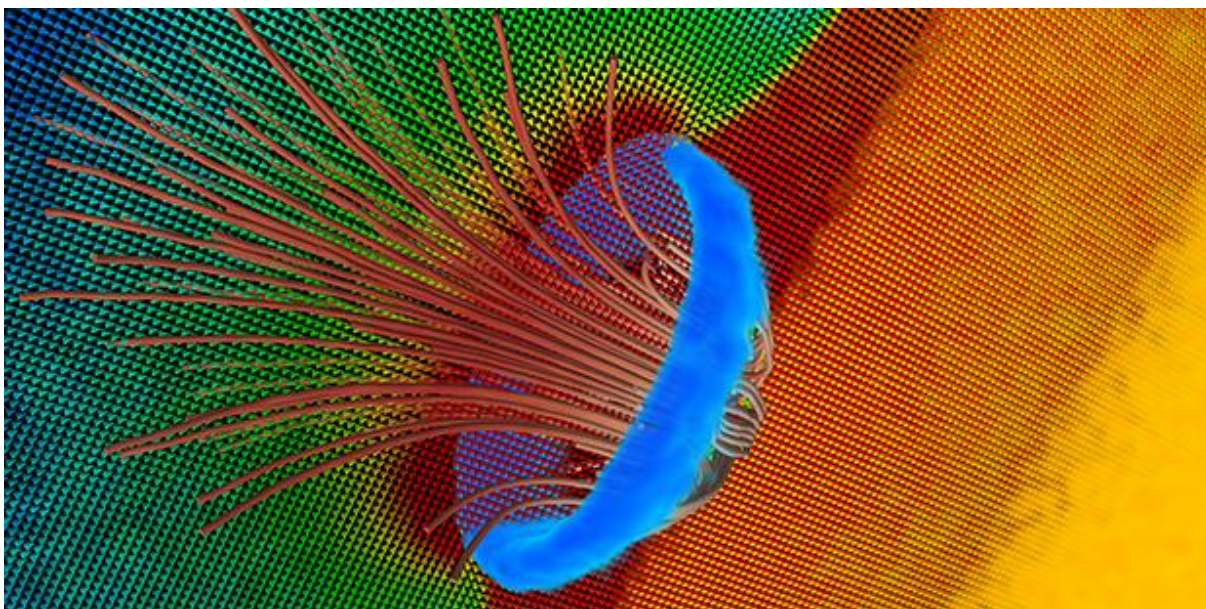


Figura 2. Nano-bolha em colapso produz uma onda de choque provocando dano a uma barreira de sílica. A enorme capacidade computacional é usada para simular os átomos e moléculas interagindo num período de tempo em que ocorre a cinética química que ativa os mecanismos de danos. Esses dependem da velocidade de choque. A equipe do ANL está assim simulando várias velocidades de partículas para estabelecer as velocidades mínimas abaixo das quais o dano é mínimo ou inexistente e o limite superior a partir do qual o dano é catastrófico (31).

6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO

Uma metodologia teórico-experimental desenvolvida de modelagem de corrosão sob tensão foi descrita neste artigo e pode ser transferida com bastante benefício para a indústria, desde que haja pesquisa adicional para os materiais-meios de interesse específicos. Há ainda a conveniência de que a indústria brasileira em parceria com as universidades em que se desenvolvem esse tipo de pesquisa desenvolva aplicativos específicos para modelagem como o concebido em (8) e também de aplicativos de simulação de corrosão sob tensão.

7. AGRADECIMENTOS

Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de pós-doutorado, IPEN/CNEN-USP (Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares/Conselho Nacional de Energia Nuclear-Universidade de São Paulo) pela oportunidade e infraestrutura de pesquisa.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Aly, O. F. “Modelagem da fratura por corrosão sob tensão em mecanismo de acionamento das barras de controle de reator de água pressurizada”. 271 p. Tese de Doutorado em Ciências – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2006. Acesso em março de 2013:

http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Omar%20Fernandes%20Aly_D.pdf

(2) Aly, O. F.; Mattar Neto, M.; Schwartzman, M.M.A.M. “Pré-Modelagem de Iniciação por Corrosão Sob Tensão de Liga de Níquel Considerando os Efeitos do Hidrogênio, Lítio e Boro do Meio Aquoso”. In: Gutemberg de Souza Pimenta; Neusvaldo Lira de Almeida; et al. (org.). Intercorr 2012-ABRACO-Anais do Evento. 1ª. ed. Rio de Janeiro: ABRACO, 2012, v. único, p. 1-14.

(3) Aly, O. F.; Mattar Neto, M.; Schwartzman, M.M.A.M. “A Methodology For Modeling Stress Corrosion Cracking With An Example”. In: COBEM 2011, 2011, Natal-RN. Proceedings of COBEM 2011, 2011.

(4) Aly, O. F.; Mattar Neto, M.; Schwartzman, M.M.A.M. “Resultados de Modelagem de Iniciação de Fratura por Corrosão Sob Tensão em Componentes de Reatores Nucleares”. In: 66º Congresso Anual da ABM, 2011, São Paulo. Anais do 66º Congresso Anual da ABM. São Paulo: ABM, 2011. p. 773-783.

(5) Aly, O. F.; Mattar Neto, M.; Schwartzman, M.M.A.M. “Modelos de Processos de Fratura por Corrosão Sob Tensão em Componentes de Reatores Nucleares - Alguns Resultados e Exemplos”. In: 11ª. COTEQ- Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos, 2011, Porto de Galinhas-Pernambuco. Anais da 11ª. COTEQ: Brasil, 2011.

(6) Aly, O. F.; Andrade, A.H.P.; Mattar Neto, M.; Schwartzman, M.M.A.M. “Results On Modeling of Primary Water Stress Corrosion Cracking at Control Rod Drive Mechanism Nozzles of Pressurized Water Reactors”. In: 19th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, 2007, Toronto. SMiRT 19 Transactions. Raleigh, NC, USA, 2007. pp. 1-8. Acesso em março de 2013:

<http://ptc.ipen.br/TEMP/98287.pdf>

(7) Aly, O.F., Andrade, A.H.P., Mattar Neto, M., Szajn bok, M., Toth, H.J. “Modelling of primary water stress corrosion cracking (PWSCC) at control rod drive mechanism (CRDM) nozzles of pressurized water reactors (PWR)”, EICM-2 Proceedings, Shipilov, S.A.; Jones, R.H.;Olive, J.-M.; Rebak, R.B. (Ed.)“EICM-2 - Second International Conference on Environment-Induced Cracking of Metals, The Banff Centre, Banff, Alberta, Canada, September 19-23, 2004, Elsevier: London, 1st Edition, 2008, v.2 pp. 143-151. ISBN 978-0-08-044693-6. Acesso em março de 2013: <http://ptc.ipen.br/TEMP/98474.pdf>

(8) Aly, O. F.; Mattar Neto, M.; Schwartzman, M.M.A.M. “Stress Corrosion Prediction Modeling Software- A Proposal”. Recent Patents on Corrosion Science, v. 2, n. 2, p. 112-117, 2012. ISSN (Print): 2210-6839 ISSN (Online): 1877-6108

DOI: <http://dx.doi.org/10.2174/2210683911202020112>

(9) Lima, L.I.L. “Influência da Concentração de Hidrogênio na Suscetibilidade à Corrosão Sob Tensão de Junta Soldada com Metais Dissimilares em Ambiente do Circuito Primário de

- Reator Nuclear”. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. UFMG: Belo Horizonte, MG, 2011. Acesso em março de 2013: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-8NWH82>
- (10) Staehle, R.W. “Combining design and corrosion for predicting life”, in: R.N. Parkins (Ed.), *Life Prediction of Corrodible Structures*, vol.1, NACE International, Houston, TX, USA, 1994, pp. 138-291.
- (11) Rebak, R.B., Szklarska-Smialowska, Z. “The mechanism of stress corrosion cracking of alloy 600 in high temperature water”, *Corros. Sci.* 38 (1996) 971-988.
- (12) Aly, O.F.; Mattar Neto, M.; Schwartzman, M.M.A.M; Lima, L. I. L. “Modeling of Tests of Primary Water Stress Corrosion Cracking of Alloy 182 of Pressurized Water Reactor According To EPRI and USNRC Recommendations”. In: *Proceedings of 68th ABM International Congress*, July 30th to August 2nd 2013, Belo Horizonte – MG – Brazil (to be published).
- (13) Newman, R.C. “Stress Corrosion Cracking Mechanisms. Corrosion Mechanisms in Theory and Practice”, P. Marcus and J. Oudar (ed.), 2nd ed, pp. 399-450, Marcel Dekker, New York (2002).
- (14) Chikkam, A. “Metallurgical Investigation of a Steam Header with a Crack”, *Corrosion Management Asia*, 2012 Report , 11 pp., Acesso em maio de 2012: http://files.engineering.com/getfile.aspx?folder=578e3235-4dd7-43b4-a89f-c02093b4f067&file=Steam_Header.pdf
- (15). Van der Merwe, J.W. “Environmental and Material Influences on the Stress-Corrosion Cracking of Steel in H₂O-CO-CO₂ Solutions”, Report (University of the Witwatersrand), 24 pp., Acesso em maio de 2012: http://www.google.com/url?sa=X&q=http://www.hindawi.com/journals/ijc/aip/414156.pdf&ct=ga&cad=CACQARgAIAEoBDAAOABA5Oz7_ARIAVgAYgVwdCICUg&cd=Y0c8BCYrS6k&usg=AFQjCNFjIb_JLUNmKGevAOC1DO7vz7Xysg
- (16) Moss, T., Olszta, M.J., Grant, W., Was, G. S. “Grain Boundary Oxidation and Stress Corrosion Cracking in Nickel-Base Alloys Strained in Supercritical Water”. In.: 15th International Conference on Environmental Degradation, TMS, 2011, pp. 1519-1530.
- (17) EFC: Corrosion in Refinery Industry Failure Atlas, “Case History n. 7” April 2012. Acesso em julho de 2012: http://www.efcweb.org/efcweb_media/Downloads/EFC+WP15/EFC_WP15Atlas_7.pdf
- (18) Maldonado, J.G., Kane, R.D. “Stress corrosion cracking of carbon steel in fuel ethanol service”. In.: Shipilov, S.A.; Jones, R.H.;Olive, J.-M.; Rebak, R.B. (Ed.)“EICM-2 - Second International Conference on Environment-Induced Cracking of Metals, The Banff Centre, Banff, Alberta, Canada, September 19-23, 2004, Proceedings Elsevier: London, 1st Edition, 2008, v.2, pp. 337-347.
- (19) Lee, C.-K. “Susceptibility to Stress Corrosion Cracking and Electrochemical Behavior of Electroless Ni-P /nano-TiO₂ Composite Coatings on 70-30 Brass in Fluoride Solutions”. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 7 (2012) 8487 – 8502.
- (20) Huixia Zhang, Xiaodong Wang, Ruiling Jia, Jian Hou, Weimin Guo, “Investigation on Stress Corrosion Cracking Behavior of Welded High Strength Low Alloy Steel in Seawater Containing Various Dissolved Oxygen Concentrations”, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 8 (2013) 1262 – 1273. Acesso em janeiro de 2013: <http://www.electrochemsci.org/papers/vol8/80101262.pdf>
- (21) Turnbull, A., McCartney, L.N., Zhou, S. “A model to predict the evolution of pitting corrosion and the pit-to-crack transition incorporating statistically distributed input parameters”. In.: Shipilov, S.A.; Jones, R.H.;Olive, J.-M.; Rebak, R.B. (Ed.)“EICM-2 - Second International Conference on Environment-Induced Cracking of Metals, The Banff Centre, Banff, Alberta, Canada, September 19-23, 2004, Proceedings Elsevier: London, 1st Edition, 2008, v.1, pp. 19-45. ISBN 978-0-08-044693-6.

- (22) Today Singapore. “‘Stress corrosion cracking’ caused NEL disruptions in August, last month”, published on February 2013, acesso em fevereiro de 2013:
<http://www.todayonline.com/singapore/stress-corrosion-cracking-caused-nel-disruptions-august-last-month>
- (23) Parrott, R., Pitts, H. “Chloride stress corrosion cracking in austenitic stainless steel- Assessing susceptibility and structural integrity”. Merseyside, UK: HSE-Health and Safety Executive, 2011, 62pp. Acesso em Fevereiro de 2013:
<http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr902.pdf>
- (24) Wikipedia. “Silver Bridge”, acesso em março de 2013:
http://en.wikipedia.org/wiki/Silver_Bridge
- (25) Japan Failure Knowledge Database. “Burst of Steam Turbine Rotor in Nuclear Power Plant”. Acesso em março de 2013: <http://www.sozogaku.com/fkd/en/cfen/CB1031029.html>
- (26) Roberge, P. R. “Stress Corrosion Cracking of Chemical Reactor: The Flixborough explosion, UK 1974”, *Corrosion Doctors*, acesso em março de 2013: <http://www.corrosion-doctors.org/ProcessIndustry/flixborough.htm>
- (27) Vankeerberghen, M., “Will finite-element analysis find its way to the design against stress corrosion cracking?” In.: Shipilov, S.A.; Jones, R.H.;Olive, J.-M.; Rebak, R.B. (Ed.)“EICM-2 - Second International Conference on Environment-Induced Cracking of Metals, The Banff Centre, Banff, Alberta, Canada, September 19-23, 2004, Proceedings Elsevier: London, 1st Edition, 2008, v.1, pp. 115-123. ISBN 978-0-08-044693-6.
- (28) Vankeerberghen, M., Weyns, G., Gavrilov, S., Martens, B., Deconinck, J. “Crack propagation rate modelling for 316SS exposed to PWR-relevant conditions”, *Journal of Nuclear Materials* 384 (2009) 274-285.
- (29) Macdonald, D.D., Engelhardt, G.R., Balachov, I. “The electrochemistry of stress corrosion cracking-from theory to damage prediction in practical systems”. In.: Shipilov, S.A.; Jones, R.H.;Olive, J.-M.; Rebak, R.B. (Ed.)“EICM-2 - Second International Conference on Environment-Induced Cracking of Metals, The Banff Centre, Banff, Alberta, Canada, September 19-23, 2004, Proceedings Elsevier: London, 1st Edition, 2008, v.2, pp. 55-92. ISBN 978-0-08-044693-6.
- (30) R.W.Smith. “Computer simulation of intergranular stress corrosion cracking via hydrogen embrittlement”. *Modelling Simul.Mater. Sci.Eng.*, 8 (2000), 629-648.
- (31) ANL- Argonne National Laboratory, “Argonne Leadership Computing Facility”, acesso em novembro de 2012:
<https://www.alcf.anl.gov>.
-