

CRITÉRIOS DE TAMPONAMENTO DE TUBOS DE GERADORES DE VAPOR COM TRINCAS AXIAIS NA REGIÃO DAS PLACAS SUPORTES

Miguel Mattar Neto

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP
Travessa R, 400 Cidade Universitária
05508-900 São Paulo, SP, Brasil
E-mail: mmattar@net.ipen.br

RESUMO

A corrosão sob tensão com ataque intergranular (IGA/SCC) ocorre no lado do secundário dos tubos dos Geradores de Vapor (GVs) onde as impurezas se concentram devido a vaporização sob condições de fluxo com restrições. Assim, ela pode ser chamada ODSCC (*Outer Diameter Stress Corrosion Cracking*), na maioria dos casos. As localizações mais típicas são as áreas perto das placas suportes, nos depósitos de lama (*sludge piles*) e nas reentrâncias (*crevices*) no topo do espelho, embora ela também possa aparecer nos trechos livres dos tubos sob os depósitos relativamente finos que se formam na superfície dos mesmos. O mecanismo de degradação por ODSCC na região das placas suportes tem sido causa de tamponamento de diversos tubos dos GVs. Assim, nesse trabalho, são apresentados os estudos feitos sobre critérios de tamponamento de tubos de GVs específicos para esse mecanismo de degradação (ODSCC na região das placas suportes) propondo meios para não penalizar economicamente a operação de usinas mantendo a segurança e confiabilidade requeridas. Com base nesses estudos algumas conclusões são apresentadas sobre a utilização dos critérios de tamponamento e das dificuldades relacionadas com essa utilização.

Palavras-chave: gerador de vapor, tubo, integridade estrutural, trinca axial, corrosão sob tensão

I. INTRODUÇÃO

A corrosão sob tensão (SCC) com ataque intergranular (IGA) ocorre no lado do secundário dos tubos de Gvs fabricados de Inconel 600 onde existem tensões residuais e as impurezas se concentram devido a vaporização sob condições de fluxo com restrições, alterando as condições físico-químicas do meio. Assim, ela pode ser chamada ODSCC, na maioria dos casos. As localizações mais típicas são as áreas perto das placas suportes, nos depósitos de lama (*sludge piles*) e nas reentrâncias (*crevices*) no topo do espelho, embora ela também possa aparecer nos trechos livres dos tubos sob os depósitos relativamente finos que se formam na superfície dos mesmos. Exceto nos casos onde ocorreu grande contaminação por chumbo, a SCC no Inconel 600 é principalmente intergranular. Nos casos onde grandes quantidades de chumbo estão presentes a fissuração no Inconel 600 pode ser parcialmente transgranular. No entanto, mesmo nos casos com aspectos transgranulares, o

padrão geral do ataque é controlado pelo ataque intergranular.

A SCC ocorre numa variedade de padrões que vão de trincas por corrosão sob tensão únicas à corrosão intergranular generalizada. Uma das formas intermediárias de ataque envolve penetrações intergranulares, onde a SCC avança através da parede em uma frente relativamente larga em vários contornos de grãos, em vez de ocorrer em contornos de grãos isolados. Outra forma de ataque intermediária é chamada corrosão celular. Nesse tipo de ataque a corrosão forma padrões de trincas na superfície com arranjos grosseiros de células hexagonais ou retangulares. É importante ressaltar que, tipicamente, o ataque celular se torna preferencialmente axial com a penetração pela parede.

Causas. As causas do aparecimento de ODSCC podem ser separadas em três categorias: o ambiente corrosivo (e.g., composição química do meio e temperaturas altas), as tensões e o material.

Com relação aos fatores ambientais há, além da temperatura, uma gama muito grande de impurezas que causam ODSCC, incluindo substâncias cáusticas; impurezas formadas por ácidos como as que contêm enxofre, resinas e chumbo. Há indicações que ODSCC pode aparecer mesmo em soluções neutras. Ela é fortemente acelerada, no entanto, por condições oxidantes, que podem resultar do ingresso de oxigênio dissolvido ou de produtos de corrosão oxidantes, especialmente óxidos ou íons de cobre.

No caso das tensões, nota-se que a presença de tensões residuais nas superfícies dos tubos aumenta o risco e a taxa de ODSCC. Essas tensões podem aparecer devido a expansão dos tubos na zona de transição próximo ao espelho, devido ao alinhamento e polimento dos tubos, e devido a danos de fabricação como as abrasões nos tubos.

Sobre os fatores relacionados com o material, pode-se dizer que o Inconel 600 apresenta algum grau de suscetibilidade pois é um material trefilado e recozido na própria linha (*mill annealed*). Apesar de terem sido estabelecidas em [1], por exemplo, algumas correlações entre o grau de suscetibilidade e parâmetros relacionados à composição do material, ao processo de fabricação e ao ambiente, elas têm pouca utilidade pela impossibilidade de se caracterizar, na prática, a situação dos tubos e do ambiente em cada posição.

Experiência Internacional. A ODSCC em GVs foi primeiramente notada nos depósitos de lama nos espelhos para as centrais mais antigas que operavam com tratamento químico à base de fosfato. Sugeriu-se que, nessas centrais, condições muito cáusticas ocorriam nos depósitos de lama nos espelhos como consequência de uma alta concentração de fosfato de sódio na água dos GVs.

Em duas centrais antigas, Obrigheim na Alemanha e Beznau 1 na Suíça, que operavam com tratamento volátil da água (AVT), a ODSCC também foi notada [2].

Nos anos subsequentes à troca do tratamento da água à base de fosfatos para volátil, por volta dos meados dos anos 70 a ODSCC foi um problema crescente. Os primeiros ataques foram notados no final dos anos 70 nas reentrâncias nos espelhos. A próxima localização de ataque foi nos depósitos de lama nos espelhos. Desde meados dos anos 80, os ataques têm aumentado próximo aos suportes dos tubos, especialmente em centrais com placas suportes com furos usinados (*drilled holes*) mas também em GVs com suportes tipo grelhas [2].

Em todas as localizações a morfologia principal das trincas associadas com ODSCC é de orientação axial. No entanto, trincas devido a ODSCC orientadas circunferencialmente tem sido notadas de modo crescente recentemente em regiões próximas ao topo do espelho, em centrais com tubos expandidos em toda a espessura do espelho (*full depth expanded, hard rolled or explosively expanded*) tanto para Inconel 600 trefilado e recozido na própria linha a baixas temperaturas (LTMA, *Low Temperature Mill Annealed*) e quanto a altas temperaturas (HTMA, *High Temperature Mill Annealed*), e nos suportes em centrais com placas suportes de aço carbono com furos usinados [2],[3].

Medidas Preventivas. As medidas preventivas mais importantes contra ODSCC envolvem minimizar a presença de reentrâncias, mudar a composição dos materiais e o tratamento térmico dos tubos para aumentar a resistência à corrosão, e reduzir as tensões por alterações nos projetos e nos processos de fabricação.

Para centrais já construídas ou em operação as principais medidas envolvem [2]:

- i. limitar o aparecimento de substâncias agressivas nas áreas de oclusão minimizando o ingresso de impurezas e mantendo essas impurezas em equilíbrio molar;
- ii. reduzir o potencial oxidante minimizando o ingresso de oxigênio e de produtos de corrosão oxidantes por meio do tratamento químico da água;
- iii. adicionar ácido bórico *on-line* visando inibir ou reduzir o crescimento dos defeitos.

Para GVs que já sofreram ataques por ODSCC é muito difícil evitar o crescimento de defeitos causados por esse mecanismo de degradação e, com exceção da redução de temperatura, não se identificou nenhuma outra medida saneadora. Muitas centrais com esse problema implementaram programas de adição de ácido bórico mas a experiência no campo mostrou que os benefícios foram moderados.

Ocorrências futuras. O panorama geral que se tem com relação a ODSCC em centrais com tubos de Inconel 600 trefilados e recozidos é que [2]:

- i. É praticamente inevitável que ela ocorra próximo aos suportes, nos depósitos de lama e no topo do espelho;
- ii. Uma vez que o ataque inicie, seu crescimento não pode ser completamente evitado. Há programas para desenvolvimento de medidas que inibam o crescimento do ataque, como já foi mencionado.

Implicações com relação à segurança. A probabilidade de defeitos que se desenvolveram por ODSCC trazerem o risco de ruptura dos tubos sob condições de acidente varia muito, dependendo da localização e da morfologia dos defeitos.

No que se observa mais comumente, que são trincas axiais por ODSCC próximo às reentrâncias nos suportes, não se espera que cause problemas de segurança principalmente no caso dos furos usinados nas placas suportes pois as próprias placas, se a montagem estiver correta, dão o vínculo mecânico e dificultam o colapso do tubo, desde que os defeitos fiquem limitados à espessura das placas. Deve-se lembrar, no entanto, que sob condições de acidente, as placas suportes podem sofrer deslocamentos sendo removidos os vínculos na região dos tubos trincados. Em outras posições, como próximo aos depósitos de lama e nos vãos livres, as trincas axiais podem causar problemas pois não há nenhum vínculo ou reforço para limitar o colapso dos tubos.

Um aspecto de segurança importante é o vazamento do primário para o secundário sob condições de

acidente nos casos de centrais com incidência significativa de ODSCC.

Assim, os GVs com ODSCC devem ser periodicamente inspecionados e reparados para mantê-los em condições seguras e confiáveis. Nas inspeções deve-se levar em consideração os limites de detecção dos defeitos pela inspeção utilizada, a taxa de aumento dos defeitos, as dimensões dos defeitos que podem ser aceitáveis sob o aspecto de integridade estrutural e a quantidade e dimensões das trincas relacionadas aos limites de vazamento do primário para o secundário.

II. CRITÉRIOS DE TAMPONAMENTO PARA TUBOS DE GVs

Antes de iniciar a apresentação de critérios de tamponamento aplicáveis ao caso sob estudo, é importante mencionar que as abordagens utilizadas para a definição de critérios de tamponamento para tubos de GVs podem ser classificadas em três tipos:

O limite de degradação é uma fração da espessura da parede do tubo. Essa abordagem tem sido largamente usada por sua simplicidade e por manter margens de segurança aceitáveis. O valor mais utilizado é a fração de 40 %, adotado em [4], valor esse baseado no fato de que a espessura de parede para atender os limites do código ASME (*The American Society of Mechanical Engineers*) [5] é da ordem de 40% da espessura na maioria dos tubos de GVs de reatores PWR. Com as margens adicionais de 10% para crescimento dos defeitos durante o próximo ciclo operacional e 10% para o erro nas medidas nas inspeções, chega-se ao limite de redução de 40% da espessura como o valor admissível.

Este critério pode ser mais ou menos conservador a partir da definição de limites maiores ou menores. Por exemplo, no caso do Japão [2], com uma abordagem muito conservadora chamada “sem defeitos e sem vazamento” o limite estabelecido de redução da espessura é de 20%. Por outro lado, sendo menos conservador na adoção das margens para o crescimento de defeitos entre ciclos operacionais e para os erros nas medidas pode-se ter limites maiores, como no caso da Suécia que é de 50% [2].

Gerenciamento específico para cada mecanismo de degradação (com avaliações determinísticas e probabilísticas). Essa abordagem, indicada em [6], tem as seguintes características:

- i. São desenvolvidas correlações entre alguns parâmetros da inspeção (e. g., comprimento de trinca ou voltagem) com pressões de colapso e taxas de vazamento;
- ii. As inspeções são feitas em 100% dos tubos em serviço na área afetada pela degradação usando técnicas que caracterizem a degradação de modo conservador e confiável;
- iii. Os limites admissíveis no parâmetro de inspeção são definidos de modo a garantir que não ocorra o colapso. Tipicamente um limite de confiança de 95% é utilizado visando evitar que a pior

combinação entre as dimensões dos tubos e suas propriedades mecânicas resultem numa pressão de colapso muito baixa;

- iv. São dadas margens no parâmetro de inspeção para considerar o crescimento do defeito no próximo ciclo operacional;
- v. São dadas margens para considerar os erros nas medições;
- vi. A taxa de vazamento total após um acidente no final do ciclo operacional deve ser estimada, considerando a distribuição de defeitos deixados sem reparo e a distribuição do crescimento dos defeitos no próximo ciclo. Se a taxa de vazamento for maior que a admissível, com a combinação com o vazamento de outros defeitos, outros tubos devem ser reparados até que os limites de vazamento sejam atendidos.

Abordagens puramente probabilísticas. Nessas abordagens tenta-se demonstrar que o risco de dano ao núcleo do reator é suficientemente pequeno por meio da garantia que o risco de ruptura dos tubos, sob condições normais ou de acidente, é muito baixo e que as doses para os trabalhadores, para o público e para o meio ambiente serão baixas, se ocorrerem acidentes postulados, como resultado do vazamento limitado do lado primário para o lado secundário.

Não foi observado na literatura nenhuma aplicação de critérios de tamponamento de tubos com uma abordagem puramente probabilística. Em [7] há abertura para utilização de abordagens probabilísticas. Deve-se ressaltar, no entanto, que nos critérios desenvolvidos dentro de gerenciamento específico de cada mecanismo de degradação há um uso muito grande de técnicas estatísticas. Os tamanhos de defeitos e suas taxas de crescimento, as características dos materiais dos tubos e suas propriedades geométricas e os erros nas medições nas inspeções são definidos estatisticamente visando o desenvolvimento de análises probabilísticas para avaliação do colapso dos tubos e das taxas de vazamento sob as diversas condições de cargas, inclusive com previsões para o final do próximo ciclo de operação.

III. CRITÉRIOS DE TAMPONAMENTO PARA ODSCC NA REGIÃO DAS PLACAS SUPORTES

A grande ocorrência de trincas axiais por ODSCC na interseção dos tubos com as placas suportes de GVs com tubos de Inconel 600 e furos usinados nas placas suportes motivou o desenvolvimento de critérios específicos de tamponamento de tubos para esse mecanismo de degradação. Visou-se, com isso, evitar o reparo desnecessário de tubos, tanto do ponto de vista da segurança quanto do ponto de vista de confiabilidade técnica e econômica.

Pelas dificuldades de caracterização de trincas axiais (dimensões e profundidade) nessas posições nas inspeções comumente empregadas com *Eddy Current Testing* (ECT) optou-se por utilizar uma abordagem de gerenciamento específico do mecanismo de degradação,

onde o parâmetro básico é a voltagem da inspeção por ECT com sonda circular [2],[3],[8]-[11]

De modo geral, os critérios são estabelecidos a partir do limite estrutural decorrente da correlação entre a pressão de colapso e a voltagem do ECT com sonda circular definido por

$$V_{SL} = V_{RL} + V_{ECT} + V_{CG} \quad (1)$$

onde V_{SL} é limite estrutural para a voltagem decorrente da correlação entre a pressão de colapso e a voltagem do ECT com sonda circular; V_{RL} é limite para a voltagem para reparo do tubo; V_{ECT} é voltagem correspondente ao erro de medida e V_{CG} é voltagem correspondente ao crescimento do defeito entre inspeções

Todas as indicações de voltagem do ECT com sonda circular maiores que o valor limite requerem reparo. Os valores correspondentes ao erro de medida e o limite estrutural para a voltagem decorrente da correlação entre a pressão de colapso e a voltagem da sonda circular são desenvolvidos a partir de dados de testes de tubos fabricados ou retirados de GVs em operação.

Para os tubos que permaneceram em serviço com indicações de voltagem aceitáveis, uma avaliação de vazamento acidental deve ser feita para garantir que a taxa de vazamento prevista sob condições de acidente devido a todos os defeitos presentes no fim do ciclo de operação em questão seja menor que a taxa de vazamento máxima permitível, definida com base em doses de radiação aceitáveis para os trabalhadores, para o público e para o ambiente. Se as avaliações indicarem um vazamento potencialmente inaceitável, deve-se reparar tubos adicionais até que o limite da taxa de vazamento seja atendido (isto é, alguns tubos com defeitos abaixo do limite de reparo devem ser reparados para reduzir a taxa de vazamento total prevista).

Em função da qualificação dos critérios baseados nessa abordagem, foram introduzidas inspeções adicionais com ECT por sonda rotativa a partir de limites de voltagem inferiores da inspeção com ECT por sonda rotativa. Além disso, limites de voltagem da inspeção com ECT por sonda rotativa abaixo dos quais não seria necessário o reparo de tubos foram definidos. Esses limites de voltagem inferiores da inspeção com ECT por sonda circular são baseados no limiar de precisão dos equipamentos de inspeção pois voltagens baixas não permitem a caracterização de perda de espessura dos tubos e defeitos pequenos são associados a baixas voltagens.

Dificuldades. A adoção de critérios baseados no modo específico de degradação trazem mais requisitos a serem cumpridos para sua implementação.

Inspeções. As inspeções crescem em número e em complexidade. Por exemplo, inspeção com sonda circular deve incluir 100% das interseções do lado da perna quente e do lado da perna fria até a placa mais baixa com ODSCC; inspeção com sonda rotativa para todas as indicações maiores que limite de voltagem inferior da sonda circular; inspeção com sonda rotativa para todas as interseções com

depósitos de cobre; inspeção com sonda rotativa para todas as interseções com resíduos (*large mixed residuals*); inspeção com sonda rotativa com sinais de incrustações (*dent*) maiores que 5.0 V (da inspeção sonda circular).

Montagem de bancos de dados de tubos retirados. Tubos devem ser retirados, testados e examinados, sendo que dois tubos devem ser retirados, cobrindo pelo menos 4 interseções, durante a parada onde se pretende iniciar a aplicação dos critérios ou na parada anterior, e, para acompanhamento, um tubo deve ser retirado em parada para recarga de combustível correspondente a 34 meses efetivos a plena potência (EFPM - *Effective Full Power Month*) de operação ou correspondente a um intervalo máximo de três recargas de combustível, o que for menor.

Programa de monitoração de vazamentos. Devem ser atendidos o limite de vazamento em cada GV, da especificação técnica da central e feita uma revisão dos procedimentos de monitoração de vazamentos para garantir que, se o vazamento em um tubo ocorrer, ele será detectado e medidas para evitar a sua ruptura serão tomadas a tempo. Tubos com vazamentos conhecidos devem ser reparados antes que os GVs voltem ao serviço após uma parada.

Cálculo da probabilidade de colapso dos tubos. Análises probabilísticas devem ser feitas considerando as distribuições de voltagens das inspeções com ECT por sonda circular projetadas para o fim do ciclo de operação, as distribuições relativas às propriedades mecânicas dos materiais e as correlações entre pressões de colapso e voltagens.

Cálculo do vazamento dos tubos. Análises probabilísticas devem ser feitas considerando as distribuições de voltagens das inspeções com sonda circular projetadas para o fim do ciclo de operação, as distribuições relativas às propriedades mecânicas dos materiais e as correlações entre vazamentos e voltagens.

Relatório pós inspeção. Em função de dificuldades de ordem prática (pouco tempo) é aceitável que as avaliações sobre dados de tubos retirados, cálculo de probabilidade de colapso e de vazamento sejam emitidas até 90 dias após a inspeção.

IV – CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

Há várias abordagens utilizadas para definição de critérios de tamponamento de tubos de GVs afetados por ODSCC na região das placas suportes.

Há critérios baseados em limites de redução da espessura dos tubos onde há definição mais direta e imediata sobre o tamponamento de tubos. Os requisitos de inspeções menores assim como os requisitos relacionados com o vazamento do primário para o secundário. Como, em geral, há um conservadorismo maior, a operação das usinas pode ser penalizada com um maior tamponamento de tubos.

Visando eliminar conservadorismos excessivos, foram desenvolvidos critérios baseados na abordagem de

gerenciamento específico dos mecanismos de degradação, onde trincas passantes, isto é, que penetram ao longo de toda a espessura do tubo, são aceitáveis desde que se demonstre que não haverá colapso dos tubos nem vazamentos do primário para o secundário acima dos limites permitidos de liberação de radioatividade para os trabalhadores, para o ambiente e para o público. Há requisitos severos de qualificação dos critérios e de sua aplicabilidade a cada usina, de inspeção, de avaliação de integridade dos tubos e de avaliação do vazamento. O trabalho a ser desenvolvido para implementação desses critérios traz vantagens por se ter menos tubos tamponados e uma previsão de vida útil do GVs mais precisa.

A escolha de qual abordagem seguir deve estar baseada no compromisso entre esses aspectos mencionados. Deve-se notar, no entanto, que os esforços estão direcionados para implementar abordagens de gerenciamento específico dos mecanismos de degradação indicando que, mesmo com o trabalho e os custos decorrentes, há vantagens com o menor número de tubos tamponados.

Além disso, há uma forte tendência para a utilização das abordagens probabilísticas por serem elas mais adequadas ao tratamento dos parâmetros relacionados com os critérios e poderem levar a menos tubos tamponados. Não há, ainda, um critério de tamponamento completamente probabilístico mas os critérios mais atualizados, de gerenciamento específico dos mecanismos de degradação, exigem muitas avaliações probabilísticas.

REFERENCES

- [1] Berge, Ph., *After 33 Years, It is Time to Solve Pure Water Cracking, Proceedings of the 1992 EPRI Workshop on PWSCC Alloy 600 in PWRs*, USA, December 1993 (EPRI TR-103345)
- [2] IAEA, *Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: Steam Generator*, Vienna, November 1997 (IAEA-TECDOC-981)
- [3] EPRI, *PWR Steam Generator Tube Repair Limits: Technical Support Document for Outside Diameter Stress Corrosion Cracking at Tube Support Plates*, EPRI, Palo Alto, CA, USA, March 1992 (EPRI TR-100407)
- [4] USNRC, *Inservice Inspection of Pressurized Water Reactor Steam Generator Tubes*, USA, July 1975 (*Regulatory Guide* 1.83, Ver. 1)
- [5] ASME, *ASME BPV Code, Section III*, New York, NY, USA, 1995
- [6] USNRC, *Bases for Plugging Degraded PWR Steam Generator Tubes*, USA, Aug. 1976 (*Regulatory Guide* 1.121)
- [7] USNRC, *Steam Generator Integrity*, USA, December 1998 (*Draft Regulatory Guide* DG-1074)
- [8] USNRC, *Voltage-Based Repair Criteria for Westinghouse Steam Generator Tubes Affected by Outside Diameter Stress Corrosion Cracking*, USA, August 1995 (Generic Letter 95-05)
- [9] Wilson, B., *Ringhals 3 and 4 Steam Generator Plugging Criteria*, IAEA Specialist's Meeting on Steam Generator

Problems and Replacement, Madrid, Spain, 13-16 December 1993, pp. 476-509

[10] Hedner, G., *Regulatory Practices and Experiences on Steam Generators – Swedish Presentation*, OECD-CNRA Special Issue Meeting on Regulatory Practices and Experience on Steam Generators, Paris, France, 25-26 June 1992

[11] Andersson, J. E., Bystedt, P., Hedner, G., Skånberg, L., *Swedish Experiences of a Revised Plugging Criterion for Steam Generator Tubes – A Regulatory View*, NEA/CSNI-UNIPED Specialist Meeting on Operating Experience with Steam Generators, Brussels, Belgium, 16-20 September, 1991, paper 4.4, pp. 4.4-1 / 4.4-7

PLUGGING CRITERIA FOR STEAM GENERATOR TUBES WITH AXIAL CRACKS NEAR TUBE SUPPORT PLATES

ABSTRACT

Stress corrosion cracking (SCC) with intergranular attack (IGA) occurs on the secondary side of steam generator (SG) tubes where impurities concentrate due to boiling under restricted flow conditions. In the most of cases, it can be called ODS (Outer Diameter Stress Corrosion Cracking). The typical locations are areas near support plates, in sludge piles and at top of tubesheet crevices. Though it can also occur on free spans under the relatively thin deposits that build up on the tube surfaces. ODS near tube plate supports have been the cause of plugging of many tubes. Thus, studies on SG tubes plugging criteria related to this degradation mechanism are presented in this paper. The purpose is to avoid unnecessary tube plugging from either safety or reliability standpoint. Based on these studies some conclusions on the plugging criteria and on the difficulties to apply them are addressed.

Key Words: steam generator, tube, structural integrity, axial crack, stress corrosion cracking