
Copyright 2014, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2014, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2014.

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

LIMPEZA MECÂNICA PARA REMOÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS, ORIUNDOS DE CORROSÃO E EROSÃO DO SISTEMA SECUNDÁRIO, NOS ESPELHOS E SUPERFÍCIES EXTERNAS DOS TUBOS DOS GERADORES DE VAPOR DA USINA NUCLEAR DE ANGRA 1 PARA EVITAR CORROSÃO SOB TENSÃO

¹Paulo Artur Pimentel Tavares da Silva, ²Diogo Petronilio de Jesus, ³Oséas Mello de Almeida, ⁴Lauro Roberto Lopes, ⁵Rodrigo Vieira da Fonseca, ⁶Ricardo Albuquerque Soares, ⁷Einar Sobral de Carvalho

Abstract

The process of stress corrosion in steam generators occurs sharply at the intersections between the tube and the mirror junction between the primary and secondary heat exchange systems (tubesheet), where it accumulates material from the secondary circuit. Aggravating factors in this type of corrosion are the susceptibility of the material, oxidizing environment, elevated temperature and residual stress of reaming. Thus, for mitigating stress corrosion cracking, we tailor the design with the use of Inconel Alloy 690 tubes in the steam generators, we tailor the project to the process of using demineralized water, add ammonia and hydrazine ensuring alkalinity and reducer environment and improving the chemical control. Cleaning is done by jets of pressurized water entered through the robot between the tubes of the steam generators and the tubesheet of heat exchange by means of a closed circuit, which can reach 40,000 kPa, every outage. This material removed is separated, dried, analyzed and evaluated every cleaning. The present work aims to demonstrate how useful the cleaning process called sludge lancing, as mitigation of the corrosion process.

Keywords: corrosion in steam generator, sludge lancing, tubesheet corrosion

Resumo

O processo de corrosão sob tensão em geradores de vapor se dá de forma acentuada nas interseções entre o tubo e o espelho de junção entre os sistemas primário e secundário de troca térmica (tubesheet), onde se acumula material oriundo do circuito secundário. Fatores agravantes neste tipo de corrosão são a suscetibilidade do material, o meio oxidante, temperatura elevada e tensão residual de mandrilagem. Desta forma, para mitigarmos a corrosão sob tensão, adequamos o projeto com a utilização de liga de Inconel 690 nos tubos dos Geradores de Vapor, adequamos o projeto com o processo de utilização de água

¹-Engenheiro Químico - ELETROBRAS ELETRONUCLEAR

²-Engenheiro Químico - ELETROBRAS ELETRONUCLEAR

³-Engenheiro Mecânico - ELETROBRAS ELETRONUCLEAR

⁴-Engenheiro Metalúrgico - ELETROBRAS ELETRONUCLEAR

⁵-Engenheiro Mecânico - ELETROBRAS ELETRONUCLEAR

⁶-Engenheiro Mecânico - ELETROBRAS ELETRONUCLEAR

⁷-Químico - ELETROBRAS ELETRONUCLEAR

desmineralizada, adicionamos hidrazina e amônia garantindo o meio alcalino e redutor realizando um maior controle químico. A limpeza é feita por jatos de água pressurizada inseridos por meio de robô entre os tubos dos geradores de vapor e o espelho de interseção dos meios de troca térmica por um circuito fechado, que pode chegar a 40.000 kPa, a cada parada programada para troca de elemento combustível. Este material removido é separado, seco, analisado e avaliado a cada limpeza. O presente trabalho pretende demonstrar qual a utilidade do processo de limpeza denominado *sludge lancing*, como mitigação do processo corrosivo.

Palavras-chave: corrosão em gerador de vapor, *sludge lancing*, corrosão espelho do gerador de vapor

Introdução

No funcionamento de uma usina termonuclear, tem-se o objetivo de utilizar parte da energia liberada na fissão nuclear de átomos radioativos de forma controlada em energia elétrica que possa alimentar o sistema elétrico interligado administrado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. Como o processo de fissão nuclear ocorre de forma controlada, a altas temperaturas e pressões, diversos aspectos de projetos devem ser considerados para minimizar todos os processos de erosão e corrosão que possam acometer um sistema sujeito às tensões de temperatura, pressão, radiação e íons dissolvidos em meio aquoso, além da diversidade de materiais dos diversos componentes dos sistemas associados ao projeto.

Com o acúmulo de conhecimento na área nuclear, e por se tratar de uma área sensível à sociedade, pode-se verificar que as melhorias nas usinas nucleares se dão em dois vetores principais, na melhoria de projetos ou na melhoria de processos.

As melhorias de projetos se dão em diversas áreas, mas as mais interessantes são as de modificações de materiais para minimizar os efeitos de corrosão e fragilização e *lay-out* para minimizar os efeitos de erosão nos circuitos por onde circula o meio aquoso de troca térmica.

As melhorias de processo se dão com melhores controles por aumento nas inspeções e nas adições de produtos químicos, bem como nas remoções de produtos de corrosão e erosão que podem se tornar fatores que agravam principalmente o processo de corrosão do sistema e redução de seu rendimento térmico.

Um dos pontos sensíveis de uma usina termonuclear do tipo PWR – Pressurized Water Reactor (Reator de Água Pressurizada) é a barreira entre os sistemas primário (onde a energia nuclear é transmitida à água) e secundário (onde a energia térmica é transformada em energia mecânica na turbina) para que não haja contaminação de material radioativo do sistema primário para o secundário. A troca térmica entre os sistemas primário e secundário se dá pelos geradores de vapor, onde a água do sistema primário, à alta pressão e temperatura, passa por dentro de tubos para trocar calor com uma massa de água do sistema secundário que evapora para gerar energia mecânica com a movimentação de uma ou mais turbinas.

O foco deste trabalho é demonstrar como a melhoria de projeto de modificação de material dos componentes entre os sistemas primário e secundário associado à limpeza mecânica

frequente minimiza o efeito da corrosão sob tensão nos geradores de vapor, local onde grande massa com produtos de corrosão e erosão se acumulam pelo processo de evaporação da água.

Resultados e discussão

Numa usina nuclear, os processos corrosivos devem ser minimizados a todo custo para que a integridade do sistema se mantenha, pois todo e qualquer vazamento tem o potencial de se transformar num enorme problema, pois o material que o sistema armazena é radioativo.

Um ponto de preocupação da indústria nuclear é na formação de corrosão sob tensão (CST) nos tubos de Inconel 600 (vide figuras 1 e 2 a seguir), fenômeno de deterioração de materiais causada pela ação conjunta de tensões mecânicas (residuais ou aplicadas) num meio corrosivo, no limite de troca térmica entre os sistemas primário e secundário, onde se deposita a maior parte dos produtos de corrosão e erosão do sistema secundário, junto à região de mandrilagem no espelho e nas regiões das intersecções dos tubos com as placas suporte dos geradores de vapor. A CST é caracterizada pela formação de pites e trincas, levando à ruptura do material (vide figura 3 a seguir).

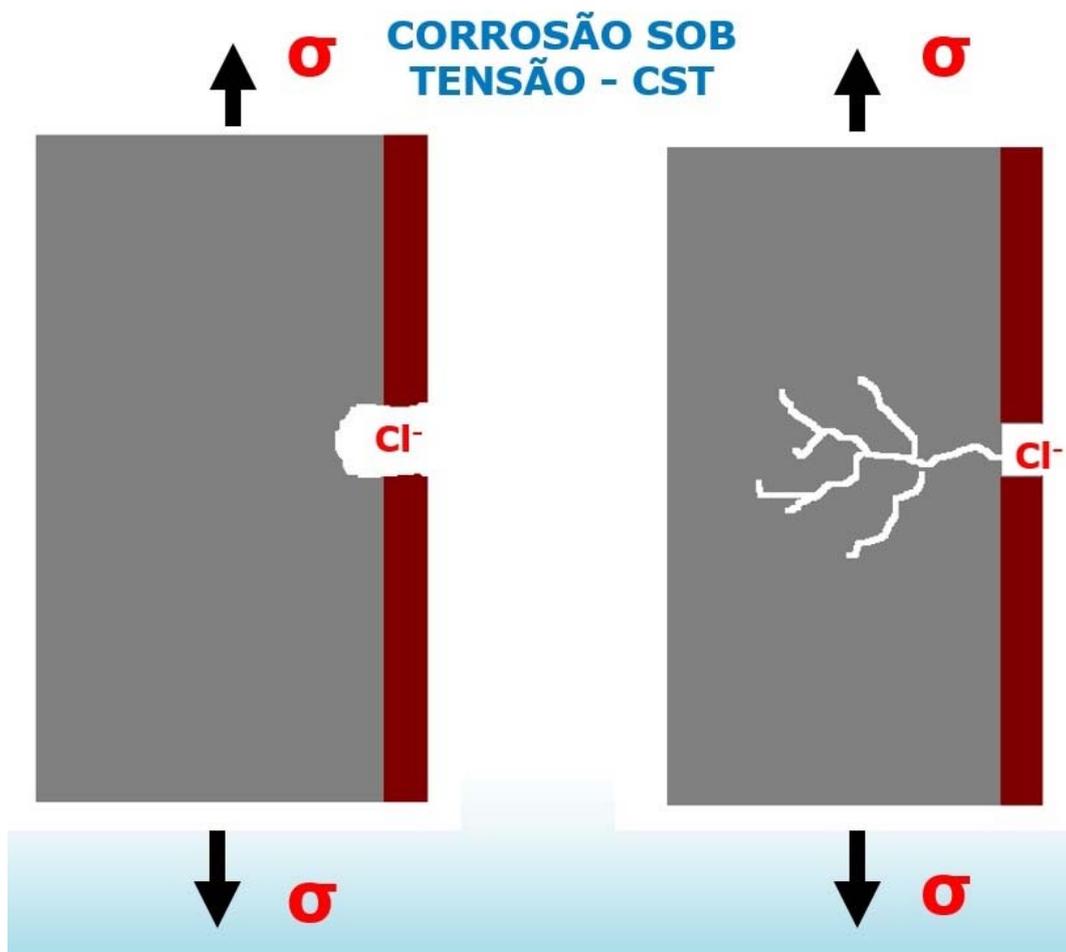
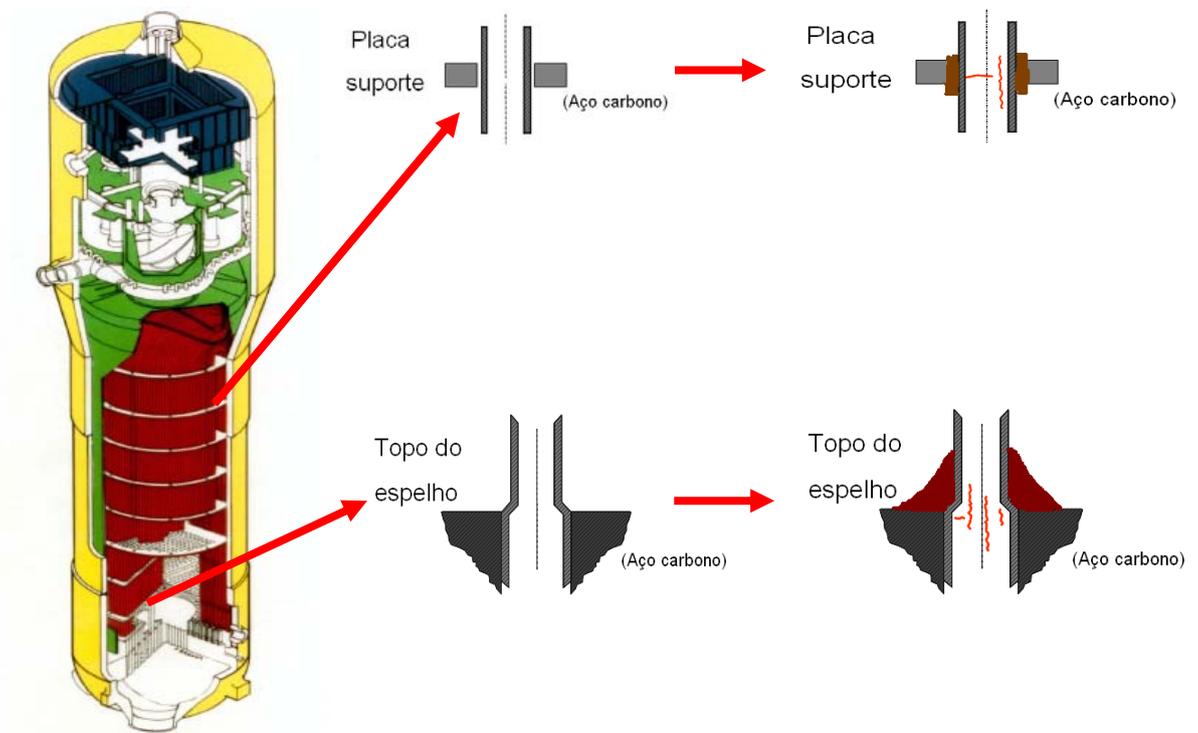


Figura 1 – Corrosão sob tensão (CST).

CORROSÃO SOB TENSÃO EXEMPLOS



É importante contextualizar o processo de geração de energia de uma usina nuclear conforme colocado no diagrama abaixo (figura 4), com diversos materiais e controles para geração de energia elétrica:

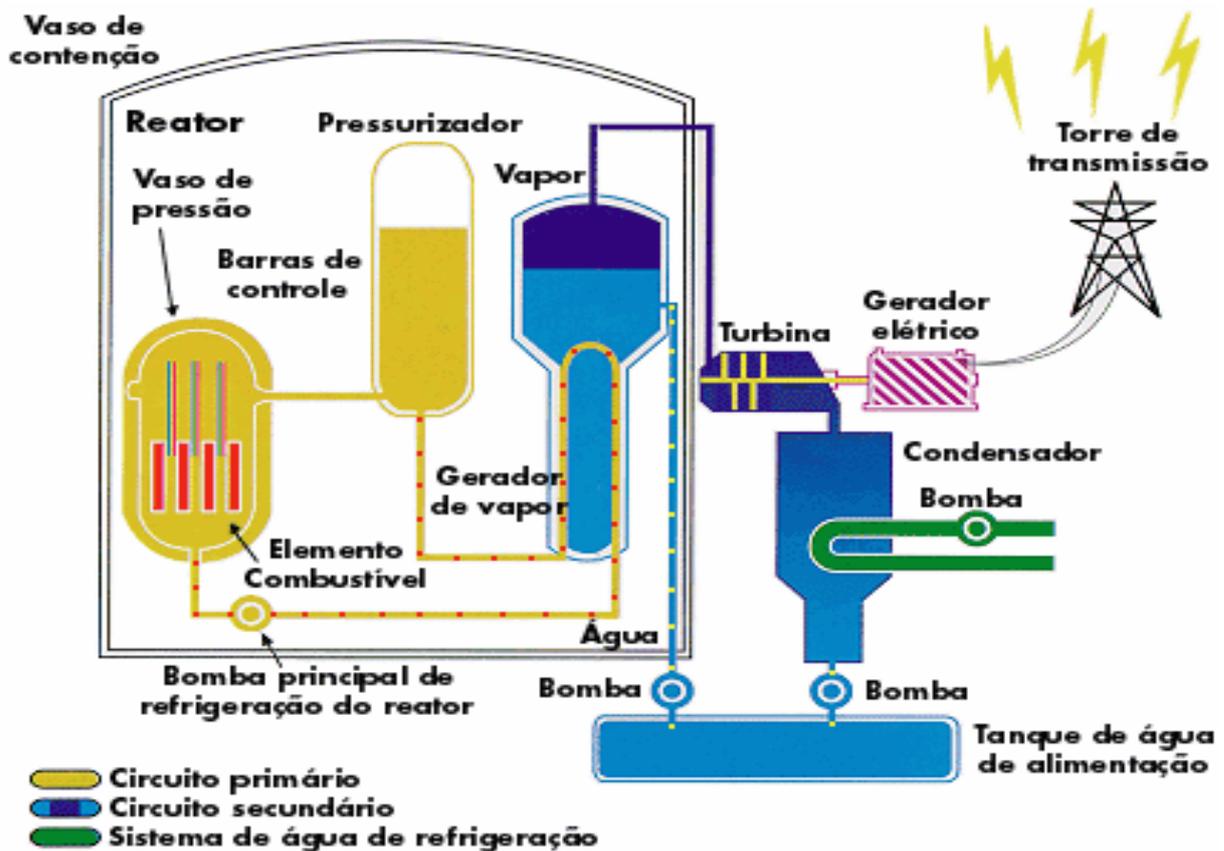


Figura 4 – Diagrama de uma usina Nuclear PWR.

Considerando como estratégias de controle de corrosão, o controle do meio químico básico e sem muitas variações, que tem a função principal de minimizar os processos de corrosão do sistema secundário, o número de paradas não programadas não interferem consideravelmente no processo de formação de produtos de corrosão e erosão, verificamos que a formação da lama, formada basicamente por óxidos de ferro (Fe_3O_4 – Magnetita) e de cobre (Cu ou CuO) na parte do sistema secundário dos geradores de vapor (TTS), apresenta um comportamento constante que é o seguinte:

- aumentada até a passivação do metal onde o meio aquoso é contido;
- constante com variações pontuais referentes aos fatores de paradas não programadas;
- aumentada quando existe a presença de lama dura.

A experiência indica que a formação de lama nos ciclos de operação pode diminuir nas seguintes situações:

- aumento da eficácia dos métodos de controle químico analítico;
- mudança de produtos químicos adicionados ao sistema secundário;
- introdução de novos métodos de remoção de lama na limpeza do espelho dos geradores de vapor.

Tendo a experiência da Usina de Angra 1 como objeto base de estudo deste trabalho, observamos que nas seis primeiras paradas programadas para troca de elemento combustível na Usina Nuclear de Angra 1 houve a remoção de lama do sistema secundário dos geradores de vapor por fluxo de água de baixa pressão (700 kPa), e somente na sétima parada programada para troca de elemento combustível que foi realizada a primeira limpeza por jateamento de água pressurizada entre os tubos dos geradores de vapor (20.000 kPa e depois 30.000 kPa) denominado sludge lance (figura 5). Já nesta limpeza não foi possível se alcançar parte do espelho do gerador de vapor que estava com uma camada expressiva de aproximadamente 36 cm de lama firmemente fixado no lado do sistema secundário do espelho de troca térmica (lama dura), conforme esquema da figura 6. A presença de lama dura fez com que 50% da área do espelho de troca térmica dos geradores de vapor não fossem limpos, favorecendo maior acúmulo de lama devido à sua não remoção pelas purgas rotineiras quando em operação. Pode-se perceber a variação da quantidade de lama removida de acordo com a modificação do método de limpeza e o comportamento dos novos GV semelhante ao dos antigos quando se executava limpezas do lado secundário dos GV com maior frequência.

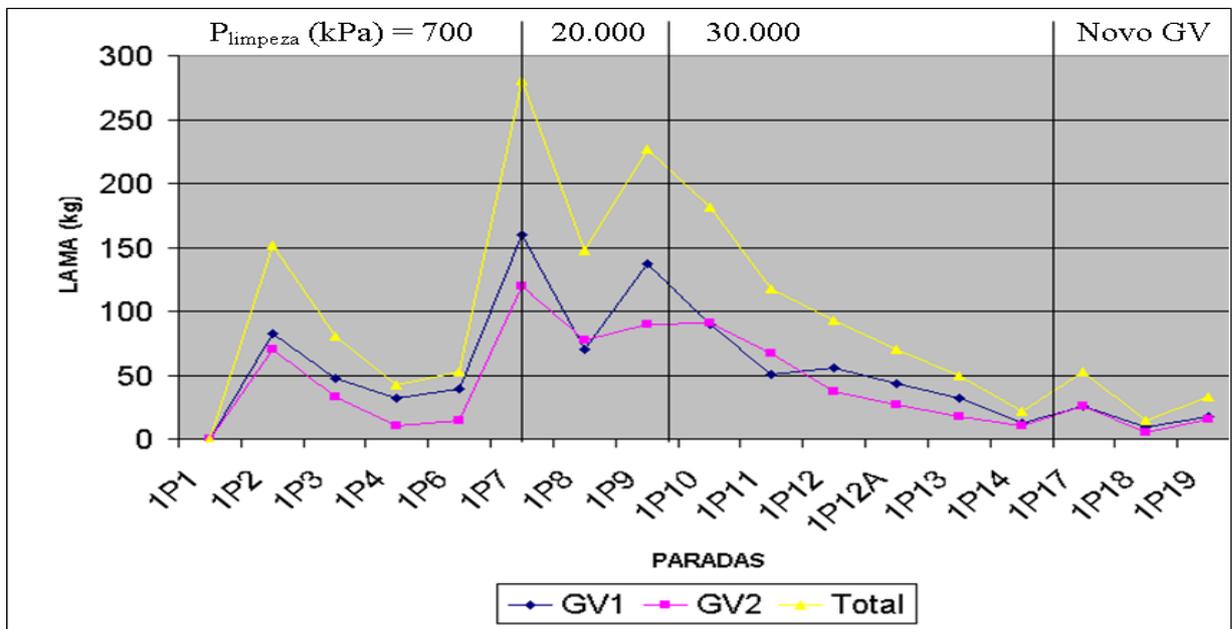


Figura 5 – Histórico de remoção de lama dos geradores de vapor.

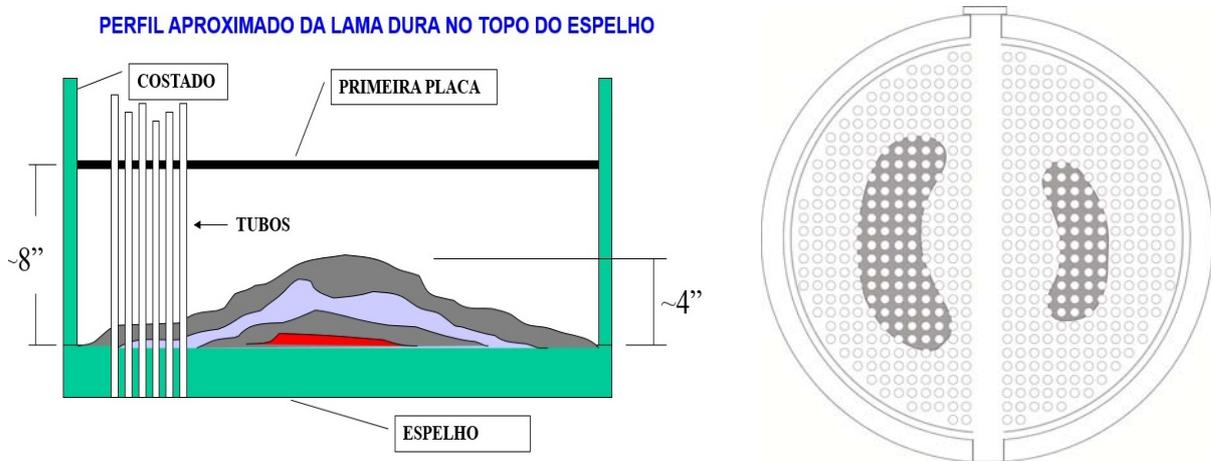


Figura 6 – Perfil de lama dura no topo do espelho dos geradores de vapor.

Baseado num estudo de 1986 feito pelo EPRI (Electric Power Research Institute), a partir da 1P7, o processo de remoção da lama na parte superior do espelho dos geradores de vapor e entre os tubos se dá com a aplicação de jatos de água feitos por lanças a uma pressão de 22.000 kPa entre os tubos dos GV na altura da tubesheet (TTS), um processo denominado sludge lance. Atualmente, devido à disposição dos tubos dos atuais GV, o jateamento se dá em 3 direções, a 30°, 90° e 150° por um robô previamente programado a fazer o processo de limpeza. O esquema abaixo (figura 7) mostra a estrutura montada para armazenar a água, pressurizá-la e injetá-la a alta pressão entre os tubos dos geradores de vapor, para depois removê-la, filtrá-la e retornar ao sistema de limpeza num circuito fechado. O processo de remoção da lama dura se dá com o jateamento direto de água a 40.000 kPa na região de lama dura por entre os tubos. Esta limpeza foi realizada na 1P12A.

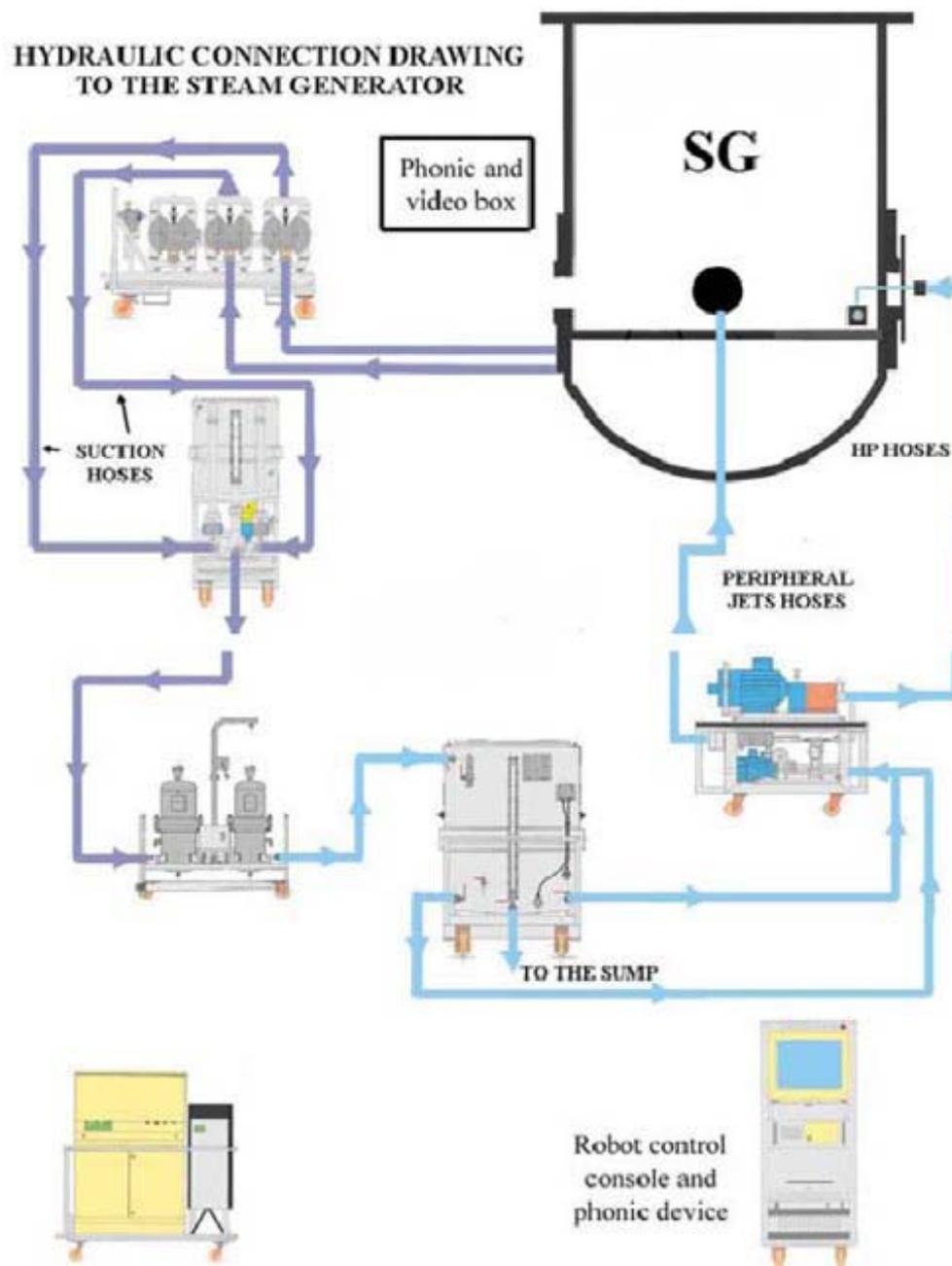


Figura 7 – Diagrama de funcionamento de limpeza sludge lance.

Os problemas mais preocupantes que os depósitos de lama dura no espelho dos geradores de vapor podem oferecer ao desempenho do equipamento são os seguintes:

- alta temperatura na parede externa dos tubos;
- depósito de Ferro e Cobre acumulado externamente aos tubos;
- número elevado de defeitos até 8 cm de altura do topo do espelho.

Na figura 8, os problemas de corrosão encontrados nos tubos dos geradores de vapor são identificados e pode-se verificar que os tubos que tiveram mais ocorrências foram justamente os de corrosão por tensão (1 e 5) que demandaram reparos.

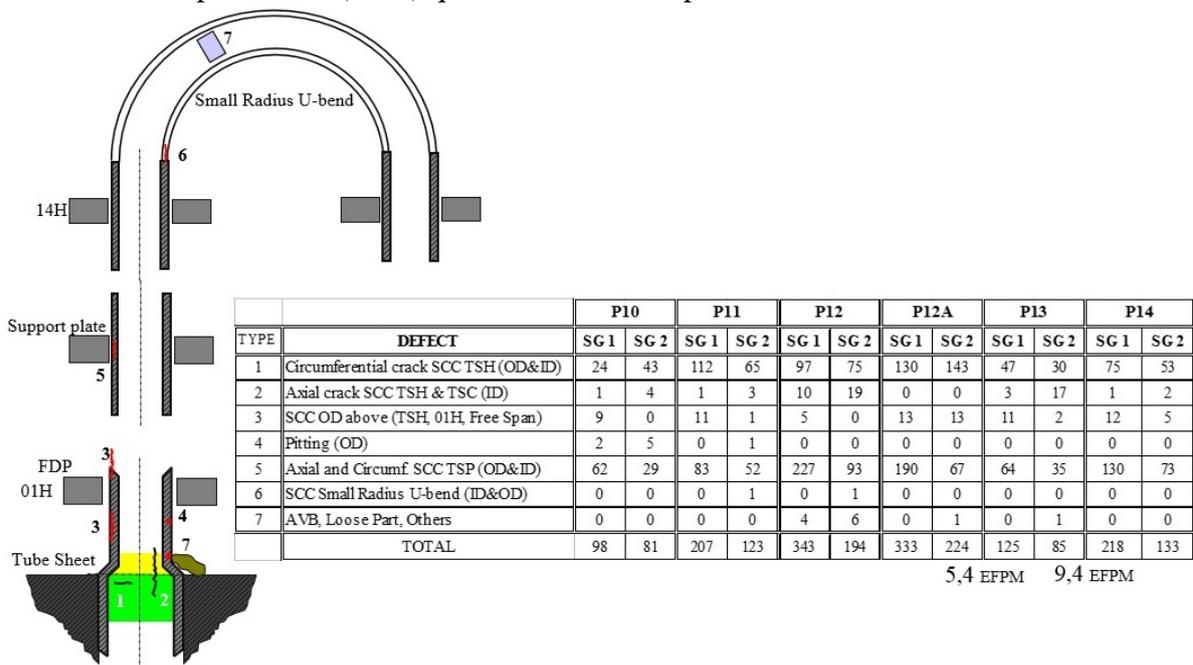


Figura 8 - Tipos de corrosão nos tubos dos geradores de vapor.

Poderemos verificar na figura 9 logo a seguir a escalada de tubos danificados até a parada 14.

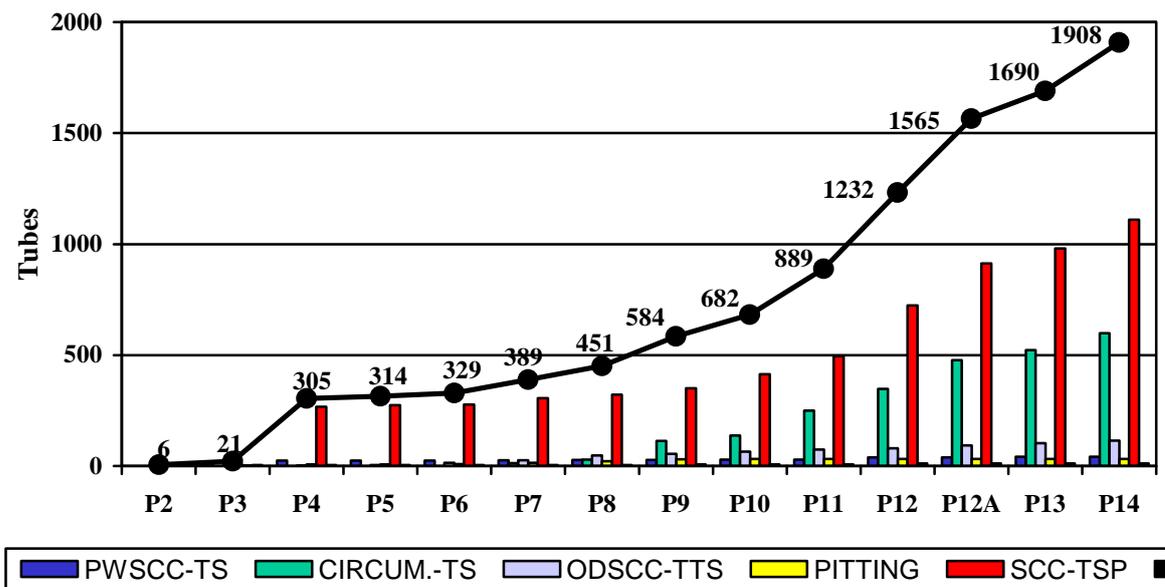


Figura 9 – Tubos reparados ao longo das paradas e tipo de defeito nos tubos em barras.

Foi verificado, com o escalonamento de defeitos nos tubos dos geradores de vapor, um problema de projeto no material utilizado nos tubos dos geradores de vapor, feitos de uma liga metálica, o Inconel 600, muito suscetível à corrosão sob tensão na região de tensões residuais do processo de mandrilagem no espelho onde os tubos de troca térmica são fixados. Esta corrosão foi agravada com a formação e não remoção de lama dura do espelho de troca térmica dos geradores de vapor.

Uma grande mudança de processo foi então realizada, que foi a execução de paradas intermediárias para limpeza do espelho e inspeção por *Eddy Current Test* dos tubos dos geradores de vapor. Este tipo de mudança foi fundamental para que os tubos dos geradores de vapor aguentassem sem rupturas o conjunto de modificações de projeto que foi a troca dos geradores de vapor e tubulações, ocorrida em 2009 numa parada da unidade que durou 6 meses. Nesta parada foram efetuadas várias modificações de equipamentos e componentes, particularmente com a troca de materiais, como do INCONEL 600 pelo INCONEL 690TT, conforme Tabela 1, e também projetos de modificação de *lay-out* que evitariam o depósito de material oriundo de erosão conforme pode ser visto nas figuras 10, 11 e 12 a seguir.

Tabela 1 – Modificações nos geradores de vapor de Angra 1.

ITEM TROCADO	MATERIAL ORIGINAL	MATERIAL ATUAL
Tubos	INCONEL 600 ASME SB168UNS06600	INCONEL 690 TT ASME SB168UNS06690
Placas Suporte	Aço Carbono	Aço Inoxidável
Espelho	Aço Carbono Forjado	Aço Carbono Forjado revestido com INCONEL

CORROSÃO SOB TENSÃO – COMO EVITAR ?

LINHAS DO PRESSURIZADOR DE ANGRA 1

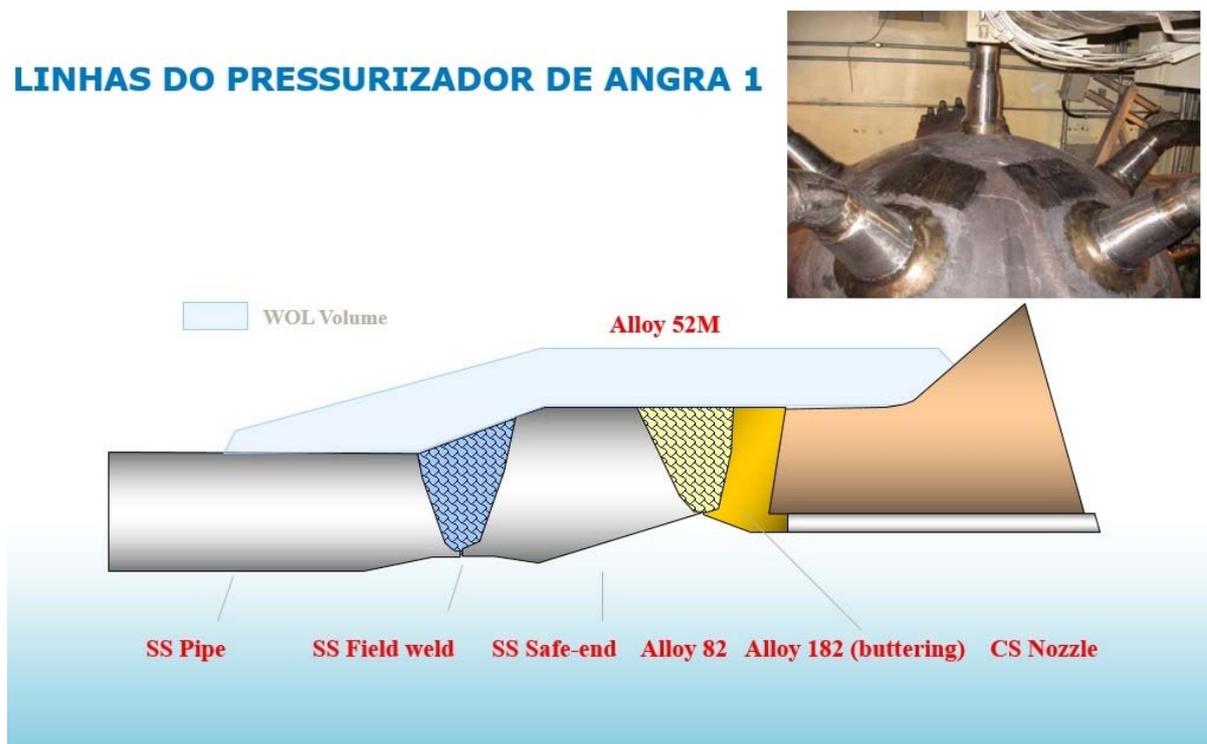


Figura 10 – Medidas de projeto para evitar CST.



Figura 11 – Troca de geradores de vapor da Usina Nuclear de Angra 1.



Figura 12 – Novo gerador de vapor da Usina Nuclear de Angra 1.

Conclusões

A experiência internacional da indústria nuclear mostra que é fundamental a limpeza frequente das superfícies internas dos geradores de vapor do lado do secundário como forma de preservação do equipamento. Esta limpeza é executada com jateamento de água pressurizada para garantir que os depósitos sobre o espelho, os tubos, os suporte dos tubos dos geradores de vapor e as placas suportes dos tubos não sofram corrosão sob tensão e por pites além de melhorar o desempenho térmico do equipamento.

Como foi demonstrado, este método de limpeza foi utilizado não somente para melhoria do desempenho térmico do equipamento como estratégia para preservação do equipamento com consequente extensão da vida útil dos geradores de vapor da Usina de Angra 1 até a troca destes equipamentos mantendo uma operação de forma segura, confiável e rentável, considerando os demais processos operando em sua performance ótima.

É importante frisar que a remoção de lama é uma das técnicas para minimizar o processo de corrosão no lado secundário dos geradores de vapor e devem ser executada numa frequência onde diversas variáveis deverão ser consideradas, mas observando que, se não houver a remoção da mesma, pode haver a formação da chamada “lama dura” que é bem prejudicial para a conservação do equipamento e deve ser removida o quanto antes.

Referências bibliográficas

- (1) GENTIL, V. **Corrosão**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1987. p. 92, 182-289.
- (2) Dow Jr., B. L. Utility Experience With Steam Generator Chemical Cleaning. **Introduction**. Energy Management Services, Little Rock, Arkansas, p.1-1,-2-9, Dec. 1994.
- (3) Lee, R. A. S. CECIL: A Robot for Secondary-Side Maintenance of PWR Steam Generators. **Introduction, Design, Laboratory Testing, Recommendations and Conclusions**, Waltham, Massachusetts, Feb. 1989.
- (4) JEONG, W. T.; KIM, S. T.; HONG, S. Y. Development of a Steam Generator Lancing System. **Sludge Accumulation, Tubesheet Lancing**. Daejeon, Korea, Aug. 2005.
- (5) Moroney, V.; Marks, C.; Gorman, J.; Kreider, M.; Dumouchel, M. Steam Generator Management Program: Development of Predictive Models for Deposit Accumulation and Corrosion on Secondary Side of Steam Generators. **A Model of Degradation, Development of Defect, Deposit Correlations**. Palo Alto, California. Nov. 2011.