



8º CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECANICA
Cusco, 23 a 25 de Outubro de 2007

AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE TUBOS DE GERADOR DE VAPOR DE USINAS NUCLEARES – UM CASO PRÁTICO

Miranda, C. A. J. *, Maneschy, J. E. A. †, Rodrigues, P. R. B. ††

* IPEN - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Av. Lineu Prestes, 2242 (São Paulo, SP, Brasil)

†, †† ELETRONUCLEAR
Rua da Candelária, 65 (Rio de Janeiro, RJ, Brasil)

e-mail: *cmiranda@ipen.br; †emanesc@eletronuclear.gov.br; †† prodrig@eletronuclear.gov.br

RESUMO

Na análise de integridade estrutural dos tubos de geradores de vapor de usinas nucleares de potência, que devem ser integralmente inspecionados por técnicas indiretas, para cada tipo de defeito deve-se estabelecer as dimensões máximas admissíveis. Estas são dadas como curvas relacionando um parâmetro do defeito (profundidade, comprimento, etc.) à menor pressão de colapso que o tubo resiste. Se a dimensão de um defeito, projetada para o fim do próximo ciclo operacional, for menor do que o valor admissível o tubo pode permanecer em serviço, de outra forma o tubo deve ser reparado ou tamponado. Devido ao grande número de tubos (cerca de 5000) e as incertezas envolvidas é aconselhável realizar uma análise estatística para estabelecer os valores admissíveis. Uma indicação é aceitável se sua probabilidade acumulada de falha por colapso for inferior a 5%. Para obter estes valores considerando todas as incertezas (dimensões dos defeitos, correlação, propriedades do material, etc.), sem conservadorismo exagerado, torna-se necessária a adoção do método Monte Carlo. Este trabalho descreve algumas das análises de integridade estrutural realizadas nos tubos dos geradores de vapor de uma usina nuclear típica, usando um programa próprio onde foram implementadas as correlações usuais desenvolvidas pela indústria, para os tipos mais frequentes de degradação, com uma discussão dos resultados obtidos usando o método Monte Carlo, apresentando a experiência brasileira adquirida com este tipo de problema.

Palavras-chave: Gerador de vapor, Integridade estrutural, Método Monte Carlo.

INTRODUÇÃO

Um gerador de vapor típico de uma central nuclear de potência tem cerca de 5000 tubos ou mais, em geral feitos de uma liga de níquel (INCONNEL), ver fig. 1, e todos devem ser inspecionados periodicamente, ao fim de cada ciclo operacional da usina, para a detecção de eventuais defeitos que possam comprometer a sua integridade estrutural e/ou vazamento do circuito primário para o secundário. Por causa da radiação a inspeção é feita indiretamente utilizando técnicas não destrutivas baseadas no princípio das correntes parasitas (ECT – Eddy-Current Test) que, dada a sua natureza, têm erros intrínsecos e, portanto, as medidas feitas têm incertezas que podem ser estimadas.

A figura 2 exemplifica como são obtidos os parâmetros de ajuste do tamanho do defeito detectado na inspeção com o seu tamanho real e a incerteza deste ajuste para um determinado tipo de sonda/técnica utilizada na inspeção já que cada tipo de defeito exige uma técnica de inspeção particular que tem sua incerteza própria, isto é: tem um erro intrínseco.

Para a avaliação da integridade de um tubo que apresente um dado defeito são utilizadas correlações empíricas, obtidas por ajuste dos resultados de diversos de ensaios, repetidos para diversas dimensões do defeito, sob condições controladas, onde os tubos com um dado tipo de defeito são testados sob pressão até colapsarem. Assim, a correlação associada a um determinado tipo de defeito relaciona a pressão de colapso do tubo com aquele tipo de defeito aos parâmetros envolvidos em cada caso/defeito (dimensões do defeito, do tubo, propriedades do material, etc.). Por se tratar de um ajuste esta correlação também tem um erro intrínseco. Outra fonte de incerteza são os valores das propriedades dos materiais dos tubos (tensão de escoamento e de ruptura).

Segundo a norma [1], após a inspeção dos tubos, deve-se fazer uma avaliação dos defeitos encontrados com o intuito de confirmar as previsões feitas antes do início do ciclo recém terminado. Com o histórico dos defeitos detectados na inspeção atual e nas anteriores é feita uma previsão da taxa de aparecimento e crescimento dos defeitos (durante o próximo ciclo a ser iniciado) para prever o tamanho dos defeitos detectados ao fim do próximo ciclo operacional. Este procedimento define outra incerteza: a taxa de crescimento dos defeitos durante o ciclo de operação. Observe-se que não se considera as incertezas nas dimensões dos tubos (diâmetro e espessura) uma vez que as mesmas estão ‘incorporadas’ na incerteza da correlação através dos resultados dos ensaios..

Na avaliação da integridade estrutural dos tubos, para cada tipo de defeito deve-se estabelecer as dimensões máximas admissíveis que são dadas como curvas relacionando um parâmetro do defeito (profundidade, comprimento, etc.) à menor pressão de colapso que o tubo resiste com aquele tipo de defeito. Se a dimensão de um defeito, projetada para o fim do próximo ciclo operacional, for menor do que o valor admissível, isto é: se estiver abaixo da curva, o tubo pode permanecer em serviço, de outra forma o tubo deve ser reparado ou tamponado (posto fora de serviço).

Há várias formas de se considerar as incertezas envolvidas, para estabelecer os valores (ou a curva) das dimensões máximas admissíveis para cada tipo de defeito, desde procedimentos muito simples e bastante conservadores até aqueles (aparentemente) mais complexos e menos conservadores, minimizando o grau de conservadorismo, embora sempre atendendo às exigências das normas com o emprego de análise estatística.

Neste último caso, segundo a norma [2], uma indicação é aceitável se sua probabilidade acumulada de falha por colapso for inferior a 5%. Para obter os valores máximos admissíveis dos defeitos que atendam a esta condição, considerando todas as incertezas (técnica de inspeção, dimensões dos defeitos, correlação, propriedades do material e taxa de crescimento), sem conservadorismo exagerado, torna-se necessária a utilização do método Monte Carlo.

Neste trabalho são apresentadas algumas destas correlações, como é feita a consideração das incertezas envolvidas na avaliação da integridade estrutural de tubos com defeito e se descreve brevemente, também, o programa próprio desenvolvido para a análise de integridade estrutural de tubos de geradores de vapor de centrais nucleares onde foram implantados os diversos tipos de defeitos mais comuns a partir das correlações disponíveis na literatura, e diversos casos-exemplo são apresentados e discutidos.

Principais Mecanismos de Degradação em Geradores de Vapor de Usinas Nucleares

Em geral os defeitos nos tubos de geradores de vapor são causados por mecanismos de corrosão sob tensão ou por atrito com as partes estruturais. Os defeitos são classificados em três tipos básicos: Axiais, Circunferenciais e Volumétricos. A fig. 1 apresenta, esquematicamente, os principais defeitos que ocorrem nos tubos de um GV e sua localização dentre os quais os mais comuns são: defeitos axiais (passantes e não passantes ou de penetração parcial) em várias posições ao longo do tubo, defeitos circunferenciais (principalmente na região do topo do espelho), redução uniforme de espessura do tubo em 360° e redução de espessura na direção axial do tubo com extensão limitada na direção circunferencial. Os dois últimos são classificados como volumétricos. Outros tipos de defeitos, que ocorrem nos tubos dos GVs têm como envoltória, alguns dos defeitos mencionados. Em particular, a experiência mostra que defeitos como o pite (*Pitting*) não é fonte de falha por pressão embora possa ser fonte de falha por vazamento, o que não é abordado neste trabalho.

Os defeitos axiais e os circunferenciais podem ocorrer tanto na parte externa do tubo (lado do secundário) quanto na interna (lado do primário) e são mais frequentes na ‘perna quente’ uma vez que a temperatura mais elevada torna o material mais suscetível aos mesmos. E, também, são mais frequentes na região de expansão dos tubos junto do espelho do GV (mandrilamento) bem como nas interseções dos tubos com as placas espaçadoras, principalmente quando ocorre o chamado *denting* que é uma formação exagerada de óxidos entre a placa e o tubo e que pode até diminuir a seção do tubo em situações extremas.

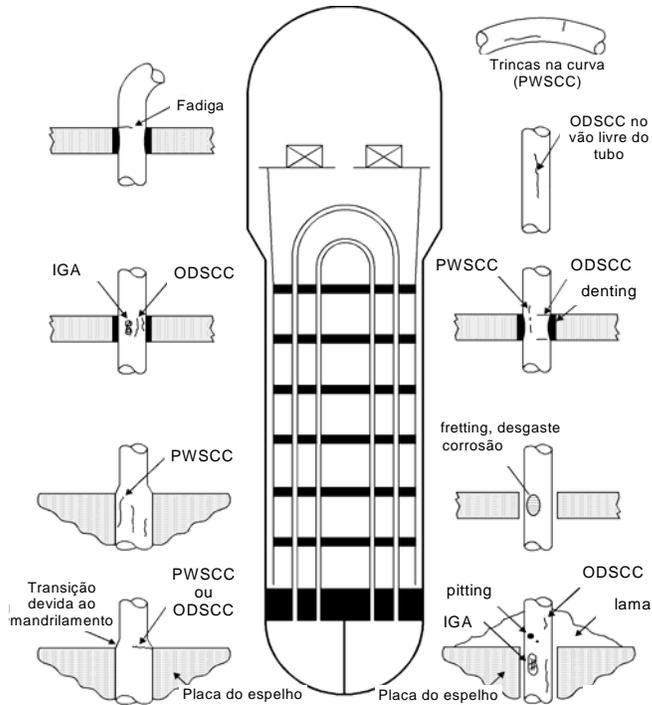


Figura 1. Esquema de um GV com os principais defeitos que ocorrem e sua localização

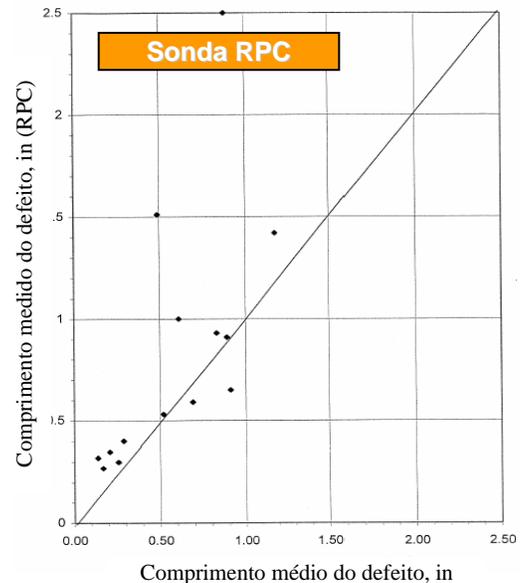


Figura 2. Exemplos de sonda/técnica utilizada na detecção de defeitos em tubos de GV [3]

O histórico das inspeções progressivas definirá, em um primeiro momento, que defeitos são esperados de serem encontrados e, portanto, as técnicas que serão adotadas na inspeção atual. Previamente a uma análise de integridade estrutural os defeitos detectados devem ser estratificados por mecanismo de dano, tipo, localização ao longo do tubo e origem (interno ou externo) e para cada defeito assim estratificado devem ser preparadas as curvas e valores máximos admissíveis (sem considerar o crescimento) que permitirão uma primeira avaliação dos defeitos recém detectados para comparação com as previsões feitas na inspeção anterior (Análise CM – Condição de Monitoramento). A comparação dos defeitos detectados com os defeitos da inspeção anterior fornecerá as taxas de aparecimento e crescimento dos mesmos com as quais serão obtidas novas curvas e valores máximos admissíveis. Isto permitirá completar os dados necessários para a avaliação final (Análise OA – Avaliação Operacional) que definirá quais defeitos/tubos deverão ser reparados e quais deverão ser postos fora de serviço, plugueados. Esta seqüência de atividades/análises está resumida esquematicamente na figura 3

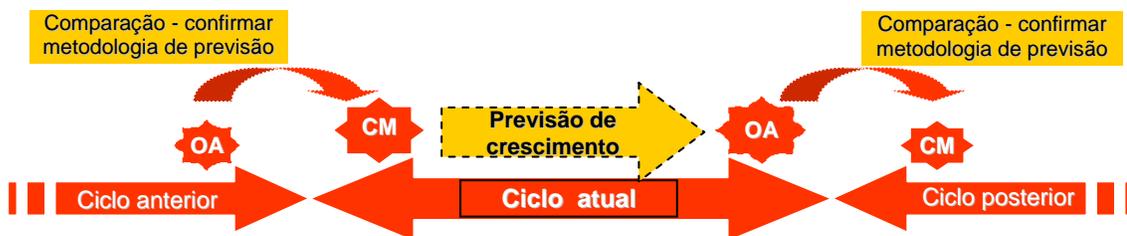


Figura 3. Seqüência lógica da avaliação de integridade estrutural dos tubos de um GV

PRESSÃO MÍNIMA, AJUSTES E INCERTEZAS

Pressão mínima. Considera-se que um tubo com defeito não compromete a segurança por risco de colapso sob pressão, portanto a integridade do tubo estará assegurada, se a sua pressão de colapso mínima, $P_{B_{tubo}}$, considerando todas as incertezas envolvidas (inclusive quanto ao crescimento do defeito) e que depende de cada planta, atender a eq. (1) [2] onde ΔP_{des} é a pressão de projeto (mínima) a ser garantida para qualquer condição ou defeito, ΔP_{oper} é a diferença entre a pressão do circuito primário e a pressão do secundário em condição de operação normal, e ΔP_{acid} é a diferença de pressão em situação de acidente.

$$P_{B_{tubo}} > P_{B_{des}} (= \Delta P) = \max(3,0 * \Delta P_{oper}, 1,4 * \Delta P_{acid}) \quad (1)$$

Ajuste e Incertezas devidas às dimensões do defeito (à técnica de detecção). Cada tipo de defeito exige uma técnica de inspeção específica, isto é: um procedimento e uma sonda específicos, para a obtenção indireta das suas dimensões (parâmetro característico) como profundidade, comprimento, etc., a partir da medida, por exemplo, da corrente parasita que se desenvolve em uma bobina (sonda) introduzida no tubo. Haverá, também, um erro específico associado às dimensões do defeito devido a técnica utilizada. A partir de ensaios onde se aplica a técnica em defeitos padronizados, com parâmetros conhecidos, é possível determinar o ajuste necessário a ser feito no valor lido, parâmetro medido (X_{NDE}), para associá-lo ao valor 'real' médio do defeito (X). Assim, para cada técnica/defeito haverá uma correlação de ajuste, como indicado na eq. (2), onde os coeficientes C_a e C_b são conhecidos 'a priori', e uma incerteza ou erro traduzido pelo respectivo desvio padrão, σ_x .

$$X = C_{a,x} * X_{NDE} + C_{b,x} \quad \text{com desvio padrão } \sigma_x \quad (2)$$

Incertezas devidas ao material. Nas correlações é utilizado o valor médio $S_m = (S_y + S_u)$ que representa a soma das tensões limite de escoamento (S_y) e limite de ruptura material (S_u) obtidas dos ensaios com o material dos tubos. Para considerar a incerteza deste valor assume-se uma distribuição normal com média S_m e desvio padrão σ_m dos valores médios de cada ensaio.

Incertezas devidas à correlação. Como mencionado, para cada tipo de defeito há uma correlação empírica envolvendo vários parâmetros com a pressão de colapso do tubo. Por ser, também, um ajuste, esta correlação representa o valor médio da pressão de colapso e tem um erro, ou incerteza, intrínseco dado por um valor de desvio padrão. No item seguinte serão mostrados exemplos de correlação e as respectivas incertezas.

DEFEITOS TÍPICOS, RESPECTIVAS CORRELAÇÕES E INCERTEZAS

A seguir são apresentados alguns dos defeitos típicos que aparecem nos tubos de um GV, com os seus principais parâmetros, independentemente da sua origem (interno ou externo) e da sua localização, bem como as respectivas correlações [2] (onde é utilizada a profundidade relativa, $h = d/t$). Defeito axial de penetração total (passante), fig. (4.a), cujo único parâmetro é o comprimento L e cuja correlação básica é dada pela eq. (3.a). Defeito axial de penetração parcial, fig. (4.b), cujos parâmetros são o comprimento L e a profundidade média h , a incerteza da correlação, eq. (3.b), está no fator 1,104. O parâmetro Φ ajusta a correlação para o caso de defeito interno ($\Phi = 1,0$ para defeito externo). Esta correlação tem uma incerteza dada pelo desvio padrão $\sigma_{corr} = 0.0705$. Defeito circunferencial, fig. 4.c, cuja correlação é dada em função da porcentagem de área degradada (PDA) da seção transversal do tubo. Há duas correlações, dependendo do valor do PDA, eq. (3.c). Defeito Volumétrico caracterizado pela redução axial da espessura com extensão circunferencial limitada, também definido por dois parâmetros, L e h , fig. (4.d), a respectiva correlação é dada na eq. (3.d) cuja incerteza está no fator 291. Estas correlações foram desenvolvidas para o sistema inglês de unidades e, por isso, os dados e os resultados são apresentados neste sistema não sendo conveniente reescrevê-las para as unidades do sistema internacional, SI.

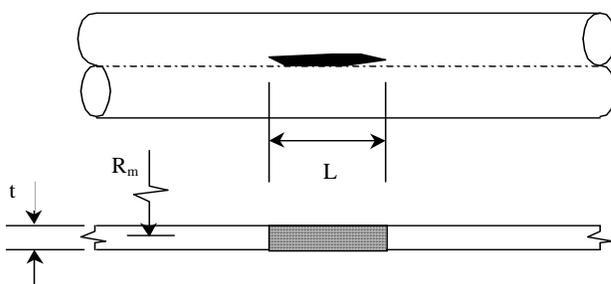


Figura 4.a. Defeito axial de penetração total (passante)

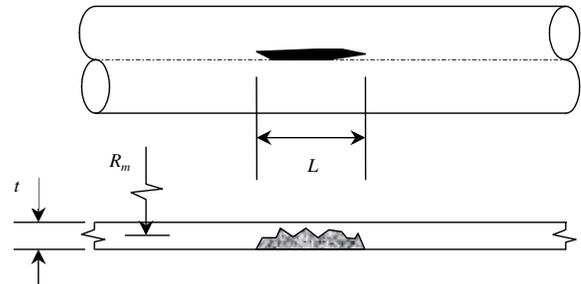


Figura 4.b Defeito axial de penetração parcial

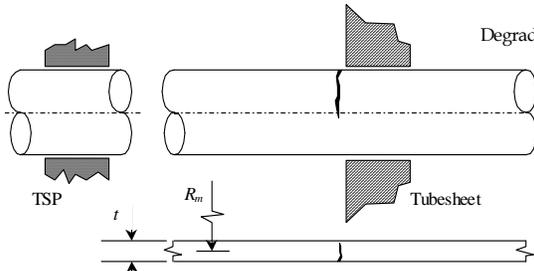


Figura 4.c. Defeito circunferencial

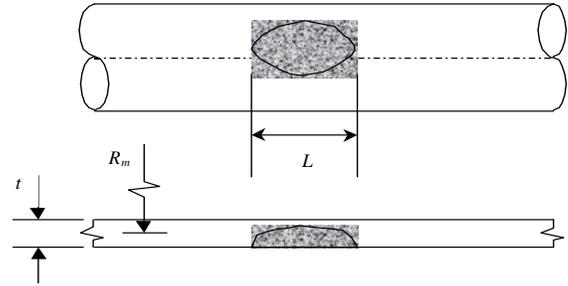


Figura 4.d. Redução axial da espessura com extensão circunferencial limitada (volumétrico)

$$L = \sqrt{R_m t} \left[-2.2418 - 3.600 \ln \left(\frac{P_B R_m}{(S_y + S_u) t} - 0.06132 \right) \right] \quad (a)$$

$$P_B = \Phi 0,58 (S_y + S_u) \frac{t}{R_i} \left[1,104 - \frac{L}{L + 2t} h \right], \quad \Phi = \frac{(L + 2t)}{\left(L + 2t + \frac{Ld}{R_i} \right)} \quad (b)$$

$$P_B = \frac{t}{R_m} (S_y + S_u) 1.2227 (1 - \xi), \quad \xi > 0,75 \quad (c.1)$$

$$P_B = \frac{t}{R_m} (S_y + S_u) (0.57326 - 0.35281 \xi), \quad \xi \leq 0,75 \quad (c.2)$$

$$P_B = 0.58 (S_y + S_u) \frac{t}{R_i} \left(1.0 - \frac{L}{L + 2t} h \right) + 291 \text{ psi} \quad (d)$$

Tratamento das Incertezas

Devemos considerar as incertezas de modo a produzir a menor pressão de colapso do tubo ($P_{B_{\text{tubo}}}$). Dizer que um defeito tem uma probabilidade acumulada de falha por colapso inferior a 5% significa que para qualquer tipo de defeito, a pressão de colapso do tubo, associada à análise “CM” ou “OA” deve ser avaliada com probabilidade de 0,95, com um grau de confiança de 50%. Em outras palavras: se espera que, em 95% das vezes os tubos com um dado defeito (tamanho) não sofrerão colapso quando a pressão atuante valer $P_{B_{\text{tubo}}}$. Para isto devemos considerar, para cada parâmetro envolvido na correlação de um dado defeito, uma determinada distribuição estatística. Assim, por exemplo, para a análise “CM” e considerando apenas o comprimento L do defeito, nas correlações devemos usar o valor L_X como indicado na expressão (4) onde se adota o ajuste na medida L_{NDE} já indicado na expressão (2) e a incerteza dada pelo desvio padrão (σ_L). Para a análise “OA” devemos acrescentar o termo entre colchetes onde $L_{\text{Gr,medio}}$ é o crescimento médio observado entre inspeções e σ_{LG} é o respectivo desvio padrão.

$$L_X = (C_{a,L} * L_{\text{NDE}} + C_{b,L}) + Z_L * \sigma_L + [L_{\text{Gr,medio}} + Z_{\text{Gr}} * \sigma_{\text{LG}}] \quad (4)$$

Adotando-se a distribuição normal, como é feito em geral, e supondo que o único parâmetro envolvido seja o comprimento do defeito, na correlação para obter a pressão de colapso associada a este defeito/tubo deveríamos utilizar o valor L_X , definido pela expressão (4), associado à probabilidade acumulada de 0,95. Isto quer dizer que deveríamos usar os fatores $Z_{\text{Gr}} = Z_L = 1,645$. Devemos aplicar raciocínio semelhante a todos os demais parâmetros envolvidos na correlação associada ao tipo de defeito sob análise.

Se o fator Z assume um valor fixo para todos os parâmetros da correlação isto significa que estamos considerando as incertezas do modo mais conservador e implica que obteremos um valor $P_{B_{\text{tubo}}}$ também conservador o que, em algumas situações pode se mostrar uma solução não econômica pois implicaria muitos tubos postos fora de serviço comprometendo o desempenho do GV. Se, por outro lado, permitimos que o fator Z assumam valores aleatórios entre 0 e 1, mas que atendam a uma distribuição normal padrão, com média nula e desvio padrão unitário, para todos os parâmetros da correlação, podemos repetir o cálculo em, digamos, 10000 vezes e teremos 10000 valores de pressão de colapso. Se na distribuição formada por estes valores tomarmos o valor associado à probabilidade acumulada de 0,95 teremos atendido à exigência da norma com menos conservadorismo. Esta é a essência do Monte Carlo.

EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Foi desenvolvido um programa [4] em linguagem Matlab para automatizar a aplicação do método Monte Carlo para a obtenção das dimensões críticas de um tubo com um dado defeito dentre aqueles com correlações disponibilizadas na ref. [2], das quais alguns são mostrados na Fig. 4 e as respectivas correlações nas Eq. 3. Como resultado do programa desenvolvido é obtida uma figura com três curvas, ver exemplos a seguir, associadas respectivamente, ao “Limite Estrutural”, obtida utilizando os valores médio nominais dos diversos parâmetros, à condição CM e à condição OA. Estas duas últimas obtidas com o método estatístico Monte Carlo incorporando todas as incertezas.

A seguir serão apresentados dois exemplos de aplicação: um para um defeito axial e outro para um defeito circunferencial. Em ambos os casos consideraremos que os tubos do GV sejam feitos de um material cuja distribuição dos (S_y+S_u) tenha o valor médio $S_M = 147000$ psi e desvio padrão $\sigma_M = 6250$ psi, e que tenhamos o valor $P_{B_{des}} = 4000$ psi.

Exemplo 1 - Defeito axial interno de penetração parcial

Considerando o defeito axial de penetração parcial originado na superfície interna do tubo, seja σ_{Corr} o desvio padrão que representa a incerteza da correlação, $L_{NDE,Médio}$ o valor médio, após o ajuste pela eq. (2) do comprimento medido L_{NDE} do defeito sendo σ_L a sua incerteza (desvio padrão), $h_{NDE,Médio}$ o valor médio da profundidade do defeito, também ajustado segundo a eq. (2) a partir do valor medido (h_{NDE}) e σ_h a respectiva incerteza (desvio padrão). Assim, um tubo com este tipo de defeito e os parâmetros definidos deverá falhar na pressão P_B dada pela eq. (5), diretamente derivada da eq. (3.b), onde o fator Z é o mesmo discutido acima.

Como a máxima diferença de pressão ($P_{B_{des}}$) é um valor fixo para uma dada planta, podemos reescrever a eq. (5) fazendo $P_B = P_{B_{tubo}}$ de forma a explicitar um dos parâmetros variáveis, por exemplo, a profundidade relativa h em função de todos os demais, em particular, em função do comprimento L do defeito. Assim, para cada valor arbitrado de comprimento L podemos aplicar a expressão obtida para calcular o respectivo valor de profundidade, associado a um dado valor do fator Z (aleatório, distribuição normal padrão). Mantendo o valor do comprimento L e repetindo o processo umas 10000 vezes, para outros tantos valores de Z , teremos 10000 valores críticos de h cujo valor desejado é aquele associado à probabilidade acumulada de 0,95, com um grau de confiança de 50%, também chamado de 5º percentil da distribuição. O processo é repetido para todos os valores de L .

$$P_B = \Phi \cdot 0.58 (S_M - Z \cdot \sigma_M) \frac{t}{R_i} \left[(1.104 - Z \cdot \sigma_{Corr}) - \frac{(L_{NDE,Médio} + Z \cdot \sigma_L)}{(L_{NDE,Médio} + Z \cdot \sigma_L) + 2t} \cdot (h_{NDE,Médio} + Z \cdot \sigma_h) \right] \quad (5)$$

Vamos supor que o defeito axial a ser inspecionado esteja em uma localização tal que seja utilizada uma técnica com os seguintes ajustes (fictícios): (no comprimento) $L_{NDE,médio} = 1.00 \cdot L_{NDE} + 0.05$ com $\sigma_L = 0.10$ ” e (na profundidade) $h_{NDE,médio} = 1.01 \cdot h_{NDE} + 0.0$ com $\sigma_h = 0.11$ (11%).

Para este tipo de defeito vamos supor, também, que o valor médio do crescimento do comprimento entre inspeções seja de $L_{Gr} = 0,05$ ” com desvio padrão $\sigma_{LGr} = 0,05$ ” e que o valor médio do crescimento da profundidade relativa entre inspeções seja de $h_{Gr} = 3,5\%$ com desvio padrão $\sigma_{hGr} = 1,5\%$.

O resultado da análise, para este exemplo, pode ser visto na fig. 5, onde são apresentadas as curvas do “Limite Estrutural”, da condição CM e da condição OA. Os pontos em vermelho não fazem parte da saída do programa e são explicados no item seguinte (“Discussão”).

Exemplo 2 - Defeito circunferencial

Consideremos, agora, um defeito circunferencial em um tubo que será inspecionado com uma técnica com os seguintes ajustes (fictícios) no seu único parâmetro, PDA - Porcentagem de Área Degradada da seção do tubo, o parâmetro ξ nas eq. 3.c.1 e 3.c.2: $\xi = PDA_{NDE,médio} = 1.00 \cdot PDA_{NDE} + 10$ com $\sigma_\xi = 15\%$. Quanto ao crescimento do defeito, vamos supor que o valor médio do crescimento do PDA entre inspeções seja de $PDA_{Gr} = 7,5\%$ com desvio padrão $\sigma_{PDA,G} = 3\%$. (No programa desenvolvido, [4], os valores devem ser fornecidos em porcentagem e internamente o programa os converte para valores decimais a serem utilizados nas correlações.)

Um tubo com um defeito circunferencial e com os parâmetros definidos deverá falhar na pressão P_B dada pelas eq. (6.a) e (6.b), diretamente derivadas da eq. (3.c), onde explicitamente foram incluídas as incertezas nos parâmetros envolvidos.

O resultado desta análise/exemplo é apresentado na fig. 6, através das curvas “Limite Estrutural”, “CM” e “OA”.

$$P_B = \frac{t}{R_m} (S_M - Z\sigma_M) (1.2227 - 1.341\sigma_{P_n}) (1 - \xi - Z\sigma_\xi), \quad \xi > 0,75 \quad (a)$$

$$P_B = \frac{t}{R_m} (S_M - Z\sigma_M) [0.57326 - 0.35281(\xi + Z\sigma_\xi) - 1.383\sigma_{P_n}], \quad \xi \leq 0,75 \quad (b)$$

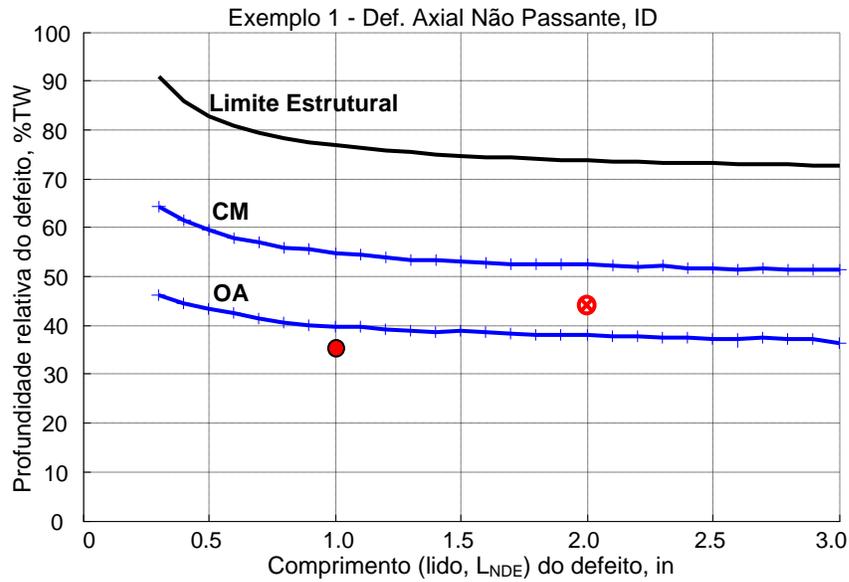


Figura 5. Resultado do exemplo 1 – Defeito axial interno de penetração parcial

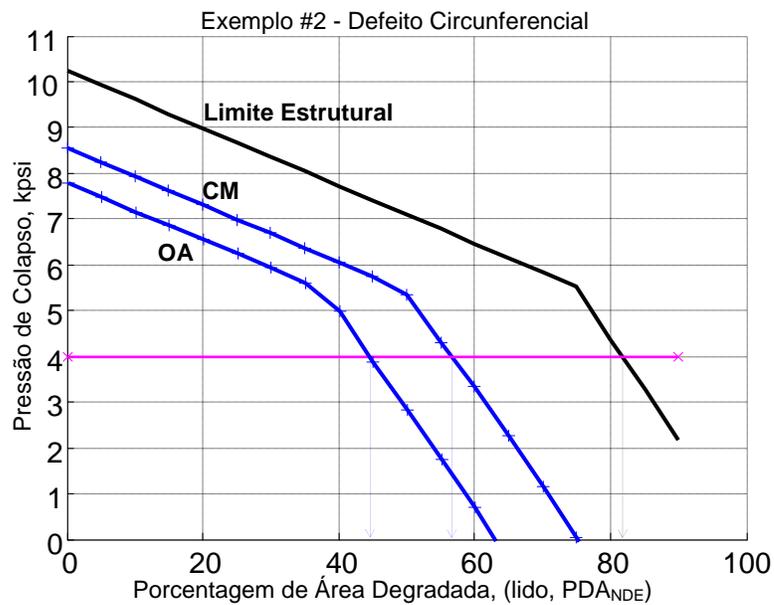


Figura 6. Resultado do exemplo 2 – Defeito Circunferencial

Discussão dos resultados

Observe-se que: 1. nos dois exemplos, há uma razoável diferença entre considerar os valores nominais dos parâmetros (curva Limite Estrutural) e os valores com as suas incertezas, curvas CM e OA; 2. como as incertezas já foram incorporadas nos valores utilizados nas correlações, o valor do parâmetro do defeito obtido na inspeção (L_{NDE} , h_{NDE} , PDA_{NDE} , etc.) pode ser utilizado diretamente nas curvas dos resultados; 3. o ‘andamento’ irregular das curvas CM e OA é inerente ao método de obtenção e porque não foi feito nenhum tratamento dos resultados como, por

exemplo, interpolação de um polinômio para ‘suavizar’ as curvas.

Exemplo 1. A partir análise da fig. 5, em particular da curva OA, os resultados obtidos são interpretados da seguinte forma: um tubo (‘o’) com um defeito com, por exemplo, 1” de comprimento e que tenha comprometido menos de 40% da espessura do tubo poderia permanecer em serviço uma vez que até o fim do próximo ciclo de operação, portando já incluindo o crescimento esperado e todas as incertezas envolvidas, o risco de falha por colapso do mesmo seria inferior a 5%. Um outro tubo (‘⊗’) que tenha, por exemplo, um defeito com comprimento de 2” e profundidade > 40% da espessura, deveria ser reparado ou retirado de serviço (tamponado) pois até o fim do próximo ciclo de operação da planta a sua probabilidade de falha seria superior aos 5%.

Exemplo 2. Raciocínio semelhante pode ser feito no caso do exemplo 2 onde, observando a figura 6 e para a pressão de projeto considerada, 4000 psi, um defeito circunferencial torna-se crítico (isto é: probabilidade acumulada de falha > 5%) quando compromete cerca de 45% da seção do tubo (curva OA). Se fossem adotados os valores nominais dos parâmetros envolvidos este valor seria de pouco mais de 80%.

Há algumas abordagens mais ‘simples’ com graus diferentes de conservadorismo. Uma abordagem conservadora seria considerar, por exemplo, para cada um dos parâmetros envolvidos o valor associado ao 5º percentil da sua distribuição específica (fixando-se $Z=1,645$). Outra abordagem ainda mais conservadora seria considerar os valores extremos (mínimos ou máximos) de cada parâmetro envolvido. Por fim, no extremo do conservadorismo, teríamos a imediata retirada de serviço de qualquer tubo em que fosse detectado algum tipo de defeito, independente da sua localização, origem e dimensões. A abordagem estatística utilizando o método Monte Carlo mantém o nível de segurança adequado estabelecido pelas normas e, ao mesmo tempo, reduz o conservadorismo das abordagens mais ‘simples’.

CONCLUSÃO

Foram descritos, de forma sucinta, os princípios que norteiam a avaliação da integridade estrutural de tubos de geradores de vapor de usinas nucleares apresentando-se algumas correlações disponíveis desenvolvidas pela indústria, para defeitos mais comuns. Utilizando-se um programa próprio, onde foram implementadas as correlações, dos defeitos mais comuns, foram apresentados dois exemplos de aplicação do método Monte Carlo para considerar as incertezas dos parâmetros envolvidos com uma discussão dos resultados obtidos. Os resultados

REFERÊNCIAS

1. NEI 97-06 "Steam Generator Program Guidelines", Nuclear Energy Institute, September 1999..
2. "Steam Generator Degradation Specific Management Flaw Handbook", EPRI Technical Report 1001191, January 2001.
3. ETSS, *Eddy Current Examination Technique Specification Sheet*, 2006.
4. Relatório PSE.CENM.ETN.140.01 RELT.001.00, Programa ASGeTuDA (Versão 4.2), 14/02/2007.

UNIDADES E NOMENCLATURA

ΔP_{des}	- pressão de projeto (mínima) a ser garantida para qualquer condição ou defeito (psi)
ΔP_{oper}	- diferença entre a pressão do primário e a pressão do secundário em condição de operação normal (psi)
ΔP_{acid}	- idem, em situação de acidente (psi)
$C_{a,x}$	- declividade do ajuste linear do parâmetro genérico ‘X’ do defeito
$C_{b,x}$	- coeficiente linear do ajuste do parâmetro genérico ‘X’ do defeito (a unidade depende do defeito)
X_{NDE}	- valor lido na inspeção parâmetro genérico ‘X’ do defeito (a unidade depende do defeito)
σ_X	- desvio padrão do ajuste do parâmetro genérico ‘X’ do defeito (a unidade depende do defeito)
$S_m = (S_y + S_u)$	- soma das tensões limite de escoamento, S_y , e limite de ruptura material, S_u (psi)
R, R_i, R_m	- raio do tubo, raio interno do tubo, raio médio do tubo (inches)
t	- espessura da parede do tubo (inches)
L	- comprimento do defeito (inches)
d	- profundidade média do defeito (inches)
$h = d/t$	- profundidade relativa do defeito (sem unidade)
ξ, PDA	- Porcentagem de Área Degradada da seção do tubo com defeito circunferencial (sem unidade)
Φ	- parâmetro de ajuste da correlação para o caso de defeito axial interno (sem unidade)
Z	- parâmetro aleatório que atende a uma distribuição normal padrão, média nula e desvio padrão unitário (sem unidade)

Caso 5.1.4 - Defeito de Penetração Parcial (1)

Correlação e Incerteza no Comprimento Lnde do defeito:
 $[a * Lnde + b]$ e SDevL

a - Coeficiente Angular (declividade) da reta de ajuste do Comprimento Lnde
 1.00

b - Coeficiente Linear (Intercept) da reta de ajuste de Lnde (inches)
 0.05

SDevL - Desvio Padrao (Incerteza) do ajuste do Comprimento Lnde (inches)
 0.10

Título da Analise (max. 60 caracteres)
 Exemplo da Aplicação - Def. Axial Nao-Passante

Tipo de Defeito (OD=externo; ID=interno)
 ID

OK Cancel

Caso 5.1.4 - Defeito de Penetração Parcial (2)

Correlação e Incerteza na Profundidade relativa do defeito (hnde):
 $[a * hnde + b]$ e SDevh

a - Coeficiente Angular (declividade) da reta de ajuste da Profund. hnde
 1.01

b - Coeficiente Linear da reta de ajuste da Profund. relat. hnde (%TW)
 0.00

SDevh - Desvio Padrao do ajuste da Profundidade relativa hnde (%TW)
 11.0

OK Cancel

Caso 5.1.4 - Defeito de Penetração Parcial (3)

MedL - Crescimento medio do Comprimento L entre inspecoes (inches)
 0.05

SDevL - Desvio Padrao do crescimento do Comprimento L (inches)
 0.05

Medh - Crescimento medio da Profund. rel. h entre inspecoes (%TW)
 3.50

SDevh - Desvio Padrao do crescimento da Profundidade rel. h (%TW)
 1.50

OK Cancel

Caso 5.2.1 - Defeito Circunferencial (1)

Correlação e Incerteza no PDAnde - Porcent. de Area Degradada (Caso 5.2.1):
 $[a * PDAnde + b]$ e SDevPDA

a - Coeficiente Angular (declividade) da reta de ajuste do PDAnde
 1.00

b - Coeficiente Linear (Intercept) da reta de ajuste do PDAnde (%)
 0.0010

SDevPDA - Desvio Padrao do ajuste na medida da Area degradada, PDAnde (%)
 15

Título da Analise (max. 60 caracteres)
 Exemplo #2 - Defeito Circunferencial

Tipo de Defeito (OD=externo; ID=interno)
 OD

OK Cancel

Caso 5.2.1 - Defeito Circunferencial (2)

Med - Crescimento medio da Area degradada, PDAnde, entre inspecoes (%)
 7.5

SDevGr - Desvio Padrao do crescimento da Area degradada, PDAnde, (%)
 3.0

OK Cancel