



**APLICAÇÃO DO MÉTODO MONTE CARLO NA AVALIAÇÃO
DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE TUBOS DE GERADORES
DE VAPOR DE CENTRAIS NUCLEARES DE POTÊNCIA**

Carlos Alexandre de J. Miranda

Miguel Mattar Neto

IPEN-CNEN/SP, Travessa R, 400.

05508-900, S. Paulo, SP, Brasil.

E-mail: cmiranda@net.ipen.br, mmattar@net.ipen.br

Resumo. *A cada parada operacional programada de uma central nuclear de potência é realizada, a inspeção de todos os tubos dos Geradores de Vapor (GV), verificando-se a integridade dos mesmos pelo confronto das dimensões dos defeitos encontrados com os limites definidos em normas e nas condições operacionais da planta. Tubos com algum defeito superior ao limite devem ser reparados ou tamponados o que, no limite, compromete o funcionamento econômico da central. Recentemente foram propostos critérios que consideram, na avaliação do tubo com defeito, a origem, orientação, morfologia e localização do defeito, além das suas dimensões. Tais critérios basearam-se no desenvolvimento de correlações específicas para cada defeito, a partir de ensaios também específicos. Tais critérios baseiam-se na probabilidade de falha dos tubos com defeito, sob a ação de cargas especificadas. Para tanto deve-se levar em conta as incertezas envolvidas: da própria correlação, dos valores das propriedades do material dos tubos, da técnica de inspeção adotada e do analista, e das dimensões dos defeitos (comprimento e profundidade). Em geral um tubo tem um defeito aceitável se a sua probabilidade acumulada de falha é de, no máximo, 10%. A forma de considerar tais critérios e tais incertezas passa por um tratamento estatístico. São possíveis duas abordagens estatísticas: (a) “simplificada”, quando todas as incertezas são consideradas atuando no sentido mais desfavorável e, (b) simulação por Monte Carlo, quando todas as incertezas variam aleatoriamente. Neste trabalho se faz uma breve revisão dos modos de falha/defeitos nos tubos de GVs e apresenta-se como aplicar o Método Monte Carlo a um caso específico. Os resultados são apresentados em forma de curvas comparando as duas abordagens.*

Palavras-chave: Mecânica da Fratura, Integridade Estrutural, Geradores de Vapor, Tratamento Estatístico, Monte Carlo.

1. INTRODUÇÃO

Uma usina nuclear de potência como Angra 1 produz cerca de 600 MW elétricos e tem 2 geradores de vapor (GV) com cerca de 5000 tubos cada um. Internamente aos tubos circula a água do circuito primário e do seu lado externo circula a água do circuito secundário que se transformará em vapor para, então, movimentar as turbinas. Assim, os tubos dos GVs fazem parte da “barreira de pressão do primário”. Estes tubos representam a maior parte desta barreira de pressão e, também, a sua parte mais delgada ($\approx 1\text{mm}$) tanto quando comparada com a espessura da parede do vaso de pressão, tipicamente da ordem de 20 cm quanto quando comparada com as espessuras das demais tubulações do primário que conectam os diversos equipamentos que o compõe.

O ambiente dos GVs em geral (química da água, temperatura, tensões nos tubos, etc) pode ser considerado, também, um fator agravante para a integridade estrutural dos tubos, dependendo do

material de que são fabricados. Em particular o Inconel 600 é suscetível a estes efeitos associados ao longo tempo em que os mesmos ocorrem (“envelhecimento” do material). Este conjunto de fatores induz a necessidade um cuidadoso monitoramento do estado dos tubos dos GVs. Usualmente a inspeção dos tubos dos GVs de uma central nuclear de potência é realizada a cada parada, fim de um ciclo operacional, para troca dos combustíveis, quando 100% dos tubos são inspecionados, verificando-se a integridade dos mesmos pelo confronto das dimensões dos defeitos encontrados com os limites definidos em normas e nas condições operacionais da planta.

Há vários critérios, alguns mais conservadores do que outros, para avaliar a integridade estrutural dos tubos de um GV. Tipicamente podem ser citados dois casos: Japão e Estados Unidos. No Japão um tubo é reparado ou tamponado desde que, na inspeção, seja detectado um defeito, não importando a sua natureza, localização e/ou suas dimensões. Já as normas dos Estados Unidos, estabelecem uma redução máxima admissível da espessura do tubo com algum tipo de defeito (40%), independente da sua origem, localização, morfologia e dimensões. Tubos com algum defeito superior ao limite devem ser reparados ou tamponados. A aplicação destes critérios conservadores, no limite, quando a quantidade de tubos tamponados é grande, compromete o funcionamento econômico da central. Além do aspecto econômico há, também, aspectos de segurança que não podem ser negligenciados e que tendem a incrementar a quantidade de tubos tamponados.

Com o intuito de reduzir o conservadorismo destes critérios foram propostos critérios alternativos (NEI, 1997) que consideram, na avaliação do tubo, se o defeito é externo ou interno, a sua localização (próximo ao espelho do GV, próximo a uma placa suporte, no vão livre do tubo, etc.), a sua orientação (axial ou circunferencial), a sua morfologia, se o mesmo (trinca/defeito) é passante ou não passante e suas demais dimensões. Para tanto, foram desenvolvidas correlações específicas para cada tipo defeito, após a realização de ensaios também específicos com tubos com defeitos simulados (usinados) e tubos com defeitos 'reais' retirados de GVs em operação.

Para a aplicação de tais critérios alternativos, baseados na probabilidade de falha de um tubo com defeito, sob a ação de cargas especificadas, deve-se levar em conta as incertezas envolvidas: (da própria correlação, dos valores das propriedades do material, da técnica de inspeção adotada, incluindo as incertezas do analista e das dimensões dos defeitos. Em geral defeito será aceitável se a probabilidade acumulada de falha do tubo for de, no máximo, 10%, consideradas todas as incertezas envolvidas e a carga aplicada que, em geral, trata-se da diferença de pressão entre o primário e o secundário, afetada de um fator de segurança. Portanto, a forma de se realizar a avaliação de integridade estrutural dos tubos de um GV utilizando-se tais critérios alternativos e considerando as incertezas envolvidas passa por um tratamento estatístico. São possíveis duas abordagens estatísticas: (a) “simplificada”, quando todas as incertezas são consideradas atuando no sentido mais desfavorável (sempre associadas à probabilidade de falha aceitável) e, (b) simulação por Monte Carlo, quando todas as incertezas variam aleatoriamente.

Neste trabalho se faz uma breve revisão dos principais modos de falha/defeitos considerados nos tubos de GVs, as respectivas correlações desenvolvidas pelo EPRI (2000a, 2000b), os parâmetros e as incertezas envolvidas e se apresenta, para um caso, um exemplo específico de como aplicar a abordagem simplificada e o método Monte Carlo para se determinar os valores críticos de tamanho de trinca/defeito, associados aos 10% de probabilidade de falha/colapso, que servirão para definir se um dado tubo deve ser ou não tamponado ou reparado.

2. DEFEITOS QUE OCORREM NOS TUBOS DE UM GV

No decorrer deste trabalho, onde se usa indistintamente os termos defeito e trinca como sinônimos, embora nem sempre o sejam, serão abordados os defeitos típicos que ocorrem nos GVs com tubos dobrados em forma de U típicos em usinas nucleares PWR do tipo de Angra 1. Em geral cada defeito tem uma origem específica e uma localização ou morfologia típicas conforme apresentado na Figura 1. Alguns tipos de defeito têm nomes ‘consagrados’, em inglês, que definem o seu tipo e/ou origem, usados na Figura 1, que são descritos a seguir.

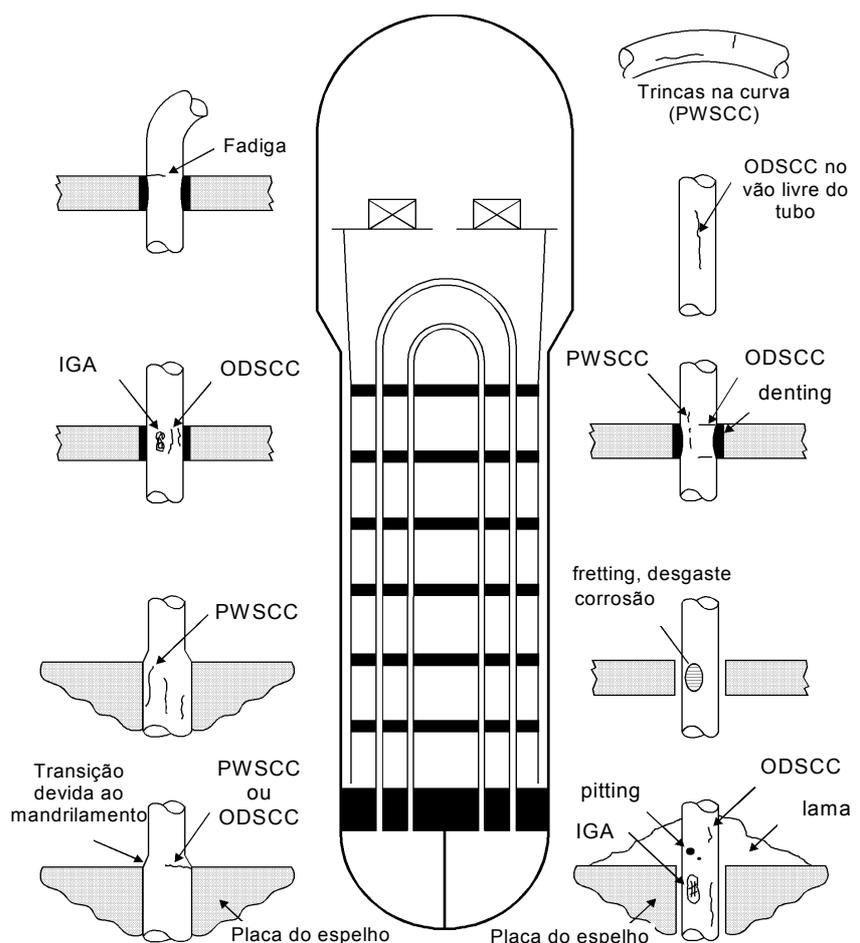


Figura 1. Defeitos típicos de um Gerador de Vapor com tubos dobrados em U (EPRI, 2000b)

2.1 Nomenclatura

Principais tipos de defeito que ocorrem nos tubos de um GV, identificados na Figura 1. PWSCC: ‘*Primary Water Stress Corrosion Cracking*’ – trata-se do defeito que se inicia na superfície interna do tubo (água do primário) devido à corrosão sob tensão. ODSCC: ‘*Outer Diameter Water Stress Corrosion Cracking*’ - defeito que se inicia na superfície externa do tubo (lado do secundário). IGA: ‘*Inter-Granular Attack*’. Pitting: corrosão localizada (‘pontual’). Fretting: tipo de fadiga provocada pelo contato entre superfícies. Denting: defeito criado pela corrosão da superfície dos furos da placa suporte (PS) cujo óxido elimina a folga inicialmente existente entre o tubo e a PS podendo, inclusive, provocar uma redução da seção do tubo.

2.2 Alguns Defeitos e sua Idealização

Na avaliação da integridade estrutural dos tubos de um GV se deve considerar (a) as dimensões do tubo: raio interno, r_i , ou raio médio, r_m , e sua espessura, t ; (b) a diferença de pressão a que os mesmos estão submetidos, ΔP (afetada de um fator de segurança), (c) o material de que são feitos os tubos através da sua resistência dada em termos do valor $S_y + S_u$ (tensão de escoamento + tensão de ruptura) e (d) as dimensões do defeito: comprimento (L), profundidade média (d) ou relativa ($h=d/t$) além da sua orientação (axial ou circunferencial), localização ou posição ao longo do tubo e a sua origem (superfície interna ou externa). A seguir são apresentados alguns dos defeitos que aparecem nos tubos dos GVs seguidos de uma breve descrição e da sua idealização (EPRI, 2000b), em forma de figura ilustrativas, que englobam, em alguns casos, mais de um defeito indicado na Figura 1.

Trinca axial passante no meio do vão livre do tubo. Este defeito (Figura 2) é envoltória para todos os demais defeitos axiais. Uma vez que se mostra que o tubo com este defeito não colapsa, o

mesmo também não colapsará para nenhum outro defeito axial com mesma dimensão longitudinal (L).

Trinca axial não-passante. Semelhante ao caso anterior sendo que o defeito tem penetração parcial na espessura do tubo (Figura 3) e se considera uma profundidade média constante ao longo do seu comprimento L. Pode ser interno ou externo.

Trinca axial na zona de expansão. Caso particular de trinca axial, pode ser na superfície interna ou externa do tubo e se distingue do caso anterior por se considerar uma parcela de enrijecimento do tubo (Figura 4), isto é; se considera uma contribuição a mais na resistência do tubo com defeito devida à presença do espelho.

Degradação volumétrica limitada circunferencialmente. O tratamento deste defeito, Figura 5, se baseia na capacidade da parte remanescente da parede do tubo de resistir ao rasgamento sob a pressão e, para ser válido, é necessário que a dimensão circunferencial do defeito seja limitada).

ODSCC na TSP. Diferente dos demais, o critério alternativo desenvolvido para a avaliação da integridade estrutural dos tubos, para este defeito (Figura 6), não considera um parâmetro estrutural diretamente como o seu comprimento L ou a sua espessura h, mas, sim, a voltagem, V, lida pela sonda de inspeção dos tubos.

Pitting. Este defeito é extremamente localizado e caracterizado pela sua extensão longitudinal (L_{ax}) e circunferencial (L_{circ}) e profundidade, d.

Em geral o *pitting* não traz perigo de colapso para o tubo mas é importante sua verificação quanto ao risco de vazamento.

Trinca axial passante na curva do tubo. Este defeito é caracterizado pelo seu comprimento L.

Trinca circunferencial. Este defeito pode ocorrer, tipicamente, junto ao espelho ou junto às placas suportes dos tubos (TSP), Figura 7. O mesmo é caracterizado pelo tamanho da área degradada, ou comprometida, pelo defeito.

2.3 Critério

Um tubo com um determinado defeito será mantido em serviço se a sua probabilidade de

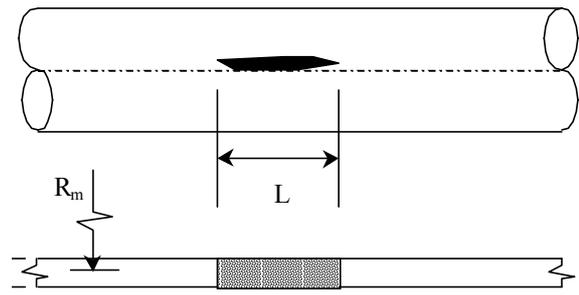


Figura 2. Trinca axial passante

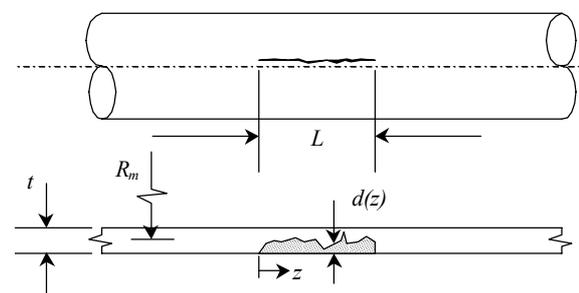


Figura 3. Trinca axial não-passante

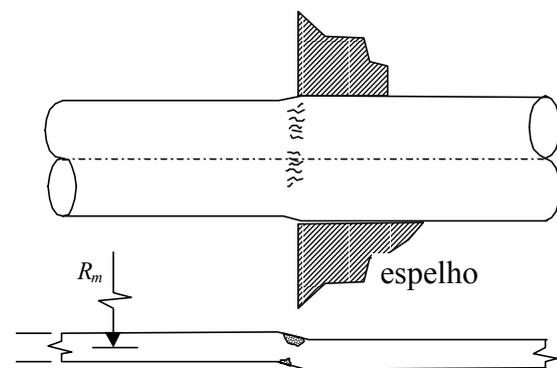


Figura 4. Trinca axial na zona de expansão

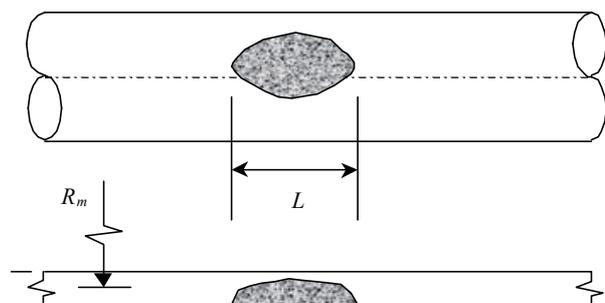


Figura 5. Degradação volumétrica limitada circunferencialmente

falha, consideradas todas as incertezas envolvidas, for de 10% no máximo, quando estiver atuando uma pressão de colapso ΔP igual ao valor máximo entre $3\Delta P_{oper}$ e $1.43\Delta P_{acc}$. ΔP_{oper} é a máxima diferença de pressão entre o primário e o secundário quando em operação normal e ΔP_{acc} é a máxima diferença de pressão em condição de acidente.

3. EQUAÇÕES ASSOCIADAS AOS DEFEITOS

A partir de experimentos, foram definidas as correlações envolvendo a pressão de colapso dos tubos, indicada nas equações como PB (*Burst Pressure*), com um determinado defeito, com os demais parâmetros envolvidos.

A seguir, a título ilustrativo, serão apresentadas duas destas correlações com uma breve discussão sobre os parâmetros e incertezas envolvidos.

Em seguida, se mostra como aplicar o tratamento estatístico e, em particular, o método Monte Carlo a fim de se determinar o valor crítico associado a 10% de probabilidade de falha do tubo.

Para o caso de uma *trinca axial passante*, como para todos os demais casos, inicialmente foram definidos os parâmetros adimensionais P_N (pressão normalizada), eq. (1.a) e λ (comprimento normalizado de trinca), eq. (1.b), com os quais foi feito o ajuste dos dados experimentais pela equação exponencial (1.c) onde $b_1 = 0.061319$, $b_2 = 0.53648$ e $b_3 = -0.2778$. Esta correlação, fornece a pressão de colapso ‘média’ (nominal) de um tubo com um defeito axial passante como idealizado. Ocorre que o valor $\max(3\Delta P_{oper}, 1.43\Delta P_{acc})$ é um parâmetro conhecido, associado à usina logo é conveniente rescrever a equação para expressar o tamanho crítico L_c deste defeito em função dos demais parâmetros, como indicado na equação (2).

Por mais precisos que sejam os valores dos parâmetros envolvidos, há um erro inerente no valor assim obtido uma vez que o mesmo é oriundo de uma expressão que melhor se ajusta aos valores experimentais. Para cada valor experimental haverá um erro dado pela diferença entre o próprio valor experimental e o valor previsto pela equação de ajuste. Estes erros assumirão valores ora positivos ora negativos com média nula. Admitindo que estes erros formem uma distribuição normal podemos caracterizá-la univocamente pelo seu desvio padrão σ_N (com ‘erro’ médio nulo neste caso). Para este defeito a distribuição dos erros devidos a correlação, eq. (1), apresenta um desvio padrão $\sigma_N = 0.01715$. É comum se referir a este valor σ_N como ‘o desvio padrão da correlação’. É razoável admitir, também, que cada um dos demais parâmetros envolvidos apresentem uma distribuição normal dos seus valores caracterizada por uma média e um desvio padrão. Usando os valores nominais ou ‘médios’ para estes parâmetros envolvidos obtém-se um valor L_c que representa a probabilidade de 50% de ocorrer o colapso do tubo. Esta interpretação vale também para as demais formulações.

Como um segundo exemplo seja o caso de avaliar a integridade estrutural de um tubo com o defeito *Degradação volumétrica limitada circunferencialmente* (Figura 5). A respectiva correlação é apresentada na equação (3), muito similar à correlação do caso *Trinca axial não-passante*. A incerteza da correlação é traduzida pelo valor (desvio padrão) $\sigma_B = 282$ psi associado com a constante 291 psi.

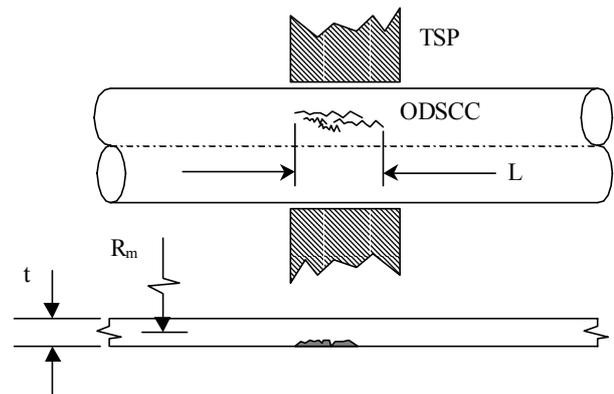


Figura 6. ODSCC na TSP

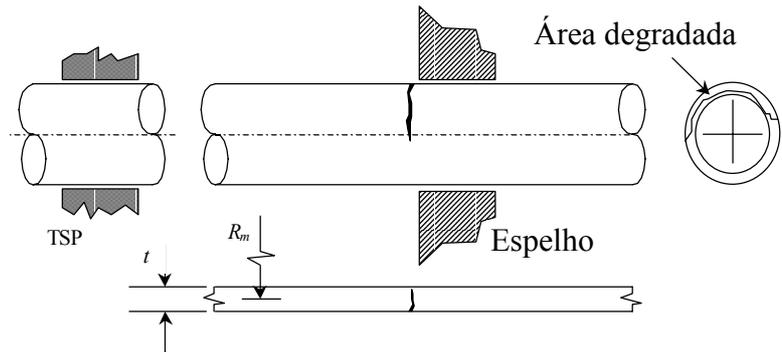


Figura 7. Trinca circunferencial

$$P_N = \frac{P_B R_m}{(S_y + S_u)t} \quad (a), \quad \lambda = \frac{L}{\sqrt{R_m t}} \quad (b), \quad P_N = b_1 + b_2 e^{b_3 \lambda} \quad (c) \quad (1)$$

$$L_C = \frac{\sqrt{R_m t}}{b_3} \ln \left[\left(\frac{P_B R_m}{(S_y + S_u)t} - b_1 \right) / b_2 \right] \quad (2)$$

$$P_B = 0.58 (S_y + S_u) \frac{t}{R_i} \left[1 - \frac{Lh}{L + 2t} \right] + 291 \quad (3)$$

3.1 Probabilidades Acumuladas e Percentis

Conhecida a sua distribuição é possível definir valores dos parâmetros associados a uma dada porcentagem acumulada de ocorrência definidos como sendo $M_X \pm Z\sigma_X$ onde M_X é o valor médio da distribuição do parâmetro X , σ_X é o seu desvio padrão e Z é um fator associado à probabilidade acumulada desejada que pode ser obtido em tabelas de livros de estatística. Assim, como exemplo, seja um dado material com o qual foi executado um grande número de ensaios onde o valor (S_y+S_u) foi medido. Foi encontrada uma distribuição (normal) de valores deste parâmetro com um valor médio $(S_y+S_u)_{50\%} = 1000$ MPa e um desvio padrão $\sigma = 50$ MPa. Para se conhecer o valor $(S_y+S_u)_{10\%}$ associado a probabilidade acumulada de 10 % deve-se fazer $(S_y+S_u)_{10\%} = (S_y+S_u)_{50\%} - Z*\sigma = 1000 - 1.282*50 = 935.9$ MPa. Para conhecer o valor $(S_y+S_u)_{90\%}$ associado a probabilidade acumulada de 90 % deve-se fazer $(S_y+S_u)_{90\%} = (S_y+S_u)_{50\%} + Z*\sigma = 1064.1$ MPa devido a simetria da distribuição normal. Caso se queira trabalhar com as probabilidades de 5% ou 95% se deveria adotar $Z = 1.685$ nos cálculos acima. Os valores 10% e 90% são, respectivamente, os valores máximos do 10º e do 90º percentil da distribuição. O mesmo raciocínio se aplica aos demais parâmetros. Se (S_y+S_u) fosse o único parâmetro envolvido, o valor $(S_y+S_u) = 935.9$ MPa forneceria um tamanho crítico de defeito que atenderia ao requisito estrutural (probabilidade de falha $\leq 10\%$, ou probabilidade de não colapsar $\geq 90\%$, avaliada com o nível de confiança de 50%).

3.2 Mecânica de Aplicação do Critério Alternativo

O Critério Alternativo aqui discutido, trabalha com dois valores que são usados em duas verificações: o primeiro é chamado “Condição de Monitoramento - CM” e o segundo é chamado a “Avaliação Operacional - OA”.

A verificação da Condição de Monitoramento objetiva determinar se o tubo sob análise manteve a ‘performance’ aceitável no final do intervalo de operação apenas completado. Um defeito medido está no limite da Condição de Monitoramento se satisfaz os requisitos estruturais com probabilidade de 0.90 (90%), avaliada com o nível de confiança de 50%.

Para a Avaliação Operacional considera-se o crescimento potencial do defeito no conjunto das variáveis e limitando o potencial vazamento. Uma trinca medida está no limite OA se satisfizer os requisitos estruturais no fim do próximo intervalo de operação com probabilidade de 0.90 (90%), avaliada com o nível de confiança de 50%, em conjunto com 95 % do seu crescimento previsto. Esta verificação (OA) não será abordada neste trabalho.

Uma vez obtida a correlação associada com um defeito, a aplicação do Critério Alternativo aqui discutido, para avaliar a integridade estrutural (Condição de Monitoramento) de um dado tubo de um GV, baseado na sua probabilidade acumulada de falha, se inicia com o obtenção do Limite Estrutural que é o tamanho do defeito associado a probabilidade acumulada de 50% ou, em outras palavras: aplicando à correlação os valores médios dos parâmetros envolvidos. A partir deste valor devem ser considerados valores que levem em conta as incertezas (associadas aos parâmetros envolvidos). Assim, após se obter, por exemplo, o comprimento crítico nominal (50%) de um

defeito, se deve reduzi-lo (pois um defeito menor terá menor probabilidade de falha) adequadamente para considerar as incertezas da correlação, do material e da técnica de inspeção (que medirá o defeito ‘real’ existente para confrontá-lo com o admissível), etc.

4. DETERMINAÇÃO DA “CONDIÇÃO DE MONITORAMENTO (CM)”

Aplicando o raciocínio descrito acima aos defeitos *Trinca axial passante*, eq. (2), e *Degradação volumétrica limitada circunferencialmente*, eq. (3), obtém-se respectivamente as eq. (4) e (5) que definem os respectivos valores críticos para a Condição de Monitoramento. A eq. (5) pode ser rescrita para expressar, por exemplo, h em função de L (nesta hipótese o valor h seria o valor associado a condição de monitoramento, h_{CM}), como mencionado na seção 3 e feito para o caso de *trinca axial passante*, eq. (1) e (2).

4.1 Abordagem Simplificada

Se se considera $Z = 1.282$, estas equações (4) e (5) traduzem a “abordagem estatística simplificada” uma vez que todas as incertezas são consideradas na situação ou sentido mais desfavorável ou em outras palavras: para cada parâmetro envolvido tomou-se o seu valor que, isoladamente, produz o valor CM associado a probabilidade 0.90 com nível de confiança de 50%. Observe-se que a resistência do material é reduzida de $Z\sigma_M$, as dimensões do defeito (L e h) são incrementadas de σ_L e σ_h e o valor da correlação é aumentado, eq. (4), ou reduzido, eq. (5), pelo erro da própria correlação (respectivamente σ_{PN} e σ_B).

$$L_{CM} = \frac{\sqrt{R_m t}}{b_3} \ln \left[\left(\frac{P_B R_m}{(S_y + S_u - Z\sigma_M)t} + Z\sigma_{PN} - b_1 \right) / b_2 \right] - Z\sigma_L \quad (4)$$

$$P_B = 0.58(S_y + S_u - Z\sigma_M) \frac{t}{R_i} \left[1 - \frac{L + Z\sigma_L}{L + Z\sigma_L + 2t} (h + Z\sigma_h) \right] + 291 - Z\sigma_B \quad (5)$$

4.2 Abordagem pelo Método Monte Carlo e sua Implementação

Uma forma mais sofisticada, e menos conservadora, de considerar as incertezas dos parâmetros envolvidos nas correlações que definem os valores críticos de cada defeito, e em particular, para os casos *Trinca axial passante* e *Degradação volumétrica limitada circunferencialmente*, é permitir que todas as incertezas variem de forma aleatória, simulando o que ocorre na prática.

Para realizar este procedimento considera-se, nas eq. (4) e (5), que o fator Z varie aleatoriamente. Neste caso os valores de Z são obtidos a partir de uma distribuição normal padrão - média nula e desvio padrão unitário, $\sigma = 1.0$. Desta forma, tomando-se um grande número de valores aleatórios de Z, em torno de 10000 valores, tem-se uma distribuição de valores do parâmetro de interesse (L ou h). O valor L_{CM} ou h_{CM} desejado será aquele associado ao 10º percentil. Esta é a essência do Método Monte Carlo.

O segmento de programa apresentado a seguir, com comandos MATLAB, implementa a aplicação do Método Monte Carlo à eq. (5), devidamente rescrita para expressar h em função de L e dos demais parâmetros, onde $ncomb = 10000$, $Sf = S_y + S_u$, $SDevSf$ é o desvio padrão de Sf, $CorOffSetU = 291$ psi e $SDevOfsUnc = 282$ psi, $SDevh = \sigma_h$, $PBdes = \max(3\Delta P_{oper}, 1.43\Delta P_{acc})$ e r e t são, respectivamente o raio interno e a espessura de parede do tubo (TW). A função $randn$ retorna um valor aleatório de uma distribuição normal padrão. Lx é um vetor com os valores ‘nominais’ médios dos comprimentos de trinca supostamente medidos durante uma inspeção. Estes valores apresentam uma incerteza ou erro cuja distribuição tem erro médio nulo um desvio padrão $SDevL$.

Em trabalho anterior (Mattar Neto & Miranda, 2001) foi mostrado que o programa desenvolvido a partir das equações associadas aos defeitos apresenta resultados com ótima aderência com os da referência (EPRI, 2000b).

```

for i = 1: 1: ncomb
    Zm = randn; % (material)
    Zb = randn; % (Correlação)
    Zl = randn; % (comprimento da trinca)
    Zh = randn; % (profundidade da trinca)
% Material (valor médio = Sf; Desvio padrão = SDevSf)
    Smat = Sf + Zm * SDevSf;
% Correlação de PB - constante (CorOffsetU) e desvio padrão SDevOfsUnc
    ofp = CorOffsetU + Zb * SDevOfsUnc;
% Comprimento da trinca (Lx) - valor médio = Lx, Desvio padrão = SDevL
    ucL = Zl * SDevL;
    LL = Lx + ucL; % tamanho de trinca (Lx) com incertezas
    HH = Zh * SDevh; % Profundidade da trinca com Incerteza
    aux = 0.58*Smat*t; % variável intermediária auxiliar
    hhLx(i) = (LL + 2*t)./LL * (1.0 - (PBdes - ofp)*Ri./aux);
    hhLx([i]) = hhLx([i]) - HH;
end % ciclo para cada um dos NCOMB valores aleatórios

```

5. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO - RESULTADOS

A abordagem “simplificada” e pelo método Monte Carlo” foram implementadas em um programa para vários casos. Serão apresentados os resultados para dois casos com os seguintes dados gerais: tubos de diâmetro nominal $R_{nom} = \frac{3}{4}$ ”, $PB_{des} = 4200$ psi, $Sf = 146.60$ ksi, $SDevSf = 6.23$ ksi. Para o caso de *Trinca axial passante* considerou-se $SDevL = 0.15$ ” e para o caso de *Degradação volumétrica limitada circunferencialmente* considerou-se $SDevh = 0.08$ (8% de TW) e $SDevL = 0.10$ ”. Os comprimentos nominais de trinca variaram de 0.1” a 3.0”.

Os resultados obtidos estão apresentados nas Figuras 8 e 9 em forma de três curvas: “Limite Estrutural” obtida com os valores nominais dos parâmetros envolvidos, e as duas curvas que representam as duas abordagens discutidas: “Simplificada” e “Monte Carlo” que fornecem os valores associados com a “Condição de Monitoramento”.

Observe-se a partir da Figura 8, e considerando a pressão $PB_{des} = 4200$ psi, que o Limite Estrutural para uma trinca axial passante é 0.5”. Ao serem consideradas as incertezas envolvidas tem-se o valor da “Condição de Monitoramento” (0.23” pela metodologia simplificada ou 0.30” pelo método Monte Carlo).

No caso da Figura 9, onde há dois parâmetros mutuamente relacionados, o Limite Estrutural de um defeito com comprimento 1” corresponde a uma profundidade máxima do defeito de cerca de 70% da espessura (t) do tubo. Considerando as incertezas envolvidas, neste caso, para o mesmo defeito com $L = 1$ ”, obtém-se o valor da “Condição de Monitoramento” como sendo 64% de t ou 66% de t (respectivamente pela metodologia simplificada ou por Monte Carlo).

Tubos que, na inspeção, apresentem defeitos superiores à Condição de Monitoramento devem ser reparados ou tamponados. Adicionalmente se deveria fazer a verificação da “Avaliação Operacional” quando seria previsto o tamanho máximo admissível de um dado defeito ao fim do próximo ciclo de operação e seriam reparados ou tamponados os tubos que, no fim do próximo ciclo, apresentem defeito previstos acima do admissível.

6. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Os resultados, resumidos nas Figuras 8 e 9, mostram que há um ganho em se considerar a abordagem mais ‘s sofisticada’ usando o método Monte Carlo para considerar as incertezas dos parâmetros envolvidos na avaliação de um tubo com um dado defeito. Este ganho dependerá dos valores das incertezas: quanto maiores estas incertezas maior será o ganho ao se usar Monte Carlo.

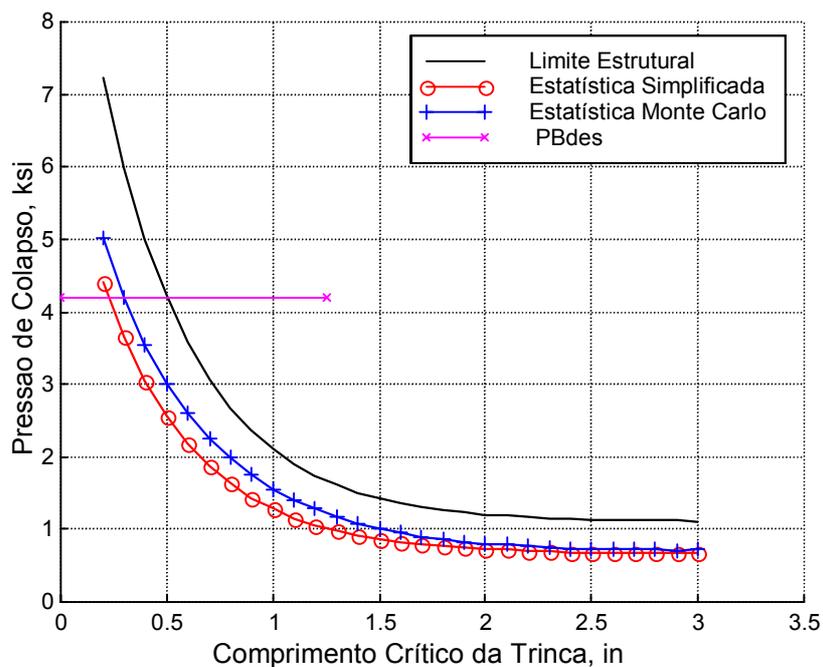


Figura 8. Comprimento crítico de trinca axial passante

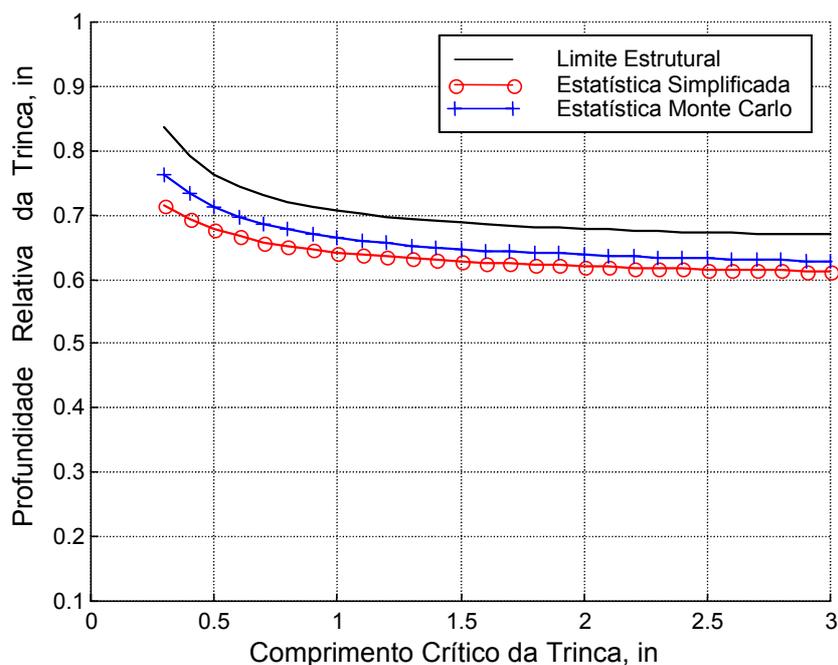


Figura 9. Comprimento crítico de uma degradação volumétrica limitada circunferencialmente

Neste trabalho foi adotada a probabilidade acumulada de falha do tubo defeituoso de 10%. Se se deseja ser mais conservador, pode-se trabalhar com uma probabilidade de falha menor, por ex., 5%. Isso implica só aceitar defeitos menores (do que aqueles obtidos com 10%) ou, em outras palavras: tamponar ou reparar uma quantidade maior de tubos. Este é um critério a ser definido pelo operador da planta e que deve ser submetido, com justificativas, ao órgão licenciador.

A abordagem apresentada representa um salto qualitativo em relação à ‘antiga’ abordagem (40% da espessura da parede do tubo) por permitir uma redução no conservadorismo dos resultados. Além disso, a mesma permite alguma simplificação para considerar os efeitos estatísticos, em lugar de métodos mais sofisticados (simulações de Monte Carlo). De qualquer modo, os resultados atendem aos limites impostos nas normas (ASME, 1989).

7. REFERÊNCIAS

- ASME, 1989, “ASME Boiler and Pressure Vessel Code, with 1989 addenda”, American Society for Mechanical Engineers, New York, NY, USA.
- EPRI, 1997, “Burst Pressure Correlation for Steam Generator Tubes with Throughwall Axial Cracks”, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, USA (EPRI TR-105505).
- EPRI, 2000a, “Steam Generator Integrity Assessment Guidelines: Revision 1”, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, USA (EPRI TR-107621, Revision 1)
- EPRI, 2000b, “Steam Generator Degradation Specific Management Flaw Handbook”, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, USA.
- NEI, 1997, “Steam Generator Program Guidelines”, Nuclear Energy Institute, Washington, D.C., USA (NEI 97-06).
- Mattar Neto, M., Miranda, C. A. J.; 2001, “Different Approaches for Structural Integrity Assessment of PWR Steam Generator Tubes”, 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering, COBEM 2001, Nov 26-30, 2001, Uberlândia, MG, Brazil.

APPLICATION OF THE MONTE CARLO METHOD IN THE STRUCTURAL INTEGRITY ASSESSMENT OF NPP STEAM GENERATOR TUBING

Carlos Alexandre de J. Miranda

Miguel Mattar Neto

IPEN-CNEN/SP, Travessa R, 400.

05508-900, S. Paulo, SP, Brasil.

E-mail: cmiranda@net.ipen.br, mmattar@net.ipen.br

***Abstract.** Usually the tubing bundle of the Steam Generators (SG) in a Nuclear power Plant is performed at every plant programmed shutdown, to change fuel elements, for instance. All tubes are inspected to verify their defects by comparison with critical defect dimensions found in the applied codes and standards and the plant specifications. Tubes with some defect greater than the limit should be plugged or repaired. If the number of plugged tubes is high it can compromise the NPP economical output. Recently new criteria were proposed to consider, in the evaluation of a tube with some defect, the defect origin, its orientation and morphology, its locations and dimensions. These criteria were based in a large experimental work that allowed the development of specific correlation for each type of defect and in the assumption (and acceptance) of a failure probability in a given tube with some defect and under specified loads. To do so, the involved uncertainties should be taken into consideration. These ones come from the correlation itself, the properties of the material of the tubes, from the non-destructive inspection technique, including those from the analyst and from the defect dimensions (length and depth). A tube has an acceptable defect if its accumulated probability of burst is lower than 10%. The way to implement these criteria and to consider the uncertainties is to make a statistical treatment. Two approaches are possible: (a) “simplified statistics”, when all uncertainties are considered in the worst way and, (b) simulation using the Monte Carlo method, when all uncertainties vary randomly. In this work shows a brief revision of the several defects that a tube in a SG can present and it shows how to apply the Monte Carlo method for a specific case. The results are presented as curves comparing both approaches.*

Keywords: Fracture Mechanics, Structural Integrity, Steam Generators, Statistics, Monte Carlo.