

# **ENSAIOS *IN SITU* NA AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL DE TUBOS DE GERADORES DE VAPOR DE CENTRAIS NUCLEARES DE POTÊNCIA**

**Carlos Alexandre de Jesus Miranda**

IPEN-CNEN/SP, Travessa R, 400  
05508-900, S. Paulo, SP, Brasil  
Tel.: (0xx11) 3816-9198 r233  
E-mail: cmiranda@ipen.br

**Resumo.** Os tubos dos Geradores de Vapor (GV) de uma usina nuclear são inspecionados a cada parada a fim de se verificar se há defeitos nos mesmos e avaliar a sua integridade pelo confronto das dimensões dos defeitos detectados com os limites definidos em normas. Se for encontrado um defeito que supere o respectivo limite, já incluindo uma tolerância para o crescimento do mesmo entre inspeções consecutivas, o tubo deve ser reparado. Muitos tubos plugueados podem comprometer a eficiência dos GVs. O primeiro critério de aceitação definia uma porcentagem máxima de degradação de 40% da espessura do tubo, devida ao defeito. Critérios mais recentes consideram a origem do defeito, orientação, morfologia e localização no tubo, além, obviamente, das suas dimensões e são baseados na probabilidade de falha dos tubos com defeito, sob a ação de cargas especificadas, levando-se em conta as incertezas envolvidas (correlação, propriedades do material dos tubos, técnica de inspeção adotada e dimensões do defeito). A forma de considerar tais critérios e tais incertezas passa por um tratamento estatístico. Em geral um efeito é aceitável se a sua probabilidade acumulada de falha é  $\leq 10\%$ . Caso um dado defeito não atenda aos requisitos, deve-se rever os critérios de aceitação de tubos com defeito. É possível, também, confirmar a validade e conservadorismo de tais critérios testando-se *in situ* alguns dos tubos que não os atendem. Neste trabalho se faz uma breve revisão dos principais modos de falha/defeitos nos tubos de GVs de uma usina nuclear, dos princípios de inspeção dos tubos dos GVs e dos critérios de seleção de tubos candidatos a serem testados *in situ* com aplicações utilizando o método Monte Carlo.

**Palavras-chave:** Integridade estrutural, Gerador de vapor, Estatística, Monte Carlo

## **1. INTRODUÇÃO**

Um Gerador de Vapor (GV) de uma usina nuclear tem cerca de 5000 tubos e todos os tubos são inspecionados a cada parada da mesma a fim de se verificar se há defeitos nos mesmos. O objetivo é avaliar a sua integridade pelo confronto das dimensões dos defeitos detectados com os limites definidos em normas específicas. Se for encontrado um tubo com um defeito que supere o respectivo limite, o tubo deve ser reparado ou tamponado. Há, ainda, outras exigências de segurança, como os limites máximos de vazamento de água do circuito primário para o secundário, que podem implicar uma maior quantidade de tubos tamponados. Muitos tubos tamponados podem comprometer a eficiência térmica dos GVs e econômica da usina, inviabilizando-a, no limite.

Historicamente, o primeiro critério de aceitação definia uma porcentagem máxima de degradação de 40% da espessura do tubo, devida ao defeito, já incluindo uma tolerância para o crescimento do mesmo entre duas inspeções consecutivas. Este critério é absoluto pois leva em

conta apenas um parâmetro: a profundidade do defeito. O mesmo não leva em conta outros parâmetros como a origem do defeito (interno ou externo), orientação (axial ao tubo ou circunferencial), morfologia (defeito único, pontual ou linear, defeito volumétrico ou múltiplo) e sua localização no tubo (meio do vão reto, próximo ao espelho ou às placas suportes, na curva, etc). Há países que adotam critérios ainda mais restritivos baseados no princípio de ‘defeito zero’ quando um tubo é tamponado ou reparado se for detectado um defeito no mesmo, não importando os suas dimensões.

Recentemente foram desenvolvidos outros critérios (NEI, 1997) que levam em conta estes diversos parâmetros ignorados anteriormente além, obviamente, das dimensões do defeito (comprimento e profundidade) e são baseados na probabilidade de falha dos tubos com defeito, sob a ação de cargas especificadas. Em geral um defeito é aceitável se a sua probabilidade acumulada de falha é  $\leq 10\%$ . Para a aplicação de tais critérios foram desenvolvidas correlações específicas para cada tipo, localização e morfologia de defeito, obtidas a partir de ensaios também específicos onde são simulados (usinados) os diversos tipos de defeito que ocorrem em um tubo típico de um GV (EPRI 2000a, 2000b). Também foram testados tubos retirados de GVs com defeitos reais. Como resultado, para cada tipo de defeito, inclusive variando a sua localização ao longo do tubo, obtém-se uma correlação empírica entre a pressão de colapso do tubo e os diversos parâmetros envolvidos (propriedades do material, dimensões do defeito e do tubo, etc).

Para a correta aplicação de tais critérios leva-se em conta todas as incertezas envolvidas: da correlação, dos valores das propriedades do material dos tubos, da técnica de inspeção adotada para detectar o defeito, do analista dos resultados da inspeção e das dimensões do defeito. A forma de considerar tais critérios e as incertezas envolvidas passa por um tratamento estatístico onde são possíveis duas abordagens: (a) “simplificada”, e muito conservadora, quando todas as incertezas são consideradas atuando no sentido mais desfavorável, isto é, se somam e, (b) simulação por Monte Carlo, quando todas as incertezas variam aleatoriamente. Como resultado são obtidos, dependendo do caso, valores críticos ou curvas que definem o tamanho do defeito, associados aos 10% de probabilidade de falha/colapso, que servirão para definir se um dado tubo deve ser ou não tamponado ou reparado (diz-se que o tubo com defeito que não atende aos requisitos de segurança).

Dada a natureza estatística destes novos critérios de avaliação da integridade estrutural de tubos de GVs, alguns dos defeitos que permaneçam nos tubos podem aumentar de tamanho durante o novo ciclo de operação da usina/GV a ponto de haver vazamento pelo mesmo. Como há limites de segurança também quanto ao vazamento máximo permitido de água do primário para o secundário, além da avaliação dos tubos quanto ao colapso há que se verificar, também, que o eventual vazamento seja limitado aos valores impostos nas normas específicas ou nas especificações das usinas. Para este tratamento estatístico deve-se conhecer a taxa de crescimento e sua incerteza, de cada tipo de defeito, que são específicas de um dado GV e deve-se dispor de correlações entre tamanho (dimensões, morfologia, orientação e localização) do defeito e taxa de vazamento. Tais correlações também são empíricas e contém suas próprias incertezas.

Para assegurar que os critérios adotados em uma dada usina traduzem a margem de segurança mínima adotada é possível, também, confirmar sua validade testando-se alguns dos tubos com defeitos que não os atendem. Há duas formas de realizar estes testes. Há algum tempo era comum a retirada dos tubos do GV para serem testados em laboratório. Este procedimento tinha sérias limitações para alguns tubos além do que o procedimento de corte e retirada do tubo induz alterações em alguns tipos de defeito tornando discutíveis e até mesmo invalidando os resultados dos testes. Foram desenvolvidas técnicas que permitem testar os tubos sem que seja necessário retirar os tubos do GV que, assim, são testados *in situ* com critérios adotados pelo EPRI (1989). Mais recentemente estes critérios foram revisados (EPRI, 2003).

Para a realização destes testes *in situ* é obrigatório que sejam selecionados os tubos mais críticos, isto é: com os defeitos maiores, antes que os mesmos sejam tamponados de acordo com critérios específicos. Tais critérios variam de acordo com o tipo de defeito e são de dois tipos que visam: a) selecionar os tubos mais críticos quanto a probabilidade de colapso e b) selecionar os tubos que produzem a maior taxa de vazamento.

Neste trabalho se faz uma breve revisão dos principais modos de falha/defeitos nos tubos de GVs de uma usina nuclear, dos princípios de inspeção dos tubos dos GVs e dos critérios de seleção de tubos candidatos a serem testados *in situ* quanto ao colapso, apresentando-se aplicações utilizando o método Monte Carlo a dois defeitos típicos baseados em dados empíricos de um GV genérico.

## 2. PRINCIPAIS PARÂMETROS DOS DEFEITOS

Os defeitos podem se iniciar na superfície interna do tubo (onde passa a água do circuito primário) devido à corrosão sob tensão ou se iniciar na superfície externa do tubo (lado do secundário), por corrosão, por fadiga ou até pelo desgaste devido ao atrito entre superfícies. A corrosão pode ser localizada ('pontual') ou generalizada. Neste último caso o defeito pode se apresentar como uma trinca (circunferencial ou longitudinal) ou sem forma definida (defeito predominantemente plano ou volumétrico). Há, ainda, o defeito criado por '*fretting*' ou 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.

Os principais parâmetros a serem considerados na avaliação de integridade de um tubo são: as dimensões do tubo (raio,  $r$ , e espessura,  $t$ ), a diferença de pressão a que o mesmo está submetido ( $\Delta P$ ), o valor  $S_y + S_u$  (tensão de escoamento + tensão de ruptura) do material do tubo, as dimensões do defeito (comprimento,  $L$ , e profundidade,  $d$ ) e sua origem (superfície interna ou externa). A orientação do defeito (axial ou circunferencial), sua forma (pontual, linear ou volumétrico) e posição ao longo do tubo é levada em conta na seleção da correlação apropriada. A diferença de pressão para a qual a integridade do tubo será verificada deve ser o maior valor entre ( $3\Delta P_{oper}$  e  $1.43\Delta P_{acc}$ ) respectivamente  $\Delta P$  de operação normal e  $\Delta P$  de operação de acidente. Em geral o primeiro valor predomina. Algumas correlações usam a profundidade média ( $d$ ) enquanto que outras usam a profundidade relativa ( $h=d/t$ ).

Alguns dos defeitos típicos que aparecem nos tubos dos GVs são indicados nas Fig. (1) a (6) seguintes. No caso do defeito *ODSCC na TSP*, Fig. (5), a avaliação da integridade estrutural do tubo com este tipo de defeito não considera um parâmetro estrutural diretamente mas a voltagem da sonda de inspeção.

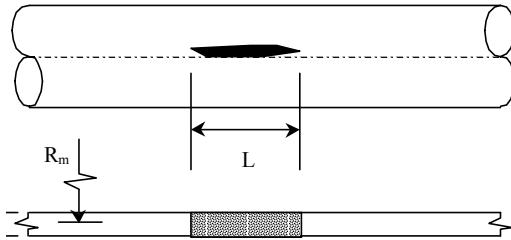


Figura 1. Trinca axial passante no meio do vão livre do tubo

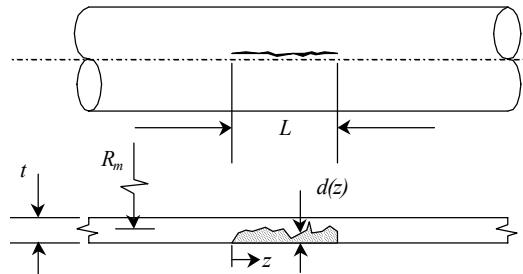


Figura 2. Trinca axial não-passante no meio do vão livre do tubo

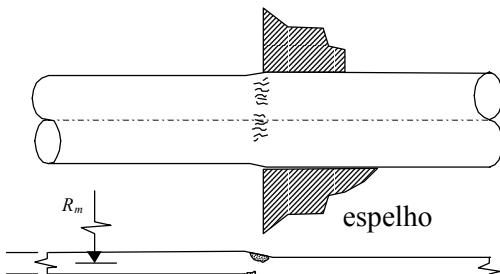


Figura 3. Trinca axial na zona de expansão (considera a presença do espelho)

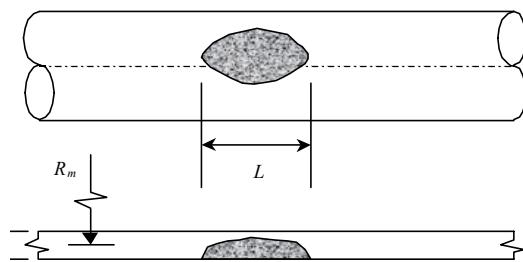


Figura 4. Degradação volumétrica limitada circunferencialmente

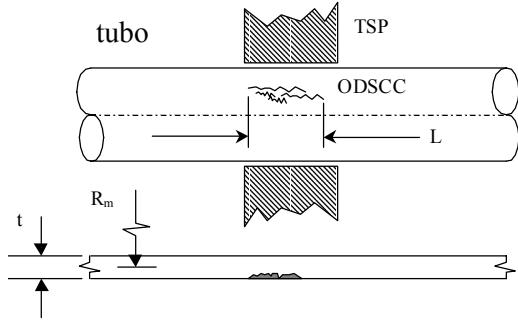


Figura 5. ODSCC na TSP  
(o parâmetro de avaliação da integridade do tubo é a voltagem da sonda de inspeção)

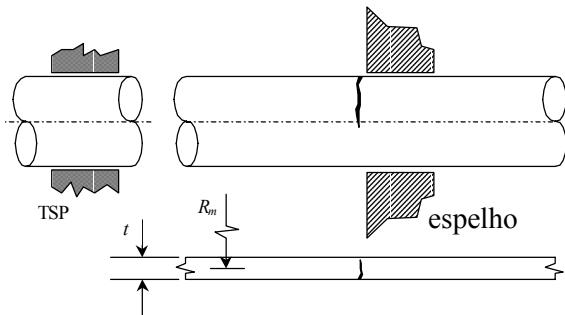


Figura 6. Trinca circumferencial  
(ocorre, principalmente na vizinhança do espelho e das placas suportes dos tubos)

A forma com que os defeitos reais se apresentam, em geral, não coincide com a forma idealizada para os mesmos a partir das quais foram obtidas as correlações utilizadas nas avaliações de integridade. Este é outro fator de incerteza de difícil consideração e que é contornado, nas avaliações, pela consideração do tipo/forma mais conservador.

### 3. CORRELAÇÕES TÍPICAS E INCERTEZAS

As correlações envolvendo a (diferença de) pressão de colapso, PB, dos tubos com um determinado defeito, com os demais parâmetros envolvidos foram obtidas experimentalmente a partir do melhor ajuste dos pontos experimentais e representam a mediana das probabilidades do tubo se romper com uma dada pressão PB. Há uma incerteza intrínseca associada ao valor PB fornecido pela correlação que é dada pelo desvio padrão da distribuição das diferenças entre os valores fornecidos pela correlação e os valores experimentais obtidos, que vem a ser o ‘desvio padrão da correlação’,  $\sigma_N$ . Tipicamente as correlações são fornecidas como apresentado nas Eq. (1) e (2) associadas a “trinca axial passante no meio do vão livre do tubo”, Fig. 1, e na Eq. (3) associada a “degradação volumétrica limitada circumferencialmente”, Fig. 4.

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

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

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

Nas Eq. (1.a) e (1.b) foram utilizados os parâmetros adimensionais  $P_N$  (pressão normalizada) e  $\lambda$  (comprimento normalizado do defeito), utilizados no ajuste dos dados experimentais pela equação (1.c) onde  $b_1 = 0.061319$ ,  $b_2 = 0.53648$  e  $b_3 = -0.2778$ . Para este defeito a distribuição dos erros devidos a correlação apresenta um desvio padrão  $\sigma_N = 0.01715$ . Como o valor  $3\Delta P_{oper}$  (ou  $1.43\Delta P_{acc}$ ) é um parâmetro conhecido, associado ao GV, é conveniente rescrever a correlação para obter um parâmetro crítico do defeito (por exemplo o seu comprimento crítico,  $L_c$ ) em termos dos outros parâmetros - ver Eq. (2). No caso da Eq. (3) a incerteza da correlação é traduzida pelo valor (desvio padrão)  $\sigma_B = 282$  psi associado com a constante 291 psi.

Em trabalhos anteriores (Miranda & Mattar Neto, 2001, e Mattar Neto & Miranda, 2001) foi apresentado, em detalhes, um histórico dos principais critérios de avaliação estrutural e de aceitação de tubos de GV com defeitos com ênfase nos critérios acima apresentados de forma resumida, além das diversas correlações, suas incertezas e múltiplos casos de aplicação das mesmas e como aplicar o método Monte Carlo para obter as curvas que norteiam a aplicação destes critérios. Inclusive foi

mostrado como definir a probabilidade acumulada de 10% de falha de um tubo com um dado defeito e a conceituação detalhada das duas verificações: a “Condição de Monitoramento - CM” e da “Avaliação Operacional - OA”. A verificação CM visa determinar se, mesmo com o defeito detectado na inspeção, o tubo do GV manteve um nível de segurança mínimo aceitável no final do intervalo de operação da usina/GV apenas completado (10% de probabilidade acumulada de falhar). Na verificação OA deve-se levar em conta o crescimento previsto para o defeito durante o próximo período de operação da usina/GV. Um tubo com um defeito que não atende a verificação OA deve ser reparado ou tamponado uma vez que o mesmo tem forte risco de falha (colapso do tubo ou vazamento excessivo) até o final do próximo ciclo de operação do GV.

#### **4. REQUISITOS GERAIS PARA A REALIZAÇÃO DOS TESTES “IN SITU”**

Havendo defeitos que não atendem aos requisitos de segurança na verificação “CM”, além do reparo ou tamponamento os critérios de aceitação devem ser revistos. É possível, entretanto, confirmar a validade dos critérios de avaliação de integridade estrutural de tubos com defeitos testando-se alguns dos tubos com defeitos que não atendem aos critérios estabelecidos antes do seu eventual reparo ou tamponamento. Assim, os testes *in situ* visam fornecer elementos ou dados que embasem as hipóteses de avaliação estrutural e de vazamento dos tubos considerando os diferentes defeitos dos mesmos.

O teste *in situ* deve ser capaz de produzir no tubo, no local onde está situado o defeito a ser testado, um estado de tensões equivalente ao estado real existente durante a operação normal da planta e durante condições de acidente postuladas (multiplicadas por fatores de segurança apropriados). Uma maior atenção deve ser dada às condições de teste (por exemplo, no caso de testar um tubo com defeito circunferencial o equipamento de teste deve ser capaz de reproduzir o esforço axial existente no tubo pressurizado). A seguir serão apresentados alguns dos cuidados que devem ser tomados quando da seleção dos tubos candidatos a serem testados e quanto à realização dos testes:

- . *Ajustes de Parâmetros.* Devem ser feitos ajustes para levar em conta as diferenças entre as condições de teste e de operação da planta/GV. Por exemplo, parâmetros como pressão ( $\Delta P$ ,  $\Delta P_{oper}$ ,  $\Delta P_{acc}$ ) e taxa de vazamento devem ser ajustados considerando que a temperatura de teste (ambiente) é diferente da temperatura de operação.
- . *No Caso de Vazamento.* Se durante o teste do tubo ocorrer vazamento, deve ser realizado um teste específico para medir a taxa de vazamento. No caso de se constatar um vazamento significante (quando o vazamento total dos tubos testados exceder 20% do vazamento limite admissível da planta) testes adicionais de vazamento poderão ser necessários.
- . *Tubos que vazam.* Tubos que reconhecidamente vazam, identificados durante a operação, na inspeção visual ou durante testes do secundário, devem ser testados a vazamento.
- . *Vazamento excessivo durante o teste.* No caso eventual em que o vazamento excessivo impeça que a pressão final de teste seja atingida, devem ser efetuadas análises adicionais para avaliar o tubo quanto a sua integridade estrutural.

É recomendado que pelo menos 5 dos tubos com os defeitos mais críticos sejam testados para assegurar que os tubos mais degradados (defeitos mais críticos, de cada tipo) sejam selecionados. Se houver menos de 5 tubos selecionados todos devem ser testados. Todos os tubos testados à pressão devem ser testados a vazamento.

##### **4.1. Principais Etapas dos Testes de Pressão e/ou de Vazamento**

Em linhas gerais os testes de pressão e/ou de vazamento de um tubo seguem as etapas:

1. Pressurizar o tubo até a pressão de operação normal,  $\Delta P_{norm}$
2. Testar a vazamento na pressão de operação normal ( $\Delta P_{norm}$ )
  - . manter a pressão por cerca de 5 minutos (típico)

3. Pressurizar até a pressão de acidente,  $\Delta P_{acc}$
4. Testar a vazamento na pressão de acidente ( $\Delta P_{acc}$ )
  - . manter a pressão por cerca de 5 minutos (típico)
5. Pressurizar o tubo até atingir max( $3\Delta P_{norm}$ ,  $1.43\Delta P_{acc}$ )
6. Se o tubo falhar no teste de pressão, tubos adicionais devem ser testados
7. Se o tubo vazar, deve ser efetuada a avaliação da taxa de vazamento

## 4.2. Principais Atividades Necessárias à Execução dos Testes

Em caráter genérico as principais atividades necessárias à execução dos testes *in situ* são:

- . *Identificar e ‘dimensionar’ os defeitos.* É o exame dos tubos do GV com a identificação e a caracterização dimensional dos defeitos.
- . *Classificar (segregar) os defeitos.* Os defeitos encontrados são classificados quanto:
  - . Orientação (axiais, circunferenciais, volumétricos); Superfície de origem: internos (ID) ou externos (OD); Localização: espelho, placa suporte, curva, vão livre, etc.
  - . *Selecionar os tubos a serem testados à pressão e/ou ao vazamento.* Para cada tipo de defeito (morfologia, orientação e posição), selecionar os tubos candidatos a serem testados com base em alguns critérios que levam em conta parâmetros específicos para cada defeito e tipo de teste.
  - . *Testar os tubos.* Para cada tipo de defeito testar os tubos selecionados à pressão e ao vazamento. Todos os tubos a serem testados à pressão deverão ser testados ao vazamento.

## 4.3. Ações a serem Tomadas Após o Teste de um Tubo

São as seguintes as ações a serem tomadas após o teste de um dado tubo:

1. Eventual exame visual do tubo para confirmar a natureza de uma eventual falha.
2. Exame não-destrutivo no tubo/defeito testado para determinar eventuais mudanças no defeito decorrentes do teste.
3. Reparar o tubo testado (plagueamento, enlavrimento, etc.)
4. Se o tubo for mantido em serviço após o teste, um exame NDE deve ser feito no mesmo para garantir que o defeito, após os testes, se mantém abaixo dos limites admissíveis.

## 5. SELEÇÃO DE TUBOS COM DEFEITOS AXIAIS

Os critérios de seleção dos tubos candidatos a serem testados *in situ* (EPRI, 2003) visam garantir que sejam escolhidos, para serem testados, os tubos mais críticos, considerando cada tipo de defeito através da sua localização, origem, morfologia e dimensões. Para a seleção dos tubos a serem testados, além da sua segregação pelos seus diversos tipos e localizações, é fundamental a caracterização dimensional do defeito que consiste em obter o perfil do mesmo em termos de valores de profundidade *versus* comprimento. Tais critérios variam de acordo com o tipo de defeito e são, basicamente, de dois tipos que visam: a) selecionar os tubos que produzam a maior taxa de vazamento e b) selecionar os tubos mais críticos quanto à probabilidade de colapso. Estes últimos serão abordados a seguir, particularizando para os defeitos axiais e os defeitos circunferenciais. Os critérios e parâmetros críticos a serem avaliados para selecionar os tubos candidatos aos testes “*in situ*” dependem do tipo de defeito.

A seguir são descritos os critérios e parâmetros necessários à esta seleção de tubos com defeitos axiais visando detalhar a atividade “*Selecionar os tubos a serem testados à pressão*” através de suas sub-atividades.

a) *Para cada defeito axial devem ser determinados os seguintes parâmetros:*

- . o seu comprimento total, L
- . a sua profundidade máxima, MD
- . a profundidade média crítica ( $d_{ST}$ )

- . o comprimento médio crítico ( $L_{ST}$ )

Os parâmetros  $d_{ST}$  e  $L_{ST}$  representam as dimensões de um defeito idealizado, conforme a Fig. 7, que teria a mesma pressão crítica do defeito 'real', cujo perfil é obtido durante a inspeção do tubo (caracterização dimensional do defeito).

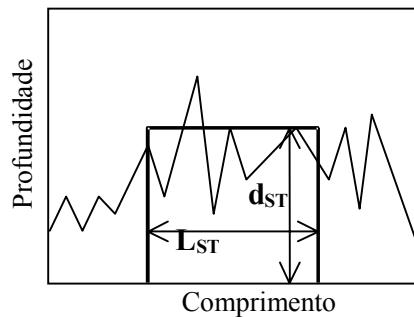


Figura 7. Parâmetros  $d_{ST}$  e  $L_{ST}$

*b) Definir os valores limites ou parâmetros críticos para os defeitos axiais*

1. valor  $L_{THR-P}$ . Este parâmetro é o comprimento de defeito abaixo do qual o risco de falha do tubo é desprezível independente da sua profundidade. Não é necessário considerar a incerteza no comprimento do defeito.

2. valor  $MD_{THR-P}$ . Este parâmetro é a profundidade de defeito abaixo da qual o risco de falha do tubo é desprezível independente do seu comprimento. Não é necessário considerar a incerteza na profundidade do defeito.

3. *Obter a curva AD x L (Profundidade média  $AD_{THR}$  x L Comprimento)*. Para cada comprimento de defeito,  $L$ , obter a respectiva profundidade média crítica,  $AD_{THR}$ , abaixo da qual o risco de falha do tubo é pequeno. Nesta determinação é necessário considerar todas as incertezas.

*c) Selecionar os tubos com defeitos axiais*

1. Eliminar os tubos onde  $L \leq L_{THR-P}$
2. Eliminar os tubos onde  $MD \leq MD_{THR-P}$
3. Selecionar os tubos onde, para um dado comprimento,  $d_{ST} > AD_{THR}$
4. Sendo  $N$  o número de tubos selecionados, se:
  - .  $N = 0 \rightarrow$  não é necessário realizar o teste de pressão
  - .  $N \leq 5 \rightarrow$  testar todos os tubos selecionados
  - .  $N > 5 \rightarrow$  testar os 5 tubos com os maiores defeitos

## 6. SELEÇÃO DE TUBOS COM DEFEITOS CIRCUNFERENCIAIS

A seguir são descritos os critérios e parâmetros necessários para selecionar os tubos com defeitos circunferenciais visando detalhar, através de sub-atividades, a atividade “*Selecionar os tubos a serem testados à pressão*”.

*a) Para cada defeito circunferencial devem ser determinados os seguintes parâmetros:*

- . o ângulo do defeito, CA
- . a profundidade máxima do defeito, MD
- . o valor PDA (integrado em  $360^\circ$ ), porcentagem de área degradada da seção do tubo

*b) Definir valores limites ou parâmetros críticos para os defeitos circunferenciais*

1. valor  $PDA_{THR}$ . É o valor limite de PDA abaixo do qual não ocorrerá a falha do tubo na pressão de teste considerando as incertezas das medidas do defeito.

2. valor  $CA_{TWS}$ . É a extensão angular de um defeito passante associada ao valor  $PDA_{THR}$  (Obs.: se  $PDA_{THR} = X\%$   $\rightarrow CA_{TWS} = X \cdot 360^\circ$ )

*c) Selecionar os tubos com defeitos circunferenciais*

1. Se  $CA < CA_{TWS} \rightarrow$  não é necessário testar o tubo
2. Se  $PDA < PDA_{THR} \rightarrow$  não é necessário testar o tubo  
Se  $PDA \geq PDA_{THR} \rightarrow$  incluir o tubo na lista dos candidatos a serem testados
3. Sendo N o número de tubos selecionados, se:
  - .  $N = 0 \rightarrow$  não é necessário testar tubos à pressão
  - .  $N \leq 5 \rightarrow$  testar todos os tubos selecionados
  - .  $N > 5 \rightarrow$  testar os 5 tubos com os maiores defeitos

## 7. APLICAÇÕES E RESULTADOS

Um programa previamente desenvolvido (IPEN, 2002) foi modificado para implementar o cálculo dos parâmetros necessários para a seleção dos tubos com defeitos a serem testados à pressão, considerando todas as incertezas envolvidas utilizando o método Monte Carlo.

No primeiro exemplo foi obtida uma curva  $AD \times L$  típica, para uma trinca axial de penetração parcial. No segundo exemplo foi obtida uma curva  $PDA_{THR} \times PB$  típica, para um defeito circunferencial. Em ambos, foram utilizadas 10000 simulações na avaliação pelo método Monte Carlo. Os seguintes dados foram adotados, que se considera típicos para um GV de uma central nuclear com tubos de diâmetro nominal 3/4": espessura dos tubos  $t = 0.0430"$ , raio externo = 0.3750", material dos tubos com  $(Sy+Su) = 146600$  psi que apresenta um desvio padrão  $\sigma_{Sy+Su} = 6230$  psi, e condição de operação tal que  $\max(3\Delta P_{norm}, 1.43\Delta P_{acc}) = 4100$  psi.

### 7.1. Exemplo 1 - Defeito Axial

A Fig. (8) apresenta uma curva  $AD \times L$  típica, para uma trinca axial de penetração parcial na superfície externa do tubo. As seguintes incertezas foram consideradas, em termos do desvio padrão no comprimento L e na profundidade relativa do defeito,  $\sigma_L = 0.10"$  e  $\sigma_h = 5\%$ .

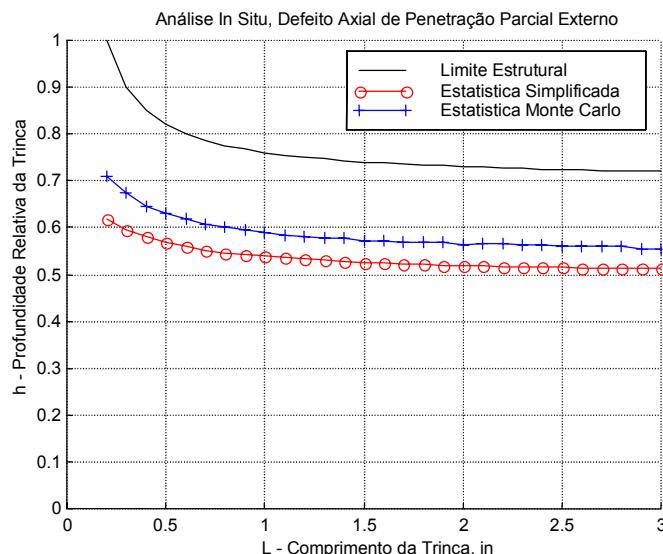


Figura 8. Curva  $AD \times L$ , defeito na superfície externa do tubo

Os parâmetros  $L_{STR-P}$  e  $MD_{THR-P}$  são valores únicos, não apresentados, que devem ser obtidos em ‘rodadas’ específicas anulando-se as incertezas do defeito.

## 7.2. Exemplo 2 – Defeito Circunferencial

A Fig. (9) apresenta uma curva  $PDA_{THR} \times PB$  típica para um defeito circunferencial na superfície externa do tubo. As seguintes incertezas foram consideradas, em termos do desvio padrão no valor PDA (fração de área da seção do tubo degradada pelo defeito),  $\sigma_{PDA} = 10\%$ .

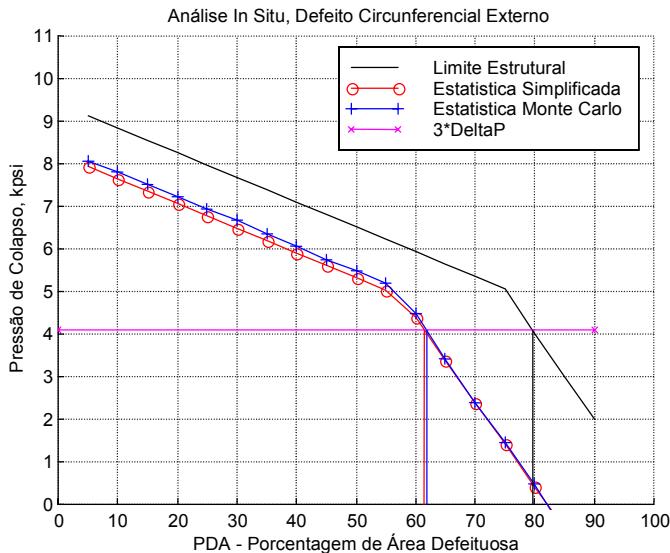


Figura 9. Curva  $PDA \times PB$ , defeito circunferencial na superfície externa do tubo

O parâmetro  $PDA_{THR}$  é o valor associado à pressão  $3\Delta P = 4100$  psi que, no exemplo, corresponde a pouco mais de 60%. Assim, qualquer tubo/defeito deste tipo cujo PDA exceda o valor  $PDA_{THR}$  é um candidato a ser testado “*in situ*”.

## 8. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Foram apresentados, de forma sucinta, comentários sobre o documento “*Steam Generator In Situ Pressure Test Guidelines*” (EPRI, 2003), que fornece orientações para a seleção de tubos de Geradores de Vapor com defeito candidatos a realização de testes *in situ*, para verificar a sua integridade quanto à pressão e quanto ao vazamento. Tais testes servem para demonstrar que os tubos selecionados (os mais críticos) satisfazem os critérios de integridade e de vazamento estabelecidos na norma NEI 97-06 (NEI, 1997) “*Steam Generator Program Guidelines*”, cujas recomendações estão detalhadas no documento do EPRI. “*Steam Generator Degradation Specific Management Flaw Handbook, Technical Report*” (2000b), levando em conta as incertezas envolvidas (material, dimensões, correlações, etc.).

Foi dado enfase ao detalhamento das principais etapas envolvidas para a realização dos testes de pressão em tubos com defeitos axiais e tubos com defeitos circunferenciais, indicando-se os principais parâmetros que devem ser medidos durante a parada e os principais parâmetros que devem ser calculados (valores limites), e que são usados na seleção dos tubos a serem testados.

Um programa (IPEN, 2002) previamente desenvolvido foi modificado para implementar o cálculo dos parâmetros necessários para a seleção dos tubos com defeitos axiais e circunferenciais a serem testados à pressão, considerando todas as incertezas envolvidas, utilizando o método Monte Carlo.

São apresentados dois exemplos de aplicação do programa e aplicação dos critérios de seleção de tubos candidatos a serem testados *in situ* a partir de curvas de comprimento x profundidade ( $AD \times L$ ), para uma trinca axial de penetração parcial, e a curva  $PDA \times PB$ , para um defeito circunferencial, para determinação do parâmetro  $PDA_{THR}$ . Para tanto foram adotados valores típicos

para um GV com tubos de diâmetro nominal 3/4" cujo material apresenta um desvio padrão de 6230 psi no valor da soma tensão de escoamento + tensão de ruptura. Foram estimadas incertezas nas medidas das dimensões dos defeitos além de serem consideradas as incertezas nas correlações, dadas no relatório específico do EPRI (2000b). Os resultados, em forma de curvas mostram-se bastantes coerentes com o esperado e com resultados previamente publicados (Miranda, C. A. J.; Mattar Neto, M., 2001).

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 na norma ASME (1989) específicas da área nuclear.

## 7. REFERÊNCIAS

- ASME, 1989, “ASME Boiler and Pressure Vessel Code, with 1989 addenda”, American Society for Mechanical Engineers, New York, NY, USA.
- EPRI, 1989, "Steam Generator In Situ Pressure Test Guidelines", Revision 1, Final Report EPRI TR-107620-R1, June 1989, EPRI – Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.
- 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.
- EPRI, 2003, "Steam Generator In Situ Pressure Test Guidelines", Revision 2, Report EPRI 1007904, March 2003, EPRI – Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.
- IPEN, 2002, Relatório Técnico PSE.CENM.ETN.036.00 RELT.006.00 - “Programa ASGeTuDA (Versão 3.0) Análise de Degradação nos Tubos dos GVs de Angra 1”.
- 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”, 16<sup>th</sup> Brazilian Congress of Mechanical Engineering, COBEM 2001, Nov 26-30, 2001, Uberlândia, MG, Brazil.
- Miranda, C. A. J.; Mattar Neto, M., 2001, “Aplication of the Monte Carlo Method in the structural Integrity Assessment of NPP Steam Generator Tubing”, CONEM 2001.

# **IN SITU PRESSURE TEST TO EVALUATE THE STRUCTURAL INTEGRITY OF FLAWED TUBES OF NPP STEAM GENERATORS**

**Carlos Alexandre de Jesus Miranda**

IPEN-CNEN/SP, Travessa R, 400

05508-900, S. Paulo, SP, Brasil

Tel.: (0xx11) 3816-9198 r233

E-mail: cmiranda@ipen.br

**Abstract.** All tubes in the Steam Generators (SG) tube bundle of a NPP are fully inspected at every plant shutdown to verify the existence of defects and to evaluate their integrity by comparison with the critical values available in the specific codes and plant specifications. Tubes with some defect greater than the limit, which includes allowances for their growth during the next operating period, should be plugged or repaired. A high number of plugged tubes compromises the performance of the SG and the NPP economical output. The first criterion of defect acceptance allowed a maximum reduction of 40% of the tube thickness. However, new criteria were proposed to consider, in the evaluation of a tube with some defect, other parameters as the defect origin, its orientation and morphology and its location besides their dimensions. For the application of these new criteria a large experimental work was performed that allowed the development of specific correlation for each type of defect. They were based on a failure probability in a given tube with a given defect and under specified loads, considering all the involved uncertainties from the correlation itself, the properties of the material of the tubes, from the non-destructive inspection technique and from the defect dimensions. To take into account all uncertainties one should use statistics, usually the Monte Carlo method allowing all uncertainties to vary randomly. By these criteria a defect is acceptable if the accumulated probability to occur the tube burst under the specified load (e.g., pressure) is  $\leq 10\%$ . Still, if a defect does not meet the criteria, it should be repaired or the tube plugged and, in this case, the NPP owner should review the adopted criteria for acceptance of defective tubes. Is it also possible to validate the criteria by an in situ testing of some of those defective tubes that violate the criteria. The criteria remains valid if no tube bursts during the test which is performed until the internal pressure in the tested tube reaches, in general, three times the  $\Delta P_{oper}$  value (the differential pressure the tube experiments under normal operation). This work shows a brief revision of the defects that a tube can present, the defect parameters that should be taken into account and some typical correlations developed for the new criteria application. Some of the most important requirements for the in situ testing are shown together with the criteria to select those tubes with axial and with circumferential defect candidates to be pressure tested. Two applications were done, using Monte Carlo simulations to show how the results are given, considering a fictitious SG with some arbitrary values for the involved parameters.

**Keywords:** Structural Integrity, Steam Generators, Statistics, Monte Carlo.