



## UMA ABORDAGEM PROBABILISTA PARA ESTIMAR A PROPAGAÇÃO DE TRINCAS EM TUBOS DE GERADOR DE VAPOR

**Eduardo Maneschy**

**Paulo Rodrigues**

Eletrobrás Termonuclear S.A.

Rua da Candelária, 65 – Rio de Janeiro RJ 20091-020, Brasil

**Resumo.** *A ruptura de um dos tubos do gerador de vapor é um dos acidentes que afeta a disponibilidade e segurança de instalações nucleares. Para reduzir ao mínimo a probabilidade da ocorrência desse problema, as proprietárias das centrais implementaram uma estratégia de manutenção, que consiste em inspecionar periodicamente os tubos por meio da técnica das correntes parasitas (ECT). As dimensões dos possíveis defeitos encontrados são comparadas com limites previamente especificados, que quando não são obedecidos obrigam a remoção de serviço dos tubos (são tamponados). Dados de testes em diversas plantas em operação no mundo indicam que a iniciação e propagação das trincas ocorre pelo mecanismo de corrosão sob tensão (SCC). Nos últimos anos a experiência internacional registra um número cada vez maior de tubos removidos por dano induzido por SCC. Como tendência semelhante vem sendo constatada na Usina Nuclear Angra 1, tornou-se necessário desenvolver um plano de ação para gerenciar a vida do gerador de vapor. Um dos objetivos desse plano é definir a estratégia de manutenção adequada que permita estender a vida residual do equipamento. Os resultados iniciais, restritos às atividades relacionadas à área estrutural, são apresentados neste trabalho. A abordagem para a análise emprega a tecnologia da mecânica da fratura probabilista e pretende: a) definir a distribuição estatística dos principais parâmetros envolvidos; b) estabelecer um critério de tamponamento que permita deixar os tubos mais tempo em serviço sem reduzir a segurança da Usina.*

**Palavras-chave:** *Angra 1, Gerador de Vapor, Fratura, Probabilidade*

### 1. INTRODUÇÃO

A solução do problema do desgaste prematuro dos tubos do gerador de vapor (GV) é um dos maiores desafios que vêm sendo enfrentados na indústria nuclear. Esse dano, que começou a se manifestar no final da década passada, é causado pelo mecanismo de corrosão sob tensão (SCC), responsável pela iniciação e propagação dos defeitos que provocam a falha

do material. Os tubos fazem parte da barreira de pressão de reatores PWR e isolam produtos de fissão liberados do lado primário para o secundário. A barreira é quebrada quando, sob determinadas condições, uma trinca se torna passante, provocando vazamentos indesejáveis, que são eliminados com o desligamento da planta. Para evitar a parada não programada, os tubos são removidos preventivamente de serviço (tamponados) sempre que as trincas medidas nas inspeções periódicas atingem comprimentos pré-estabelecidos. Como o dano por SCC é dependente do tempo, do meio hostil e das severas condições de trabalho, a cada ano aumenta o número de tubos inoperantes. Por isso a vida do equipamento é, em princípio, reduzida.

A Usina Nuclear Angra 1 opera com dois geradores de vapor modelos D3 fornecidos pela Westinghouse. Cada um dos GV's possui 4674 tubos, fabricados de Inconel 600, que são examinados usando o método das correntes parasitas (eddy-current test, ECT). De acordo com os resultados das inspeções realizadas nos últimos cinco anos a tendência de degradação por SCC existente nas outras plantas é também observada em Angra 1.

Diversas alternativas vêm sendo adotadas para minimizar o problema e estender o tempo de operação das centrais nucleares. Podem-se citar, entre outras, um melhor controle da química do sistema, a reavaliação das condições de operação, o aprimoramento das técnicas de inspeção e a utilização de critérios de tamponamento menos restritivos. A interação entre essas disciplinas é que permite elaborar a estratégia de manutenção do equipamento ou mesmo a sua troca.

Na área estrutural a mecânica da fratura probabilista é uma das opções que vêm sendo empregadas para determinar a possibilidade de falha no GV. Neste contexto, a falha é caracterizada pela necessidade de remover os tubos a partir da indicação de uma trinca maior que os limites especificados. A tecnologia da fratura probabilista, embora recente, é adotada em diversos países para estabelecer novos limites de tamponamento dos tubos (Ribes *et al.*, 1993; Pitner *et al.*, 1993; Cizelj, 1994; IAEA, 1995), e tem sua utilização recomendada às situações em que há incertezas nos parâmetros que governam a propagação dos defeitos no material. Assim, essa é a abordagem adequada para analisar o problema, uma vez que em cada GV existem milhares de tubos com diferentes propriedades materiais, características geométricas, tensões atuantes e tamanhos de defeitos.

Três condições são necessárias para que o SCC se manifeste: material susceptível, ambiente agressivo e solicitações de tração. Quanto mais desfavorável for essa combinação piores serão as conseqüências sobre o material. No caso do GV, o mecanismo de falha é denominado PWSCC (*primary water stress corrosion crack*) quando aparecem trincas axiais no lado interno do tubo, principalmente na região de transição, acima do topo do espelho. A representação esquemática dessa região é mostrada na Fig.1.

Diversos são os parâmetros que controlam a falha dos tubos na zona de transição. Para o mecanismo de PWSCC um fator importante são as tensões residuais resultantes da montagem do tubo no espelho, uma grandeza influenciada, principalmente, pela dispersão existente no limite de escoamento do material. Outras incertezas na previsão de falha são as variações no diâmetro externo e espessura dos tubos, resistência mecânica, nas dimensões e taxas de crescimento dos defeitos e nos erros associados às medições durante o teste por ECT.

Neste trabalho é discutido a maneira como a técnica probabilista pode ser empregada para determinar um critério de tamponamento associado à probabilidade de falha especificada nas normas da indústria (NEI, 1997; USNRC, 1998). Com isso, espera-se reduzir o conservadorismo no critério atualmente usado em Angra 1, que foi estabelecido a partir de uma análise determinista. Inicialmente é apresentada a formulação teórica do problema e mostrado como são obtidas as distribuições estatísticas (funções densidade de probabilidade) da tensão de fluxo (média aritmética entre o limite de escoamento e de ruptura), raio médio e espessura do tubo, e comprimento das trincas medidas pelo ECT. Em seguida é abordada a forma como a taxa de propagação dos defeitos pode ser avaliada usando dados reais dos tubos

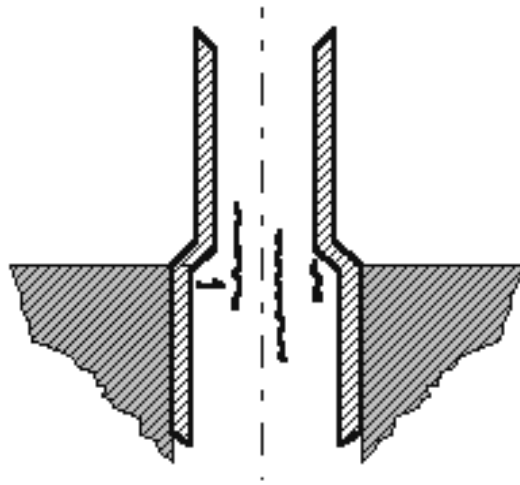


Figura 1 - Zona de transição do tubo na região do espelho

ou então estimada com modelos de análise disponíveis na literatura. A partir dessas informações é calculada a resposta do problema, obtida numericamente com o método de Monte Carlo.

## 2. PROBABILIDADE DE FALHA

A probabilidade de falha  $P_f$  é avaliada a partir de dados representados por distribuições estatisticamente independentes. A equação a ser resolvida é (Thoft-Christensen e Baker, 1982)

$$P_f = \int \int \dots \int_{f(\bar{X}) \leq 0} f_{x_1}(x_1) f_{x_2}(x_2) \dots f_{x_n}(x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n \quad (1)$$

onde  $f(\bar{X})$  é a função de falha e  $f_{x_1}(x_1), \dots, f_{x_n}(x_n)$  são as funções de densidade de probabilidade conjunta dos  $n$  parâmetros de entrada que caracterizam as incertezas do problema.

Para a análise dos tubos do GV duas considerações são feitas: a) admite-se que existe uma trinca axial passante na zona de transição (ver Fig.1); b) o modo de falha dos tubos, conforme resultados de experimentos realizados (NEA, 1996), é por colapso plástico. Nesse caso a instabilidade do defeito ocorre quando a tensão circunferencial,  $\sigma_\theta$ , atinge a tensão de fluxo,  $S_f$ , do material. A função  $f(\bar{X})$ , que define o critério de falha, é determinada de

$$f(\bar{X}) = S_f - \sigma_\theta m_b \leq 0 \quad (2)$$

com  $\sigma_\theta (= \Delta P R_m / t)$ . A quantidade  $\Delta P$  é três vezes a diferença na pressão entre os sistemas primário e o secundário (USNRC, 1998), sendo o raio médio e a espessura do tubo, respectivamente,  $R_m$  e  $t$ . O fator de amplificação  $m_b$  leva em conta o tamanho da trinca axial, com determinação proposta por Erdogan (1976) usando

$$m_b = 0,614 + 0,386e^{-1,25\lambda} + 0,418\lambda, \quad \lambda = [12(1 - \nu^2)]^{0,25} (R_m t)^{-0,5} a \quad (3)$$

onde  $\nu$  é o coeficiente de Poisson do material e  $a$  é a metade do comprimento da trinca.

Observa-se que  $f(\bar{X})$  é igual a  $f(S_f, R_m, t, a)$ , posto que são essas as variáveis que apresentam incertezas (admite-se que  $v$  seja um valor determinista e  $\Delta P$  uma constante conhecida). Como o mecanismo de SCC envolve a propagação do defeito, o seu crescimento num dado período,  $da/dt$ , também é aleatório. As distribuições estatísticas desses parâmetros são estabelecidas a seguir.

### 3. DADOS DE ENTRADA – INCERTEZAS DO PROBLEMA

#### 3.1 Distribuição da resistência do material

Os tubos de Angra 1 são fabricados de Inconel 600 e possuem propriedades mecânicas definidas em termos do limite de escoamento,  $S_y$ , e de ruptura,  $S_u$ . Examinando-se a folha de dados do material (Westinghouse, 1972) conclui-se que essas propriedades são representadas estatisticamente por uma distribuição normal. Desse modo admite-se que a tensão de fluxo  $S_f$  também é caracterizada por essa distribuição, com média  $\mu_{S_f}$  e desvio padrão  $\sigma_{S_f}$  iguais a

$$\mu_{S_f} = 545 \text{ MPa} \qquad \sigma_{S_f} = 24 \text{ MPa}$$

#### 3.2 Distribuição dos parâmetros geométricos do tubo

As dimensões nominais e as tolerâncias de fabricação dos tubos são obtidas da especificação do fornecedor (Westinghouse, 1975). Foi assumida a distribuição normal para  $R_m$  e  $t$ , com média igual ao valor nominal de cada quantidade. Considerando-se que a dispersão máxima é três vezes o desvio padrão (confiabilidade de 99,8%), tem-se

$$\mu_{R_m} = 8,979 \text{ mm} \quad \sigma_{R_m} = 0,017 \text{ mm} \quad ; \quad \mu_t = 1,092 \text{ mm} \quad \sigma_t = 0,034 \text{ mm}$$

#### 3.3 Distribuição do tamanho das trincas

A Fig.2 mostra a distribuição das trincas axiais internas nos tubos de um dos GV's, detectadas por ECT realizado na parada de Angra 1 em 1998. Na ordenada, é representada a frequência relativa, que é o número de indicações num intervalo de comprimento dividido pelo número total de indicações. Os comprimentos dos defeitos ( $2a$ ) indicados na figura são os existentes na zona de transição, localizados acima do topo do espelho, que pelo critério de tamponamento dos tubos é a parcela a ser limitada (o tamanho dentro do espelho não influencia no tamponamento).

A probabilidade de detecção,  $POD$ , está diretamente relacionada com a confiabilidade da técnica de inspeção por ECT e, juntamente com o erro na detecção do tamanho da trinca,  $2a_{erro}$ , devem ser incluídos nas curvas de distribuição. A estimativa desses parâmetros é feita pelas empresas que executam o teste, sendo para o PWSCC (Tecnatom, 1997):

$$83,3\% < POD < 99,4\% \quad \text{intervalo de confiança de 95\%} \quad ; \quad 2a_{erro} \approx 2,0 \text{ mm} \quad (4)$$

A função de densidade de probabilidade correspondente aos resultados do ECT pode ser aproximada usando diferentes distribuições, como a gama, log-normal ou Weibull. Neste trabalho optou-se pela última, com parâmetro de escala 4,5 e de forma 5,5, selecionados após tentativas para verificar a distribuição que melhor se ajustava aos dados medidos durante a inspeção de 1998. Na Fig.3 nota-se que a comparação entre os resultados de campo e os

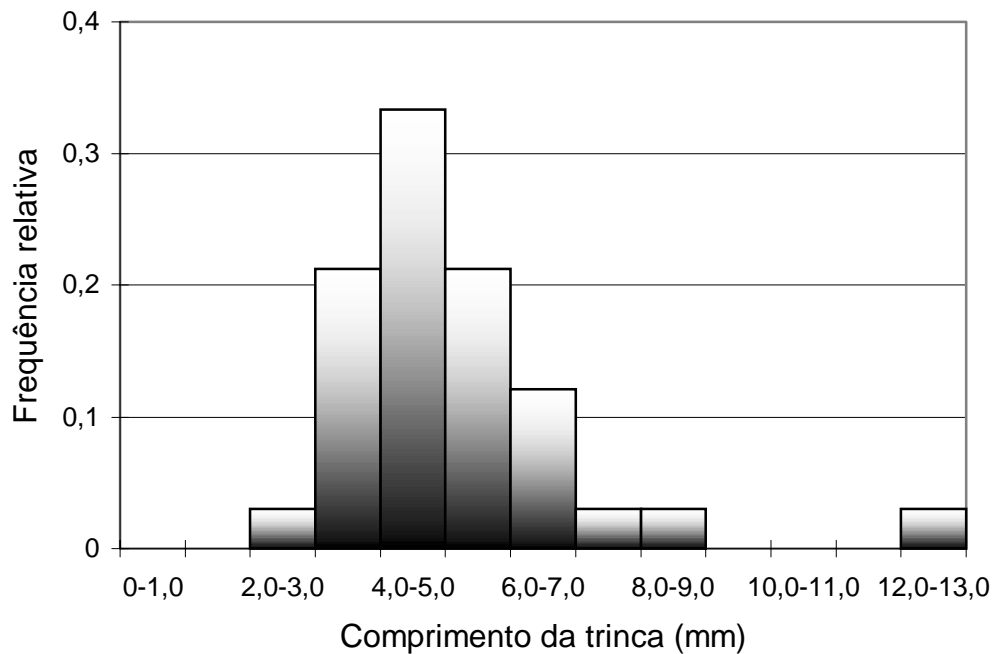


Figura 2 - Distribuição das trincas axiais na zona transição (ECT de 1998)  
GV 2 – Número de indicações PWSCC: 33

previstos estatisticamente concordam razoavelmente.

#### 4. PROPAGAÇÃO DA TRINCA

A taxa de propagação de trincas num ciclo típico de operação é usada para prever a distribuição dos defeitos a ser esperada na parada para inspeção subsequente. A estimativa é realizada com análise estatística dos dados de campo (fornecidos pelo ECT) ou então por meio de um modelo empregando os conceitos da mecânica da fratura.

A cada intervalo de 12 meses, durante as paradas de Angra 1 para manutenção, todos os tubos dos GV's são inspecionados por ECT para verificar a existência de trincas. Os resultados dos testes são armazenados em um banco de dados onde é possível identificar, em cada um dos tubos, o tamanho, localização e mecanismo de iniciação dos defeitos. A taxa de propagação num tubo em particular é obtida tomando-se a diferença no comprimento do defeito entre duas paradas consecutivas. A distribuição do incremento no comprimento das trincas entre 1997 e 1998 (ciclo de 12 meses a 100% de potência) é apresentada na Fig.4.

Nota-se que as indicações para o mecanismo de PWSCC, apesar de ainda escassas, tendem à distribuição exponencial. Quando a quantidade de dados é insuficiente para a representação estatística da taxa de propagação, torna-se aceitável o uso de valores disponíveis em outras centrais com histórico de operação, propriedades do material e características de projeto (método de expansão do tubo no espelho) similares. Um número típico corresponde a um crescimento médio de 2 mm/ano.

No caso de estimativa usando mecânica da fratura pode-se usar

$$\frac{da}{dt} = C(K - K_{ISCC})^m \quad (5)$$

conforme proposta de Scott (1991). O fator de intensidade de tensões é  $K$ , sendo  $m$  e  $C$  constantes obtidas experimentalmente e  $K_{ISCC}$  o limiar para propagação do defeito. Resultados

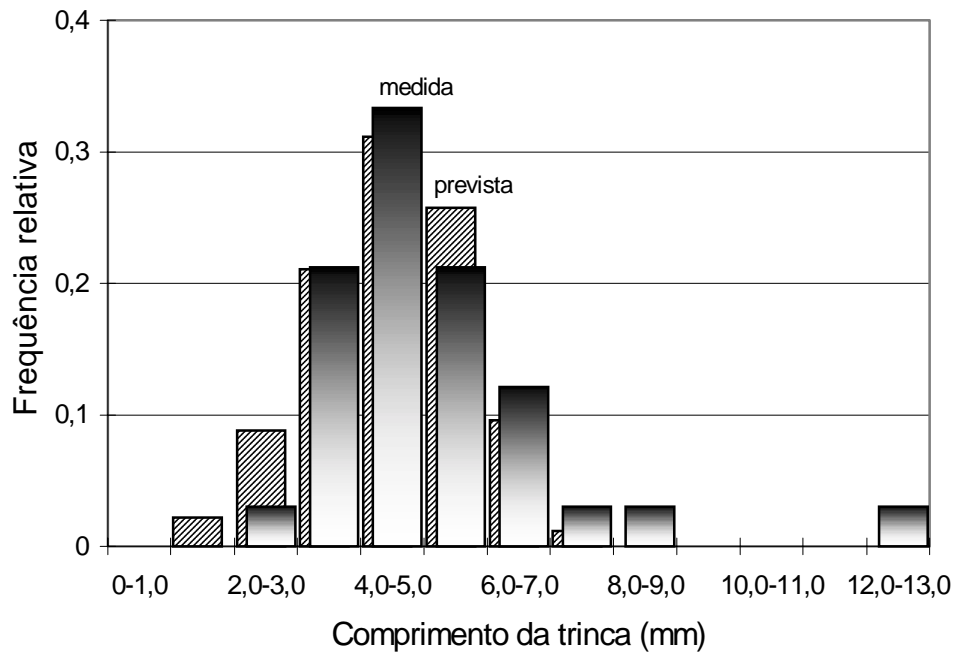


Figura 3 - Distribuição das trincas axiais medidas e previstas na zona de transição GV 2 – Número de indicações PWSCC: 33

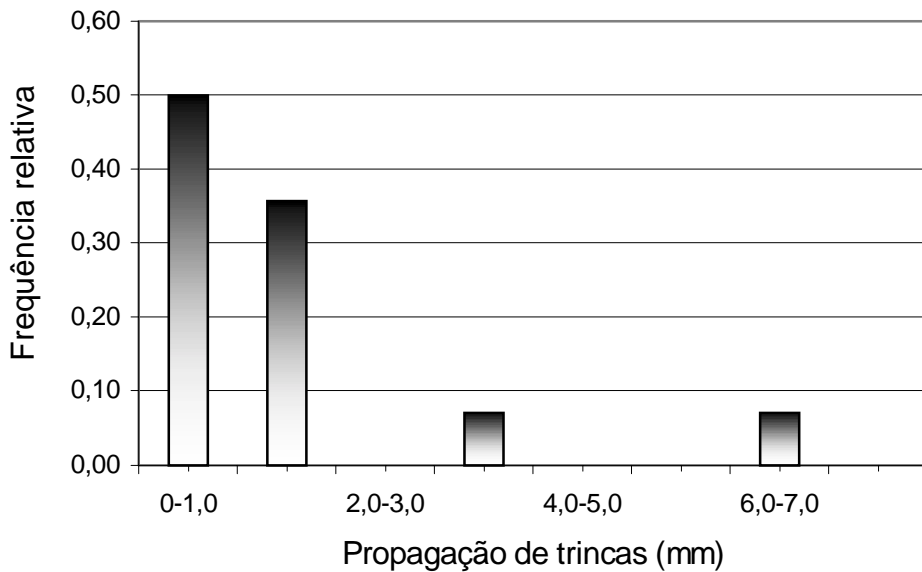


Figura 4 - Taxa de propagação de trincas na zona de transição (período de 12 meses)

de Cizelj (1994) com valores de  $m = 1,16$ ,  $C = 2,8 \times 10^{-11}$  e  $K_{ISCC} = 9 \text{ MPa m}^{1/2}$  forneceram previsões de propagação consistentes com dados de campo medidos na Usina de Krsko (Eslovênia). O fator de intensidade de tensões para a trinca passante axial foi obtido de

$$K = \left[ \frac{1}{(\pi a)^{0,5}} \int_{-a}^a \sigma(\xi + l) \sqrt{\frac{a \pm \xi}{a \mp \xi}} d\xi \right] m_b \quad (6)$$

com  $\sigma$  sendo a tensão circunferencial na zona de transição,  $l$  a posição do centro da trinca (em relação ao topo do espelho),  $\xi$  a coordenada local com origem no centro da trinca, e  $a$  e  $m_b$  conforme já definidos.

Uma alternativa para prever  $da/dt$  (mm/h) é fornecida por Pitner *et al.* (1993), que propõem a expressão

$$\frac{da}{dt} = CK^m \quad (7)$$

onde  $m = 1,07$  e  $C$  é aproximado por uma distribuição log-normal de média  $\mu_C = -12,06$  e desvio padrão  $\sigma_C = 0,84$ . Esses números foram obtidos a partir dos resultados dos testes nas plantas francesas, sendo o limiar para a propagação assumido como  $K_{ISCC} = 35 \text{ MPa m}^{1/2}$ . A mesma referência oferece uma opção para o cálculo de  $K$  ( $\text{MPa m}^{1/2}$ ) usando a equação

$$K = -23,96 \log(a) + 3,8a + 28,4 \quad (8)$$

Observa-se na Eq.(6) que é necessário conhecer a tensão na região de interesse. Em Medeiros e Maneschy (1998) são apresentados os detalhes desse cálculo, realizado por meio de um modelo de elementos finitos axissimétrico, que combina análise elasto-plástica para a estimativa das tensões residuais provocadas pela expansão mecânica do tubo no espelho com análise elástica para os demais carregamentos (pressão mais temperatura de trabalho). A tensão circunferencial total na zona de transição é mostrada na Fig.5 para valores típicos de  $S_y$ ,  $t$  e  $c$  (folga entre o tubo e o espelho antes da expansão). A origem do sistema de coordenadas é o topo do espelho e os dados são obtidos na superfície interna ao longo da direção axial do tubo. Como a tensão de operação é de aproximadamente 80 MPa, conclui-se que o campo de tensões é controlado pela componente residual. Comparação desses resultados com outros disponíveis na literatura (Flesh *et al.*, 1993; Cizelj, 1994; Allam *et al.*, 1998) indicam que os números obtidos aqui são consistentes.

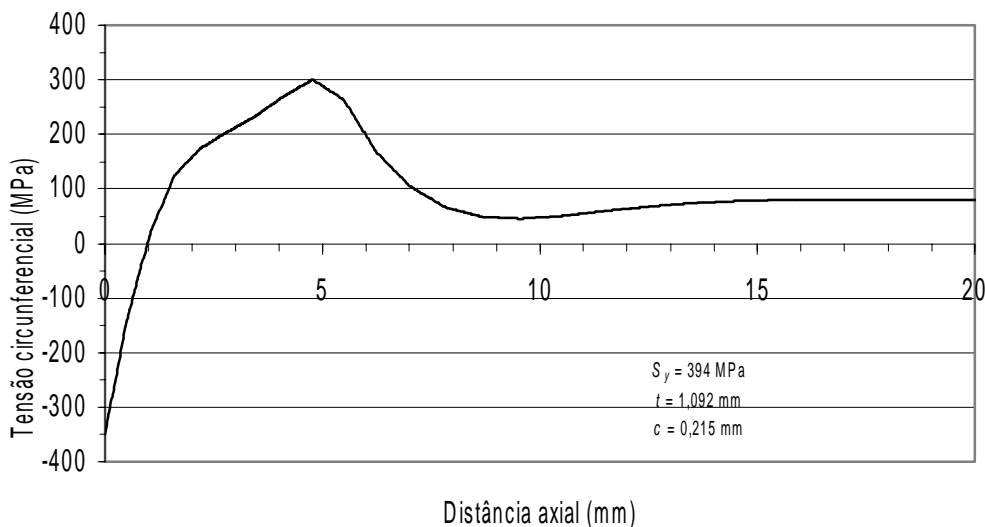


Figura 5 - Tensão total na superfície interna do tubo (origem é o topo do espelho)

De acordo com Middlebrooks *et al.* (1993) e com estudos preliminares realizados pelos autores, a espessura do tubo e a folga inicial (antes do processo de mandrilamento) não afetam a distribuição das tensões residuais. Entretanto, essa quantidade, em geral, pode variar significativamente com  $S_y$ . A análise do material do GV de Angra 1 indica que o valor médio do limite de escoamento é 394 MPa, desvio padrão de 33 MPa, e com valores representados por uma distribuição normal. Neste caso em particular a incerteza na tensão residual é desprezível, porque não há diferença apreciável no seu cálculo com diferentes  $S_y$ .

Na obtenção de  $K$  (e  $da/dt$ ) o valor da tensão depende da posição da trinca, e varia ao longo de eixo longitudinal (ver Fig.5). Consequentemente, trincas menores crescem mais rapidamente que as de maior comprimento. Essa observação é confirmada por dados reais medidos durante o ECT (ver Fig.4).

## 5. RESULTADOS

A principal informação que se deseja neste estudo é quantificar a influência do critério de tamponamento dos tubos no risco de falha (ruptura) de um dos tubos do GV. Esta é uma etapa preliminar do trabalho, uma vez que em Angra 1 o número de trincas por PWSCC não é suficiente para representar estatisticamente a sua distribuição e taxa de propagação. Portanto, não é possível definir um critério para utilização imediata. Não obstante, é apresentado um exemplo para ilustrar a aplicação da metodologia discutida aqui.

A probabilidade de falha (Eq.1) é obtida numericamente usando o método de Monte Carlo. A técnica consiste em estabelecer distribuições estatísticas e gerar milhares de simulações com números aleatórios para cada uma das variáveis básicas,  $S_f$ ,  $R_m$ ,  $t$ ,  $a$ , e determinar a função de falha correspondente. O valor de  $P_f$  é estimado usando a relação entre o número de iterações em que  $f(\bar{X}) \leq 0$  e o número total de simulações (tipicamente 10000). Um código computacional foi desenvolvido pelos autores para implementar o método.

A função de densidade de probabilidade para as trincas no final de um período de operação é a combinação entre a distribuição dos seus comprimentos no início do ciclo (Fig.2), a distribuição do seu incremento num intervalo especificado (Fig.4), e os valores de  $POD$  e  $2a_{erro}$ . Por razão apontada acima optou-se por considerar propagação de 2,0 mm em 12 meses, um valor médio próximo dos medidos no período. Esse número é melhor do que os estimados com as Eqs.5 e 7, provavelmente porque as constantes envolvidas nas equações devam ser ajustadas para o caso de Angra 1. A incerteza no comprimento da trinca é igual a 2,0 mm. Registre-se que assumir  $da/dt$  e  $2a_{erro}$  como parâmetros deterministas é uma simplificação que não será adotada nas etapas posteriores da pesquisa.

O valor de  $P_f$  ao final do ciclo de operação (antes da inspeção seguinte) em função do tamanho da trinca  $2a$  é mostrado na Fig. 6. Os resultados são para  $3\Delta P = 28,95$  MPa e  $POD = 0,833$  (Tecnatom, 1997). Com a máxima probabilidade de falha estabelecida nas normas é possível estimar o limite de tamponamento,  $L_{máx}$ , para as trincas axiais causadas por PWSCC na zona de transição tubo/espelho. De acordo com a NEI (1997), a probabilidade de falha anual de um tubo do GV não deve ultrapassar  $5,0 \times 10^{-2}$ . Portanto, tem-se  $L_{máx} = 13,8$  mm.

É interessante comparar esse número com o correspondente adotado atualmente para Angra 1, calculado usando técnica determinista, e que vale aproximadamente 9,0 mm. Observa-se que com a aplicação do conceito probabilista trincas mais longas são aceitáveis, o que permite operar mais tempo com os tubos e, em conseqüência, prolongar a vida residual do equipamento.



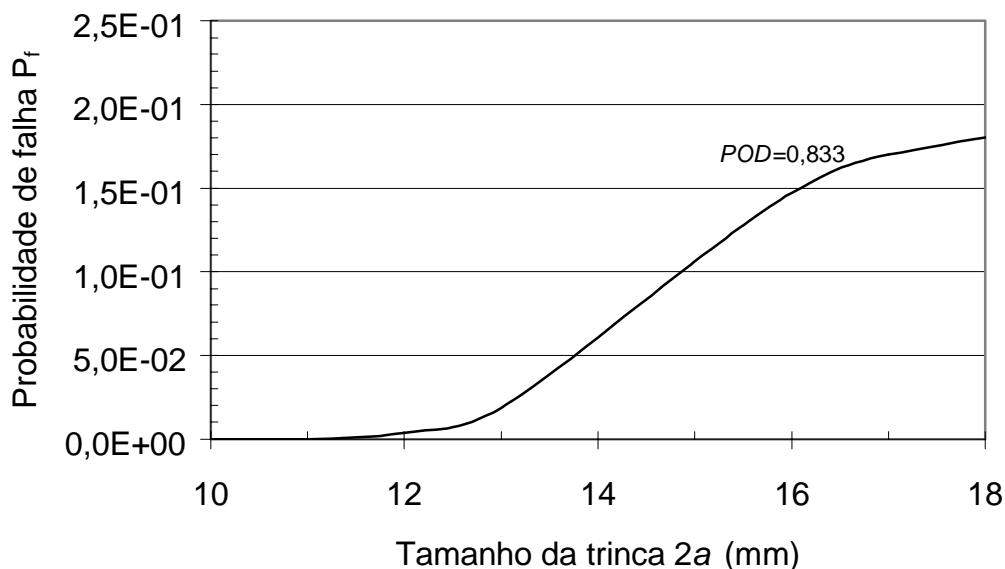


Figura 6 – Limite de tamponamento em função da probabilidade de falha do tubo

## 6. CONCLUSÃO

O trabalho apresenta uma metodologia de análise probabilista para investigar o comportamento dos tubos do GV, e definir um limite de tamponamento menos conservador que o ora empregado. Foi considerado que o mecanismo de falha dominante para as trincas axiais é o PWSCC, restrito à região de transição do tubo com o espelho.

O perfil de operação de Angra 1 e a quantidade de dados disponíveis das inspeções ainda não permitem estabelecer esse limite. Entretanto, a formulação teórica e parte dos programas computacionais estão quase todos desenvolvidos. Com os resultados do próximo ECT (previsto para o início do ano 2000) será possível completar os estudos e ampliar o uso da metodologia para outras regiões (interseção tubo/placa suporte) e formas de degradação (ODSCC *outside diameter stress corrosion crack*).

Um exemplo da aplicação da técnica indica que com o procedimento probabilista obtém-se limites de tamponamento menos restritivos que os atuais, que foram estimados usando análise determinista. Isso sugere que os tubos podem permanecer mais tempo em serviço, o que implica estender a vida do GV.

## REFERÊNCIAS

Allam, M., A. Chaaban and A. Bazergui, 1998, Estimation of Residual Stresses in Hydraulic Expanded Tube-to-Tubesheet Joints, *Journal of Pressure Vessel of Pressure Vessel Technology* 120, p.129-137.

Cizelj, L., 1994, On the Estimation of the Steam Generator Maintenance Efficiency by the Means of Probabilistic Fracture Mechanics, PhD Dissertation, Karlsruhe, Germany.

Cochet, B. and B. Flesch, 1987, Crack Instability Criteria in Steam Generator Tubes, SMiRT 9, Lausanne, Switzerland, Aug.17-21, V. D, p.405-411.

Erdogan, F., 1976, Ductile Failure Theories for Pressurized Pipes and Containers, *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, Vol.4.

Flesh, B., P. Vidal, J. Chabreire and J. P. Brunet, 1993, Operating Stresses and Stress Corrosion Cracking in Steam Generator Transition Zones (900 MWe PWR), *International Journal of Pressure Vessel and Piping* 56, p.213-228.

IAEA , 1995, Assessment and Management of Ageing Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: Steam Generator, p.116, Safety Series, International Atomic Energy Agency, Vienna.

Medeiros, M. e E. Maneschy, 1998, Análise de Tensões dos Tubos do Gerador de Vapor de Angra 1, Relatório Eletronuclear GQ/1/GV/090325.

Middlebrooks, W.B., D. L. Harrod and R. E. Gold, 1993, Residual Stresses Associated with the Hydraulic Expansion of the Steam Generator Tubing into Tubesheets, Nuclear Engineering and Design 143, p.159-169.

NEA, 1996, Probabilistic Structure Integrity Analysis and its Relationship to Deterministic Analysis, Nuclear Energy Agency Workshop, 28 Feb.– 1 Mar. Sweden.

NEI, 1997, Steam Generator Program Guidelines, Nuclear Energy Institute.

Pitner, P., T. Riffard, B. Granger and B. Flesch, 1993, Application of probabilistic fracture mechanics to optimize the maintenance of PWR steam generator tubes, Nuclear Engineering and Design 142, p.89-100.

Ribes, B., C. Peres and J. Sanches, 1993, Statistical Analysis and Model Prediction for Steam Generator Degradation, 12<sup>th</sup> International Conference on NDE in the Nuclear and Pressure Vessel Industries, 11-13 October, Philadelphia, USA.

Tecnomat, 1997, Validación de las Tecnicas de Inspección em Servicio de los Tubos de Inconel 600 de los Generadores de Vapor Modelo W D-3 para el Fenómeno de Corrosión Bajo Tensión en la Superficie Interna, IF-VCI-10 01/97.

Thoft-Christensen P. and M. J. Baker, 1982, Structural Reliability Theory and its Application, Springer-Verlag, New York.

USNRC, 1998, Steam Generator Tube Integrity, Draft Regulatory Guide DG-1074.

Westinghouse, 1972, Angra1 Steam Generator - Material Test Report.

Westinghouse, 1975, Steam Generator Stress Report , WNET-120, V.10 and 12.

## A PROBABILISTIC APPROACH TO PREDICT CRACK PROPAGATION IN STEAM GENERATOR TUBES

**Abstract.** Steam generator pipe rupture is an accident that affects the availability and safety of nuclear plants. In order to reduce the possibility of this event, utilities developed a maintenance plan to inspect the tubes by eddy-current test (ECT) at each plant outage. Tubes are plugged when crack length is greater than limits previously established using deterministic procedure. Available data worldwide indicate that stress corrosion crack is the controlled mechanism to cracks initiation and propagation. Because the same trend has been observed in Angra 1, a strategy to manage the problem is necessary to extend the steam generator lifetime. The first results of this investigation, related to structural area, are presented in this paper. The approach is based on probabilistic fracture mechanics and the purposes of the study are: a) to identify the key variables and their statistical distribution; b) to define the new plugging limit at which tube repair is necessary without challenger the safety.

**Keywords:** *Angra 1, Steam Generator, Fracture, Probability*