



**GRUPO II
PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS – (GPT)**

PROPAGAÇÃO DE TRINCA POR CORROSÃO SOB TENSÃO EM DISCO DE TURBINAS

Eduardo Maneschy
ELETROBRÁS TERMONUCLEAR SA – ELETRONUCLEAR

RESUMO

Este trabalho apresenta um procedimento para analisar a propagação de uma trinca em disco de turbina da Usina Nuclear Angra 1. O defeito foi detectado e caracterizado a partir dos resultados da inspeção em serviço, fornecidos pelo teste de ultrassom. O mecanismo de corrosão sob tensão governa a iniciação e o crescimento da trinca. O estudo é baseado nos conceitos da mecânica da fratura e mostra as diferentes etapas que devem ser consideradas para a determinação dos parâmetros importantes na solução do problema. Na avaliação, é abordado como são calculadas as tensões e estimadas as taxas de propagação em meio hostil. Para garantir a segurança do equipamento durante o restante da sua vida, é estabelecida a estratégia para definir a frequência das inspeções em serviço.

PALAVRAS-CHAVE

Angra 1, Inspeção, Trinca, Turbina

1.0 - INTRODUÇÃO

Durante inspeção por ultrassom realizada em 1997 na turbina de baixa-pressão da Usina Angra 1, foi detectada a presença de uma trinca em um dos discos do rotor. Como esse defeito poderia se propagar pelo mecanismo de corrosão sob tensão (SCC) e, eventualmente, atingir um tamanho que acarretaria na ruptura do disco, foi necessário avaliar se a presença da trinca comprometeria a operação segura da turbina.

A metodologia que vem sendo empregada para estudar esse tipo de problema é baseada na teoria da mecânica

da fratura linear-elástica. A estimativa da vida residual do equipamento, expressa em termos do tempo que o defeito leva para atingir o tamanho crítico, é obtida por meio de um procedimento que combina as tensões e propriedades do material com as dimensões da trinca. Em geral, as tensões e as características do material são conhecidas a partir de informações do fabricante da turbina. A geometria do defeito é obtida por meio do ensaio não-destrutivo (ultra-som).

A principal motivação do trabalho é apresentar como a tecnologia da mecânica da fratura é aplicada ao caso da propagação de trincas por corrosão sob tensão na interface disco/rotor. É mostrado que quando uma estratégia de manutenção é implementada (frequência de inspeção adequada) pode-se acompanhar a evolução do defeito e evitar que a sua presença comprometa a integridade da turbina e, em consequência, a operação da Usina.

2.0 - INSPEÇÃO EM SERVIÇO

O conjunto turbo-gerador de Angra 1 (657 MWe) foi fabricado pela Westinghouse e é composto por duas turbinas de baixa-pressão (LP1 e LP2) e uma de alta-pressão (HP). Cada uma das LP's possui dez discos fabricados com aço inoxidável de baixa-liga NiCrMoV, montados por interferência no rotor (fretagem). Um conjunto com cinco discos é localizado no lado da válvula governadora e o outro no lado do gerador elétrico. Os discos são identificados por números, sendo 1 o mais próximo do centro do eixo e 5 o mais afastado. A fixação no eixo é feita por meio de três chavetas de seção circular, espaçadas de 120° e usinadas de forma que metade da área do entalhe esteja contida no disco e a outra no rotor.

De acordo com o programa de testes proposto inicialmente pelo fabricante, é necessário inspecionar as máquinas após os primeiros cinco anos em serviço. Durante a inspeção por ultra-som em uma das turbinas de baixa-pressão realizada em 1997, constatou-se a presença de uma trinca superficial semi-elíptica, originada por corrosão sob tensão, com profundidade a de 5,0 mm e comprimento l de 25 mm, localizada na face do disco 2, na região do rasgo de uma das chavetas, Figura 1.

Esse tipo de defeito é muito comum em turbinas a vapor de plantas nucleares, principalmente aquelas fabricadas na primeira metade da década de 70. Dados de ensaios realizados em diversas centrais que operam com turbinas em que os discos são chavetados no eixo indicam que pelo menos 60% dos rotores inspecionados são afetados por SCC, (1). Mais ainda, em alguns casos, a partir do quinto ano em serviço, é possível detectar trincas com até 10 mm de profundidade. A principal razão para que o fenômeno promova o aparecimento e propagação do defeito na zona da chaveta é a tendência de que se acumulem impurezas do meio agressivo na folga ($\approx 0,05$ mm) existente entre esta e o disco. De um modo geral, os dois discos (números 1 e 2) próximos do centro do rotor são mais susceptíveis ao dano uma vez que o vapor chega a essa região suficientemente úmido para produzir corrosão sob tensão.

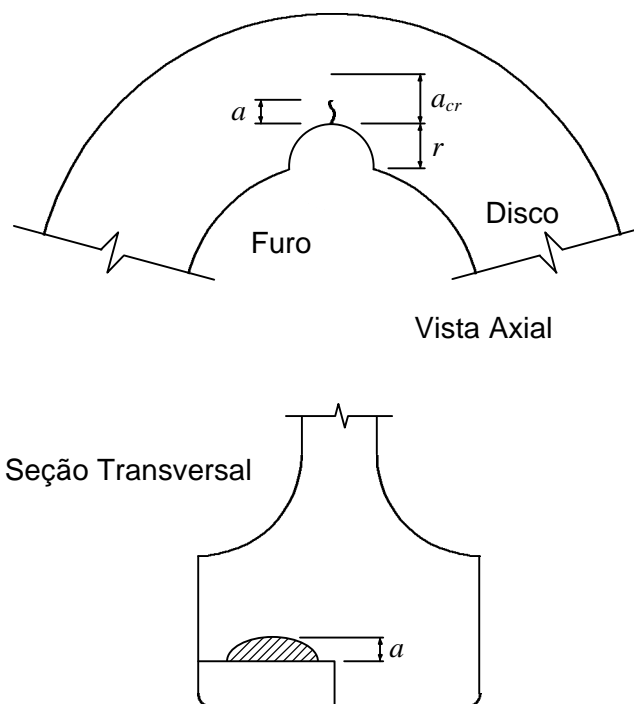
3.0 - MECÂNICA DA FRATURA

Conforme já mencionado, a teoria da mecânica da fratura é a alternativa apropriada para investigar se é possível haver a propagação instável do defeito existente. O procedimento para estimar a vida residual da turbina define períodos de inspeção em serviço que garantam a sua utilização segura. Com isso, eliminam-se os riscos de acidentes provocados por falhas inesperadas. O uso criterioso dessa tecnologia evita os custos de parada para manutenções desnecessárias ou mesmo os relativos à remoção de operação prematura do equipamento.

Quando é constatada a presença de defeitos nos internos de uma turbina, a inspeção subsequente é estabelecida com base no tempo que a trinca leva para alcançar um valor crítico, a_c , associado ao instante em

FIGURA 1 - Representação esquemática da trinca no disco (r = raio da chaveta)

que ocorre a falha repentina do componente. De acordo com a prática da indústria (2), esse tempo, t_{ins} ,



corresponde à metade daquele necessário para a trinca atingir um tamanho igual a 75% de a_c . Assim:

$$t_{ins} = \frac{0,75a_c - (a_o + d)}{2v} \quad (1)$$

onde a_o é o tamanho inicial do defeito, n é a sua velocidade de propagação e d é a incerteza na medição no ensaio com ultra-som (valor típico igual a 1,5 mm).

O procedimento para a estimativa de a_c e n é abordado a seguir.

3.1 Determinação de a_c

A obtenção da profundidade crítica para o defeito semi-elíptico é realizada com o auxílio de uma das correlações mais usadas na mecânica da fratura, proposta inicialmente por (3) e depois modificada por (4), que é escrita como

$$a_c = \frac{Q}{1,21p} \left(\frac{K_{IC}}{s} \right)^2 \quad (2)$$

sendo K_{IC} o fator crítico de intensidade de tensões e Q o parâmetro de forma da trinca obtido de (5)

$$Q = 1 + 4,593(a/l)^{1,65} + q_y \quad (3a)$$

$$q_y = (s/S_y)^2 / 6 \quad (3b)$$

com q_y sendo o fator de correção da zona plástica, s a tensão perpendicular ao plano do defeito e S_y o limite de escoamento. Quando a trinca é originada no rasgo da chaveta circular, o comprimento crítico

efetivo é obtido subtraindo-se o raio da chaveta r (ver Figura 1) do valor determinado com a Equação 2.

Na falta de informações, é comum assumir $a/l = 0,2$ constante em toda a fase de propagação. A hipótese é conservadora e representativa das medições efetuadas em vários discos que mostraram que, com o seu crescimento, a trinca tende ao formato semi-circular ($a/l = 0,5$). Esta é uma geometria favorável, sendo o pior caso a configuração de trinca plana ($a/l = 0$).

3.1.1 Determinação de s

As tensões empregadas na análise da fratura são aquelas obtidas na fase de projeto da turbina e levam em conta os efeitos da variação da temperatura ($\approx 250^\circ\text{C}$ na região dos dois primeiros discos), da força centrífuga (velocidade de rotação 1500/1800 rpm) e da carga da montagem do disco no rotor da turbina. Em geral, o fabricante fornece as tensões na base de cada disco, região onde geralmente é localizado o defeito. É atribuição do analista a correta seleção da magnitude e direção das tensões que provocam a abertura da trinca existente.

Quando esses valores não são disponíveis, a alternativa numérica é adotada. Nesse caso, a análise estrutural para os carregamentos mencionados anteriormente é precedida pela análise térmica, fase em que é obtida a distribuição de temperaturas na condição mais severa de operação da turbina (partida a frio, regime permanente a 100% de potência). A mesma geometria pode ser empregada para os cálculos térmico e estrutural, sendo a opção por um modelo de elementos finitos bidimensional a mais adotada.

3.1.2 Determinação de K_{IC}

Na prática, não é realizado teste no material para a obtenção do fator crítico de intensidade de tensões K_{IC} dos discos. Em geral, esse valor é estimado indiretamente, por meio de ensaios Charpy, e usando a correlação proposta em (6) dada por

$$K_{IC} = [5S_y(CVN - \frac{S_y}{20})]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

com CVN sendo a máxima energia absorvida no teste de impacto. Para manter a consistência das unidades com as constantes da fórmula, S_y é expresso em (kpsi), CVN em (lbs-ft) e K_{IC} em (kpsi.in^{1/2}).

3.2 Determinação de n

A taxa de crescimento dos defeitos em discos de turbinas é estimada de medições obtidas durante as inspeções em serviço nas máquinas de plantas nucleares e fósseis. Esses resultados serviram para que os fornecedores do equipamento montassem um banco de dados (hoje com centenas de pontos) cuja principal informação oferece um modelo para a previsão da velocidade de propagação n no ambiente agressivo existente na turbina (7).

Como há incertezas em variáveis como a qualidade do vapor na região dos discos e características químicas e mecânicas do material, os resultados foram analisados estatisticamente. O produto final é uma correlação do tipo Arrhenius, que é adequada para processos ativados termicamente como é o SCC. O logaritmo natural de n é uma função do limite de escoamento S_y e do inverso da temperatura de operação T na forma

$$\ln n = -A_1 - \frac{A_2}{T} + A_3 S_y \quad (5)$$

onde A_1 , A_2 e A_3 são constantes conhecidas.

Os resultados dos testes confirmam que o local mais provável para o aparecimento das trincas é próximo a base do disco, na zona das chavetas, e que há correlação entre a temperatura do metal nessa região e a temperatura de saturação do vapor. Se esta última é menor que a primeira não há iniciação de trincas. Isto explica porque a área mais susceptível aos defeitos é a dos dois primeiros discos, região em que o vapor na entrada da turbina pode estar úmido, permitindo que a condensação resultante favoreça o mecanismo de SCC. A presença de trincas não é esperada nos demais discos uma vez que estes permanecem aquecidos e com temperatura superior à do vapor (a temperatura do vapor decresce do centro para as extremidades do rotor por conta das extrações).

4.0 - RESULTADOS

Examinando-se a trinca semi-elíptica existente no disco, nota-se que a sua propagação vai ocorrer na direção radial e, portanto, sua abertura vai se processar sob a ação das tensões circunferenciais (ver Figura 1). Os resultados obtidos a seguir não levaram em conta o comprimento crítico efetivo do defeito, isto é, o raio da chaveta não foi considerado na Equação 2. Foi assumido que isto é compensado pelo conservadorismo existente na estimativa dos outros parâmetros.

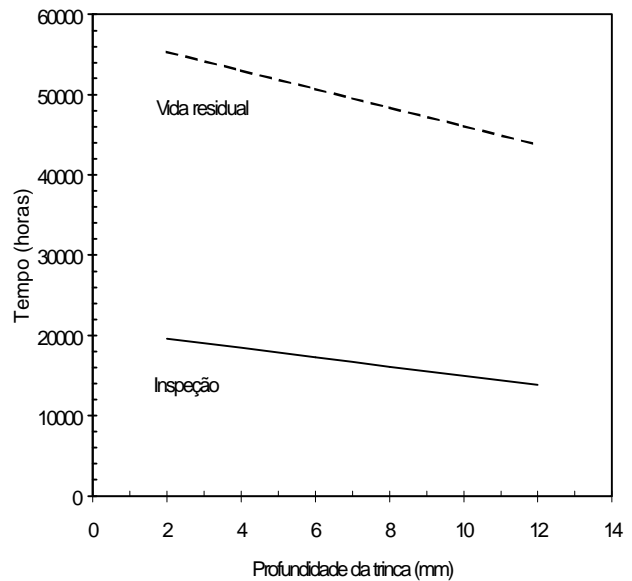
Da referência (8) tem-se: $\sigma = 603$ MPa, $S_y = 846$ MPa, $CVN = 128$ J e $n = 3,35 \times 10^{-4}$ mm/h. As dimensões da trinca fornecidas pelo ensaio de ultra-som são: $a = 5,0$ mm e $l = 25$ mm. Com a/l e σ/S_y na Equação 3 obtém-se Q igual a 1,4. Da Equação 4 tem-se o fator $K_{Ic} = 255$ MPa(m)^{1/2}. O tamanho crítico da trinca é estimado com esses parâmetros na Equação 2 e vale $a_c = 65,9$ mm. Finalmente, por substituição na Equação 1, chega-se à conclusão que é necessário inspecionar novamente este disco em

$$t_{ins} \approx 64000 \text{ horas}$$

Entretanto, a folha de dados do material de todos os discos da turbina registra que o disco 1, e não o da análise em questão (disco 2), apresenta propriedades mais críticas em relação à fratura. Além disso, e como visto anteriormente, as condições do vapor são favoráveis ao aparecimento de defeitos por corrosão sob tensão no disco 1, localizado na zona onde ocorre a primeira formação de umidade. Portanto, se uma trinca é originada nesse disco, é necessário examinar o equipamento num intervalo mais curto.

O período de inspeção do disco 1 é calculado com procedimento idêntico ao usado anteriormente e, conforme (8), considera: $\sigma = 613$ MPa, $S_y = 860$ MPa, $CVN = 102$ J e $n = 8,64 \times 10^{-4}$ mm/h. Com a/l e σ/S_y na Equação 3 obtém-se Q igual a 1,4. Da Equação 4 tem-se o fator $K_{Ic} = 228$ MPa(m)^{1/2} e da Equação 1 o tamanho crítico da trinca $a_c = 51$ mm.

Esses dados servem para gerar a curva de frequência de testes da turbina de baixa-pressão de Angra 1. A Figura 2 (linha cheia) representa como t_{ins} varia em função do tamanho do defeito presente no material. A abscissa mostra a profundidade da trinca em milímetros; na ordenada, é indicado o intervalo entre os ensaios por ultra-som, em horas. Assim, se um defeito de mesmo tamanho (5,0 x 25 mm) é encontrado no disco 1, o tempo para testar o



equipamento é bem menor que o determinado previamente.

FIGURA 2 – Frequência de inspeção e vida da turbina

É importante mencionar que o período de inspeção é estabelecido independente da existência de defeitos. Como é possível aparecer trinca no disco 1, a frequência de testes é governada por suas propriedades mecânicas em particular. A extrapolação da curva até o eixo das ordenadas mostra que a turbina deve ser examinada após a operação contínua por 21000 h (29 meses). Nesse caso, admite-se que a trinca é originada logo após cada inspeção, sendo assumido $a_0 = 0,0$ na Equação 1.

De modo a comparar t_{ins} com o tempo em que o tamanho crítico é alcançado $t_c [= (a_c - a_0) / v]$ e, com isso, estimar o grau de conservadorismo envolvido, é também representada na Figura 2 a vida residual da turbina (linha tracejada). Observa-se que, uma vez iniciado o defeito, em apenas 57000 h pode ocorrer a ruptura repentina do disco. Esse resultado indica que a maior parte da vida do material é consumida para iniciar a trinca que, depois de iniciada, rapidamente se propaga até à falha.

É importante destacar que a recente geração de turbinas, construídas com tecnologia da década de 80, praticamente elimina o número de trincas geradas por corrosão sob tensão. Isto é possível com o projeto de rotor/disco integrado (sem chavetas) e fabricando os discos usando material com menor limite de escoamento. Como essa combinação reduz as tensões e a velocidade de propagação dos defeitos, é possível estender o intervalo de tempo entre inspeções.

5.0 - CONCLUSÕES

O trabalho ilustra como a tecnologia da mecânica da fratura pode ser empregada para estimar a frequência de inspeção e a vida residual de uma turbina. Fica claro que a presença de defeito é tolerada desde que seja implementada uma estratégia de manutenção adequada. Com isso, garante-se a operação segura da máquina durante sua vida útil.

No caso da Usina Nuclear Angra 1, as propriedades mecânicas e a existência de trinca no disco 1 controlam a frequência de testes. Assim, é importante conhecer as condições termodinâmicas do vapor na admissão da turbina e regular a sua qualidade para evitar que chegue úmido ao disco. Quando a energia de entrada é baixa o mecanismo de SCC se manifesta e requer que sejam realizadas inspeções em períodos tão curtos que inviabilizam economicamente a instalação. Nestes casos, a troca da turbina por outra mais moderna deve ser considerada.

6.0 - BIBLIOGRAFIA

(1) DUMONT F.G. , MARTINEZ, C.A. Evolución de la Problemática de Corrosión Bajo Tension (SCC) en los Rotores de Baja Pression. XXI Reunion Anual SNE. Tarragona-Reus. (1995). Espanha.

(2) Prática industrial aprovada pela Nuclear Regulatory Commission. (1980). USA.

(3) IRWIN, G.R. Journal of Applied Mechanics, American Society Mechanical Engineers, Vol.29, No.4, p.651 (1962). USA.

(4) CLARK, W.G. , WESSEL, E.T. Application of Fracture Mechanics Technology to Medium Strength Steels. ASTM STP n^o 463 (1970). USA.

(5) AMERICAN SOCIETY MECHANICAL ENGINNEERS. ASME XI. (1992). USA.

(6) BARSOM, J.M. , ROLFE, S.P. Correlation Between KIC and Charpy V-Notch Test Results in the Transition Temperature Range. ASTM STP n^o 466 (1970). USA.

(7) CLARK, W.G. , SETH, B.B. , SHAFFER D.M. Procedures for Estimating the Probability of Steam Turbine Disc Rupture from Stress Corrosion Cracking. Joint ASME/IEEE Power Generation Conference (1981). USA.

(8) WESTINGHOUSE. Angra Turbine Disc Data. (1980). USA.