



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GMI 12  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

**GRUPO XII  
GRUPO DE ESTUDO DE ASPECTOS TÉCNICOS E GERENCIAIS DE MANUTENÇÃO EM INSTALAÇÕES  
ELÉTRICAS - GMI**

**DETECÇÃO E RECUPERAÇÃO DE TRINCAS EM PRÉ-DISTRIBUIDOR – UMA EXPERIÊNCIA APLICADA  
NA UG-15 DA UHE ILHA SOLTEIRA**

**Roberto Toyofumi Kagesawa \***  
**Rui Riyo Ueda**

**Marcelo Bine Moni**  
**Luciano da Mata Ramalho**

**Ricardo Aparecido Avante**  
**Mário Alberto Almeida Artoni**

**CESP – Companhia Energética de São Paulo**

**RESUMO**

A UHE Ilha Solteira foi concluída em 1978, onde a primeira Unidade Geradora (UG) começou a operar a partir de Julho de 1973. Em 2003, após aproximadamente 26 anos de operação da UG-15, houve a ocorrência de trincas em 15 das 24 pás do Pré-distribuidor da UG-15. Por se tratar de um fato de grande magnitude, foram executados ensaios com o objetivo de adquirir conhecimentos, principalmente, no sentido de se conseguir prever as trincas antes que atingisse um número alto de pás. Este trabalho descreve todos os procedimentos na detecção, na inovação da forma de correção e nas técnicas de alívio de tensões nos processos de recuperação das trincas.

**PALAVRAS-CHAVE**

Hidrogeradores, Pré-distribuidor, Trincas, Detecção, Correção

**1.0 - INTRODUÇÃO**

**1.1 – Generalidades – UHE Ilha Solteira**

A UHE Ilha Solteira é a maior usina da CESP – Companhia Energética de São Paulo e do Estado de São Paulo e a terceira maior Usina Hidrelétrica do Brasil. Está localizada no noroeste paulista, represando o rio Paraná entre as cidades de Ilha Solteira–SP e Selvíria-MS. Possui vinte Unidades Geradoras (UGs), com as quais perfaz uma potência instalada de 3.440,0 MW.

Devido ao grande número de Unidades Geradoras e os prazos de entrega, o fornecimento dos equipamentos eletromecânicos da UHE Ilha Solteira foi dividido para três consórcios: o Pentaconsort, constituído de firmas japonesas (Hitachi, Toshiba e Mitsubishi), sueca (Asea) e germano-suíça (Brown Boveri) que basicamente forneceu os equipamentos para os grupos de 1 a 4; o European Consortium forneceu os equipamentos para os grupos 5 a 16, constituído do grupo italiano GIE, de firmas francesas (Neyrouc e Alstom) e alemã (Voit); os equipamentos para as máquinas 17 a 20 foram fornecidos por um consórcio basicamente francês. O primeiro grupo gerador entrou em operação em Julho de 1973 e o último em Dezembro de 1978.

A indústria nacional teve grande participação no fornecimento de equipamentos auxiliares, como pórticos, pontes rolantes, blindagens, comportas, entre outros. A diversidade de fabricantes proporciona um desafio enorme para as equipes de manutenção.

(\*) Rodovia Ilha Solteira Guadalupe do Alto Paraná, km 07 – CEP 15385-000 – Ilha Solteira, SP – Brasil  
Tel: (+55 18) 3743-7170 – Fax: (+55 18) 3743-7268 – Email: roberto.kagesawa@cesp.com.br

## 1.2 – Ocorrência com o Pré-distribuidor da UG-15

O Pré Distribuidor da UG-15 distribui um fluxo de 24.000.000 litros por minuto de água o mais uniforme possível em torno da Turbina e suporta toda a massa de 1.700 toneladas do conjunto girante.

Em 2003, na UG-15, houve a ocorrência de trincas em 15 das 24 pás do pré distribuidor. Esta ocorrência caracterizou-se por um ruído anormal na tampa da turbina quando esta atingia 150 MW de potência ativa.

Por se tratar de uma ocorrência atípica, foram coletados sinais de vibração na tampa da turbina, em posições correspondentes ao ponto de fixação das pás que encontram-se logo abaixo à tampa da Turbina. Para comparações e estudo, também foram aquiritados sinais nos mesmos pontos em uma outra UG idêntica, na mesma faixa de carregamento. O reparo foi feito utilizando material de aço carbono AWS E7018.

Em 2004, diante do surgimento de ruído anormal, foi feita inspeção, constatando-se novamente trinca na parte superior da pá nº 23. O reparo foi feito também utilizando material de aço carbono AWS E7018, porém com controle maior de temperatura durante a deposição de material.

Em 2005, diante do surgimento de ruído foi feita nova inspeção, constatando-se novamente trinca na parte superior da pá 23. O reparo foi feito utilizando material AWS E309 L e foi executada a mudança no perfil de saída da pá nº 23.

Foram implementadas outros cuidados durante a correção das trincas, com objetivo de eliminar as deformações originadas da soldagem, onde qualquer alteração dimensional causaria o travamento das pás móveis do Mecanismo Distribuidor, impedindo o funcionamento da Unidade Geradora.

O procedimento de correção consistiu de:

- Dimensionamento das trincas através de ensaios com ultra-som, Partículas Magnéticas e Líquido Penetrante;
- Travamento do anel superior do Pré Distribuidor, utilizando-se 3 macacos hidráulicos de capacidade para 200 toneladas. Esta providência foi extremamente necessária para impedir deformações e preservar as folgas das pás móveis;
- Soldagem em várias etapas visando garantir a resistência e a geometria original;
- Tratamento Térmico para alívio das tensões residuais pós soldagem;
- Aplicação de Shot peening nas áreas soldadas. O Shot peening é um sistema utilizado para aumentar a resistência nas regiões sujeitas a trincas de aeronaves.

## 2.0 - ANÁLISE

### 2.1 – Estudo do Comportamento Dinâmico das pás do Pré-distribuidor

Podemos considerar a função do Pré-distribuidor em distribuir o fluxo de água o mais uniforme possível em torno da Turbina como secundária, uma vez que suporta toda a massa do conjunto girante, bem com a ação das forças hidrodinâmicas. É portanto, um componente que necessita ser dimensionado considerando carregamento estático e dinâmico.

Deve ser considerada existência de força cíclica variável atuante nas pás proveniente do vórtice de Von Karman ou da variação da pressão dinâmica no tubo de sucção e caracol, ou seja, um mecanismo de fratura por fadiga.

Pode-se dizer que o mecanismo de fratura das pás do Pré-distribuidor está relacionado a dois componentes de forças que serão apresentados a seguir.

#### 2.1.1 – Forças Hidrodinâmicas

Quando uma estrutura com determinada geometria imersa num escoamento, verifica-se em face do efeito da viscosidade, a formação, desenvolvimento e posterior desprendimento de vórtices formando a denominada esteira. A frequência de desprendimento desses vórtices aumenta com a velocidade do escoamento e, quando se atinge a ressonância, a frequência dos vórtices ( $f_v$ ) se iguala à frequência natural ( $f_n$ ) da estrutura.

Esse desprendimento de vórtice, conhecido como vórtice de Von Karman é um fenômeno comum nas grades da tomada d'água, nas pás do Pré-distribuidor, nas pás do distribuidor e nas pás do rotor da turbina.

Em pás do Pré-distribuidor, o desprendimento dos vórtices ocorre em movimento alternado no bordo de saída, produzindo uma força de excitação transversal. Quando a frequência proporcionada por esta força de excitação coincide com a frequência natural das pás, inicia-se o processo de ressonância. Nesta condição, as pás passam a comandar o desprendimento dos vórtices no bordo de saída, induzindo os seguintes componentes:

- Componentes de força que pode ser analisada como a resultante das componentes média e oscilatória de arrasto (na direção de arrasto);
- Componente oscilatória de sustentação (no sentido perpendicular ao escoamento) que é bastante superior à força de arrasto.

Este fenômeno o qual se inicia com vibração do tipo forçada transforma-se em vibração do tipo auto-excitada e mantém-se com amplitude alta e moderada variação da velocidade de fluxo.

A componente oscilatória de sustentação tem uma frequência ( $f_v$ ) que pode ser expressa pelo número de STROUHAL:

$$S = f_v \cdot D / V$$

Sendo  $f_v$  a frequência de desprendimento dos vórtices,  $V$  a velocidade do escoamento e  $D$  a espessura do perfil do bordo de saída. A Figura 1 representa os resultados de escoamento em torno de uma seção retangular de comprimento  $L$ .

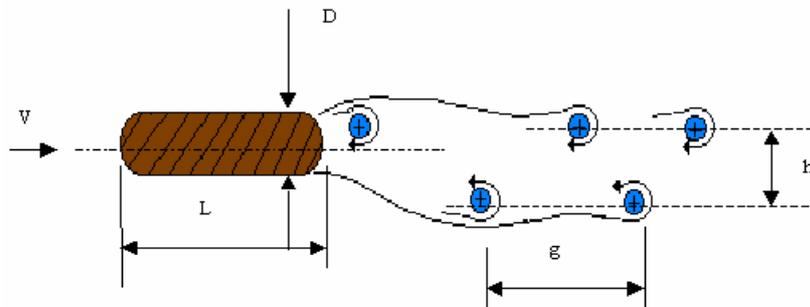


FIGURA 1 – Escoamento em torno de uma seção retangular de comprimento  $L$

Segundo as pesquisas sobre vibração induzida em placas planas podemos considerar que:

- Número de Strouhal é uma função do número de Reynolds, mas permanece aproximadamente constante para  $Re \geq 105$ ;
- Quando a pá vibra na condição de ressonância, o vórtice sincroniza-se na frequência da estrutura, e o número de Strouhal nessa condição passa por uma instabilidade, isto é, ele não se define muito bem;
- A sincronização das oscilações ressonantes perto da esteira fornece energia à estrutura, tanto que ela vibra com grande intensidade;
- A espessura da camada limite deve ser considerada como parte da dimensão transversal da pá;
- A geometria do bordo de fuga em uma grande influência sobre os esforços dinâmicos atuantes na pá e conseqüentemente haverá indução de vibração nela. No caso das pás do Pré-distribuidor de turbina, a amplitude do vórtice formado atrás da pá depende da velocidade do fluxo  $v$  e da geometria do bordo da saída através do número de Strouhal.

A Figura 2 mostra alguns perfis de bordos de saída de pás de Pré-distribuidor:

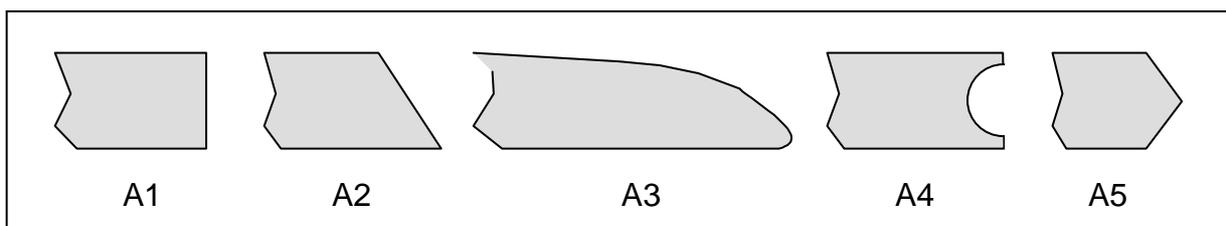


FIGURA 2 – Perfis de bordos de saída de pás de Pré-distribuidor.

### 2.1.2 – Forças Mecânicas

A fratura por fadiga em determinado material é resultado do surgimento de trinca sob aplicações de tensões repetitivas, as quais são substancialmente inferiores à tensão capaz de provocar fratura sob carga monotonicamente crescente ou mesmo com valores nominais inferiores ao limite de escoamento do material.

Neste último caso, a fratura ocorre após um grande número de ciclos de tensões, tipicamente superior a  $10^3$  ciclos de tensão e, é conhecido como fadiga de alto ciclo. Para tensões acima do limite de escoamento generalizado, a fratura ocorre em menos de  $10^3$  ciclos, sendo conhecido como fadiga de baixo ciclo. Dependendo da forma como o componente é solicitado, pode ser caracterizado pelo valor das tensões aplicadas ou pelo valor das deformações resultantes.

Deve ser considerado, o primeiro caso como fadiga controlada por deformação, por exemplos, ocorrências de fraturas em eixos, bielas, virabrequins, asas de avião em vôo, vasos de pressão, pás de turbina, pás de distribuidor e pás do Pré-distribuidor.

E o segundo caso, a fadiga de componentes submetidos a ciclo de temperatura conhecido como fadiga térmica. O processo de fadiga divide-se em três estágios:

➤ Estágio I

Corresponde à nucleação da trinca por deformação plástica localizada e o seu crescimento inicial, ao longo de planos de escorregamento, sob a influência de tensões de cisalhamento. Este estágio não é visível a olho nu na superfície de fratura, pois, normalmente, não se estende por mais de 2 a 5 grãos e pode corresponder de 0 a 90 % do número total de ciclos que o componente suporta antes de fraturar.

➤ Estágio II

Corresponde ao crescimento da trinca num plano perpendicular à direção da tensão principal de tração. A transição do estágio I para II se dá através da formação de numerosos degraus, também não visíveis a olho nu. A fratura neste estágio II é a mais característica do processo de fadiga, é sempre visível a olho nu e ainda que não corresponda necessariamente à maior parte do número de ciclos total suportado pela peça.

➤ Estágio III

Corresponde à fratura brusca final que ocorre no último ciclo de tensões quando a trinca desenvolvida progressivamente atinge o tamanho crítico para propagação instável, isto é, a fratura desenvolvida progressivamente depende das tensões aplicadas e da tenacidade do material. Em princípio é possível que o material se deforme antes da ruptura final, mas normalmente as fraturas de fadiga são macroscopicamente frágeis.

Das considerações acima, é importante compreender que para ocorrer trinca por fadiga, são necessárias duas condições:

- Tensões de tração: são estas tensões que provocam o crescimento da trinca em estágio II, embora tensões de compressão não provoquem fratura por fadiga, carregamento externo em compressão pode provocar;
- Deformação plástica localizada: para que as fraturas por fadiga ocorram sob tensões nominais abaixo do limite de escoamento, é condição necessária que haja deformação plástica localizada, pois, analogamente qualquer tipo de fraturas de metais, a fadiga é nucleada e acompanhada na propagação por deformação plástica.

Sendo um processo essencialmente localizado, é fácil de entender a importância na fadiga, da concentração de tensões devido a variações de dimensões e estado de superfície tais como, raios de concordância, rasgos de chaveta e riscos de usinagem, bem como de tensões residuais provocados por tratamento mecânico, tratamento térmico e processo de soldagem.

Em face das pás do pré-distribuidor possuir uma superfície plana e outra face convexa, ocorre a vibração no modo de flexão, gerando esforços dinâmicos de maior intensidade, favorecendo a nucleação de trincas na parte mais fina da face convexa (lado de pressão).

### 3.0 - PROCEDIMENTOS ADOTADOS

#### 3.1 – Reparo de Trincas

Como as extremidades das pás do pré-distribuidor são engastadas e soldadas ao anel superior e inferior é necessário estabelecer um processo de soldagem de complexidade maior que adotada para as pás da turbina, de modo a minimizar o efeito da tensão residual/contração a um nível admissível, uma vez que tratamento por meios térmicos “in loco” é impraticável.

##### 3.1.1 - Processo de reparo

No procedimento de reparo de trinca em pás do pré-distribuidor é importante utilizar técnica de soldagem que evitem surgimento de defeitos que pode ocasionar trincas, tais como: poros, mordeduras, faltas de fusão, falta de penetração, inclusões de escórias, micro trincas, deposição insuficiente e tensão térmica. Estes defeitos podem ter como origem os equipamentos, materiais de soldas, procedimento de deposição de material, controle de qualidade do material depositado, tratamento térmico e outros pontos importantes salientados neste relatório que merecem atenção especial. Desta forma, é necessário estabelecer:

- Especificação do material de deposição;
- Tratamento do material ;
- Qualificação de soldador;
- Preparação da unidade geradora:
  - Apoio do conjunto girante;
  - Iluminação do local de trabalho;
  - Montagem de andaime;
  - Montagem do sistema de ventilação e exaustão;
  - Remoção de pintura nas pás e guias de água para inspeção;
  - Inspeção e ensaios das pás;
- Pré-aquecimento;
- Tracionamento das pás;
- Controle de temperatura durante a deposição de material;
- Controle de qualidade do material depositado;
- Alívio de tensão após a deposição do material;
- Martelamento dos filetes depositados;
- Limpeza dos filetes;
- Controle de deformação;
- Tratamento mecânico para alívio de tensão (Shot-Peening).

##### 3.1.2 – Ensaio de Comportamento Dinâmico

Com objetivo de identificar a causa de surgimento de trincas na pá 23 do pré-distribuidor, foi executado o ensaio de avaliação do comportamento hidrodinâmico na UG-20, onde foram medidas as seguintes grandezas:

- Deformação estática e dinâmica em tração, compressão e flexão;
- Freqüências naturais e modos de vibrar nas respectivas freqüências naturais;
- Vibrações na estrutura suporte dos mancais da unidade geradora e do munhão da palheta diretrizes;
- Oscilação do eixo da unidade geradora (Programa Vibramaq);
- Pressão dinâmica junto à tampa da turbina, tubo de sucção, caixa espiral e entre as pás do pré-distribuidor e o distribuidor.

##### 3.1.2.1 – Resultados do ensaio dinâmico

Nos ensaios realizados não indicaram indício de sobrecarga nas pás ou de presença de forças excitadoras nas proximidades das freqüências naturais que justificasse tomar medida complementar. Diante das reincidências de trincas na pá 23, provavelmente pelas tensões residuais decorrente do processo de reparo, principalmente

considerando que em prazo de um ano tivemos duas ocorrências. Para dirimir qualquer dúvida sobre o processo de reparo e as tensões atuantes, a CESP decidiu fazer duas importantes mudanças no processo de reparo visando dois aspectos:

- Substituição do eletrodo de aço carbono AWS classe E 7018-1 por eletrodo de aço inoxidável AWS classe E 309 L visando minimizar o efeito de tensão residual;
- Mudança do perfil do bordo de saída da pá visando minimizar o efeito do vórtice de Von Karman.

#### 4.0 – COMENTÁRIO / CONCLUSÃO:

Este evento propiciou o aumento do know how da CESP no tratamento e reparo de trincas, além da economia extremamente significativa nos custos de manutenção. As melhorias e as economias foram:

##### 4.1 – Detecção de trincas sem a necessidade de indisponibilizar a Unidade Geradora

Com a otimização do equipamento modelo 2526 e software Sentinell da Bruel&Kjaer® é possível verificar os sinais de vibração e detectar se há trincas e precisar onde estão localizadas no Pré distribuidor. Nos moldes normais, há um gasto de 05 (cinco) dias de indisponibilidade da UG nesta inspeção, que consiste no salvamento de peixes, esgotamento de todo o conduto hidráulico da Turbina, montagem de plataformas e montagem de sistema de iluminação.

##### 4.2 – Atuação rápida da manutenção, evitando-se a quebra de outras pás do Pré distribuidor.

Por se tratar de uma estrutura, a quebra de uma única pá provoca a fragilização da estrutura, ocasionando a quebra sucessiva das outras pás. Fato que levou a trinca em 15 pás em 2003. Esta fato não deverá ocorrer novamente.

##### 4.3 - Acréscimo do know how da CESP.

Os custos com a recuperação das trincas, utilizando-se do know how interno, foi de aproximadamente R\$ 200.000,00 (Duzentos mil reais), onde foi utilizada uma tonelada de eletrodo. O custo de Mercado de Engenharia e recuperação seria de mais de R\$ 1.500.000,00 (Um milhão e quinhentos mil reais). Portanto, somente na recuperação, a economia foi de R\$ 1.300.000,00 (Um milhão e trezentos mil reais). A este valor não está incluso o valor referente ao faturamento da empresa em função do ganho de Geração por não haver a necessidade de indisponibilizar a UG para inspeções no Pré distribuidor.

Além da redução dos custos, há a possibilidade de receita através da venda deste serviço para outras empresas do Setor.

Este trabalho faz parte de um processo de melhoria contínua de reparos em Turbinas, que vem sendo executado nos últimos anos. Em todos os processos implantados foram economizados, somente em materiais e processos, aproximadamente R\$ 6.300.000,00 (Seis milhões e trezentos mil reais).

#### 5.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Relatório Técnico RT/OME/001/04 – Ocorrências de Trincas nas Pás do Pré-distribuidor das UGs 05 a 20 da UHE Ilha Solteira – 2004.
- (2) Análise Técnica OME/003/2005 – Alteração no Processo de Reparo do Pré-distribuidor da UG15 da UHE Ilha Solteira – 2005.
- (3) Fox, Roberto W., McDonald, Alan T. – Introdução à Mecânica dos Fluidos - 1985
- (4) Silveira Neto, A., Fundamentos da Turbulência nos Fluidos – Universidade Federal de Uberlândia.
- (5) Manual de Montagem dos Grupos 05 a 16.
- (6) III Prêmio CESP de Produtividade e Qualidade – 2005.