



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

GGH - 08
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

GRUPO I

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

SOLUÇÕES ADOTADAS PELA CESP PARA REPAROS DE CAVITAÇÃO E TRINCAS EM ROTORES DE TURBINAS HIDRÁULICAS

Márcio de Pinho Bitencourt (*)

CESP

**Hamilton H. Tiba
Serizawa**

CESP

Roberto T. Kagesawa

CESP

Adelino S.

CESP

RESUMO

Desde a década de 90, a CESP vem trabalhando para minimizar a incidência das trincas e da erosão cavitacional nas pás das unidades geradoras das Usinas de Ilha Solteira, Três Irmãos e Eng. Souza Dias (Jupirá), investindo nos estudos para minimizar os efeitos dinâmicos da cavitação, não só atuando diretamente nas técnicas de reparo, como também nos aspectos operativos das unidades geradoras. Quanto aos processos de reparos utilizados, a CESP esmerou-se na experiência adquirida ao longo de 25 anos e nos trabalhos feitos em parceria com fabricantes de turbinas, universidades, centros de pesquisas e fabricantes de consumíveis.

PALAVRAS-CHAVE

Cavitação, Trincas, Tensões residuais, Fadiga e Turbinas

1.0 - INTRODUÇÃO

O processo tradicional para reparo de cavitação utilizado pela CESP consistia na aplicação de eletrodo revestido de aço carbono na região da pá junto ao cubo da turbina e o eletrodo de aço inoxidável na cobertura na região de maior agressividade da cavitação, evitando-se a deposição de aço inoxidável na proximidade do bordo de saída junto ao cubo, por ser uma região de maior concentração de tensão.

Em 1997, com o surgimento no mercado nacional de arame tubular de aço inoxidável, adequado para soldagem em todas as posições utilizando equipamento de soldagem semi-automático (MIG-MAG), a CESP comprovou a sua eficiência tanto em ensaios realizados em laboratórios e quanto no campo, passando logo em seguida a utilizar para o reparo de cavitação. A grande vantagem deste processo de soldagem é quanto a produtividade de deposição de material ser em torno de 30% maior em relação ao processo convencional (eletrodo revestido), sem comprometer a qualidade do material depositado.

Em 2001, a CESP aprovou a utilização do arame tubular de liga de cobalto para cobertura nas turbinas Kaplan da Usina de Eng. Souza Dias (Jupirá) e turbinas Francis da Usina de Ilha Solteira, por ser um material especialmente desenvolvido por alguns fabricantes com resistência à cavitação muito superior ao aço inoxidável e, ainda com excelente soldabilidade.

A experiência da CESP em reparos de trincas nas pás de turbina baseia-se nos trabalhos desenvolvidos nas turbinas das usinas de Ilha Solteira e Três Irmãos, onde tivemos sérios problemas desde a entrada em operação das mesmas. Estas trincas junto à junção pá cubo no bordo de saída, junto à junção pá saia no bordo de entrada e no bordo de saída pá saia, foram sendo constatados que ocorriam por seguintes motivos:

- Falta de alívio de tensão adequada durante o processo de soldagem fabricação e de campo;

*Avenida Nossa Senhora do Sabará, 5312 - CEP 04447-011 - São Paulo - SP - BRASIL

Tel.: (011) 5613-3768 - Fax: (011) 5613-3773 - e-mail: marciobitencourt@cesp.com.br

- Excitação hidráulica produzida por desgaste no bordo de saída devido à cavitação;
- Perturbação hidráulica na turbina (vórtice) decorrente do projeto da turbina;
- Operação em faixa proibida ou em carga parcial.

O processo de reparo inicialmente implementado na CESP utilizava eletrodo revestido, porém não contemplava o controle e tratamento pós soldagem de tensão residual.

No diagnóstico feito em 2001 apontava que o reparo de trinca e cavitação nas pás da turbina das Usinas de Ilha Solteira e Três Irmãos era o item com maior contribuição no índice de indisponibilidade e continuava sendo o caminho crítico da manutenção preventiva. Nas análises preliminares apontavam que as ocorrências de trincas e cavitação estavam relacionadas a tensão residual remanescente da técnica de soldagem e devido ao problema dinâmico originado por operação em condições desfavoráveis. Na Usina Ilha Solteira era evidente a operação das unidades geradoras em carga parcial, uma sistemática que a CESP se submetia ao longo dos anos nestas usinas para controle de tensão do sistema.

Diante deste quadro, a CESP para minimizar os efeitos de cavitação e as forças atuantes nas pás da turbina alterou a faixa operativa das usinas de Ilha Solteira e Três Irmãos com base nos estudos sob os aspectos hidráulicos, metalúrgicos, estruturais, fabricação, condições operativas e de tensões atuantes nas pás da turbina feito em conjunto com os fabricantes de turbina.

Para minimizar as tensões residuais decorrente do processo de soldagem foi introduzido técnicas de tratamento para atenuar os efeitos de tensão residual na região soldada por meio térmico e mecânico (shop peening), e para seu controle a medida por processo de difração de raio-x.

2.0 ASPECTOS RELEVANTES DO PROCESSO DE REPARO DE CAVITAÇÃO E TRINCAS

2.1 Consumíveis e equipamentos de soldagem

No processo de aquisição de consumíveis utilizados para reparos de cavitação e trincas em pás de turbinas, a CESP solicita dos fornecedores documentos comprovando a quantificação da composição química segundo as normas vigentes e os procedimentos estabelecendo os tipos de equipamentos de solda, gases de proteção a ser utilizadas e os parâmetros para ajustes de tensão, corrente e velocidade para soldagem. Antes da aplicação é verificado a soldabilidade do consumível de cada lote soldando em todas as posições necessárias para reparo de pás de turbina, bem como a qualidade do material depositado sem poros, mordeduras e trincas. Quando o fornecedor é desconhecido é feito um diligenciamento do consumível para comprovar a qualidade do material depositado tanto em laboratório e no campo.

O arame tubular a base de liga de cobalto, por ser um material desenvolvido por algumas empresas com propriedade mecânica excepcional, não é um material normatizado. Por isso, no processo de aquisição são exigidos dos fornecedores documentos comprovando as propriedades mecânicas e a composição química, dentro dos valores estabelecidos pela CESP, bem como os testes de soldabilidade e qualidade do metal depositado em todas as posições. Estes testes nos consumíveis (arames tubulares) são extremamente importantes, considerando que o material depositado entre lotes do mesmo fornecedor pode ter diferença significativa na qualidade e no rendimento do material, quer seja por problema de processamento ou decorrente de fornecimento de consumíveis de diferente procedência. Também influi no desempenho do consumível o problema de armazenamento em local inadequado, principalmente quando a bobina é fornecida sem a proteção. Uma questão que estamos avaliando é quanto à utilização de materiais de diversos fornecedores com diferente formulação, no que tange à fragilização por efeito de fadiga.

Com relação ao equipamento de soldagem é importante que antes do início da soldagem, os instrumentos de indicação de tensão, corrente e velocidade de deposição do arame sejam aferidos.

2.2 Processo de reparo de cavitação

Em pás Francis das usinas de Ilha Solteira e Três Irmãos a maior incidência de cavitação ocorre na região localizada entre a pá e o cubo (vide Figura 01). A cavitação na pá Kaplan da Usina Jupia ocorre na proximidade do bordo de saída na região onde estão instaladas as abas anticavitação (vide Figura- 02).



FIGURA- 01- Pá Francis



FIGURA- 02- Pá Kaplan

Inicialmente, o serviço consiste em avaliar a região cavitada de cada pá para definir a superfície a ser reparada a partir da localização e as dimensões da região erodida. Em seguida determina-se a superfície padrão a ser adotada nesta turbina e estabelecer as áreas para enchimento de material de aço carbono, aço inoxidável e material de cobalto, seguindo os seguintes critérios:

- Revestimento de aço inox mais liga de cobalto na região com alta incidência de erosão cavitação (>20 mm profundidade);
- Revestimento com aço inoxidável na região de média ou baixa incidência de erosão cavitação (<20mm profundidade);
- Não recobrir com carbono uma região revestida com aço inoxidável ou liga de cobalto;
- Não recobrir com inox uma região revestida com liga de cobalto;
- Padronizar as áreas de revestimento de inox e de liga de cobalto para todas as pás.

As configurações de reparo das pás de turbina das usinas de Ilha Solteira e Eng.Souza Dias estão representadas nas Figuras 03 e 04 abaixo.



FIGURA-03 – Modelo da usina de Ilha Solteira

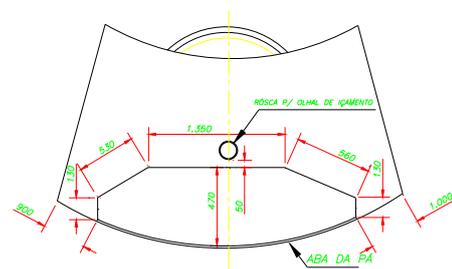


FIGURA-04 – Modelo da usina Eng. Souza Dias

Entre as unidades geradoras não é necessário padronizar a área de reparo, porém é importante padronizar entre as pás da mesma Unidade Geradora para facilitar posteriormente o acompanhamento de reparo.

Durante o reparo são controlados os seguintes parâmetros:

- Temperatura de pré-aquecimento e de soldagem;
- Folgas dos anéis de desgaste superior e inferior com espessímetro;
- Folgas superiores e inferiores das palhetas com espessímetro;
- Recomposição do perfil hidráulico da pá com gabarito;
- Avaliação da superfície acabada e verificação das discontinuidades com ensaio de líquido penetrante, segundo a Norma ASME, Secção V e VIII Divisão1 e o ensaio de ultra-som segundo a Norma ASME, Secção V e VIII Divisão.

O enchimento é feito respeitando as áreas correspondentes de cada material definido na fase de mapeamento, (vide a Figura-04), tomando-se os cuidados para evitar sobreaquecimento, resfriamento rápido, umidade no consumível e aterramento inadequado. Para desbaste do material depositado e recomposição do perfil utiliza-se esmerilhadeira de alta rotação (vide a Figura-06)



FIGURA-05- Fase de soldagem



FIGURA-06- Fase de lixamento

A recomposição do perfil hidráulico é feita utilizando gabaritos com vários perfis.(vide a Figura-07). O acabamento superficial (polimento) final é feito utilizando lixadeira com granulação fina (vide Figura-08).



FIGURA-07- Gabarito de conferência do perfil



FIGURA-08- Fase de acabamento da pá

A aprovação dos serviços de reparos é feita com base nos ensaios de líquido penetrante e ultra-som, segundo os critérios estabelecidos. O defeito reprovado é reparado, respeitando todos os procedimentos estabelecidos nesta instrução até a completa aprovação.

2.3 Metodologia de reparo de trincas em pás

As trincas nas pás de turbinas das Usinas de Ilha Solteira e Três Irmãos ocorrem junto à junção pá cubo no bordo de saída (Figura-09), junto á junção pá saia no bordo de saída (Figura-10) e no bordo de saída pá saia (Figura-11).



FIGURA- 09



FIGURA-10



FIGURA-11

Os reparos são feitos basicamente conforme os procedimentos apresentados a seguir.

O pré-aquecimento para remoção do material da pá é feito ligando as resistências até a temperatura da região junto à trinca atingir cerca de 100°C. A remoção de material é iniciada pelo lado de sucção com eletrodo de grafite de 9 mm, atentando ao carvoeiro no fato de constituir a forma do chanfro com ângulo máximo de 60° fornecendo um gabarito indicativo de 60°, e quanto à importância de remover o mínimo necessário de material. Caso a trinca for passante, a remoção deve atingir a profundidade em torno de 2/3 da espessura da pá (vide a Figura-12).

A limpeza de chanfro é feita com lixadeira deixando as arestas paralelas e contínuas, com raio suave no fundo do chanfro e bem como uma leve concordância nas arestas, posicionando a trinca na parte central do fundo do chanfro e após efetuar o ensaio de líquido penetrante para verificar presença de discontinuidades. Os filetes de solda são depositados alternando as posições e sempre conservando o formato do chanfro, conforme ilustrado na

Figura-13. Esta técnica de deposição atenua o efeito de contração do material da pá e minimiza o aquecimento localizado.

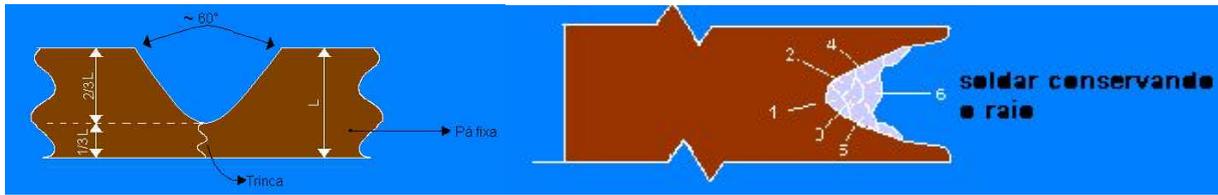


FIGURA-12- Perfil do chanfro

FIGURA-13- Técnica de deposição de material

As resistências de aquecimento são ligadas para manter a temperatura em torno de 100°C e o controle de temperatura de soldagem máxima de 130°C . A deposição inicial do material atinge cerca de 60% da profundidade do chanfro (vide a Figura-14). A remoção do material no lado oposto é feita até atingir a raiz da solda, conforme mostra a Figura-15.

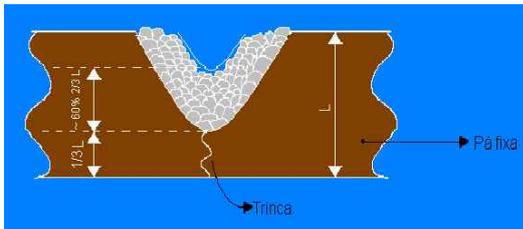


FIGURA-14- Primeira etapa de soldagem

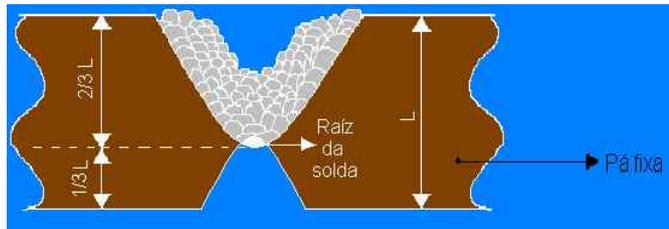


FIGURA-15- Abertura de chanfro no lado oposto

A deposição final do material deve ter 3 mm de sobre camada, conforme mostra a Figura-16. Após o enchimento da sobre camada de acabamento é feito um passe de recristalização para revenir a ZTA a 3 mm do metal base conforme mostrada na Figura-17.

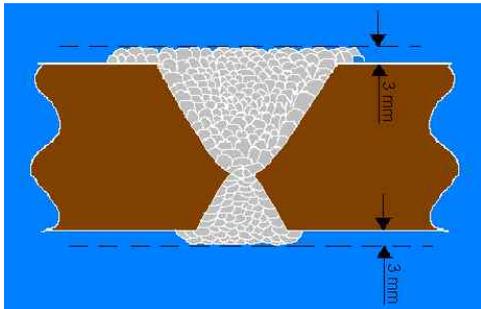


FIGURA-16- Sobrecamada de acabamento

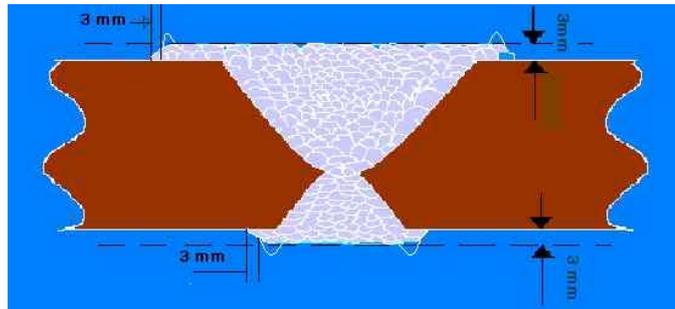


FIGURA-17- Passe de recristalização

Logo após o passe de recristalização é feito o tratamento de pós-aquecimento para atenuar os efeitos de tensão residual na região soldada, bem como, eliminar os poços de hidrogênio proveniente do processo de soldagem, utilizando resistências.

Este tratamento térmico de pós-soldagem é executado conforme o procedimento apresentado a seguir:

- Instalar as resistências tipo esteiras na região da junção da pá com o cubo e na região da junção da pá com a saia, largura em torno de 250 mm e recobrir com manta de lã de rocha (vide Figura- 18);
- Ligar as resistências a um equipamento de controle de temperatura automático (vide a Figura-19);
- Elevar a temperatura até 150°C , mantendo por um período de três (3) horas;
- Diminuir lentamente a temperatura para 75°C , desligando as resistências;
- Ligar as resistências e manter a temperatura de 75°C por um período de duas (2) horas;
- Desligar as resistências e deixar esfriar naturalmente até a temperatura ambiente.



FIGURA-18- Resistências instaladas e cobertas



FIGURA-19- Equipamento de controle de temperatura

O esmerilhamento para acabamento é iniciado quando a temperatura nas pás atingir a temperatura ambiente para recompor o perfil original em ambos os lados. A aprovação é feita com base nos ensaios de líquido penetrante e ensaio com ultra-som. Caso seja constatada descontinuidade que seja necessária ser reparada é feito respeitando todos os procedimentos estabelecidos nesta instrução, até a completa aprovação segundo os critérios e normas estabelecidos.

Para finalizar o reparo é feito tratamento mecânico Shot Peening na região da ZTA (lado de sucção e pressão) nas regiões do bordo de saída pá cubo, bordo de entrada e saída pá cinta. O shot-peening induz no material uma tensão compressiva a partir da deformação plástica superficial do material, resultando no aumento da resistência à fadiga da camada trabalhada e conseqüentemente, retardando o processo de nucleação de trincas por fadiga. Este tratamento é aplicado seguindo os procedimentos e os critérios previstos no manual SAE HS-84. O equipamento de jateamento com acionamento pneumático (vide a Figura-20 trabalha com pressão máxima de 8,0 Kgf/cm² e, esferas de aço com diâmetro para obter ganho na eficiência (maior tensão de compressão e maior profundidade). A qualidade do tratamento é aferida através de amostragens executadas em lâminas (Almen) determinando a sua curvatura após jateada através de equipamento específico. Este controle é repetido constantemente durante a execução dos serviços visando determinar o tempo de jateamento e a necessidade de reposição da granalha, uma vez que esta perde na eficiência pela quebra de suas partículas (vide a Figura-21



FIGURA- 20- Equipamento de jateamento



FIGURA- 21- Superfície da pá após tratamento

No final do processo é medido a tensão residual por difração de raio-X, determinando em cada ponto as tensões nas direções longitudinal e transversal. Na Tabela-01 mostra as medidas de tensões em MPa, cujo sinal (-) indica tensão compressiva e o sinal (+) indica tensão trativa.

TABELA-01

PONTO	LOCAL	DIREÇÃO	TENSÃO EM Mpa	
			ANTES	DEPOIS
1	Pá2 cubo/sucção	Longitudinal	+260	-320
2		Transversal	+50	-370
3	Pá12 cubo/sucção	Longitudinal	+110	-470
4		Transversal	+260	-520
5	Pá 2 cinta	Longitudinal	-70	-310
6		Transversal	-70	-380

Estes resultados mostram que as tensões resultantes após o tratamento de shot-peening, são predominantemente de ação compressiva, garantindo uma condição de equilíbrio das tensões residuais, tornando estas regiões mais resistentes ao processo de nucleação de trincas por fadiga.

3 SOLUÇÕES ADICIONAIS TOMADAS PARA MINIMIZAR O EFEITO DE TENSÕES

3.1 Introdução de enxertos e implantes

Segundo o resultado obtido nos ensaios para medições de tensões nas pás da turbina da UHE Ilha Solteira, a VOITH recomendou uma alteração geométrica nas pás para eliminar contra saídas negativas na região de junção da pá cubo no bordo de saída. Esta alteração foi realizada com a finalidade de diminuir as tensões estáticas médias locais, colaborando para um menor incidência de trincas.

A Figura 22 mostra a configuração do bordo de saída original e com enxerto de aço inoxidável AISI-304. O acabamento é feito arredondando com raio de 10 mm, tanto junto ao bordo no lado de pressão como no lado de sucção da pá a uma distancia aproximada de 200 mm em relação ao cubo.

A análise metalográfica das pás da turbina da Usina Três Irmãos apontou que a condição metalúrgica encontrada nas áreas de entrada d'água pá cinta e na saída pá cubo pode ter contribuído para redução da vida útil por fadiga, devido a presença de defeitos na soldagem no revestimento original e a realização de reparos sem o cuidado necessário para minimizar os efeitos de tensão residual. Para eliminar estas regiões foi proposto retirar o material das regiões afetadas e inserir enxertos de material de aço inoxidável X3 CrNi13/4, um material com melhores propriedades mecânicas, conforme ressaltada em cor azul por na Figura-23.

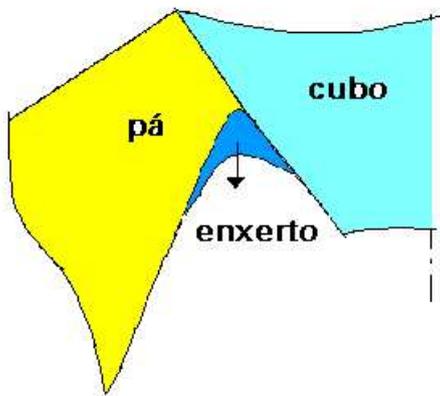


FIGURA-22- Enxerto utilizada na usina Ilha Solteira

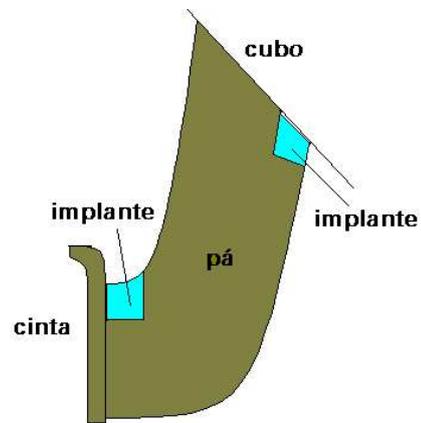


FIGURA-23- Implante da usina de Três Irmãos

O implante é chanfrado com ângulo de 30° e o enchimento executado com processo FCAW utilizando o consumível AWS - E 309LT1. Após o enchimento com sobrecamada de acabamento é dado um passe de recristalização para reaver a ZTA a 3 mm do metal base e, em seguida realizado um pós-aquecimento por 3 horas a 150°C .

Depois de terminado o acabamento é feito o tratamento mecânico para aliviar as tensões residuais por processo de shot peening e acompanhado de medição por difração de raio x.

3.2 Mudança da faixa operativa

A faixa operativa estabelecida pelo fabricante nas unidades geradoras 01 a 04 era de 110 a 160 MW e, posteriormente com base nos resultados de análise de vibração passaram a operar na faixa entre 120 a 160 MW. Em 1996, estas unidades geradoras passaram a operar na faixa entre 120 a 178 MW tomando-se como base nos resultados de ensaios térmicos e dinâmicos do conjunto turbina gerador.

A faixa operativa das unidades geradoras 05 a 20 estabelecidos pelos fabricantes era de 90 a 160 MW. Na década de 80, diante dos problemas ocasionados por paradas excessivas das unidades geradoras para controle de tensão do sistema, passou a operar estas unidades geradoras de 0 a 25 e 90 a 160 MW (1980 a 1985) e posteriormente com base em análises dinâmicos e em modelos matemáticos foi alterado para operar de 60 a 160 MW (1985 a 1996). Em 1996, estas unidades geradoras passaram a operar na faixa entre 60 a 170/174 MW tomando-se como base nos resultados de ensaios térmicos e dinâmicos do conjunto turbina gerador. Em 2002 as unidades geradoras 05 a 20 passaram a operar com 90 a 170/174 MW, considerando os resultados obtidos nos ensaios das forças atuantes nas pás e na reavaliação dos cálculos feita pela VOITH, tais como:

- Os métodos numéricos produzem valores muito próximos, senão exatamente os medidos experimentalmente;
- Os valores estáticos são admissíveis estando dentro das boas práticas de projeto;
- Não há chance de amplificação de vibração em virtude de ressonâncias;
- O rotor é estável de 90 a 175 MW como previsto;
- A maior instabilidade ocorre abaixo de 60 MW para queda testada;

- As flutuações registradas demonstram que as hipóteses adotadas no cálculo de fadiga são corretas;
- Operações fora da faixa garantida devem ser evitadas, pois certamente contribuirão para ocorrência de trincas e com isto encarecer os custos de manutenção da UG.

As unidades geradoras da usina de Três Irmãos, a faixa operativa estabelecida de projeto previa a operação de 82,7 a 160 MW, embora a CESP sempre operou com potência acima de 120 MW, uma vez que não haviam sido instalados os compressores de cargas parciais.

A CESP desde a primeira ocorrência de trincas manifestou a preocupação com o cálculo estrutural do rotor da turbina, embora os memoriais de cálculo apresentados pela ALSTOM, tanto durante a aprovação do projeto quanto do recálculo feito por ocasião dos estudos para determinar as causas das trincas não indicassem valores acima do especificado. A posição da CESP era que existiam fenômenos que podiam não estar previstos no modelo de cálculo do rotor e havia necessidade de efetuar as medições das forças atuantes em uma unidade geradora. Com o surgimento de trincas nas unidades geradoras 01, 02 e 03, a ALSTOM mostrou que estes ensaios eram cruciais para determinação das causas das trincas.

Os resultados destes ensaios mostraram que:

- Há presença de vórtices entre as pás que nascem na aresta de entrada das pás, evoluem no meio do canal hidráulico e perto da saída, os vórtices saem do caminho central para se dirigir no lado de sucção e chocar-se com as mesmas.
- Esses vórtices criam esforços que podem induzir o surgimento de trincas por fadiga, sendo portanto, a qualidade do material e o processo de fabricação aspectos muito importante no tempo necessário para iniciar as trincas;
- Estes vórtices ocorrem na faixa entre 82,7 a 130 MW, então é recomendável limitar a operação em potência acima de 130 MW;
- No ensaio para caracterização metalúrgica de região da junção das pás com a cinta, constatou-se presença de defeitos na soldagem no revestimento original e os reparos executados sem o cuidado necessário para minimizar o efeito de tensões residuais;
- Estas condições metalúrgicas podem ter contribuído para redução da vida útil por processo de fadiga, sendo recomendado por isso, a adoção da técnica dos implantes citado no item 3.0

Em 2001, as unidades geradoras da usina de Três Irmãos passaram a operar entre de 130 a 160 MW.

5.0 CONCLUSÕES

Com base nos resultados das primeiras inspeções feitas nas unidades geradoras das usinas de Ilha Solteira, Três Irmãos e Eng. Souza Dias, concluímos que as soluções tomadas para minimizar os efeitos de cavitação e a região de concentração de tensão nas pás de turbinas estão sendo bastante eficientes. Estima-se que a próxima manutenção preventiva das unidades geradoras destas usinas possa ser executada com redução de 30% no tempo de execução que corresponde a um ganho médio de 20 dias. Proporciona ainda, um ganho econômico bastante significativo em consequência de redução dos custos de mão de obra e materiais utilizados nos reparos.

Convém salientar que estas soluções adotadas foram frutos de um longo trabalho desenvolvido com base na experiência da CESP em manutenção e operação de unidades geradoras, com participações decisivas de fabricantes de turbina, fornecedores de consumível, entidades de pesquisa e universidades.

Para finalizar a CESP continua pesquisando outras técnicas ou novas ferramentas para minimizar os efeitos de cavitação e das forças atuantes nas pás de turbinas, tais como, operação das unidades geradoras como compensador síncrono, sistema de injeção de ar mais eficiente e operação das unidades geradoras utilizando ferramenta de controle de eficiência da turbina.

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Instruções Técnicas CESP para reparos de trincas e cavitação em turbinas
- (2) Especificação Técnica CESP para reparos de trincas e cavitação em turbinas
- (3) Relatório Técnico IPT 56.110 - Medições Dinâmicas na UG 08 da UHE Ilha Solteira