

Análise Estrutural de Rotores de Turbinas Hidráulicas para Estudo da Incidência de Trincas e Desempenho à Vida de Fadiga

C. G. Filippin, LACTEC e A.T. de Lira, COPEL

Resumo – Um rotor de turbina hidráulica é projetado para vida infinita à fadiga. Porém, em função de necessidades de manutenção e de reparos, que com frequência são realizados por processos severos, como a soldagem por arco elétrico, pode-se inserir dano a estes componentes, reduzindo a vida à fadiga. O acompanhamento dos níveis de tensões residuais indicam o grau de severidade das intervenções realizadas. Conforme o estado dessas tensões residuais pode ser necessário o emprego de técnicas de alívio de tensões como tratamentos térmicos posteriores ao processo de reparo ou alívio de tensões por vibração. Para o segundo caso deve-se conhecer as frequências naturais do rotor da turbina hidráulica.

Palavras-chave— Alívio de tensões, Cavitação, Soldagem, Tensões residuais, Turbina hidráulica.

I. INTRODUÇÃO

A presente análise estrutural de rotores de turbinas hidráulicas visa o desenvolvimento de um processo de avaliação do aumento da incidência de trincas em rotores hidráulicos, e as possíveis soluções para minimização do problema, em especial da Usina de Foz do Areia, da Companhia Paranaense de Energia – COPEL. As prováveis causas do surgimento de trincas são associadas a aspectos operacionais, aspectos de manutenção e aspectos estruturais.

Entre as proposições para solução do problema serão analisadas alterações nos procedimentos de reparo, condições operativas das unidades geradoras e aplicação de alívio térmico e/ou vibratório de tensões.

II. RECUPERAÇÃO DE ROTOR DE TURBINA

O rotor de uma turbina hidráulica pode estar sujeito a desgaste operacional em função das condições operacionais do hidrogerador, das características de projeto e das propriedades do material empregado na sua construção. A causa mais comum de desgaste de um rotor é a erosão por cavitação.

A. Erosão por Cavitação

O fluxo de água sobre uma pá de um rotor de turbina hidráulica gera campos de pressão ao longo da superfície da pá. Nas regiões da superfície da pá onde a pressão atinge valores inferiores à pressão de vapor da água, na temperatura de operação da turbina, formam-se bolhas de vapor de

água (cavidades). Essas bolhas são conduzidas pelo fluxo até atingirem regiões com pressão superior à pressão de vapor e condensam-se instantaneamente. A partícula de água condensada é projetada abruptamente sobre a superfície da pá. O martelamento gerado pelo impacto das partículas líquidas sobre as pás do rotor geram um processo de carregamento cíclico que se sobrepõe ao carregamento operacional do rotor. Essas regiões sofrem solicitações dinâmicas que causam fadiga ocasionando a perda de material da superfície das pás, que é a erosão por cavitação.

Como as superfícies perdem o seu perfil original e ideal, por apresentarem, então, crateras, o desempenho da turbina pode ficar prejudicado em termos de rendimento (transformação da energia hidráulica em energia mecânica) e de resistência mecânica, além de poder desenvolver um processo de cavitação acelerado.

B. Recuperação do rotor

A atividade de reparo aplicada nesse caso é a reposição do material perdido na erosão por cavitação, recompondo o perfil das pás. Essa reposição de material é feita por soldagem a arco elétrico (outros processos já foram avaliados sem sucesso).

Todo processo de soldagem a arco elétrico insere tensões residuais na região denominada ZTA (Zona Termicamente Afetada). O nível de tensão residual é função do tipo de material de base, do processo de soldagem a arco elétrico empregado, da velocidade de resfriamento e da geometria e condições de apoio da estrutura. As tensões residuais reinantes em cada porção de material se somam às tensões de trabalho (tensões operacionais), podendo levar esta região da estrutura à falha mesmo com as cargas operacionais dentro do limite de projeto.

C. Trincas nas Pás do Rotor

Em função destas características, alguns rotores podem estar operando em situações de maior severidade em termos do campo de tensões mecânicas reinantes em alguns pontos de sua estrutura. Logo, certos pontos podem estar sob tensões devido ao carregamento de projeto (função da potência gerada) e esforços adicionais devido à cavitação, tudo somado às tensões residuais de reparos anteriores realizados por soldagem. As regiões mais críticas no rotor são as transições entre pás e cubo e entre pás e coroa, onde ocorre uma

heterogeneidade geométrica mais intensa, ocasionando concentração de tensões (as tensões mecânicas reinantes são majoradas devido à variação de geometria). Esses pontos são contemplados nos cálculos estruturais durante a fase de projeto, mas são, ainda, os pontos de maior nível de tensão.

O caso em estudo refere-se aos rotores da Usina Governador Bento Munhoz da Rocha Netto (US/GBM), conhecida como Usina de Foz do Areia. Esta usina está equipada com 4 hidrogeradores com potência de 418 MW cada, com diâmetro de 6050 mm e massa de aproximadamente 150 t. Os rotores são fundidos em peça única em aço carbono. As pás são revestidas com aço inoxidável 309 nas regiões onde ocorre erosão por cavitação. Neste caso em particular há mais um fator que contribui para a severidade de esforços aplicados às pás. Como os rotores são fundidos em peça única o controle das taxas de resfriamento em cada porção da estrutura durante a fabricação fica dificultada, podendo ocasionar falhas de fundição (vazios) que normalmente se localizam em regiões com transição mais acentuada de geometria, como as ligações das pás com o cubo e com a coroa. Nesses rotores, após radiografia destas regiões, percebeu-se a existência de alguns defeitos (vazios) que intensificam a concentração de tensões, por se tratarem, também, de variações de geometria. Ainda, em função do projeto dos rotores a faixa operativa ideal é bastante estreita, de modo que as turbinas eventualmente operam fora das condições ótimas, ocasionando maior incidência de cavitação.

Em função deste histórico, foram tomadas medidas para minimizar as falhas por trincas nas pás dos rotores das turbinas. Entre essas medidas, pode-se citar: a otimização da faixa de operação, o emprego de materiais mais resistentes à cavitação nas recuperações dos rotores e o emprego de processos de soldagem a arco elétrico com menor aporte de calor.

D. Tensões Residuais

As tensões residuais oriundas do processo de reparo do rotor, e que se somam às tensões de trabalho, podem ser avaliadas para que se tenha um maior controle da recuperação por soldagem. A medição das tensões residuais é feita por extensometria de resistência elétrica através do método do furo cego. Esse método é normalizado segundo ASTM E837-95. O método consiste na instalação, em cada ponto onde se queira determinar o nível de tensões residuais, de um extensômetro de três elementos (roseta), com adesivo apropriado. Após a cura do adesivo é executado no centro do extensômetro um furo cego com diâmetro de 1,6 mm e profundidade de 2,0 mm. Com a execução do furo os esforços reinantes na vizinhança do furo são aliviados e o extensômetro mede as tensões correspondentes, que eram as tensões residuais naquele ponto. A Figura 2 apresenta pontos típicos onde foram medidos os níveis de tensões residuais nas pás dos rotores. A Figura 1 mostra uma roseta para medição de tensões residuais. A partir de uma roseta, composta por três elementos, pode-se obter as tensões principais e as suas respectivas direções, caracterizando o campo de tensões residuais reinantes em um determinado ponto.

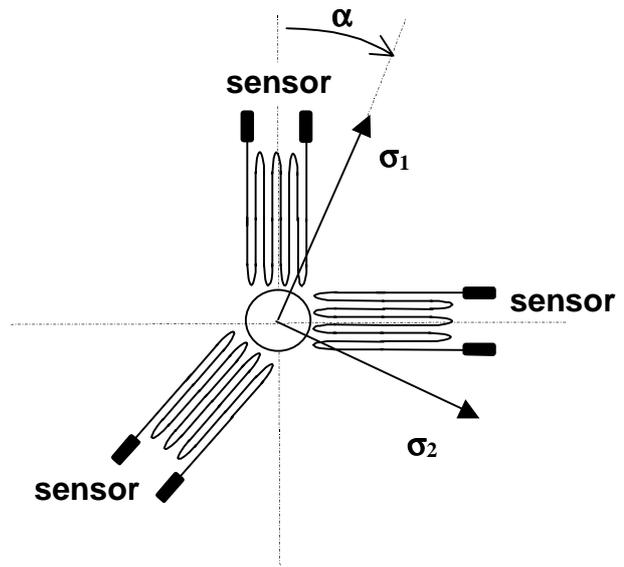


Figura 1: Roseta para medição de tensões residuais.

E. Alívio de Tensões

As tensões residuais presentes em determinada região do rotor devem ser aliviadas para que tenham sua amplitude reduzida, vindo a majorar menos as tensões operacionais. Os processos de alívio de tensões aplicáveis para um rotor de turbina são o alívio por processo térmico localizado e o alívio por processo mecânico por vibração. Ambos os processos foram avaliados em campo, sendo o método por tratamento térmico localizado mais eficiente até o momento.

O método de alívio de tensões por tratamento térmico localizado prevê o aquecimento da região a ser aliviada até uma temperatura definida em função das composições do material de base do rotor e do material de adição empregado na soldagem de reparo, por um período de tempo suficiente para que ocorra uma acomodação desta região sob uma nova condição de equilíbrio isento de tensões, ou pelo menos com menor intensidade de tensões residuais.

O método de alívio de tensões por vibração prevê a excitação da região a ser aliviada de maneira que esta região vibre de forma controlada com frequência próxima a um harmônico da frequência natural. Esse processo força a dissipação de energia na forma de energia de deformação, provocando uma acomodação da região sob uma nova condição de equilíbrio. O método pode ser menos eficiente quando as estruturas são muito complexas, de modo que os harmônicos da frequência natural fiquem muito próximos.

III. ANÁLISE DE CASO

Apresentam-se os resultados das medições de Tensões Residuais na pá 1 do rotor#4 da US/GBM, efetuadas nas datas de 18 e 19/06/2001 e 21 e 22/06/2001. As medições foram realizadas utilizando-se o método do furo cego conforme descrito na norma ASTM E837-95. Esta técnica é

recomendada para tensões dentro da região elástica do material em medição. Para valores que excedam esta região, estes são usualmente utilizados como uma referência para indicar que as tensões residuais são bastante elevadas.

Nesta ocasião havia a ocorrência de uma trinca na referida pá do rotor. Foram realizadas medições de tensões residuais antes da preparação da trinca para reparo, que é executada com goivagem com eletrodo de grafite e posterior esmerilhagem. Esta situação é referenciada pela letra “A” na Tabela I. Também foram realizadas medições após o reparo e alívio de tensões da pá. O reparo consistiu da soldagem da trinca com aço carbono e revestimento da região reparada com aço inoxidável 309, com pré aquecimento da região até a temperatura de 180°C. O revestimento se fez necessário porque a região reparada está sujeita à incidência de erosão por cavitação.

Em seguida ao término da soldagem procedeu-se o alívio das tensões por tratamento térmico localizado com o aquecimento da pá até 350°C com o auxílio de resistências elétricas. A temperatura definida foi obtida com a circulação de uma corrente de 100A. Assim que a temperatura estabilizou-se a corrente foi reduzida para 85A para a manutenção da temperatura. Após 3 horas de aquecimento a peça foi resfriada com o desligamento gradual da corrente nas resistências a um passo de 35A por hora até o desligamento completo. O resfriamento natural ocorreu por um período de 6 horas até cerca de 45°C, caracterizando um resfriamento lento. A região manteve-se isolada por material isolante térmico durante todo o processo.

As medições de tensões residuais foram executadas utilizando-se extensômetros de resistência modelo EA-06-062RE-120 da Micro Measurements - USA.

Apresenta-se na Figura 2 a localização dos pontos de medição das tensões residuais no rotor#4 da USGBM. As medições foram realizadas nos mesmos pontos tanto antes quanto depois do reparo da trinca.

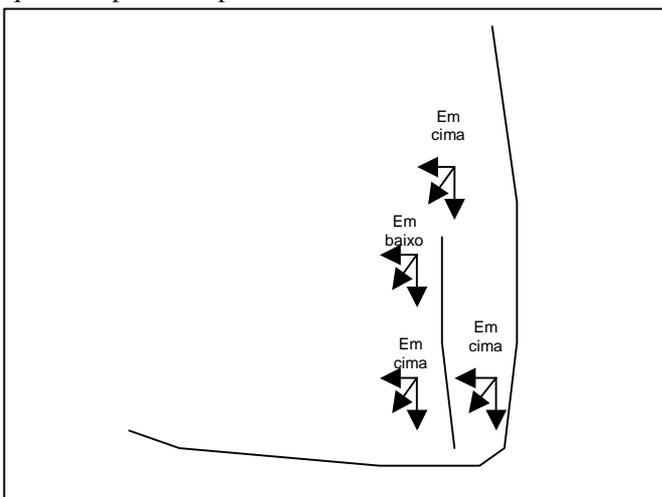


Figura 2: Pontos de medição de tensões residuais.

Na Tabela I são apresentados os níveis de tensões residuais antes do reparo da trinca (indicado com a letra A) e após o reparo, incluindo o alívio de tensões por processo térmico. Os valores das tensões residuais ao longo da profundidade do furo ceço estão nas Figuras 3 a 6.

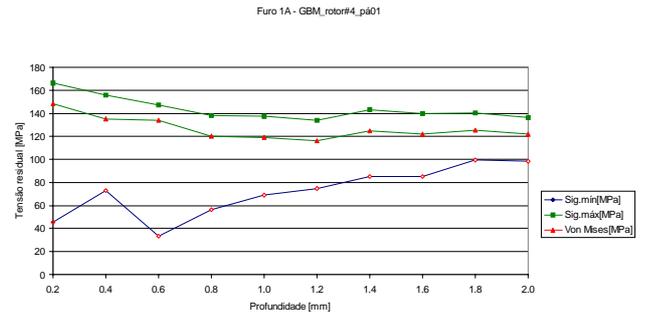


Figura 3: Furo 1A – Engaste ao lado da trinca (em cima da pá)

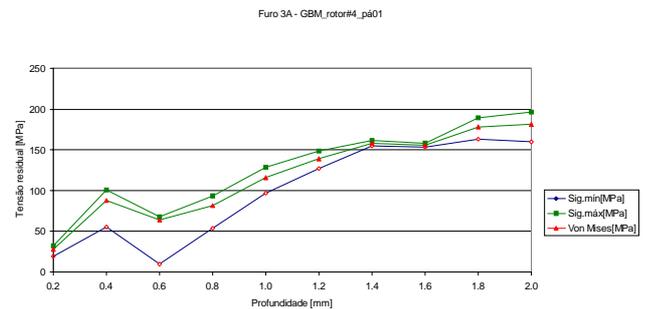


Figura 4: Furo 3A – Fim da trinca (em cima da pá)

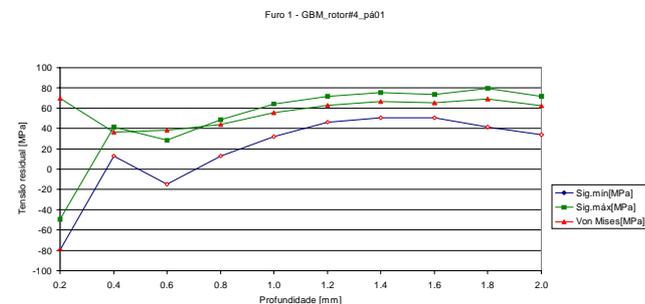


Figura 5: Furo 1 – Fim da trinca (em cima da pá) – após soldagem e tratamento térmico.

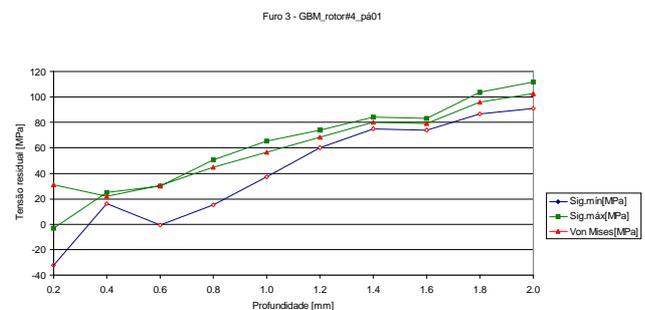


Figura 6: Furo 3 – Fim da trinca (em cima da pá) após reparo.

TABELA I: NÍVEIS DE TENSÕES RESIDUAIS

1. TENSÕES RESIDUAIS ROTOR#4 – USGBM						
Ponto	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	α [deg]	Tensão Von Mises [MPa]	Data	Localização (&Obs.)
pa#1p#1A	98	136	2	122	18-19/06	Engaste (eixo principal alinhado com trinca)
pa#1p#2A	95	214	18	186	18-19/06	Futura ZTA, em cima
pa#1p#3A	160	197	35	181	18-19/06	Fim da trinca
pa#1p#4A	130	199	42	175	18-19/06	Futura ZTA, em baixo
pa#1p#1	34	72	-5	62	21-22/06	Engaste (eixo principal alinhado com trinca)
pa#1p#2	-2	121	-13	122	21-22/06	ZTA, em cima
pa#1p#3	91	112	-3	103	21-22/06	Fim da trinca, já preenchida
pa#1p#4	112	131	-25	123	21-22/06	ZTA, em baixo

IV. CONCLUSÕES

Observou-se que os níveis de tensões residuais presentes na pá antes da soldagem eram relativamente baixos, o que já era esperado uma vez que já houve o alívio das tensões com a formação da trinca.

No entanto, após a soldagem e tratamento térmico os níveis de tensões diminuíram consideravelmente, inclusive relativo às tensões antes da soldagem. Esta redução no nível de tensões foi ocasionado provavelmente pela temperatura

mais elevada a que foi sujeita a pá.

Resumidamente, o tratamento apresentou resultados extremamente satisfatórios do ponto de vista do alívio de tensões na região da trinca da pá#1, não sendo provável a ocorrência de novas trincas naquela região. As tensões de Von Mises nas regiões de interesse, antes e após o reparo, podem ser vistas na Figura 7.

Tensão de Von Mises antes e após o tratamento térmico

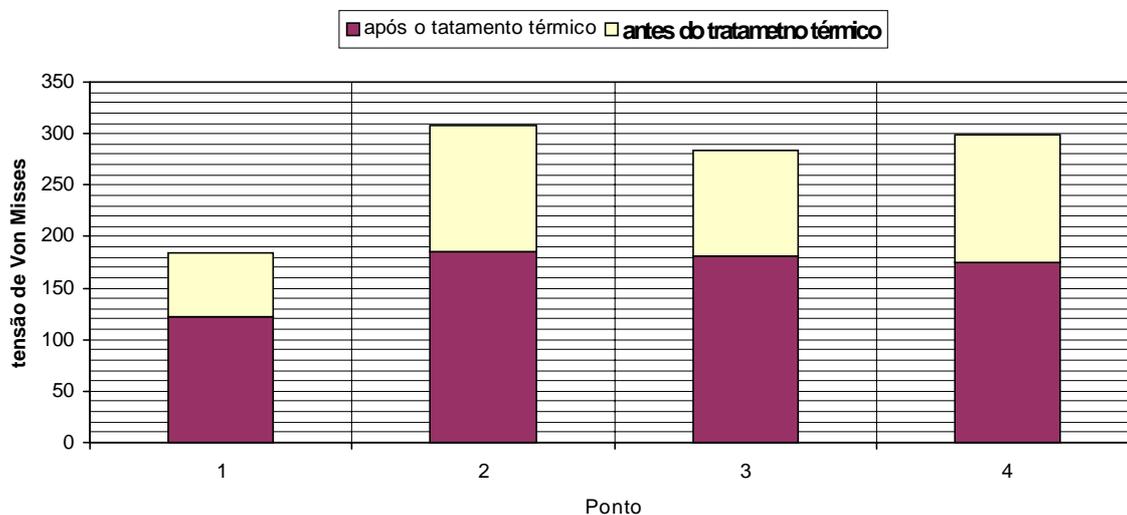


Figura 7: Tensões de Von Mises (MPa).

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Castro, J.T.P.; Freire, J.L.F. & Vieira, R.D., "Fatigue Life Prediction of Repaired Welded Structures", *J. Constructional Steel Research*, Vol.28, Pp.187-195.
- [2] Análise Experimental De Tensões Pelo Método Do Furo Central Em Componente De Elemento Combustível Cgen - 08/94 Pg 473-477;
- [3] Bott, I.S., Insfran, A.C., Ouro, C.R. E Teixeira, J.C., "The Effect of Multiple Post-Weld Heat Treatment (Pwht) on a Quenched and Tempered Hsla Steel.", *Welding in the World*, 31(6), 424-425, Dec. 1993.
- [4] Branco, C.M., Fernandes A.A., Castro P.M.S.T., *Fadiga de Estruturas Soldadas*, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1986, p 571-591.
- [5] Ferraresi, V.A., Gonçalves, R.A. & Scotti, A., "Avaliação da Suscetibilidade a Trincas de Alívio de Tensão em Aços Estruturais de Baixo Cr E Mo", *XIX Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem*, ABS, Águas de São Pedro, Sp, Out 1993, p 87-96.
- [6] Pereira, M.V.S., Wohlfahrt, H., Schaper, M., "Influence of Residual Stresses on The Fracture Behaviour of Steels in the Transition Range", *Congresso Europeu de Fratura*, Berlim, 1994, vol 1, p 755-760.

- [7] Weiss, S., Baker G.S., Gupta R.D., "Vibrational Residual Stress Relief in a Plain Carbon Steel Weldment", *Welding Research Supplement*, p 47-50, Feb. 1976.