

ESTUDO DA RECUPERAÇÃO DE PÁS DE TURBINA DA USINA LUIZ CARLOS BARRETO DE CARVALHO

[\[ver artigo online\]](#)

Alúcio Volpi de Sousa¹
Antônio Eduardo de Brito Junior²
Professor Alex de Oliveira Dutra³

RESUMO

O presente estudo teve por objetivo analisar o processo de recuperação de pás de turbina, desde a adequação das normas até a fase de execução, para seu pleno funcionamento. Afim de enriquecer o estudo foi atrelado a esse uma parte prática disposta vide aplicação de uma avaliação técnica, disposta em observância visual e documental, acerca dos procedimentos de manutenção, materiais e execução necessários a dispor recuperação de pás de turbinas da unidade geradora da Usina Luiz Carlos Barretos de Carvalho, a qual está alocada na cidade de Pedregulho - SP. Para a realização do estudo pretendido foi selecionada a metodologia de revisão bibliográfica, imersa em contextos qualitativos e quantitativos, de base técnica descritiva-exploratória, a qual foi atrelada a uma parte prática empregada entre 06 de janeiro 2015 a 31 de outubro 2017. Como resultado foi constatado que o procedimento padrão de recuperação de pás de turbina adotado pela empresa responsável pela unidade geradora, objeto do presente estudo, em demais usinas também por essa geridas pode ser utilizado, positivamente, como modelo a recuperar todos os "tipos" de turbinas existentes e/ou em operação na mesma desde que seja o mesmo seguido à risca. Assim, concluiu-se que conhecer e pôr em prática, em minúcias, os procedimentos de recuperação das pás de turbinas nas usinas geradoras, desde a adequação das normas até a fase de execução dessas, é vital a dispor sucesso funcional a essas, mesmo que isso não seja simples de ser na prática realizado.

Palavras-chave: Manutenção e recuperação. Pás de turbina. Usinas hidroelétricas. Usina Luiz Carlos Barretos de Carvalho.

¹ Bacharel no curso de Engenharia Mecânica pela Universidade de Franca.

E-mail: aluisiosousavolpi@gmail.com

² Bacharel no curso de Engenharia Mecânica pela Universidade de Franca.

E-mail: junin_edubrito@yahoo.com.br

³ Professor orientador no curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Franca.

E-mail: alexdutra86@gmail.com



STUDY OF THE RECOVERY OF TURBINE BLADES AT THE LUIZ CARLOS BARRETOS DE CARVALHO PLANT

ABSTRACT

This study aimed to analyze the turbine blades recovery process, from the adequacy of the standards to the execution phase, for its full operation. In order to enrich the study, a practical part was attached to it, see the application of a technical evaluation, arranged in visual and documental observance, about the maintenance procedures, materials and execution necessary to dispose of the recovery of turbine blades of the Generating Unit of the Luiz Power Plant Carlos Barreto de Carvalho, which is located in the city of Pedregulho - SP. To carry out the intended study, the literature review methodology was selected, immersed in qualitative and quantitative contexts, with a descriptive-exploratory technical basis, which was linked to a practical part used between January 6, 2015 to October 31, 2016. As result it was found that the standard procedure for the recovery of turbine blades adopted by the company responsible for the generating unit, object of this study, in other plants also managed by it can be used, positively, as a model to recover all "types" of existing turbines and/or operating in the same as long as it is strictly followed. Thus, it was concluded that knowing and putting into practice, in detail, the procedures for the recovery of turbine blades in generating plants, from the adequacy of standards to their execution phase, is vital to provide them with functional success, even if this is not simple to be carried out in practice.

Keywords: Maintenance and recovery. Turbine Blades. hydroelectric plants. Luiz Carlos Barretos de Carvalho Plant.

INTRODUÇÃO

De um modo amplo, pode ser dito que no Brasil, a produção de energia elétrica é muito dependente de usinas hidrelétricas. Até que entre em operações, as construções de novos empreendimentos nas usinas estão exigindo um nível alto de operações. Este fato contribui para que as turbinas operem com níveis de cavitação (QUEIROZ, 2012).

Devido à aceleração e ao fato de que a energia mecânica presente no fluido tende a se conservar, há uma redução na pressão da água quando ocorre o escoamento (SANTOS, 2013).

Vale destacar que, segundo Santos (2013), em alguns locais do equipamento, devido a essa aceleração imposta, a pressão pode cair a um valor inferior à pressão de vaporização do fluido e, logo depois, aumentar, ocasionando a cavitação.

Ou seja, em turbinas, a cavitação é causada pela queda de pressão, gerando bolhas de gás que se rompem e formam ondas de choque e micro jatos com muita energia, os quais provocam danos à superfície das turbinas por essas atingidas o que acaba por elevar, significativamente, a necessidade de existir junto a referidas turbinas um plano de manutenção minucioso a dispor, dentre outros atos, recuperação adequada a essas (ADVEL, 2014).

Diante do supra descrito surgiu a seguinte questão norteadora: O plano de manutenção de recuperação das turbinas da usina Luiz Carlos Barretos de Carvalho, que sabidamente é padronizado por sua gestora a demais usinas, segue adequado a manter as mesmas em pleno funcionamento?

Assim, o presente estudo teve por objetivo analisar o processo de recuperação de pás de turbina, desde a adequação das normas até a fase de execução, para seu pleno funcionamento. Afim de enriquecer o mesmo foi atrelado a esse uma parte prática disposta vide aplicação de uma avaliação técnica, disposta em observância visual e documental, acerca dos procedimentos de manutenção, materiais e execução necessários a dispor recuperação de pás de turbinas da unidade geradora da Usina Luiz Carlos Barretos de Carvalho, a qual está alocada na cidade de Serra azul - SP; o que tornou o mesmo pertinente uma vez que trará esse, direta ou indiretamente, benefícios variados a segmentação produtiva, científica e social, visto a fo-

mentação científica que esse ofertou/ofertará sobre o tema, adjunto a estudantes, pesquisadores, profissionais da área e interessados em tal contexto.

CONTEXTO HISTÓRICO DAS USINAS HIDRELÉTRICAS

Segundo Santos (2015, p. 24):

O uso da força das águas para gerar energia é bastante antigo (desde o século 1 a.C.) e começou com a utilização das chamadas “noras”, ou rodas d’água do tipo horizontal, que por meio da ação direta de uma queda d’água, produz energia mecânica’. A partir do século XVIII, com o surgimento de tecnologias como o motor, o dínamo, a lâmpada e a turbina hidráulica, foram possíveis converter energia mecânica em eletricidade.

A usina “Niágara Falls”, idealizada por Nikola Tesla juntamente com o apoio de Westinghouse, alocado nos Estados Unidos da América (EUA), foi considerada a primeira hidrelétrica a entrar em funcionamento por volta de 1897. Desde o início funcionamento até os dias atuais, o que tem mudado são somente as tecnologias em busca de uma melhor eficiência.

Uma usina hidrelétrica é definida como conjunto de obras e equipamentos responsáveis pela geração e transformação de energia segundo o seu potencial hidráulico. Vale lembrar que o potencial hidráulico é devido à vazão e os desníveis do rio, isso pode se dar por três formas: a) Natural, por uma cachoeira; b) Barragem, quando pequenos desníveis são concentrados na altura da barragem, e c) Desvio do rio de seu leito natural. Uma usina hidrelétrica é composta por quatro partes, quais sejam: a) barragem; b) Captação e adução de água; c) Casa de Força e d) Restituição de água no leito natural do rio.

Entretanto, o reservatório é o local onde é considerada a energia potencial da água. Quando está em movimento no conduto forçado, ela passa a ter energia cinética, sendo transformada em energia mecânica quando gira uma turbina, por serem acoplados o eixo da turbina ao eixo do gerador e seus polos.

Nesse contexto é pertinente destacar que, no que tangem as turbinas hidráulicas, Çengel (2015, p.833) “As turbinas têm sido usadas há séculos para converter a energia mecânica livre disponível de rios e do vento em trabalho mecânico útil, em geral, por meio de eixo rotativo”.

Dario (2016) dita que o custo de uma hidrelétrica é elevado, porém, traz essas inúmeras vantagens, tais como: 1. Alta eficiência; 2. Flexibilidade de operação; 3. Fácil manutenção; 4. Baixo desgaste; 5. Suprimento de energia potencialmente inesgotável, e 6. Nenhuma poluição.

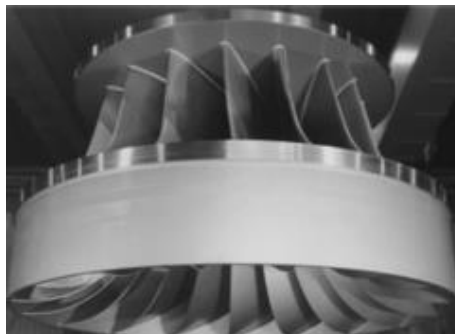
Segundo White (2011, p.796) “Basicamente há dois tipos de turbinas, de reação e ação, e a diferença está na maneira como a altura de queda é convertida”. O tipo predominante de máquina de impulso é a roda Pelton, que é apropriada para alturas de 150 a 2000 m. As turbinas de reação são de dois tipos principais: escoamento radial ou misto, de escoamento axial.

Dos tipos de escoamentos radiais, predomina a turbina Francis. As turbinas Dériaz são similares às turbinas Francis Rápidas, mas com um mecanismo que permite variar a inclinação das pás do rotor. Os tipos principais de máquinas axiais são turbinas de hélice (Propeller) cujas pás do rotor são fixas e as turbinas Kaplan com as pás do rotor ajustáveis. Outros tipos de máquinas axiais são as turbinas tubulares, bulbo e straflo.

Ainda com foco em turbinas, porém agora as de ação e reação, é interessante relatar que segundo White (2011, p.796) as mesmas são máquinas de baixa altura de queda e alta vazão; tendo essas sido extensivamente melhoradas aos longos dos anos; destacando-se entre essas o aperfeiçoamento (em termos de eficiência) disposto a essas por James Bicheno Francis, o que direcionou, na atualidade, a existirem, basicamente, dois “tipos” principais de turbina de reação: 1) a Francis, e 2) a Kaplan.

A Figura 1 apresenta o modelo de uma turbina Francis com escoamento misto, utilizada na hidrelétrica de Smith Mountain em Roanoke, VA. Contendo 17 pás fixas, diâmetro de 6,19 m.

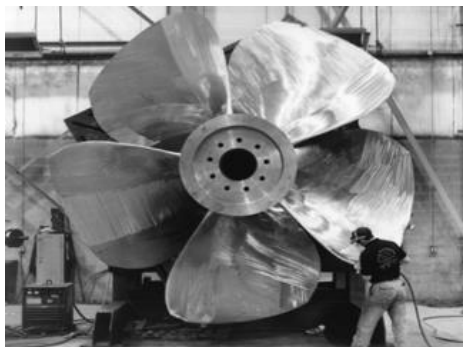
Figura 1 – Turbina Francis



Fonte: Çengel (2012, p. 693).

A Figura 2 é o indica o aspecto de uma turbina Kaplan usada na Hidrelétrica de Warwick em Cordele, GA. Contendo 5 pás fixa, diâmetro de 3,87 m.

Figura 2 - Turbina Kaplan



Fonte: Çengel (2012, p. 694).

O fato é que em usinas hidroelétricas, independentemente do “tipo” de turbina adotado, existirá, em maior ou menor grau, o fenômeno físico denominado de cavitação. É interessante destacar que a palavra cavitação advém do latim “*Cavus*” tendo essa o significado de cavidade no processo de nucleação, o qual, comumente, ocorre em sistemas hidrodinâmicos, tais como: Turbinas; Válvulas; Bomba radiais; Bomba centrífuga; Propulsores navais; Pistões de automóveis, e Canais de concreto com altas velocidades como vertedouros e barragens.

A cavitação pode ocorrer em qualquer máquina trabalhando com líquido, sempre que a pressão estática local cair abaixo da pressão de vapor do líquido. Quando isso ocorrer, o líquido pode localmente passar de líquido a vapor instantaneamente, formando uma cavidade de vapor e alterando significativamente a configuração do escoamento em relação a condição sem cavitação. A cavidade de vapor muda a forma efetiva da passagem do escoamento, alterando assim o campo de pressão local. Como o tamanho e a forma da cavidade (bolha) de vapor são influenciados pelo campo de pressão local, o escoamento pode se tornar transiente. O regime transiente pode causar oscilação em todo o escoamento e vibração na máquina (FOX, 2012, p. 485).

O fenômeno acontece, pois, ao ser acelerado a pressão do líquido se reduz para igual ou menor a pressão do vapor ($P < P_v$), passando então de líquido para vapor instantaneamente, criando assim bolhas que contêm gases que não foram dissolvidos na água ou no vapor.

As bolhas são arrastadas para regiões onde a pressão é elevada, as bolhas então vão aumentando de tamanho até que a pressão do fluido seja maior que a pressão do vapor. O vapor contido na bolha condensa bruscamente, o espaço vazio é preenchido pela água circundante, fenômeno denominado de implosão de bolhas. O choque gera picos de alta pressão, de até 1000 MPa. Sendo assim, se essa tensão exceder a dos materiais metálicos, ocorre a erosão por cavitação. Assim sendo, as causas que levam à cavitação são as seguintes: a) A aceleração do fluido; b) Altura estática do fluido, e c) Comprimento da tubulação de sucção. Em contrapartida, os problemas ocasionados pela cavitação são: a) Barulho e vibração provocada pelo colapso das bolhas; b) A perda de eficiência, e c) Danificação do material, comumente com a formação de trincas e/ou corrosão, na região de colapso das bombas.

No que refere a danificação do material vide a formação de trinca dita que:

Estado em que um determinado objeto ou parte dele se apresenta partido, separado em partes. Exemplo: a parede está trincada, isto é, está separada em duas partes. Em muitas situações, a trinca é tão fina que é necessário o emprego de aparelho ou instrumento para visualizá-la. As trincas, por representar a ruptura dos elementos, podem diminuir a segurança de componentes estruturais de um edifício, de modo que mesmo que seja muito pequena e quase imperceptível deve ter a causa ou as causas minuciosamente (SANTOS 2013, p. 231),

Ao que tange a danificação do material vide a corrosão Okamura (1982, p. 229) indica que:

Alguns tipos de fraturas em estruturas soldadas de aço ocorrem devido à redução de área seccional, ocasionada pela corrosão ou abrasão da solda, sendo a corrosão sob tensão...[...]... uma das causas mais frequentes. Existe duas categorias principais de corrosão: a generalizada e a localizada, (...). A corrosão se caracteriza por um fenômeno eletroquímico, em que um metal tende a se ionizar na presença de um eletrólito ou pela ação galvânica de diferentes metais em contato (OKAMURA, 1982, p.229)

Não se pode abster ao fato é que a danificação do material de turbinas de usinas hidroelétricas vide a formação de trincas ou corrosão, comumente, é revertido/sanado com atos imersos a soldagem. Nesse contexto é pertinente destacar que:

Um grande número de diferentes processos utilizados na fabricação e recuperação de peças, equipamentos e estruturas é abrangido pela soldagem. Classicamente, a soldagem é considerada como um processo de união, porém, na atualidade, muitos processos de soldagem ou variações destes são usados para deposição de material sobre uma superfície, visando à recuperação de peças desgastadas ou para a formação de um revestimento com características especiais. Diferentes processos relacionados com a soldagem são usados para corte de peças metálicas e em muitos aspectos estas operações se assemelham a operações de soldagem (MARQUES, 2009, p.18)

Em tal temática Okumura lembra que:

Para se garantir a qualidade de uma construção soldada, o controle das operações de soldagem deve ser exercido em diferentes níveis e estágios durante o desenvolvimento dos trabalhos. Este controle engloba [...] equipamento, ferramental, materiais de consumo, e mão de obra, o próprio procedimento de soldagem e a junta soldada em si (OKUMURA, 1982, p.294)

Okumura (1982, p.313) fundamenta que “os graus de capacitação dos soldadores são determinados em função da posição de soldagem, espessura, material etc., e os ensaios a serem efetuados são especificados para cada grau de qualificação”.

METODOLOGIA

Para a realização do presente estudo foi utilizada a metodologia de revisão bibliográfica, qualitativa e quantitativa, de cunho descritivo-exploratório sobre o tema “Estudo da recuperação de pás de turbina da usina Luiz Carlos Barretos de Carvalho”; o que incluiu análise crítica, interpretação literária e compreensão de textos.

Todo o material selecionado a ser utilizado no estudo passou por uma previa seleção de conteúdos o que permitiu que nesses existisse uma separação detalhada do que seguiria válido ou não ao mesmo. Tal separação viabilizou que os conteúdos selecionados se tornassem base segura para a produção do estudo em si.

Os conteúdos selecionados foram adquiridos, no período compreendido entre 06 de janeiro 2015 a 31 de outubro 2016, através de levantamento de livros, conteúdos de cunho científico e periódicos, com base nas seguintes palavras-chave: Manutenção e recuperação. Pás de turbina. Usina hidroelétrica. Usina Luiz Carlos Barretos de Carvalho.

O levantamento e a extração disposta aos livros se deram via coleta desses em bibliotecas de usualidade pública, de bases virtuais; o levantamento e extração dos periódicos se deu junto a bancos de dados de *websites* como *Scientific Electronic Library* (SciELO); o levantamento e extração de conteúdos de cunho científico se deu junto a bases web de pesquisa, tais como Google Acadêmico.

Referido levantamento resultou na triagem de 150 conteúdos, sendo utilizados nesses os seguintes critérios booleanos, de inclusão e exclusão, a elencar a eletividade dos mesmos: (1) os conteúdos eram publicações nacionais e internacionais de cunho científico; (2) os conteúdos estavam completos nas bases de pesquisa, (3) os conteúdos eram publicados entre 2007 a 2017, (4) os conteúdos tinham base ligada ao processo de recuperação de pás de turbina, desde a adequação das normas até a fase de execução para seu funcionamento, (5) a linha de pesquisa dos conteúdos versava, mesmo que em parte, aos procedimentos de manutenção, materiais e execução necessários a dispor recuperação de pás de turbinas de unidades geradoras de energia, e (6) os conteúdos não versavam sob contextos regulatórios

e/ou Legais que envolvem os procedimentos de manutenção, materiais e execução necessários a dispor recuperação de partes e/ou peças de unidades geradoras de energia no Brasil.

Afim de aprofundar os achados do presente estudo foi somado a esse uma parte prática, também denominado cientificamente como estudo de caso e/ou estudo de campo.

O estudo de caso, estudo de campo ou parte prática, é um método de investigação, qualitativa e/ ou quantitativa, básica aplicada, onde o pesquisador busca melhor compreender e mais objetividade validar uma base conceitual, a qual nem sempre é estatística, de um referido fenômeno e/ ou visão de mundo e/ ou setores produtivos (KOCHE, 2014. p. 77).

Referido estudo de campo foi realizado por meio da aplicação de uma avaliação técnica, disposta em observância visual e documental, das turbinas da unidade geradora da Usina Luiz Carlos Barretos de Carvalho, a qual segue situada à Av. Antônio Giolo - Pedregulho – SP, CEP 14470-000; no período de 06 de janeiro 2015 a 31 de outubro 2016.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a liberação da máquina para poder começar os procedimentos de reparo da turbina, foi inspecionada toda a turbina na unidade geradora 1 (UG1). Durante todo procedimento de recuperação, foram utilizados equipamentos, ferramentas, materiais de consumo que seguem determinados padrões de qualidade e mão de obra devidamente treinada para a execução dos serviços. No local de maior incidência, foi localizado somente uma trinca, para confirmação foi feito ensaio de líquido penetrante, e ultrassom.

Figura 3: Identificação de uma trinca na pá da turbina após o ensaio de LP



Fonte: Autor (2017).

A Figura 3 mostra a localização da única trinca encontrada na turbina já em uma das pás após o ensaio de líquido penetrante. Trata-se de uma turbina que passou pelo processo de recuperação.

Figura 4: Materiais para ensaio de (LP).



Fonte: Autor (2017).

Para o ensaio de Líquido Penetrante (LP), foi utilizado Aerossol Metal-chek VP 30 e o revelador Metal-chek D 70 ilustrado na Figura 4, confirmando então a trinca na pá.

Como a trinca era superficial (menor que 5 mm de profundidade), o método de recuperação se enquadra no procedimento cuja descontinuidade é menor que $2/3$ de espessura da pá.

Figura 5: Gabarito com o perfil da pá.



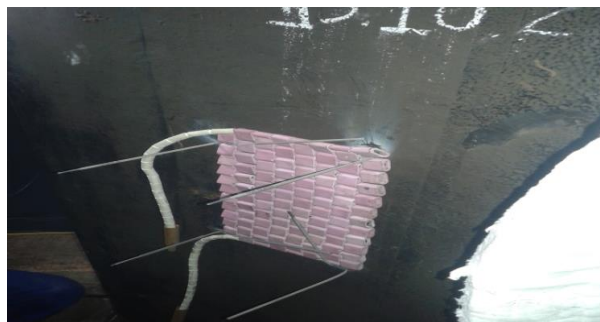
Fonte: Autor (2017).

Foi confeccionado um gabarito (conforme ilustrado na Figura 5), para após a soldagem de recompor o perfil na forma original. Os procedimentos adotados na execução nem sempre segue as normas; tendo sido os funcionários de fornos que fizeram a recuperação da trinca na pá 18 utilizaram esse gabarito e não as spline por achar mais fácil.

Em seguida, foi realizado um furo nas extremidades da pá com uma broca de 6 mm para evitar a progressão da trinca. Através de esmerilhamento, foi realizado um desbaste, a fim de eliminar a trinca, mantendo um ângulo de 60°. Na sequência, um novo ensaio de líquido penetrante foi realizado, confirmando que a descontinuidade foi eliminada.

Antes de começar o processo de soldagem, a pá foi aquecida até 150°C e foi mantido um controle de temperatura.

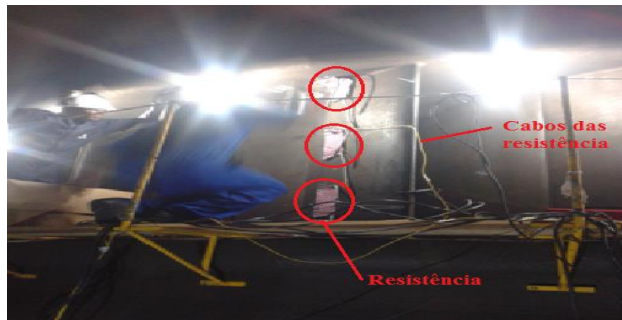
Figura 6: Resistência presa pelos eletrodos soldados



Fonte: Autor (2017).

Como meio de manter as resistências elétricas de cerâmicas fixada na pá conforme mostra a Figura 6, um eletrodo foi soldado para que segue a resistência elétrica de cerâmica.

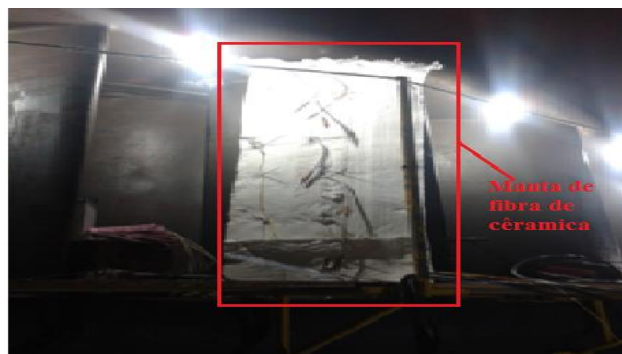
Figura 7: Resistência Instalada na pá 18.



Fonte: Autor (2017).

Para cada lado da pá foram instaladas três resistências, conforme a Figura 7, a qual indica as localizações das resistências e dos cabos.

Figura 8: Pá coberta com manta de fibra cerâmica.



Fonte: Autor (2017).

Após a instalação de todas as resistências, a pá foi coberta com uma fibra de cerâmica conforme mostra a (Figura 8), então fizeram as ligações com a máquina (modelo: REAL THERM 100 KVA) responsável pelo aquecimento da pá. Antes de começar a soldagem a temperatura foi controlada a 150°C. Para este procedimento foi utilizado o processo de soldagem FCAW.

Procedeu-se a deposição de aço carbono, seguida pela deposição de aço inoxidável em duas camadas ER309 e ER308, deixando uma sobre camada para executar o acabamento final. Com isso a solda foi resfriando lentamente até atingir temperatura ambiente. No acabamento final foi feito o esmerilhamento de tal forma a recompor o perfil original utilizando o gabarito.

Figura 9: Ensaio de LP e UT aprovados.



Fonte: Autor (2017).

A Figura 9 mostra após o procedimento de reparo da trinca na pá 18, foi feito o ensaio de líquido penetrante e ultrassom, aprovado para voltar para operação.

No que tange a erosão de cavitação e corrosão galvânica, é pertinente ressaltar que, na usina objetivo de presente estudo, essa começa com o segundo mapeamento feito pelos funcionários da usina, sabendo da evolução e delimitação de todos os locais onde terá que recuperar.

Figura 10: Áreas cavitadas.



Fonte: Autor (2017).

A Figura 10, através das áreas indicadas em vermelho, indica a área cavitada após a turbina ser entregue ao processo de recuperação.

Figura 11: Área delimitada da cavitação



Fonte: Eletrobrás Furnas (apresentação II SMER, 2007, p. 8).

A Figura 11 mostra as áreas delimitadas pelos funcionários, utilizadas como referência para calcular o volume através do mapeamento. Em amarelo, indicam-se áreas de profundidade calculando o volume.

Travamento das pás

No processo de recuperação das pás, confeccionou-se um dispositivo para o travamento de todas as pás entre si. São chapas de aço trabalhadas individualmente conforme o perfil hidrodinâmico das pás.

Figura 12: Chapa para travamento das pás.



Fonte: Autor (2017).

A Figura 12 contém a chapa riscada de giz, indicando o local do corte.

Figura 13: Corte das chapas.



Fonte: Autor (2017).

Após a marcação das chapas, foram cortadas com maçarico conforme Figura 13.

Figura 14: Chapa já soldada



Fonte: Autor (2017).

Os dispositivos prontos foram então soldados conforme Figura 14, para evitar o aporte térmico devido o processo de soldagem.

Galvanização

Existem dois procedimentos a tomar. O primeiro é quando a profundidade é inferior a 6mm. Usa o recurso de esmerilhar, tirando então as áreas afetadas pela

cavitação respeitando um ângulo de 60°. Foi pouco empregado na recuperação da turbina da UG1 devido ao fenômeno da cavitação estar bem avançado.

O segundo recurso é quando a profundidade excede a 6mm. Então, faz parte do procedimento a utilização de eletrodo de corte de grafite 5/16”.

Figura 15: Pá Goivada.



Fonte: Eletrobrás Furnas (apresentação II SMER, 2007, p. 18).

Para eliminar as irregularidades, foi utilizado galvanização conforme Figura 15, pois a maioria das pás continha profundidade que excedia os 6 mm. Logo em seguida foi esmerilhado para preparar a área para recuperação.

Figura 16 a) Deposição de Líquido VP 30; b) deposição do pó revelador D 70.



Fonte: Autor (2017).

A Figura 16, mostra no lado (a) onde foi feito a deposição do líquido penetrante, o (b) foi feito a deposição do revelador. Após o ensaio constatou-se que ainda havia irregularidades nas pás. Foi feita uma segunda goivagem para retirar as irregularidades, foi esmerilhado e logo após feito o ensaio líquido penetrante.

Figura 17: Pá sem irregularidade.

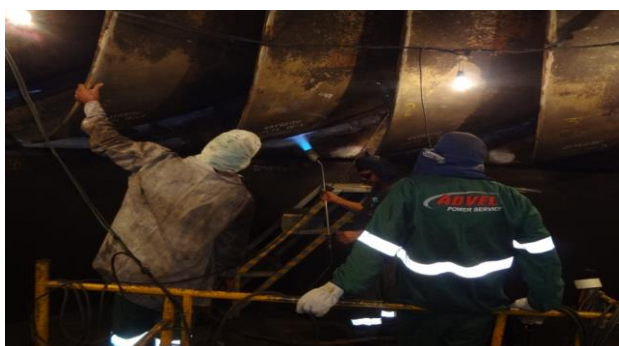


Fonte: Autor (2017).

No segundo ensaio, conforme a Figura 17, observou-se que todas as irregularidades tinham sido eliminadas, após a pá pronta para a recuperação através de soldagem.

Soldagem

Figura 18: Aquecimento da pá para soldagem.



Fonte: Autor (2017).

Antes de qualquer procedimento de soldagem e feito um aquecimento no local a ser soldado, foram aquecidos os locais até 150°C, conforme mostra a Figura 18.

Foram divididas em três etapas no processo de soldagem:

Deposição de aço carbono

Figura 19: Soldagem da pá 1 com aço carbono.



Fonte: Autor (2017).

A Figura 19 mostra que após serem aquecidos os locais até 150°C, começou a soldagem com aço carbono.

Figura 20 a) deposição de aço carbono; b) Ensaio (LP).



Fonte: Autor (2017).

A Figura 20 mostra a pá soldada (a), como faz parte do procedimento, após qualquer soldagem, feito o esmerilhamento, e logo em seguida o ensaio de líquido penetrante. Os funcionários da usina, que faz o controle, aprovaram o sequenciamento, viabilizando que posso ser dado sequenciamento a próxima etapa, a qual refere a soldagem por inox.

Deposição de aço inoxidável

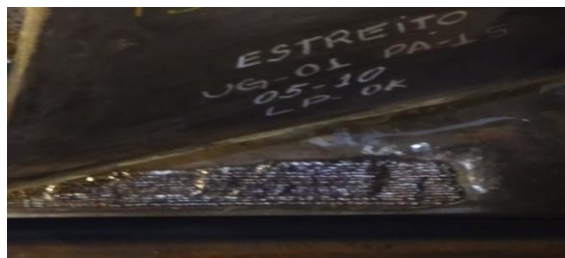
Figura 21: Aquecimento da pá 1.



Fonte: Autor (2017).

Para deposição de aço inoxidável foi necessário aquecer as áreas a serem soldadas a 150°C, conforme a Figura 21. O procedimento foi dividido em duas etapas. Na primeira foi adicionado aço inoxidável E309, respeitando um limite a faltar 9mm para chegar a *splines*. Foi então esmerilhado para dar acabamento, em seguida feito o ensaio líquido penetrante, constando que estava liberado para a próxima etapa.

Figura 22: Pá após soldagem por inoxidável



Fonte: Autor (2017).

Na segunda etapa, após o aquecimento, foi adicionado aço inoxidável E308 respeitando o limite a faltar 6 mm para chegar na *splines*, Figura 22.

Figura 23: Ensaio LP após solda com inoxidável.



Fonte: Autor (2017).

A pá, após a adição do aço E308, foi feito o ensaio líquido penetrante mostrado na Figura 23, constatando que estava liberado para prosseguir com a recuperação.

Deposição de cavitalloy

Como último procedimento de soldagem, aqueceu-se a pá a 150°C, foi depositado cavitalloy (Liga de cobalto), a fim de preencher os últimos 6mm até chegar a *splines*.

Figura 24: Pá após a deposição sobre camada de cavitalloy.



Fonte: Autor (2017).

Foi adicionado cavitalloy até atingir uma sobre camada de 3mm para acabamento conforme a Figura 24, mostrada pela área delimitada em vermelho. Foi esmerilhado e por fim feito o ensaio de LP. Houve alguns pontos acusados pelo ensaio. Foram corrigidos, então, os pontos com irregularidade, com deposição de cavitalloy, esmerilhado e novamente fez-se o ensaio de líquido penetrante e ultrassom.

Figura 25: Pá pronta



Fonte: Eletrobrás Furnas (apresentação II SMER, 2007, p. 24).

A Figura 25 mostra a pá finalizada após o processo reparo dos danos causados pela cavitação e correção galvânica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o presente estudo, foi possível constatar e conhecer os procedimentos de recuperação de turbina diante de uma análise pormenorizada da teoria baseada em referências bibliográficas, acompanhada de levantamento de dados e estudo de caso. Somado a isso, apresentou-se as fases de recuperação, tais como: mapeamento, materiais utilizados, procedimentos de soldagem, acabamento e ensaio de verificação de qualidade dos serviços executados.

Salienta-se que os resultados dos procedimentos são todos normalizados. Na coleta de dados, foi utilizada a NBR 9581-1986 (Turbinas Hidráulicas - Bombas De Acumulação E Turbinas-bombas - Verificação Da Erosão Por Cavitação), somente atualizando os métodos conforme a norma e atualizada. Para os procedimentos de soldagem foi utilizada a norma ASME IX, API 1104 E AWS D1.1. Os ensaios não destrutivos foram realizados de acordo com a norma ASME V.

Conforme fundamentado no decorrer do estudo, o procedimento apresentado não é considerado simples e único, porém, vem sendo empregado há anos com resultados satisfatórios.

De acordo com os ensaios feitos, após a recuperação, todos os procedimentos foram aprovados, liberando-se a turbina da unidade geradora 1 da usina Luiz Carlos Barretos de Carvalho para operação.

Por fim, conclui-se que o fenômeno da cavitação da Usina Luís Carlos Barretos de Carvalho também pode prevalecer em outras usinas, desde que possuam o mesmo tipo de turbina e mesmo potencial de geração, o que torna esta pesquisa um impulso inicial para o desenvolvimento de projetos futuros, especificamente em relação aos procedimentos de recuperação e o método para reduzir cavitação em turbinas hidráulicas.

Portanto o trabalho contribui para que novos pesquisadores sintam interesse em aprofundar seus conhecimentos e busquem novas metodologias a serem utilizadas, enriquecendo ainda mais a pesquisa e contribuindo com a ciência e a qualidade dos serviços prestados aos consumidores, inovando sempre, aprimorando as tecnologias já existentes e contribuindo com novos avanços.

REFERÊNCIAS

ADVEL. **Tecnologia e comércio. Novidades e informativos.** Publicado em 2014. Disponível em: <http://www.adveltecnologia.com.br/novidade.aspx?id=68>. Acesso em 28/11/2016.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **SECTION V:** Exame não destrutivo. New York: Current Exam, 2013. 25p.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **SECTION IX:** Qualificação de Soldagem e Soldadores. New York: Current Exam, 2013. 30p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9581:** Turbinas Hidráulicas - Bombas De Acumulação E Turbinas-bombas - Verificação Da Erosão Por Cavitação. Brasília, 1986. 16p.

BONSOR, Kevin. **Usinas Hidrelétricas.** S/ d. Disponível em: <http://ciencia.hsw.uol.com.br/usinas-hidreletricas1.htm>. Acesso em: 20/10/2016.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos:** Fundamentos e aplicações. 3º ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.

CARDOSO, M. **Corrosão.** S/ d. Disponível em: <http://www.infoescola.com/quimica/corrosao/>. Acesso em: 26/11/2016.

DÁRIO, E. R. **Turbinas Hidráulicas.** S/ d. Disponível em: <http://joinville.ifsc.edu.br/~evandro.dario/Máquinas Térmicas e de Fluxo/Materiais/Turbinas Hidráulicas/capitulo8- turbinas hidráulicas.pdf>. Acesso em: 23/11/2016.

FARIA, C. **Usina Hidrelétrica.** S/ d. Disponível em: <http://www.infoescola.com/energia/usina-hidreletrica>. Acesso em: 20/10/2016.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos.** Rio de Janeiro :LTC, 2012.

HENN, É. L. **Máquinas de Fluido.** Santa Maria: Editora UFSM, 2012.

KOCHE, J. C. **Fundamentos de metodologia científica:** teoria da ciência e iniciação à pesquisa. 1º ed. Rio de Janeiro: Vozes, 2014.

LIMA, J. M. **Usinas hidrelétricas:** diretrizes básicas para proteção e controle. Rio de Janeiro. Synergia, 2009.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J. B.; QUEIROZ, A. **Soldagem fundamentos e tecnologia**. 3º ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

OLIVEIRA, R. J. **Cavitação**: Como entender este fenômeno. S/ d. Disponível em: <http://mgstecnologia.com.br/noticias/admin/arquivos/Cavitacao.pdf>. Acesso em: 20/10/2016.

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de soldagem e aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

PELIZER, M. C.; FURINI, V. **II SMER**: Caldas Novas: Furnas, 2007. 34 slides, color.

QUEIROZ, F. R. **Avaliação de cavitação em turbinas hidráulicas por emissão acústica**. 2012. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

REIS, L. B. **Geração de energia elétrica**. 2º ed. Barueri: Editora Manole, 2011.

SANTOS, A. **Trincas, fissuras, fendas e rachaduras exigem cuidado**. S/ d. Disponível em: <http://www.cimentoitambe.com.br/trincas-fissuras-fendas-e-rachaduras-exigem-cuidado>. Acesso em: 26/11/2016.

SANTOS, C. G. **Dimensionamento e simulação computacional de um rotor hidráulico do tipo Francis**. S/ d. Disponível em: http://www.fahor.com.br/publicacoes/TFC/EngMec/2012/Cesar_Gabriel_dos_Santos.pdf. Acesso em: 20/10/2016.

SANTOS, R. C. L. **Análise de cavitação em uma turbina hidráulica tipo Kaplan**. 2013. 74 p. Monografia (Graduação em Engenharia mecânica). Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10009083.pdf>. Acesso em: 06/10/2016.

SILVA, E. C. N. **Máquina de fluido**. S/ d. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/pmr2481/Aula01-Int.pdf>. Acesso em: 20/10/2016.

SOUZA, Z.; SANTOS, A. H. M.; BORTONI, E. C. **Centrais hidrelétricas**: implantação e comissionamento. 2º ed. Rio de Janeiro: Inter ciência, 2009.

WHITE, F. M. **Mecânica dos fluidos**. 6º ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.