

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS UNIS-MG
ENGENHARIA MECÂNICA

ELIVAL RODRIGUES DOS SANTOS

Biblioteca Monsenhor Domingos Prado Fonseca

N. Class. M 622-24

Cutter 9.237v

Ano/Ed. 2010

UTILIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS POLIMÉRICOS EM ROTOR FRANCIS
DANIFICADO POR CAVITAÇÃO

Varginha - MG
2010

BIBLIOTECA MONSENHOR DOMINGOS PRADO FONSECA

Registro: 112108 Data: 29/03/11

Origem: — 11 — Preço: — 11 —

ELIVAL RODRIGUES DOS SANTOS



**UTILIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS POLIMÉRICOS EM ROTOR FRANCIS
DANIFICADO POR CAVITAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico, sob orientação do Professor Alexandre Lopes.

ELIVAL RODRIGUES DOS SANTOS

**UTILIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS POLIMÉRICOS EM ROTOR FRANCIS
DANIFICADO POR CAVITAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia Mecânica
do Centro Universitário do Sul de Minas –
UNIS/MG como pré-requisito para a obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico pela banca
Examinadora composta pelos membros: Prof.
Esp. Márcio de Santana, Prof. Ms. Alexandre
Soriano e Prof. Esp. Alexandre Lopes

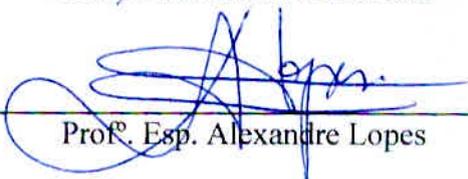
Aprovado em 01/12/2010



Prof. Esp. Márcio de Santana



Prof. Ms. Alexandre Soriano



Prof. Esp. Alexandre Lopes

OBS.:

Dedico este trabalho a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para sua realização especialmente à minha família, pelo apoio incondicional.

Agradeço a Deus pela saúde e proteção, aos meus companheiros de trabalho pelo incentivo, à minha namorada pela compreensão, aos meus amigos por compartilhar alegrias e tristezas e aos meus pais que me deram a vida e me prepararam para seguir sempre o melhor caminho.

“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino”.

Leonardo da Vinci

RESUMO

Este trabalho avalia o desempenho de revestimentos poliméricos quanto à resistência à cavitação, tendo como objetivo a redução de custos em serviços de manutenção em rotores, o aumento da disponibilidade das Turbinas e uma alternativa ao processo de soldagem. Em laboratório, foram realizados os ensaios de cavitação induzida por ultra-som quantificado pela perda de massa, posteriormente transformada em perda de espessura e o de tração, como parâmetro de aderência. Como teste de campo, os revestimentos foram aplicados em rotores de bronze, tipo Francis, na Usina de Gafanhoto, pertencente à Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG. Os corpos de prova assim como os materiais de revestimentos foram fornecidos pelos próprios fabricantes, já os laboratórios de ensaios foram cedidos pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Os testes laboratoriais constataram que os revestimentos poliméricos são menos resistentes à cavitação do que o aço carbono ABNT 1020 trefilado e o aço inoxidável AISI 309 L15, depositados por soldagem com eletrodo revestido. Nas observações de campo verificou-se que a resina da marca Devcon, denominada COMBO WEAR FC foi a que apresentou o melhor desempenho prático, contrariando a expectativa do ensaio laboratorial, onde a mesma obteve a maior perda de massa. Observou-se também que o procedimento não é recomendado para reparos em trincas e que era necessário maior tempo para modelamento do revestimento de forma a restaurar as características geométricas das pás. Essa necessidade foi atendida com a resina WEAR GUARD FINE LOAD. Durante os três anos seguintes o bom comportamento dessa resina certificou a utilização de revestimentos poliméricos em recuperação de rotores Francis danificados por cavitação.

Palavras-Chave: Cavitação. Revestimentos poliméricos. Turbinas hidráulicas.

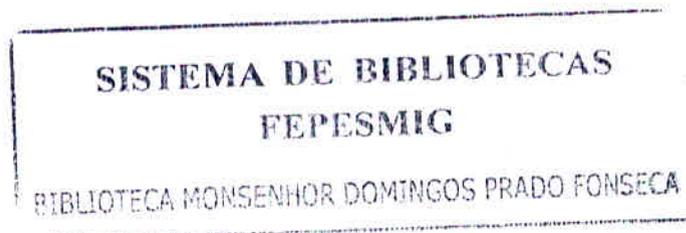
ABSTRACT

This study evaluates the performance polymer coatings for resistance to cavitation, with the objective of cost reduction in maintenance services in rotors, increasing the availability of turbines and an alternative to the soldering process. In laboratory tests were carried cavitation induced by ultrasound measured by weight loss later turned into a loss of traction and thickness as a parameter for adhesion. As a field test, the coatings were applied to brass rotors, like Francis, in Locust Plant, belonging to Companhia Energetica de Minas Gerais - CEMIG. The specimens as well as coating materials were supplied by the manufacturers, testing laboratories have been given by the Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Laboratory tests found that the polymer coatings are less resistant to cavitation than the carbon steel ABNT 1020 and drawn stainless steel AISI 309 L15, deposited by welding with covered electrode. On field observations showed that the resin Devcon brand called WEAR COMBO FC presented the best practical performance, contrary to the expectations of the test laboratory, where it obtained the highest weight loss. It was also noted that the procedure is not recommended to repair broken and what was needed more time to finish modeling in order to restore the geometrical characteristics of the blades. This need was met with the resin WEAR GUARD FINE LOAD. During the three years following the good behavior of this resin has certified the use of polymer coatings on recovery rotors Francis damaged by cavitation.

Key Words: *Cavitation. Polymer coating. Hidraulics Turbines.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Rotor Pelton desativado PCH São Bernardo – MG.....	11
Figura 02 - Turbina Pelton PCH São Bernardo – MG.....	12
Figura 03 - Rotor Francis com defletores.....	13
Figura 04 - Rotor Kaplan.....	14
Figura 05 - Turbina Bulbo em corte.....	15
Figura 06 - Erosão ocasionada por cavitação na palheta de um rotor tipo Francis.....	16
Figura 07 - Erosão ocasionada por cavitação em rotor Francis.....	16
Figura 08 - Cavitação em conchas de Rotor Pelton. PCH São Bernardo – MG.....	17
Figura 09 - Pá nº4 da Turbina Francis (G1) – Usina de Gafanhoto – MG.....	24
Figura 10 - Pá nº6 da Turbina Francis (G1) – Usina de Gafanhoto – MG.....	25
Figura 11 - Sistema de refrigeração - serpentina de cobre.....	31
Figura 12 - Sistema de refrigeração - conjunto completo.....	31
Figura 13 - Equipamento para ensaio de cavitação TELSONIC console e painel de controle.....	32
Figura 14 - Cabeçote de teste.....	32
Figura 15 - Aspectos do corpo de prova D1 após o ensaio de cavitação.....	33
Figura 16 - Aspectos do corpo de prova D2 após o ensaio de cavitação.....	33
Figura 17 - Aspectos do corpo de prova D3 após o ensaio de cavitação.....	33
Figura 18 - Aspectos do corpo de prova C1 após o ensaio de cavitação.....	33
Figura 19 - Aspectos do corpo de prova E1 após o ensaio de cavitação.....	33
Figura 20 - Corpo de prova antes do ensaio de tração.....	34
Figura 21 - Corpos de prova após o ensaio de tração.....	34
Figura 22 - Rotor Francis – Usina de Itaipu - PR.....	35
Figura 23 - Turbina Pelton PCH São Bernardo – MG. Detalhe do bico injetor.....	35



SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 Turbinas Hidráulicas.....	11
2.1.1 Turbinas de ação.....	12
2.1.2 Turbinas de reação.....	13
2.2 Cavitação em Turbinas Hidráulicas.....	15
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
4 RESULTADOS.....	22
4.1 Resultados dos ensaios de cavitação.....	22
4.2 Resultados dos ensaios de aderência.....	23
4.3 Resultados dos ensaios de campo.....	24
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	27
CONCLUSÃO.....	29
BIBLIOGRAFIA.....	30
ANEXO A.....	32
ANEXO B.....	33
ANEXO C.....	34
ANEXO D.....	36
ANEXO E.....	37

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de um país está intimamente ligado a confiabilidade e a seletividade do seu sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Como a matriz energética brasileira é essencialmente composta por usinas hidrelétricas, as concessionárias de energia necessitam de altos investimentos em manutenções de Turbinas Hidráulicas para garantir a disponibilidade operativa de suas usinas.

A cavitação é o fenômeno que mais agride as turbinas hidráulicas. Esse fenômeno consiste na implosão de bolhas de ar geradas no momento em que a pressão do líquido cai a um valor determinado como pressão de vapor. Tal fenômeno agride rotores de qualquer material, seja de aço carbono, aço inoxidável ou bronze. As manutenções preventivas são de suma importância para controlar a erosão por cavitação, já que seria economicamente inviável e tecnicamente complexa a substituição das mesmas.

Embora a cavitação seja um fenômeno que se leva em conta desde o projeto até a operação, ainda assim ela ocorre. Como forma de recuperação dos rotores hidráulicos recomenda-se revestir as áreas erodidas com materiais resistentes às implosões.

Atualmente o processo mais utilizado para recuperação de rotores em Turbinas Hidráulicas é o de soldagem, ou seja, adicionam-se materiais metálicos em substituição as partes erodidas pela cavitação. Vários métodos estão sendo testados, não sendo pretensão deste trabalho realizar comparações referentes aos mesmos.

A utilização de revestimentos poliméricos começa a ganhar destaque, principalmente em rotores compostos por materiais de difícil soldagem, como o bronze. Essa técnica também é uma alternativa a Turbinas que apresentam precárias condições sejam estruturais ou de posicionamento para uma soldagem eficiente.

Os fabricantes de resinas sintéticas estão desenvolvendo materiais cada vez melhores o que viabiliza sua aplicação tendo em vista a redução do custo e do tempo do processo, refletido diretamente no aumento da disponibilidade da Unidade Geradora.

Nesse trabalho será avaliada a eficácia de alguns revestimentos poliméricos disponíveis no mercado no que diz respeito à resistência a erosão por cavitação, através de ensaios laboratoriais e de campo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O fenômeno da cavitação varia de acordo com as características construtivas e operativas de cada Turbina hidráulica, sendo importante um estudo detalhado para detectar, prevenir e corrigir seus danos.

2.1 Turbinas Hidráulicas

As turbinas de uma usina hidrelétrica são responsáveis pela transformação da energia potencial da água em energia mecânica. Esta energia mecânica é então transferida, através de um eixo, a um gerador, onde é finalmente transformada em eletricidade. (FILHO, 2003).



Figura 1. Rotor Pelton desativado PCH São Bernardo – MG.
Fonte: o autor.

As turbinas hidráulicas podem ser classificadas em turbinas de ação ou turbinas de reação.

2.1.1 Turbinas de ação

(FILHO, 2003) “[...] Nas turbinas de ação, o rotor é instalado em uma câmara que não é totalmente preenchida com água, onde jatos de água são direcionados contra palhetas ou conchas localizadas na periferia do rotor [...]”.

A soma da força dos jatos d’água sobre as palhetas conferem ao rotor o torque necessário para girar o eixo acoplado ao gerador elétrico.

A mais importante turbina de ação é a Pelton.

Turbina Pelton: Segundo Filho, (2003) foi desenvolvida em 1880, pelo engenheiro americano Lester Pelton, tendo seu campo de aplicação para quedas de 200 à 1500m de altura. São turbinas de ação porque utilizam a velocidade do fluxo de água para provocar o movimento de rotação. Seu rotor é formado por um conjunto pás no formato de conchas, dispostas na periferia de um corpo circular, sobre as quais incide, tangencialmente, um jato de água dirigido por um ou mais injetores distribuídos de forma uniforme na periferia da roda.



Figura 2. Turbina Pelton PCH São Bernardo – MG.

Fonte: o autor.

A Figura acima ilustra o rotor de Pelton de uma Pequena Central Hidrelétrica, na oportunidade o equipamento estava em manutenção.

A Figura 23 do Anexo E mostra o injetor de uma Turbina Pelton em detalhe.

Estas turbinas podem ser de eixo vertical ou horizontal e são utilizadas em aproveitamentos hidrelétricos caracterizados por pequenos caudais e elevadas quedas úteis (250 a 2500 m). Operam a baixa rotação, tendo, no entanto, um rendimento até 93%.

2.1.2 Turbinas de reação

Turbina de reação converte ambas as energias, potencial e cinética da água, em energia mecânica. O rotor de uma turbina de reação fica alojado em uma câmara completamente preenchida com água. Na entrada desta câmara existem pás ajustáveis que aceleram e conduzem, em direções apropriadas, o fluxo de água até o rotor. (FILHO, 2003).

As Turbinas de Reação mais utilizadas são: Francis, Kaplan, Hélice/Bulbo.

Turbina Francis: este modelo de turbina foi projetado e desenvolvido pelo inglês James Francis. Nesta turbina, segundo Filho (2003), a água do distribuidor é direcionada para a parte lateral e sai pela parte inferior.

As turbinas com rotor Francis trabalham com quedas variando de 20 m a 450 m e são as mais usadas em grandes usinas hidrelétricas.

Esta turbina é caracterizada por ter uma roda formada por uma coroa de aletas fixas, as quais constituem uma série de canais hidráulicos que recebem a água radialmente e a orientam para a saída do rotor numa direção axial.

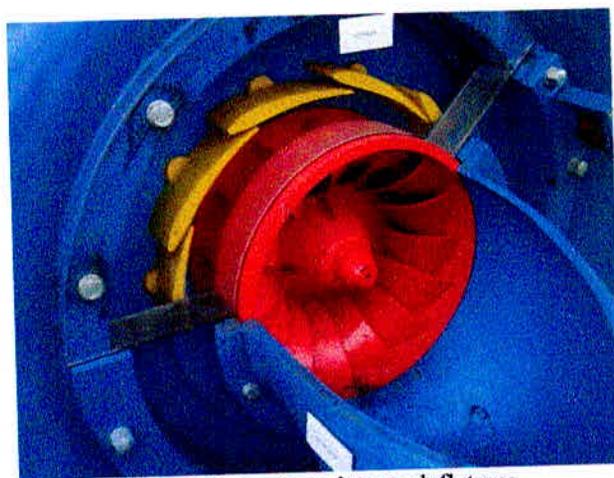


Figura 3. Rotor Francis com defletores.
Fonte: disponível em www.wikilingue.com

A entrada na turbina ocorre simultaneamente por múltiplas comportas de admissão dispostas ao redor da roda, e o trabalho exerce-se sobre todas as aletas ao mesmo tempo para fazer rodar a turbina e o gerador.

Os outros componentes desta turbina são a câmara de entrada, a qual pode ser aberta ou fechada com uma forma espiral, o distribuidor constituído por uma roda de aletas fixas ou móveis que regulam o caudal e o tubo de saída da água.

Turbinas com rotor do tipo Francis são caracterizadas por boa performance e alta eficiência de conversão de energia. No entanto, o campo de operação nesta melhor eficiência é relativamente pequeno. Usinas hidrelétricas equipadas com turbinas com rotor Francis podem ter diferentes funções como, por exemplo, trabalhar gerando energia no curso d'água ou usadas como reguladoras de vazão (ASCHENBRENNER et al., 2006).

Barbosa (1999) diz que “[...] nestes tipos de turbinas existem fenômenos oscilatórios e periódicos que causam sérios problemas, dependendo de seu ponto de operação [...]”.

Alguns desses problemas são: perda de rendimento em turbinas, flutuação de potência nas unidades geradoras, falhas estruturais em turbinas e geradores, problemas estruturais nas fundações das usinas.

Do ponto de vista hidrodinâmico, duas são as principais causas desses problemas em turbinas hidráulicas:

A cavitação: este é um fenômeno físico que pode provocar erosão, fissuras e/ou trincas afetando negativamente o desempenho de componentes e equipamentos que compõem a turbina.

O vórtice de núcleo: é um fenômeno hidrodinâmico que ocorre na sucção da turbina criando uma trança no fluxo d'água. Afeta principalmente a estrutura de concreto da usina.

Turbina Kaplan: classificada como turbina de reação, adaptada para quedas fracas e caudais elevados. Nas turbinas Kaplan as pás são móveis, o que permite variar o ângulo de ataque por meio de um mecanismo de orientação que é controlado pelo regulador da turbina.

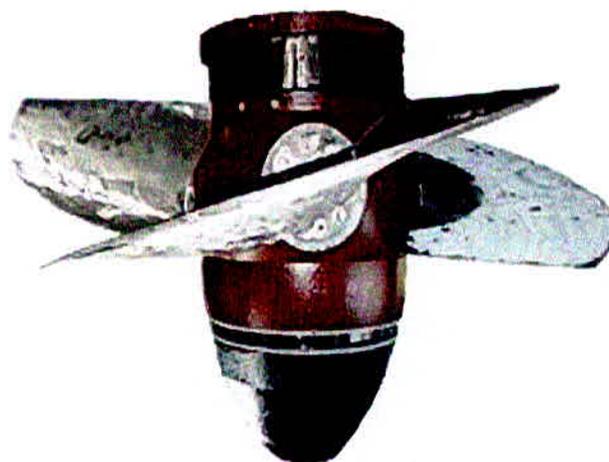


Figura 4. Rotor Kaplan.

Fonte: UCM Resita – Equipamentos Hidráulicos

(FILHO, 2003) “A Turbina Kaplan foi projetada pelo alemão Viktor Kaplan. Nesse modelo, ao passar pelo distribuidor, a água é direcionada para fluir paralelamente ao eixo da Turbina[...]. Trabalha com quedas inferiores a 70 metros. [...]”.

Turbina Hélice: as turbinas tipo Hélice, assim como a Kaplan, possuem eixo vertical e é constituída por uma câmara de entrada que pode ser aberta ou fechada, por um distribuidor e por uma roda com quatro ou cinco pás em forma de hélice. O que a difere da anterior é o fato de ter pás fixas (FILHO, 2003).

Turbina Bulbo: as turbinas Bulbo, basicamente, é designada com uma turbina Hélice, porém com eixo horizontal (FILHO, 2003). A Turbina tipo Bulbo possui um conjunto turbina-gerador de eixo horizontal instalado no interior de uma cápsula.

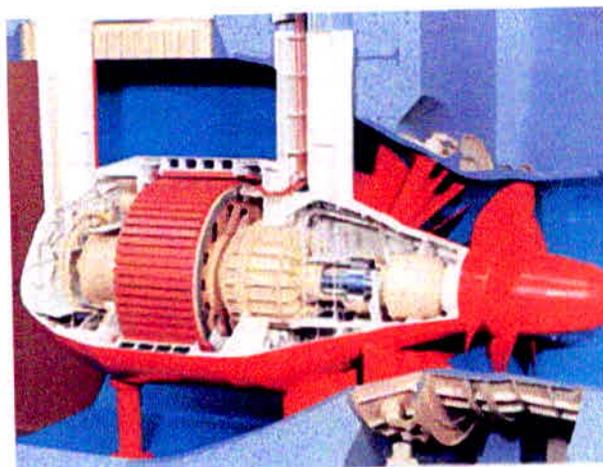


Figura 5. Turbina Bulbo em corte.
Fonte: www.cidaderenovavel.wordpress.com

A Figura 5 mostra uma Turbina Bulbo em corte ilustrando o seu interior. Destaca-se o sistema turbina – gerador embutido na cápsula submersa.

2.2 Cavitação em Turbinas Hidráulicas

A cavitação consiste na formação e subsequente colapso de bolhas ou cavidades preenchidas por vapor ao longo do escoamento de um líquido.

Canavelis, (1967), citado por Ribeiro, (2007) define cavitação como a formação de cavidades macroscópicas em um líquido, a partir de núcleos gasosos microscópicos. O crescimento destes núcleos microscópicos acontece por vaporização, dando origem a formação e implosão de bolhas de ar, sempre que a pressão em um ponto qualquer do escoamento atingir valores iguais ou inferiores à pressão de vaporização do líquido na temperatura em que ele se encontra.

A pressão de vapor de qualquer líquido depende da temperatura em que esse se encontra. A tabela 1 mostra essa relação.

Tabela 1. Pressão de vapor da água para determinadas temperaturas.

Temperatura(°C)	0	4	10	20	30	40	60	80	100
Pressão(m.c.a)	0.062	0.083	0.125	0.239	0.433	0.753	2.033	4.831	10.33

Fonte: Schneider Motobomba - Manual Técnico.

Esse fenômeno gera danos à turbina tais como erosão de material, vibrações e ruídos excessivos acarretando diminuição da eficiência e ainda queda de potência.

A erosão por cavitação ocorre devido à concentração de energia em uma pequena área sólida próxima ou no próprio local do colapso. Essa concentração de energia é responsável pelas altas tensões localizadas que excedem os limites de resistência dos materiais.

Nas Figuras 6 e 7 temos registros dos danos causados por cavitação em rotores tipo Francis.

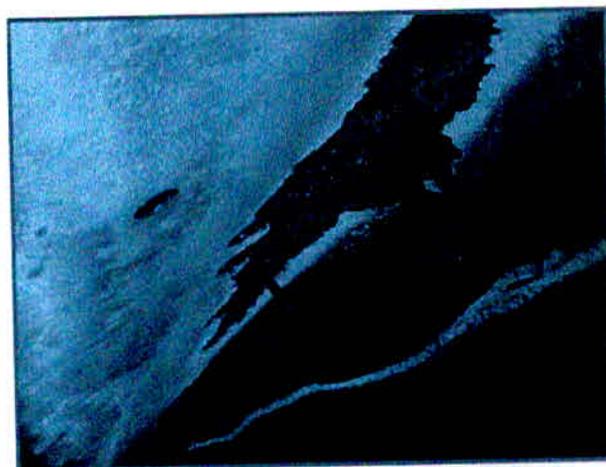


Figura 6. Erosão ocasionada por cavitação na palheta de um rotor tipo Francis. Fonte: Vaz, 2004.

Em rotor Francis as zonas de baixa pressão são formadas em regiões de aumento da velocidade como na entrada do rotor após estreitamento do caracol de adução.

Observa-se na Figura abaixo que materiais dos rotores de aço inoxidável são arrancados, aumentando a rugosidades e alterando as formas geométricas originais.



Figura 7. Erosão ocasionada por cavitação em rotor Francis.
Fonte: CEMIG – Gerência de Manutenção mecânica da Geração.

Os rotores tipo Pelton também são castigados por tal fenômeno, com mostrado na Figura 8. Além de erodir a parte interna das conchas a cavitação danifica a geometria curvilínea das extremidades.



Figura 8. Cavitação em conchas de Rotor Pelton. PCH São Bernardo – MG.
Fonte: o autor.

Na Figura acima se observa além da erosão por cavitação, a corrosão das pás de aço carbono.

A cavitação pode ocorrer em qualquer estrutura hidráulica de uma usina, tais como: vertedouro, válvulas, canais, túneis, comportas e principalmente nas turbinas hidráulicas.

Os tipos de cavitação que ocorrem em turbinas hidráulicas são normalmente os seguintes:

(a) Cavitação Fixada: Sequência da formação, crescimento e enchimento de uma cavidade de vapor, que posteriormente será interrompida por um escoamento reentrante, e deslocada à jusante, para regiões de pressões mais elevadas, onde será implodida violentamente, provocando ondas de choques e concentrações de altas pressões. Este tipo de cavitação tem alto poder de destruição (MICHEL & BELAHADJI, 1997).

(b) Cavitação por Vórtice: Tem maior incidência nas extremidades das pás rotoras de turbinas Kaplan, nas camadas cisalhantes de jatos submersos, na extensão do cone dos rotores (principalmente em turbinas com rotor Francis) e nas passagens do escoamento entre as pás, ou seja, em regiões onde ocorre formação de vórtices. Este tipo de cavitação resulta em erosões, vibrações e ruídos (MICHEL & BELAHADJI, 1997).

(c) Cavitação por Bolhas: é uma cavitação erosiva devido às altas pressões decorrentes das implosões das bolhas de ar. Este tipo de cavitação normalmente aparece ao longo de contornos sólidos, ou no interior dos fluidos, devido à queda de pressão para valores inferiores ao da pressão de vapor do líquido. (FRANC ET AL., 1995).

Os principais fatores que levam estas turbinas a cavitarem (individuais ou em conjunto) são:

- Perda dos perfis das pás e dos perfis do distribuidor, devido a sucessivas intervenções para reparos;
- Rugosidade excessiva;
- Operação fora das faixas garantidas, isto é, com carga parcial ou com sobrecarga;
- Características da água do reservatório;
- Operação com altura de sucção inferior a mínima prevista;
- Projeto de perfis inadequados;
- Proteção insuficiente das áreas sujeitas à cavitação.

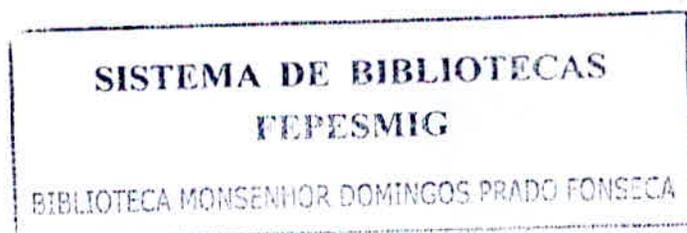
Para isso o posicionamento do rotor da turbina com relação ao nível mínimo de jusante é fundamental, pois se a contrapressão no rotor não for suficiente para compensar as quedas de pressões oriundas das condições operativas, poderá surgir uma cavitação intensa e comprometer o seu funcionamento.

Também não é viável economicamente aumentar o afogamento da turbina, pois isto elevaria os níveis de escavações e como conseqüência, os dispêndios com concreto durante a construção.

Atualmente fórmulas empíricas, advindas de métodos estatísticos, têm sido utilizadas para determinar de forma preliminar as alturas de sucção de turbinas hidráulicas. Estas fórmulas normalmente são em função da queda e, principalmente, da velocidade específica de turbinas homólogas, no entanto a comprovação do comportamento do rotor da turbina com relação à cavitação é feita nos ensaios do modelo reduzido.

Esse complexo fenômeno desperta o interesse de centros de pesquisa e de companhias de eletricidade no intuito de: prever as condições para as quais existam riscos de cavitação agressiva para o protótipo, localizar a região onde a cavitação aparecerá e se desenvolverá, estimar os níveis de tensões que a cavitação exercerá sobre as paredes sólidas, classificar materiais com relação às suas resistências à erosão, estabelecer relações entre tipo de cavitação e intensidade de erosão.

Um fator relevante em turbinas hidráulicas, é que a melhor forma de prever a cavitação da turbina é efetuar ensaios em laboratoriais especializados em modelos de escala reduzida, com posterior transposição dos resultados. Entretanto esse método é acompanhado por algumas imprecisões, tais como: viscosidade, rugosidade, nível de turbulência e qualidade da água.



3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais poliméricos e processos de aplicação usados na deposição dos revestimentos foram escolhidos basicamente dentre fornecedores de serviços e materiais da Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG, com base na experiência anterior acumulada pela empresa e são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Materiais ensaiados

Material	Identificação	Fabricante
Composto epóxi com carga cerâmica de alto desempenho	D1	Devcon
Massa epóxi com carga cerâmica	D2	Devcon
Massa epóxi com carga cerâmica de alto desempenho	D3	Devcon
Não informado	C1	Multimetall
Composto em matriz de carboneto de silício e óxido de alumínio, reforçado com fibras de Kevlar	E1	Eutetic

Fonte: CEMIG - Gerência de Manutenção mecânica da Geração

Foram preparados corpos de prova de alguns outros materiais que não puderam ser ensaiados, como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3. Materiais não ensaiados.

Material	Problema	Fabricante
Uretano bi-componente líquido que forma um novo componente, coesivo e moldável	Fusão na interface revestimento/metal	Loctite
Mistura de esferas de óxido de alumínio (Al ₂ O ₃) em matriz epóxi.	Revestimento solta-se do CP	Egepar
Composto tri-componente de alta tecnologia	Grandes pedaços de revestimento se soltaram.	Devcon

Fonte: CEMIG - Gerência de Manutenção mecânica da Geração

Os produtos da Devcon (D1- COMBO WEAR GUARD, D2-Devcon WR-2, D3 Brush Blue), Loctite, Egepar e Multimetall (C1) foram aplicados nos corpos de prova

fornecidos pela UFMG e o material da Eutetic (E1) foi aplicado pelo pessoal da CEMIG, seguindo instruções fornecidas pelo fabricante.

Para controle da temperatura de ensaio, foi construído um dispositivo mostrado no Anexo A. Trata-se basicamente de um equipamento para resfriamento da água destilada. Esse controle de temperatura é essencial para o ensaio, tendo em vista a relação da temperatura do fluido com a pressão de vapor, como mostra a tabela 1. Esse sistema mostrou-se plenamente satisfatório. Para o ensaio em questão a temperatura da água foi estabilizada em 20 °C.

A avaliação de desempenho dos revestimentos, em laboratório, foi feita através dos ensaios de cavitação acelerada por ultrassom (utilizando um equipamento TELSONIC, mostrado no Anexo B, segundo as recomendações da norma G32 - 1985) e do de aderência (utilizando um equipamento universal INSTRON, segundo a norma ASTM C633 - 1974). Os corpos de prova para estes ensaios são mostrados no Anexo C.

O ensaio de cavitação induzida caracteriza-se, basicamente, pelo movimento de ataque nos corpos de prova por uma ponta de titânio, cujo movimento é controlado por uma fonte pulsante de alta frequência, em um tempo pré determinado.

O ensaio de tração foi executado a uma velocidade de deslocamento do cabeçote de 5 mm/min. Os corpos de prova para estes ensaios são mostrados no Anexo D.

Quando não ocorreu falha durante os testes, ensaiou-se mais de um corpo de prova tomando-se como resultado os valores médios obtidos.

4 RESULTADOS

Nos ensaios laboratoriais foram obtidos resultados de perda de massa devido à cavitação e de aderência através do ensaio de tração.

Os primeiros resultados práticos foram observados após nove das aplicações em uma Turbina tipo Francis. Posteriormente a Gerência de Manutenção Mecânica da Cemig permaneceu verificando anualmente o comportamento dos revestimentos.

4.1 Resultados dos ensaios de cavitação

O Gráfico 1 mostra os resultados do ensaio de cavitação induzida, em termos de perda de massa acumulada.

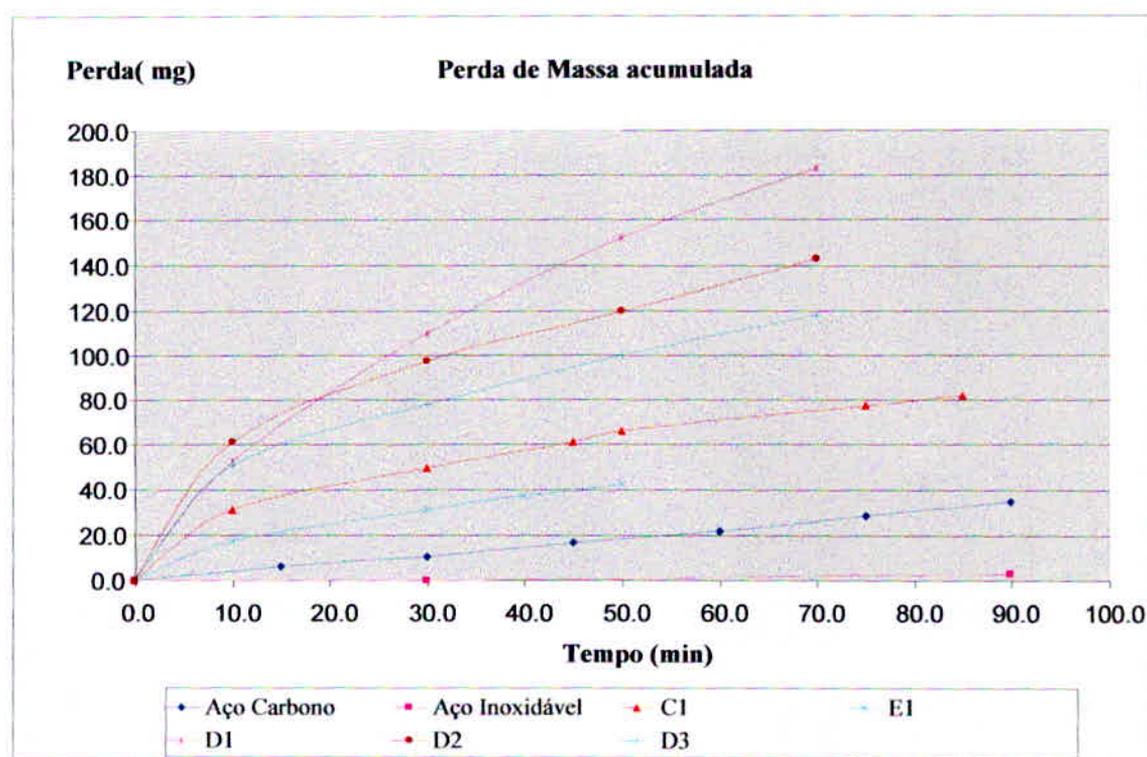


Gráfico 1. Perda de massa acumulada no ensaio de cavitação.
 Fonte: CEMIG - Gerência de Manutenção mecânica da Geração.

O Gráfico acima aponta que os aços apresentam maior resistência à cavitação induzida que os revestimentos poliméricos.

Como o objetivo do trabalho é realizar a comparação entre os revestimentos podemos destacar que o mais resistente foi o E1 do fabricante Eutetic, já o menos resistente por ter apresentado maior perda de massa foi o D1 do fabricante Devcon.

4.2 Resultados dos ensaios de aderência

A Tabela 4 mostra, além das cargas de ruptura, o tipo desta e, no caso de ruptura em dois tipos, um percentual aproximado estimado apenas visualmente, do tipo principal. O Anexo D mostra os corpos de prova antes e depois do ensaio.

Tabela 4. Medições efetuadas no ensaio de tração.

Material	CP	Carga de ruptura (kgf)			Tipo de ruptura
		Medido	Valor médio	Fabricante*	
D1	1	1882	1679,6	267	100% interface
	2	1477			100% interface
D2	1	496	393,3	302	100% revestimento
	2	291			100% interface
D3	1	1008	936,4	274	90% revestimento
	2	864			70 % revestimento
C1	1	1476	1554,3	3872 (75N/mm ²)	80% revestimento
	2	1694			70% revestimento
	3	1493			70% revestimento
E1	1	994	978,1	#	70% revestimento
	2	963			60% revestimento

Fonte: CEMIG - Gerência de Manutenção mecânica da Geração.

Observações:

- Valor não disponível. Na maioria dos casos, apenas a resistência ao cisalhamento e não a tração é fornecida pelo fabricante.

* - Considerou-se uma seção transversal de 506,70 mm², correspondente a um corpo de prova com diâmetro de 25,4 mm e 1N = 0,101972 kgf (previsto em catálogo).

Tipos de Ruptura: Na interface metal/revestimento ou somente no revestimento polimérico.

Na tabela acima é mostrado o valor da carga de ruptura esperada em função dos dados de catálogo do fabricante do revestimento, quando disponível.

O Gráfico 3 mostra os resultados do ensaio de aderência dos os materiais que não apresentaram falhas no ensaio de tração.

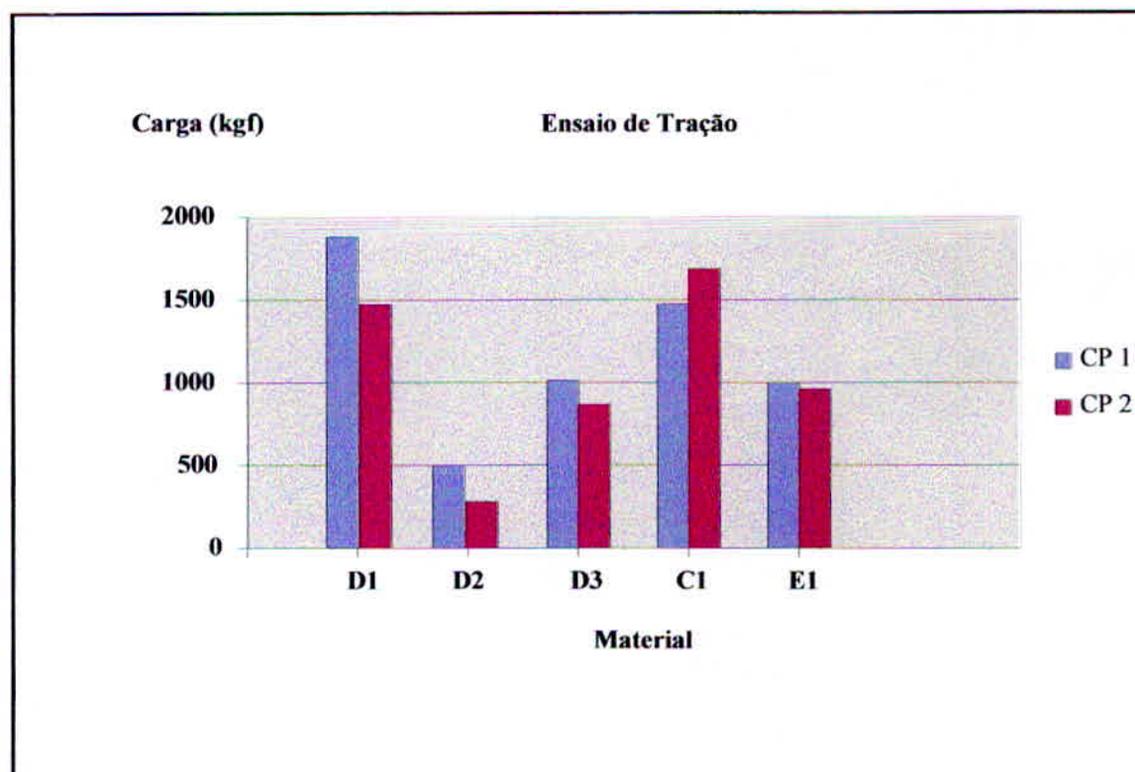


Gráfico 3 – Resultados do ensaio de aderência. Fonte: CEMIG - Gerência de Manutenção mecânica da Geração.

Observa-se que as cargas de ruptura variaram bastante de um revestimento para outro e mesmo para diferentes corpos de prova de um mesmo revestimento. Parte dessa variação pode ser explicada pelo tipo de ruptura, ou seja, quando ocorreu na interface metal/revestimento, associou-se o fato a má aderência da resina ao metal, já quando ocorreu no revestimento concluiu-se deficiência na resistência da resina.

O ensaio de tração define o revestimento D1 do fabricante Devcon como o que apresentou a melhor aderência e o revestimento D2, do mesmo fabricante como o de menor aderência.

4.3 Resultados dos ensaios de campo

Após os ensaios de laboratório, os materiais foram levados a campo e aplicados em pás diferentes da Turbina G1 da usina hidrelétrica de Gafanhoto, instalada no município de

Divinópolis - MG, pertencente à CEMIG. A primeira aplicação foi feita em 10/2005 pelos fornecedores em conjunto com os funcionários da CEMIG.

A Turbina escolhida foi uma Francis Vertical, com rotor de bronze, fabricante JAMES LEFFEL. A iniciativa de se recuperar esse rotor foi devido à complexidade de soldagem em bronze, além de que o rotor já não apresentava condições estruturais que permitisse uma boa soldagem.

O fato do material do rotor (bronze) não ser o mesmo dos corpos de prova utilizados nos laboratórios (aço 1020) pode interferir na aderência do revestimento, mas não invalida a comparação, uma vez que tanto a cavitação induzida quanto a cavitação real incidem diretamente na superfície revestida.

Depois de nove meses em operação, a turbina foi parada e os revestimentos examinados. Observou-se que a resina de melhor resistência foi a D1 - COMBO WEAR GUARD da Devcon.

Com relação aos demais revestimentos notou-se maiores desprendimentos de material polimérico e danos mais severos ao rotor, oriundos de erosão por cavitação.

Foi detectado que esses tipos de resinas não são indicadas para recuperação de trincas em rotores hidráulicos, sendo nesse caso necessária a recuperação por soldagem.

A análise da resina D1 pode ser feita sob duas pás distintas, que apresentaram resultados diferentes.

Na figura 9 pode-se observar um pequeno desgaste do revestimento, porém com a preservação mecânica da pá.



Figura 9. Pá nº4 da Turbina Francis (G1) – Usina de Gafanhoto – MG. Fonte: CEMIG - Gerência de Manutenção mecânica da Geração.

A aplicação desse tipo de material requer uma preparação da superfície de forma a eliminar ou reduzir a rugosidade superficial.

Já na figura 10 tanto o revestimento quanto o bronze da pá permaneceram intactos, isto indica um comportamento mais eficiente.



Figura 10. Pá nº6 da Turbina Francis (G1) – Usina de Gafanhoto – MG Fonte: CEMIG - Gerência de Manutenção mecânica da Geração.

O fato dos resultados para mesma resina não serem totalmente uniformes podem ser devido às pequenas diferenças na rugosidade superficial. A rugosidade interfere diretamente na aderência do revestimento.

Outro fator a ser considerado é a habilidade de quem realiza a aplicação perante o tempo de endurecimento da resina.

Em virtude do bom desempenho apresentado pela resina, decidiu-se fazer a aplicação em outras Turbinas da Usina. A resina utilizada posteriormente foi também da marca Devcon, porém com outra denominação: WEAR GUARD Fine Load. Esta resina possui as mesmas características mecânicas da COMBO WEAR FC aplicada no primeiro rotor em 2005. A mudança foi promovida devido à necessidade de um tempo maior para se aplicar o produto no rotor. Com a resina anterior, após a mistura dos seus componentes, o tempo para aplicação era de 5 a 10 minutos, com o novo produto o tempo aumentou para cerca de 20 minutos, facilitando o modelamento da resina, o que permitiu restaurar de maneira mais precisa a geometria das pás.

Desde então a Gerência de Manutenção Mecânica da CEMIG vem fazendo um acompanhamento anual nessas turbinas e os resultados podem ser considerados positivos.

A perspectiva da Gerência é ampliar a aplicação desse tipo de material visando reduzir os custos referentes aos processos de soldagem, até então utilizados e a aumentar o tempo de disponibilidade das máquinas diminuindo os períodos de paradas para manutenção.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os equipamentos utilizados e os sistemas montados funcionaram perfeitamente, permitindo que os ensaios de cavitação e de tração fossem realizados com certa facilidade e em acordo com as recomendações das normas ASTM G32 e ASTM C633.

Alguns dos materiais inicialmente selecionados para ensaio não puderam ser testados, como se viu na tabela 3. Na aplicação das resinas tentou-se seguir as instruções fornecidas.

O revestimento D1 COMBO WEAR FC, que apresentou o pior resultado no ensaio de cavitação induzida por ultrassom, foi o que obteve melhor desempenho prático.

Em geral, os resultados do ensaio de cavitação são expressos em perda de massa acumulada em função do tempo de exposição à cavitação e esse índice tem sido adequado para comparação de desempenho de revestimentos e ligas metálicas frente ao dano cavitacional. Uma comparação dos resultados apresentados pelos diferentes revestimentos poliméricos testados, em termos de perda de massa acumulada com o tempo, foi apresentada no gráfico 1. Neste gráfico foram incluídos resultados obtidos com corpos de prova de aço carbono ABNT 1020 trefilado e de revestimento aço inoxidável AISI 309 L15 depositado por soldagem com eletrodo revestido. Como se pôde observar, a perda de massa de todos os revestimentos testados é maior que a dos aços.

Contudo, os revestimentos poliméricos apresentam diferenças consideráveis de densidade, tanto entre si como com em relação aos aços. Assim, o parâmetro massa torna-se inadequado para comparação de desempenho dos materiais poliméricos e destes com materiais metálicos. Uma comparação mais útil, não influenciada pela diferença de densidade, pode ser feita em termos de perda de volume, ou de espessura, em função do tempo sob cavitação. Para a conversão dos resultados em perda de espessura, utilizou-se a equação 1, mostrada a seguir.

$$\text{Perda de espessura} = \frac{\text{Perda de massa}}{\text{Área} \cdot \text{Densidade}} \quad (\text{Eq. 1})$$

Os valores de densidade dos diversos materiais foram fornecidos pelos fabricantes. Foram utilizados ainda os seguintes dados: diâmetro do corpo de prova igual a 16,10 mm e área do corpo de prova equivalente a 203,5831 mm².

O Gráfico 2 mostra os resultados dos ensaios de cavitação anteriores convertidos para perda de espessura acumulada em função do tempo sob ação da cavitação.

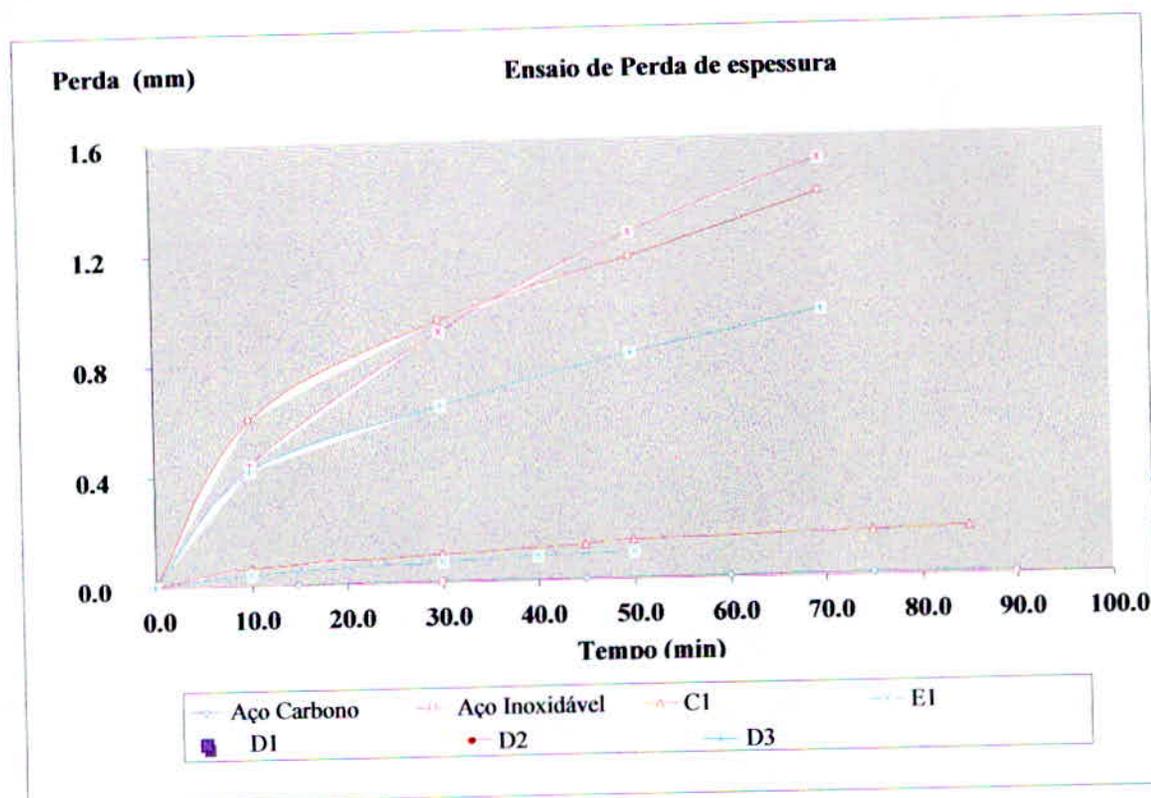


Gráfico 2 – Perda de espessura acumulada no ensaio de cavitação.
Fonte: CEMIG - Gerência de Manutenção mecânica da Geração.

Pode-se observar neste caso que o desempenho dos materiais poliméricos continua inferior ao dos materiais metálicos e há certa mudança de desempenho, porém o mais resistente continua sendo o material E1 e o menos resistente o material D1.

Segundo relatórios técnicos de operação e manutenção das Turbinas reparadas com revestimentos poliméricos na Usina de Gafanhoto, as mesmas não apresentaram perda de rendimento nem tampouco alterações referentes à vibração e/ou desbalanceamento.

CONCLUSÃO

Com relação aos objetivos propostos por este trabalho, os resultados obtidos em laboratórios foram extremamente válidos como parâmetros indicativos, definindo quais materiais poderiam ser utilizados em campo; e comparativos, estabelecendo valores de resistência à cavitação induzida e aderência dos revestimentos testados.

As divergências entre os resultados laboratoriais e os de campo podem ser explicadas por diversos fatores. Dentre eles o principal é o fato de que nem todas as variáveis de um processo real puderam ser aplicadas ao ensaio teórico, ou seja, a vibração induzida em uma ponta metálica não traduz a realidade de uma implosão de milhares de bolhas de ar oriundas de um complexo comportamento hidrodinâmico.

O eficiente desempenho da resina DI (DEVCON WEAR GUARD Fine Load), aplicada na Turbina Francis G1 da Usina de Gafanhoto, possibilitou à CEMIG uma redução de custos com o procedimento de recuperação e um aumento do tempo de disponibilidade dessa unidade geradora. O procedimento foi tão bem aceito que a empresa estendeu tal método às demais Usinas, onde existem rotores similares.

Esse procedimento não substitui o de soldagem para rotores fabricados por aço carbono ou inoxidável, sendo este processo predominantemente adotado não só pela CEMIG, mas como pela maioria das empresas do gênero.

Embora os testes de campo tenham demonstrado uma boa resistência à cavitação pelo material polimérico utilizado, vale ressaltar que o mesmo não é indicado para recuperação de trincas. Portanto, mesmo em rotores de bronze, tal manutenção deve ser feita por soldagem.

Com este trabalho tem-se embasamento técnico para utilização de materiais poliméricos em recuperação de rotores de bronze danificados por cavitação, todavia deve-se ressaltar que cada tipo de turbina hidráulica possui parâmetros e variáveis distintas. Para garantir a eficácia de qualquer procedimento de recuperação em rotores hidráulicos sugere-se realizar um estudo de caso detalhado.

**SISTEMA DE BIBLIOTECAS
FEPESMIG**

BIBLIOTECA MONSENHOR DOMINGOS PRADO FONSECA

BIBLIOGRAFIA

ASCHENBRENNER, T.; MOSER, W.; OTTO, A. (2006). **Classification of Vortex and Cavitation Phenomena and Assessment of CFD Prediction Capabilities**. Yokohama. Artigo apresentado no 23rd IAHR Symposium, Japão, 2006;

BARBOSA, A. A. (1991). **Vórtice de Núcleo em Turbinas Francis – Estudo Teórico Experimental**. Itajubá, 94 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Federal de Itajubá;

CALAINHO J. A. L. et al. (1999). **Cavitação em Turbinas Hidráulicas do Tipo Francis e Kaplan no Brasil. Apresentado no Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Foz do Iguaçu;

Cemig Geração e Transmissão S.A, Relatórios e informações técnicas;

FILHO, D. S. (2003). **Dimensionamento de Usinas Hidroelétricas Através de Técnicas de Otimização Evolutiva**. São Carlos, 398 p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

FOX, R. W; Mcdonald, A. T., PRITCHARD, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Tradução Ricardo Nicolau Nassar koury; Geraldo Augusto Campolina. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 382 p.

VAZ, C. T (2004). **Avaliação da resistência à erosão por cavitação do metal de soldas produzidas com consumível tipo 13%Cr - 4%Ni - 0,4%Mo**. Belo Horizonte, 84 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais.

RIBEIRO, J.P. (2007). Uma investigação de grandezas hidrodinâmicas no tubo de sucção de turbinas com rotor Francis operando em cargas variáveis. Dissertação (Mestrado), Pós-Graduação em Engenharia da Energia, Universidade Federal de Itajubá. 86 p.

Schneider Motobomba - Manual Técnico. Disponível em <http://www.schneider.ind.br>. Acesso em 25/10/2011 às 14h35min.

Usina de Itaipu - PR. Fonte: Galeria do Fotógrafo Caio Coronel. Disponível em: <http://www.aeconomiado brasil.com.br>. Acesso em 19/10/2010 às 21h00min.

Wikilingue – Turbinas Francis. Disponível em <http://pt.wikilingue.com/es/Ficheiro>. Acesso em 22/10/2011 às 21h30min.

ANEXO A

As Figuras abaixo retratam o dispositivo adotado para resfriamento e controle da temperatura da água utilizada no ensaio de cavitação induzida.

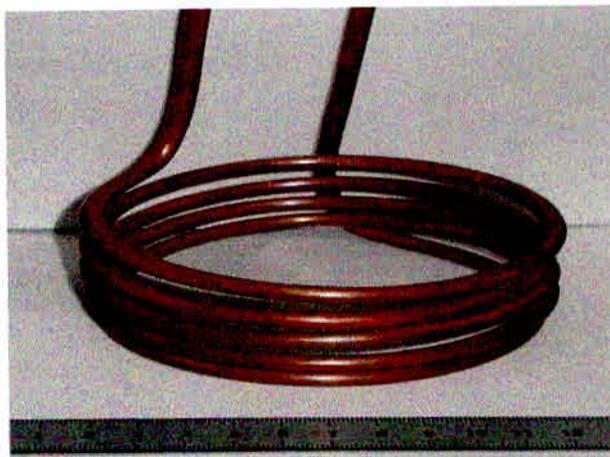


Figura 11. Sistema de refrigeração - serpentina de cobre.
Fonte: CEMIG - Gerência de Manutenção mecânica da Geração.



Figura 12. Sistema de refrigeração - conjunto completo.
Fonte: CEMIG - Gerência de Manutenção mecânica da Geração.

Durante o ensaio em questão a água permaneceu estabilizada em 20°C garantindo a confiabilidade da comparação nos resultados para os diferentes corpos de prova.

ANEXO B

As figuras presentes nesse Anexo mostram o equipamento utilizado para a realização do ensaio de cavitação induzida.



Figura 13. Equipamento para ensaio de cavitação TELSONIC console e painel de controle.
Fonte: CEMIG - Gerência de Manutenção mecânica da Geração.



Figura 14. Cabeçote de teste.
Fonte: CEMIG - Gerência de Manutenção mecânica da Geração.

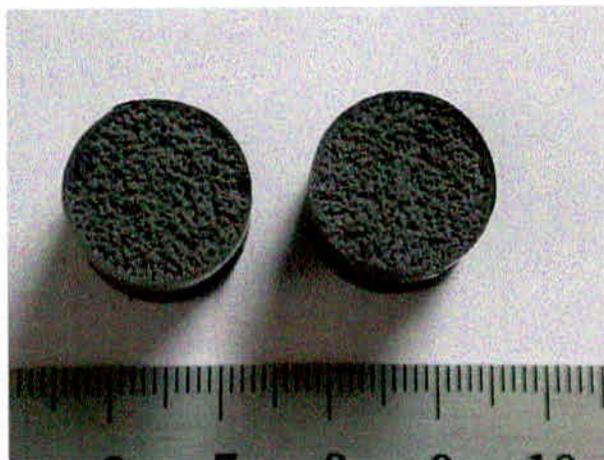
Esse ensaio foi baseado na norma G32 - 1985 e foi considerado aprovado para os objetivos desse trabalho.

ANEXO C

O Anexo C contém as fotos dos corpos de prova utilizados no ensaio de cavitação induzida.



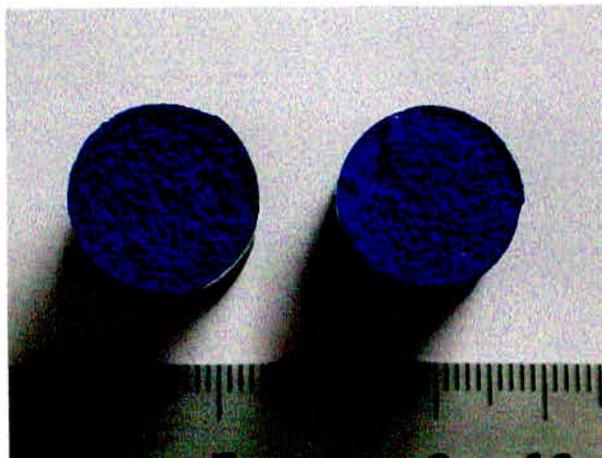
Figuras 15. Aspectos do corpo de prova D1 após o ensaio de cavitação.
Fonte: CEMIG - Gerência de Manutenção mecânica da Geração.



Figuras 16. Aspectos do corpo de prova D2 após o ensaio de cavitação.
Fonte: CEMIG - Gerência de Manutenção mecânica da Geração.

Os corpos de prova utilizados foram fornecidos pelos fabricantes dos revestimentos poliméricos utilizados nos testes laboratoriais.

Esse ensaio foi quantificado através da perda de massa dos revestimentos aplicados.



Figuras 17. Aspectos do corpo de prova Clapós o ensaio de cavitação.
Fonte: CEMIG - Gerência de Manutenção mecânica da Geração.



Figuras 18. Aspectos do corpo de prova Clapós o ensaio de cavitação.
Fonte: CEMIG - Gerência de Manutenção mecânica da Geração.



Figuras 18. Aspectos do corpo de prova Clapós o ensaio de cavitação.
Fonte: CEMIG - Gerência de Manutenção mecânica da Geração.

Após o ensaio de cavitação induzida observou-se os danos físicos que tal fenômeno é capaz de causar ao metal.

ANEXO D

O Anexo D apresenta os corpos de prova antes e depois do ensaio de tração. Esse ensaio definiu a aderência do revestimento à superfície do corpo de prova.

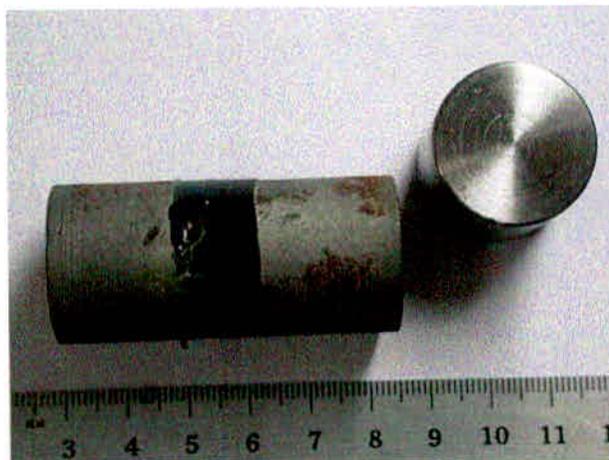


Figura 20. Corpo de prova antes do ensaio de tração.
Fonte: CEMIG - Gerência de Manutenção mecânica da Geração.



Figura 21. Corpos de prova após o ensaio de tração.
Fonte: CEMIG - Gerência de Manutenção mecânica da Geração.

O corpo de prova com revestimento mais escuro se rompeu na interface metal/revestimento e o mais claro principalmente no revestimento.

ANEXO E

A Figura 22 mostra um rotor Francis suspenso. Nota-se claramente a grande dimensão da Usina de Itaipu – PR.

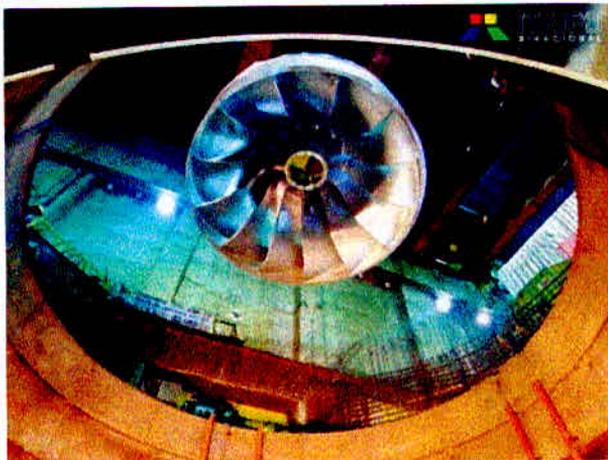


Figura 22. Rotor Francis – Usina de Itaipu - PR.

Fonte: Galeria do Fotógrafo Caio Coronel. Disponível em: www.aeconomiadobrasil.com.br

A Figura 23 destaca o bico injetor de uma Turbina Pelton. Esse componente emite o jato de água que dá origem ao movimento de rotação do rotor.

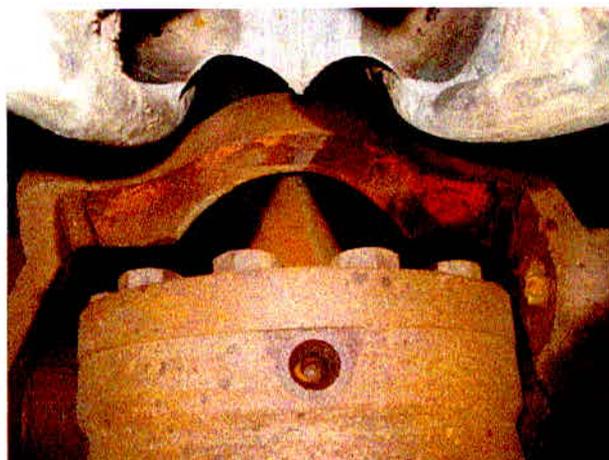


Figura 23. Turbina Pelton PCH São Bernardo – MG. Detalhe do bico injetor.

Fonte: o autor.

A Turbina em questão é provida de apenas um bico injetor. Dependendo da configuração de um Rotor Pelton podem ser encontrados vários bicos, garantindo maiores velocidades de rotação da Turbina.