

RESISTÊNCIA À CAVITAÇÃO DE PÁS DE TURBINAS HIDRÁULICAS REVESTIDAS COM POLIURETANO¹

Mário César Pelizer²

Fábio Cordeiro dos Santos³

Alberto Arnaldo Raslan⁴

Resumo

Neste trabalho, o objetivo foi o de avaliar a resistência à cavitação e aderência de revestimentos de poliuretano em pás de uma das turbinas hidráulicas da Usina Luiz Carlos Barreto de Carvalho, do sistema Furnas. Amostras de aço-carbono foram revestidas com poliuretano por aspersão. A aderência do revestimento foi avaliada pelo método ASTM D-429 / B. Elas foram, também, submetidas a testes de cavitação e de resistência ao descolamento com jato d'água sob pressão. Alguns defeitos foram artificialmente introduzidos nos revestimentos para avaliar as suas influencias. A caracterização da superfície cavitada do poliuretano foi feita através de microscopia eletrônica de varredura e interferometria laser. Os resultados mostraram uma elevada resistência à cavitação, após 80h de ensaio. Também mostraram uma satisfatória aderência do revestimento de poliuretano ao substrato de aço-carbono. Os testes com jato d'água, com pressão de 15 bar, não provocaram maiores danos na aderência do revestimento ao substrato. Um descolamento localizado ocorre quando defeitos, artificialmente provocados, expõem a interface do substrato com o revestimento à ação do jato d'água. A técnica de aspersão viabilizou a aplicação do revestimento de poliuretano nas pás da turbina. Contudo, após 3 meses de operação, houve o descolamento do revestimento, indicando que melhorias necessitam ser introduzidas no processo para que se possa obter um melhor desempenho.

Palavras-chave: Cavitação; Poliuretano; Aderência; Revestimento.

CAVITATION RESISTANCE OF HYDRAULIC TURBINES SHOVELS COATED WITH POLYURETHANE

Abstract

In this work, the main objective was the cavitation resistance evaluation and coating adhesion of polyurethane of turbines hydraulic shovels from Luiz Carlos Barreto de Carvalho's Hydroelectric Power Plant (Furnas System). Carbon steel samples were coated with polyurethane using aspersion. The adhesion of the coating was evaluated by the ASTM D-429/B method. These samples were also submitted to cavitation and high pressure water jet resistance tests. Some defects were artificially introduced in the coatings to evaluate their influences. The cavitated surface characterization of the polyurethane was obtained by SEM (Scanning Electronic microscopy) and laser interferometry. The results showed a high cavitation resistance, after 80 hours of testing. They also showed a satisfactory adhesion of the polyurethane coating to the carbon steel parent. The water jet tests, with 15bar of pressure, have not caused high damages on the coating adhesion of the parent material. A local displacement occurs when defects, artificially produced, expose the parent material interface with the coating to the water jet action. The aspersion technique has made possible the application of the polyurethane in the turbines shovels. However, after 3 months of operation, occurred the displacement the coating, which indicates that the process must be improved to be obtained better performance.

Key words: Cavitation; Polyurethane; Adhesion; Coating.

¹ Contribuição a ser apresentada no 61º Congresso Anual da ABM, 24 a 27 de julho de 2006, Hotel Intercontinental, Rio de Janeiro - RJ - Brasil.

² Engenheiro Mecânico Mestre - Furnas Centrais Elétricas S.A. (mpelizer@furnas.com.br)

³ Químico - Laboratório C.Q. e Desenvolvimento / Comercial e Industrial Petropasy Ltda (fabio.santos@petropasy.com.br)

⁴ Professor Dr., LTM / FEMEC / UFU. (ltm-raslan@ufu.br)

INTRODUÇÃO

O fenômeno de cavitação é basicamente entendido, como a seqüência dos eventos de formação de bolhas de vapor, com o seu posterior desenvolvimento, implosão ou explosão, tendo como origem a queda de pressão associada a pequenos núcleos existentes nos líquidos. Ao ciclo de vaporização-colapso, onde os níveis de pressão atingidos são da ordem de centenas de MPa, ou até de GPa, estão associados os efeitos que normalmente são indesejáveis e agressivos, tais como: erosão de contornos sólidos, vibrações e ruídos excessivos, diminuição da capacidade dos vertedouros de usinas hidrelétricas e diminuição da eficiência de turbinas hidráulicas, com conseqüente queda de potência.

Segundo Calanho et al.,⁽¹⁾ 92% da energia elétrica produzida no Brasil é de origem hidráulica. O potencial hidráulico a ser explorado é de grande envergadura, em torno de 206.992 MW. As usinas instaladas têm operado em seus limites máximos, o que tem contribuído para um incremento de ocorrência de cavitação nas turbinas hidráulicas. Levantamentos efetuados pelo CEPEL (Centro de Pesquisa de Energia Elétrica da Eletrobrás) mostraram que os gastos com a recuperação das turbinas hidráulicas no Brasil foram, em 1991, da ordem de US\$ 13,000,000.00 (treze milhões de dólares), isto considerando apenas despesas com mão-de-obra e materiais empregados nos reparos.

O método tradicionalmente empregado para recuperação de pás de turbinas degradadas por cavitação é o de revestimento com aços inoxidáveis, depositados por processos de soldagem. Segundo Calanho et al.,⁽¹⁾ as turbinas da usina de Itaipu, com 740 MW de potência nominal unitária, com rotor de 300 t de aço soldado ASTM A 643 Gr.A, sofreram intervenções para reparo, em 1995 na unidade 2 e em 1996 na unidade 12, onde foram depositados 980 e 950 Kg de eletrodos respectivamente. Nessa ocasião (1995), foi substituído o tradicional eletrodo revestido pelo processo de arame tubular, o que representou um ganho de produtividade dos serviços da ordem de 3 vezes em relação ao método anterior de reparo.

A resistência à cavitação de polímeros, o poliuretano em particular, foi avaliada por Li e Mao⁽²⁾ e Camargo et al.⁽³⁾ Ambos demonstram que o poliuretano apresenta um bom potencial como material resistente à cavitação.

Neste trabalho, o objetivo foi o de avaliar a viabilidade técnica e econômica de se empregar o poliuretano como revestimento de pás de turbinas hidráulicas, como alternativa aos processos de soldagem tradicionalmente utilizados.

METODOLOGIA

Uma amostra do material foi retirada de uma das pás de uma das turbinas da Usina Luiz Carlos Barreto de Carvalho – Furnas/MG. A amostra, após preparação metalográfica, foi submetida a análise microestrutural e dureza Vickers.

Para aplicação dos revestimentos de poliuretano, algumas barras de aço-carbono foram preparadas com as dimensões aproximadas de: comprimento = 33 mm, largura = 19 mm e espessura = 9 mm. Após o jateamento com granalha de aço G14 de uma das duas superfícies de maior área, foram aplicados, por aspersão, os revestimentos de poliuretano com espessura aproximada de 3 mm. O tempo de cura foi de 72 horas à temperatura ambiente. Os testes de aderência foram feitos de acordo com a norma ASTM D-429 / B. O ensaio consiste em depositar o filme de poliuretano sobre um substrato de aço-carbono e realizar um dobramento mecânico

do conjunto filme-placa em um ângulo de 90° , no centro da placa de 60mm de comprimento. A placa possui 25mm de largura por 1,5mm de espessura. Os resultados, expressos em N/mm, são obtidos medindo-se a força cisalhante necessária para separar um elastômero de uma superfície de metal, numa velocidade de 50mm/minuto. Os dados obtidos indicam a tensão de adesão ao longo de uma linha através da largura da tira de elastômero que está sendo separada da placa metálica.

Os testes de cavitação e de jato d'água foram efetuados na superfície como revestida, após um tempo mínimo de cura de 120 horas à temperatura ambiente e usando água de torneira. Neste caso, procurou-se realizar os testes na condição mais próxima possível das situações reais de trabalho.

O ensaio de cavitação foi feito em um equipamento com 1790 W de potência, frequência de vibração de 20 KHz, amplitude de vibração de $45 \mu\text{m}$ (pico a pico), sonotrodo de titânio e ferramenta de aço inoxidável austenítico. A norma seguida foi a ASTM G32-98,⁽⁴⁾ modificada para o método indireto. A duração do teste foi de 80 horas. Por ser demasiadamente pequeno, o desgaste não foi avaliado por perda de massa ou de volume. A avaliação do desgaste foi realizada por microscopia eletrônica de varredura e perfilometria laser. Foi traçado um perfil linear ao longo de 20 mm, com 1000 pontos / mm. A topografia de superfície das amostras usinadas foi mensurada em termos dos parâmetros Ra, Rq (Ra é a média aritmética do desvio do perfil em relação a sua linha média ou de centro e Rq é raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos desvios do perfil em relação ao plano médio).

Os testes com jato d'água foram efetuados em equipamento desenvolvido no LTM-UFU.⁽⁵⁾ A pressão utilizada foi de 15 bar, por um tempo de 12h. Os ângulos de incidência do jato d'água foram de 90° e 45° . Em duas amostras, defeitos foram artificialmente introduzidos: um na forma de bolha (Figura 1-a) e outra na forma de sulco (Figura 1-b). Em ambos os casos, o substrato ficou parcialmente exposto.



Figura 1. Condição das amostras testadas com jato d'água: com defeitos na forma de bolha (a) e sulco (b).

As dimensões aproximadas dos defeitos introduzidos foram de um diâmetro de 8 mm para a bolha (Figura 1-a) e largura de 8 mm para o sulco (1-b).

A pressão de 15 bar utilizada nos testes com jato d'água simulam o impacto de uma queda d'água de, aproximadamente, 150 m. Este valor está acima da altura dos projetos da maioria das usinas hidroelétricas brasileiras, que se situam abaixo de 100m.

O ângulo de incidência de 90° é o observado na prática. Por segurança, testou-se uma condição mais adversa, ou seja, com ângulo de 45°. Para testar condições ainda mais adversas, foram introduzidos defeitos no revestimento, deixando o substrato parcialmente exposto. Desta forma, tornou-se possível avaliar um eventual desprendimento do revestimento pela ação do jato d'água, no caso de operadores cometerem falhas grosseiras na aplicação, em campo, do revestimento.

As dimensões das amostras de aço-carbono foram definidas a partir da tolerância dimensional dos dispositivos porta-amostra dos equipamentos usados nos ensaios de cavitação e jato d'água.

O jateamento foi realizado com o intuito de garantir a maior adesividade entre o revestimento e o substrato.

A espessura mínima de revestimento que pode ser obtida no pelo processo de aspersão empregado é de, aproximadamente, 1mm. A espessura de 3mm foi definida como sendo, em um primeiro momento, os requisitos de menor custo – benefício – segurança.

Para a aplicação pretendida, ou seja, revestimentos de pás de uma turbina hidráulica, a técnica de aspersão apresenta alta competitividade. O poliuretano pode ser aplicado por esta técnica.

Os ensaios de aderência possibilitaram a seleção dos parâmetros operacionais que forneceram a melhor aderência do revestimento ao substrato

A avaliação das amostras após os testes foi feita por inspeção visual.

Para executar o trabalho de campo, o funcionamento de uma das turbinas foi paralisado no período de julho/agosto de 2005. A usina possui 6 unidades geradoras com turbinas Francis de eixo vertical e rotores de 5,8m de diâmetro. A potência nominal é de 175 MW, com rotação de 112,5rpm. A barragem possui uma altura máxima de 92m, queda nominal de 60,8m com volume de 4.290.000m³. Após processo de recobrimento com solda, o poliuretano foi aplicado sobre uma região da superfície das pás, por aspersão. Esta região foi escolhida por apresentar maior susceptibilidade ao desgaste por cavitação. Não foi efetuado jateamento prévio com abrasivo para aplicação do poliuretano, mas lixamento com lixadeira elétrica com disco de grão 36. Após a aplicação do poliuretano, o tempo de cura foi de, aproximadamente, 72 horas à temperatura ambiente.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise micrográfica revelou que o material usado na fabricação das pás é um aço com baixo teor de carbono. A dureza Vickers determinada foi de 137,2 ± 1,8 Kgf/mm².

O ensaio de cavitação mostrou que, mesmo após 80h de teste, não ocorre perda de massa ou variação de volume na região cavitada. Foi observada apenas uma ampliação no diâmetro das microbolhas previamente existentes, como mostra a Figura 3.

Na Tabela 1 são apresentados os dados de rugosidade da amostra submetida à cavitação. Observa-se que a cavitação provoca um aumento significativo na rugosidade do poliuretano.

A aderência do revestimento ao substrato não sofreu alteração, tendo em vista que a espessura relativamente grande de 3 mm do revestimento não possibilita que as pressões exercidas na superfície pela explosão das micro-bolhas de ar afetem a interface revestimento/substrato.

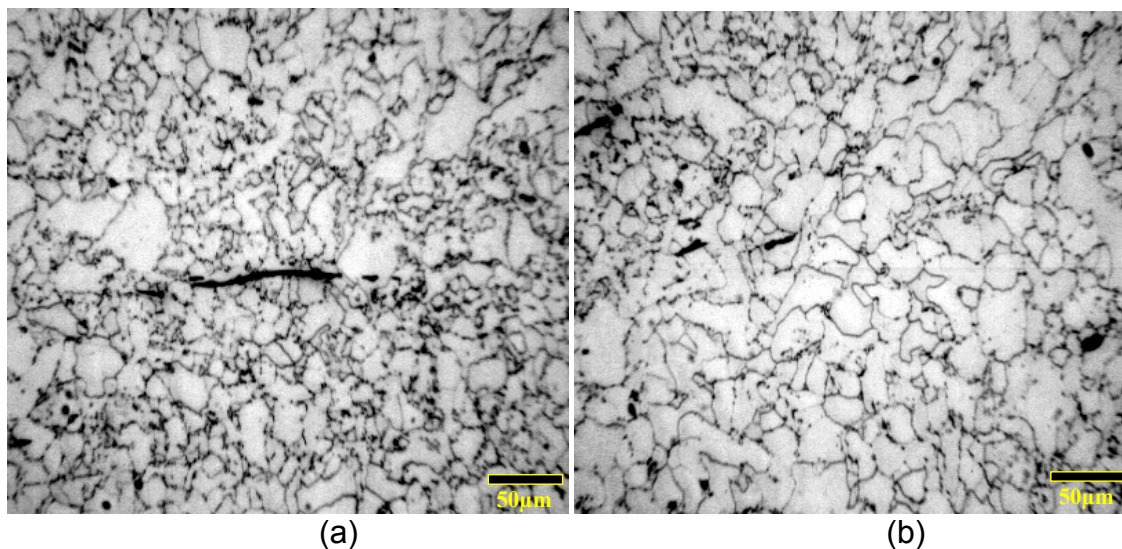


Figura 2. Microestrutura do aço de uma das pás da turbina: (a) seção longitudinal e (b) seção transversal. Ferrita e perlita. Microscopia ótica.

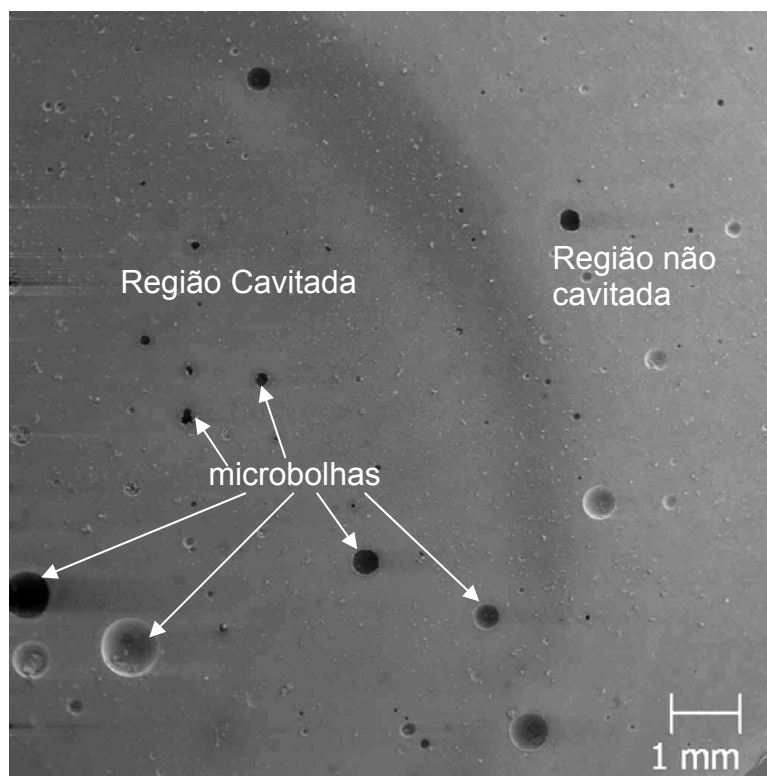


Figura 3. Morfologia da superfície de poliuretano após 80 h sob cavitação. MEV.

Tabela 1. Parâmetros de rugosidade da amostra submetida à cavitação.

	Região cavitada (μm)	Região não cavitada (μm)
R_a	$0,80 \pm 0,03$	$0,40 \pm 0,02$
R_q	$2,40 \pm 0,41$	$0,71 \pm 0,13$
R_{max}	$47,60 \pm 4,24$	$13,17 \pm 4,37$

Na amostra como revestida, com ângulos de incidência do jato d'água de 90° e 45°, não se observou desprendimento ou descolamento do revestimento.

Nas amostras em que foram introduzidos defeitos, também não se observou desprendimento do revestimento. Contudo, um descolamento foi verificado nas bordas da interface dos defeitos com o substrato de aço. Notou-se, ainda, que o efeito é mais pronunciado com ângulo de incidência de 45° e com defeito na forma de sulco. Ao se incidir o jato com ângulo de 90°, a força do impacto ocorre diretamente sobre o substrato e espalha-se, perdendo pressão. Desta forma, não há um risco sério de desprendimento do revestimento. Com ângulo de 45°, o impacto incide diretamente na interface e aderência fica comprometida, principalmente com o defeito na forma de sulco, em que a área exposta é maior. Portanto, cuidados devem ser tomados na aplicação do revestimento no sentido de evitar que essa configuração de defeito ocorra. Deve-se ressaltar que estas são situações bastante forçadas e que, dificilmente, por maior que seja a imperícia na aplicação do revestimento, devesse ocorrer, na prática.

A Figura 4-a ilustra o estado de degradação por cavitação no aço-carbono. Observa-se que o desgaste não é uniforme. A Figura 4-b ilustra a degradação de um recobrimento feito com aço inoxidável austenítico. A Figura 5-a ilustra o revestimento de poliuretano aplicado nas pás. A Figura 5-b ilustra o estado do revestimento após 3 meses de operação da turbina.

Nota-se na Figura 5-b que, infelizmente, houve descolamento da camada de revestimento. Este insucesso pode ser atribuído a três fatores. Primeiro, a pouca adesividade do poliuretano no aço inoxidável. A adesão ficou comprometida pelo fato da superfície não ter sido previamente jateada com abrasivo. Segundo, a pá não foi revestida por inteiro, o que deixou uma interface exposta à ação da água, facilitando o descolamento e posterior arrancamento do poliuretano e, finalmente, o pouco tempo para cura, de somente 3 dias.

Com base nos dados observados no campo, torna-se imperativo a adoção de algumas medidas corretivas de melhoria da adesividade, como:

- jateamento com abrasivo da superfície;
- aplicação de uma camada prévia de adesivo selecionado sobre a superfície jateada;
- aplicação do poliuretano por aspersão;
- aumentar o tempo de cura e
- fixação mecânica do revestimento nas pás.

Acredita-se que, dessa forma, aumentar-se-ão as chances para se obter sucesso com o uso desta técnica na recuperação de pás de turbinas de usinas hidroelétricas.

A economia de recursos que poderá advir, caso se consiga sucesso com esta técnica, poderá ser considerável, no que diz respeito ao tempo de parada para manutenção, matéria prima, durabilidade, mão-de-obra, etc.

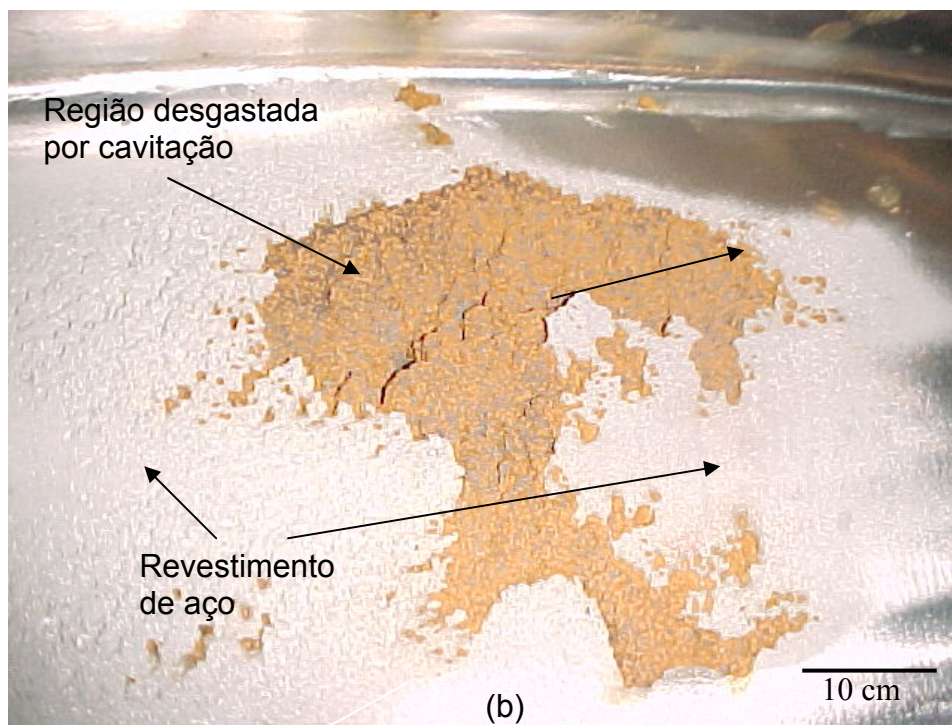
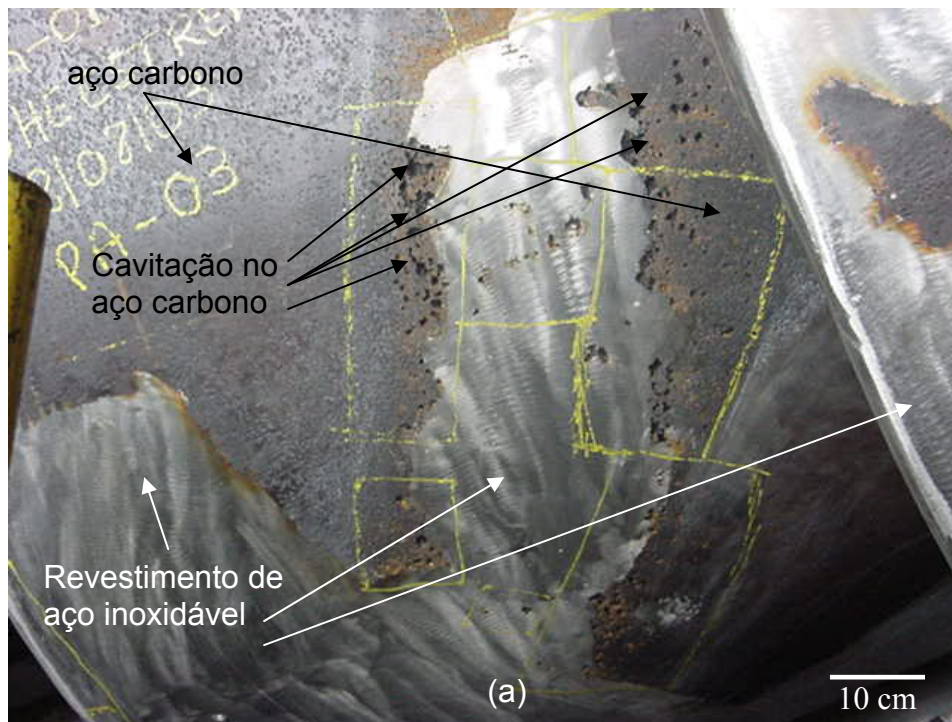


Figura 4. Desgaste por cavitação nas pás da turbina: (a) no aço-carbono e (b) no recobrimento de aço inoxidável.

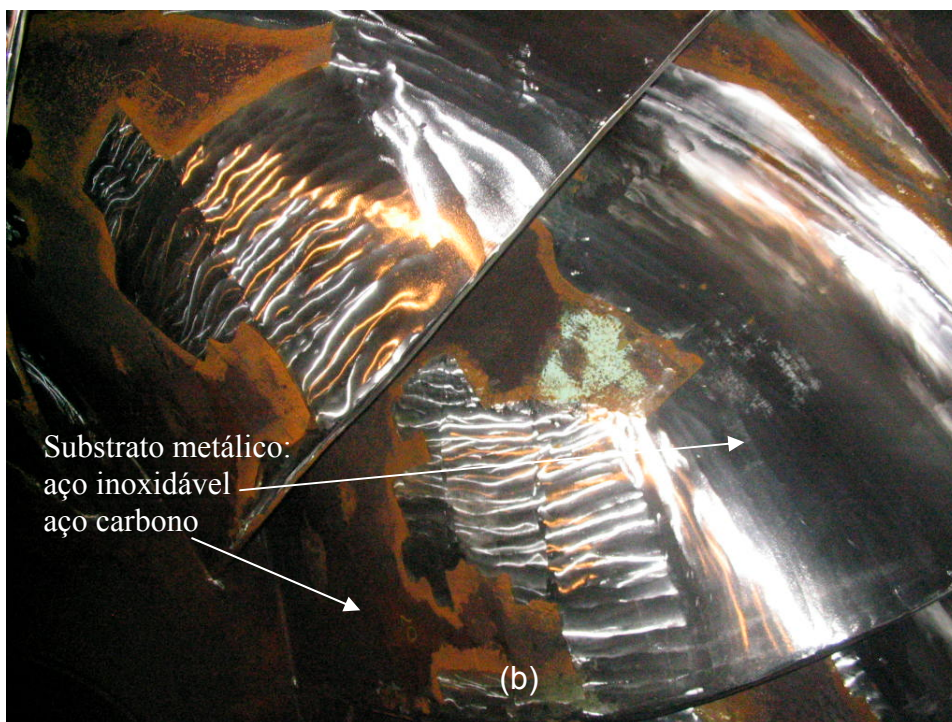
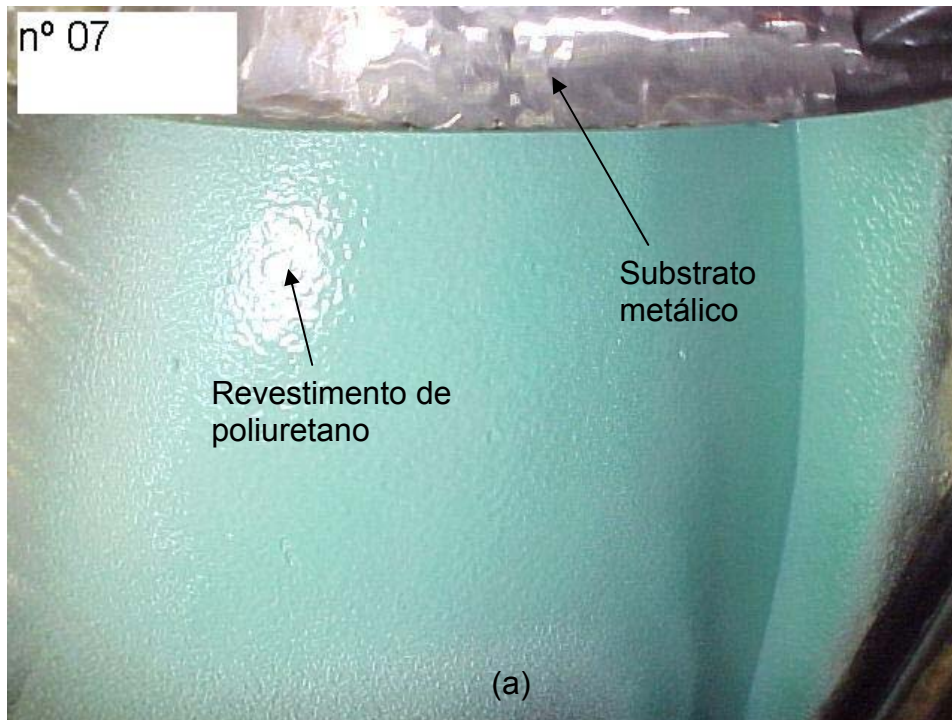


Figura 5. Revestimento de poliuretano: (a) após a aplicação e (b) após 3 meses de operação da turbina.

CONCLUSÃO

A partir de ensaios de aderência, cavitação e pressão com jato d'água em amostras de aço-carbono revestidas com poliuretano, pode-se concluir que:

- fosse selecionado um processo de aplicação por aspersão que propiciou a aderência do poliuretano ao substrato de aço-carbono;
- o poliuretano mostrou-se resistente à cavitação, após 80h de teste;
- o revestimento não se desprendeu ao ser submetido a pressões de jato d'água de 15 bar, com ângulos de incidência de 90^o e 45^o. Contudo, a presença de defeitos no revestimento comprometem a aderência do mesmo ao substrato e
- em testes de campo realizados, após 3 meses de operação, verificou-se o desprendimento do revestimento de poliuretano nas palhetas de uma das turbinas da usina hidroelétrica Luiz Carlos Barreto de Carvalho, do sistema Furnas. Melhorias no processo, principalmente no que diz respeito à aderência revestimento / substrato, precisam ser implementadas, caso se queira obter sucesso no empreendimento.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Bruno C. Camargo, Aurélio A. Pinto, Flavia C. Miranda e Hermes P.S. de Oliveira, estagiários de iniciação científica do LTM/UFU.

REFERÊNCIAS

- 1 Calainho, J.A.L.; Horta, C.A.; Gonçalves, C. e Lomônaco, F.G. Cavitação em Turbinas Hidráulicas do Tipo Francis e Kaplan no Brasil. In: XIV SNTPEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 1997, Belém / PA. **Anais...**Belém, 1997, CD-Room.
- 2 Li, Y. and Mao, S. Study on the Properties and Application of Epoxy / Polyurethane Semi-interpenetrating Polymer Networks. *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 61, p. 2059 – 2063, 1996.
- 3 Camargo, B. C.; Pinto, A.A.; Miranda, F.C. e Raslan, A. A. Resistência ao Desgaste por Cavitação de Polímeros. In: 61^o Congresso Anual da ABM, 2006, Rio de Janeiro /RJ. **Anais...** Rio de Janeiro, 2006, CD-Room.
- 4 ASTM G32-98, “Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus”, American Society for Testing and Materials, 1998.
- 5 Paes, M.T.P., Morais da Silva, J.O., Souza, F.J., Franco Jr., R.J. e Franco, S.D.. Desenvolvimento e Avaliação de Infra-estrutura para Estudo da Corrosão-Erosão em Equipamentos da Indústria Petrolífera. In: XXII Congresso Brasileiro de Corrosão, 2002, Salvador/BA. **Anais...**Salvador, 2002, CD-Room.