

# RESISTÊNCIA AO DESGASTE POR CAVITAÇÃO DE POLÍMEROS<sup>1</sup>

Aurélio Alves Pinto<sup>2</sup>  
Flávia Cavalcanti Miranda<sup>3</sup>  
Bruno Costa Camargo<sup>4</sup>  
Alberto Arnaldo Raslan<sup>5</sup>

## Resumo

A cavitação é um processo de desgaste por fadiga em que o material está sujeito a forças consecutivas no processo de colapso de bolhas de gás ou vapor próximo à sua superfície. Entre os materiais metálicos empregados na fabricação de componentes mecânicos sujeitos à cavitação, destacam-se os aços inoxidáveis e os aços nitretados. Alguns materiais poliméricos possuem um conjunto de propriedades mecânicas, tais como alta resistência ao desgaste por abrasão, baixo coeficiente de atrito, boa elasticidade, resistência a impacto e boa resiliência, que os tornam promissores em termos de resistência à cavitação. O objetivo do presente trabalho é avaliar a resistência à cavitação de poliuretano e nylon com vistas a algumas aplicações que os tornem competitivos com os materiais metálicos tradicionais. Os ensaios de cavitação foram realizados segundo a norma da ASTM G32-98, modificada para o método indireto, em um equipamento Sonic-Mill com potência de 1790 W, frequência de vibração de  $19,3 \pm 0,1$  KHz, amplitude de vibração de 45  $\mu$ m (pico a pico) e sonotrodo de titânio. A ferramenta foi confeccionada em aço inoxidável austenítico. O tempo total dos ensaios foi de 48 horas, sendo 12 horas para o nylon e 36 horas para o poliuretano. A caracterização das amostras foi feita através de microscopia eletrônica de varredura e interferometria laser. Os resultados mostraram que, tanto o poliuretano quanto o nylon, são altamente resistentes à cavitação e com grande potencial de uso como revestimentos de pás de turbinas hidráulicas.

**Palavras-chave:** Desgaste; Cavitação; Poliuretano; Nylon.

## CAVITATION WEAR RESISTANCE OF POLIMERS

### Abstract

Cavitation is a fatigue wear process involving consecutive forces in the collapse of gas or vapour bubbles next to the surface. Amongst the metallic materials, stainless steels and nitrated steels have a great use in the manufacturing of components under cavitation. Some polymeric materials present good mechanical properties, such as low friction coefficient and good elasticity, resilience and impact resistance, which make them good candidates to withstand cavitation. This paper aims to evaluate the cavitation resistance of polyurethane and nylon. Applications where they could compete with metallic materials are investigated. The cavitation tests were carried out according to the ASTM G32-98 standard, modified as an indirect method. A USM equipment with a titanium sonotrode was used, model Sonic-Mill, with a power of 1790 W, a frequency of 19,3  $\pm$  0,1 KHz, and a vibration amplitude of 45  $\mu$ m (peak to peak). A stainless steel tool was used. The total test time was 12h. SEM and laser interferometry were used to analyse the tested samples. The results showed that both polyurethane and nylon are highly resistant to cavitation and potentially could be used in hydraulic turbines.

**Key words:** Wear; Cavitation; Polyurethane; Nylon.

---

1- Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

2.3.4- Graduando, Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM), Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) - Universidade Federal de Uberlândia (UFU). (aurelio\_femec@yahoo.com.br)

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

## INTRODUÇÃO

A cavitação é um fenômeno de formação e subsequente colapso, dentro de um líquido, de bolhas ou “cavidades” contendo vapor, gás ou ambos. A cavitação resulta de uma redução localizada da pressão hidrostática, produzida pela movimentação de líquido (escoamento) ou de uma superfície sólida (vibração). A cavitação é um processo de desgaste por fadiga, ou seja, o material é sujeito a forças consecutivas no processo de colapso de micro-cavidades próximas à superfície sólida. Portanto, o material cavitado precisa absorver impactos consecutivos para não sofrer os desgastes devido à cavitação.

Em pás de turbinas hidráulicas, a cavitação dos aços pode provocar grandes perdas de massa e causar danos catastróficos se não forem tomadas medidas corretivas. Uma dessas medidas é a aplicação de solda para repor a perda de material na superfície das pás. Este processo de soldagem é muito trabalhoso e oneroso, pois além de necessitar de uma numerosa mão de obra, os profissionais dessa área são submetidos a condições insalubres de trabalho. Além disso, o tempo necessário para recobrir é muito longo, e os custos com eletrodos e soldas podem ser elevados.

Segundo Li e Mão, em 1996,<sup>(1)</sup> o poliuretano é um material de engenharia, altamente sofisticado, que substitui com grande vantagem a borracha, aço e outros plásticos estruturais, graças às suas propriedades mecânicas, tais como alta resistência ao desgaste por abrasão, baixo coeficiente de atrito, boa elasticidade, ótima resistência ao rasgo (corte) e a sua propagação, excelente capacidade de suportar grandes cargas (tração e compressão) sem deformações permanentes, resistência a impactos, boa resiliência, entre outras. Já o nylon apresenta, entre outras propriedades, baixo peso específico (1/8 em relação ao bronze), alta resistência ao desgaste e abrasão, alta resistência ao choque e baixo coeficiente de atrito.

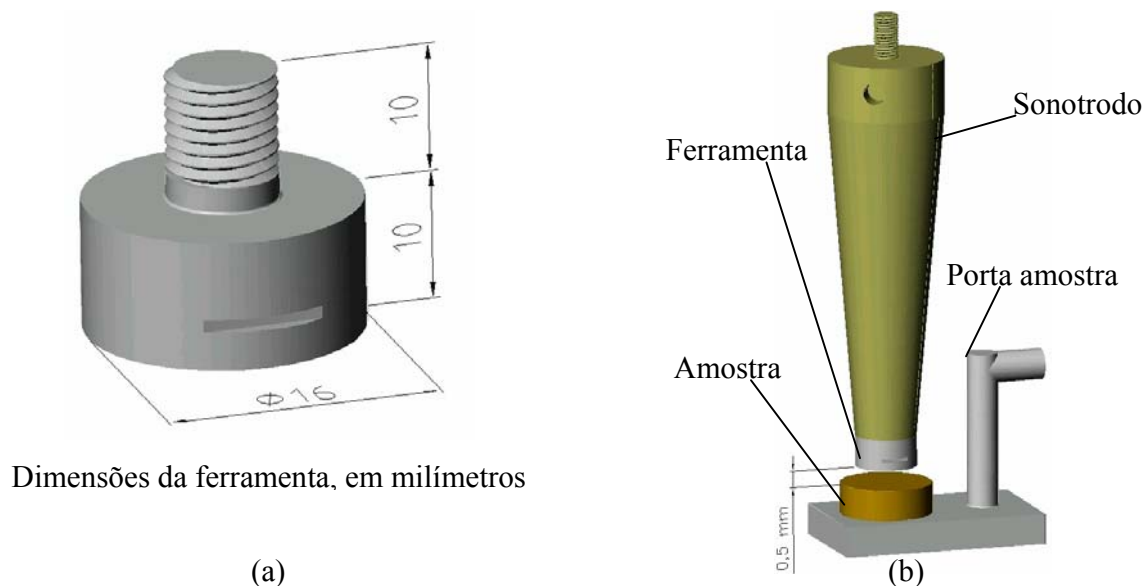
O objetivo do presente trabalho é avaliar a resistência à cavitação de materiais poliméricos (poliuretano e nylon) com vistas a algumas aplicações, Pelizer *et al*, em 2006,<sup>(2)</sup> que os tornem competitivos com os materiais metálicos tradicionais.

## METODOLOGIA

Os ensaios de cavitação foram realizados em uma máquina Sonic-Mill com potência de 1790 W, frequência de vibração de  $19,3 \pm 0,1$  KHz, amplitude de vibração de 45  $\mu$ m (pico a pico) e sonotrodo de titânio. A ferramenta foi confeccionada em aço inoxidável austenítico, com geometria e dimensões mostradas na Figura 1-(a) e foi rosqueada na ponta do sonotrodo, Figura 1-(b). O diâmetro da rosca da ferramenta é de 8,10 mm. As dimensões do sonotrodo são: altura = 123,9 mm, diâmetro inferior = 15,9 mm e diâmetro superior = 38,2 mm.

Como amostras a serem ensaiadas, foram usadas barras de poliuretano e nylon, com as seguintes dimensões: comprimento = 70 mm, largura = 30 mm e espessura = 10 mm. As superfícies foram retificadas para realização dos testes.

Os polímeros testados, nylon e poliuretano, foram submetidos a 48 horas de ensaio, sendo 12 horas para o nylon e 36 horas para o poliuretano. Os tempos foram escolhidos aleatoriamente, mas com um mínimo de 12 horas de teste, que foi usado como limite superior por Da Silva *et al*, em 2003.<sup>(3)</sup> Não há correlação destes tempos com a vida útil das pás das turbinas. Os ensaios de cavitação foram realizados segundo a norma da ASTM G32-98,<sup>(4)</sup> modificado para o método indireto.



**Figura 1.** Ferramenta empregada: (a) dimensões e (b) montagem para ensaio

A amostra a ser analisada é colocada em um porta-amostra e posicionada a uma distância de 0,5 mm do contra corpo de aço inoxidável AISI 36 com o auxílio de um micrômetro com resolução de 0,01 mm. O meio utilizado foi água, mantida a uma temperatura de ensaio de  $29 \pm 2^\circ\text{C}$ .

A perda de massa, tradicionalmente usada para avaliar o desgaste, não foi determinada, já que a mesma é, praticamente, inexistente.

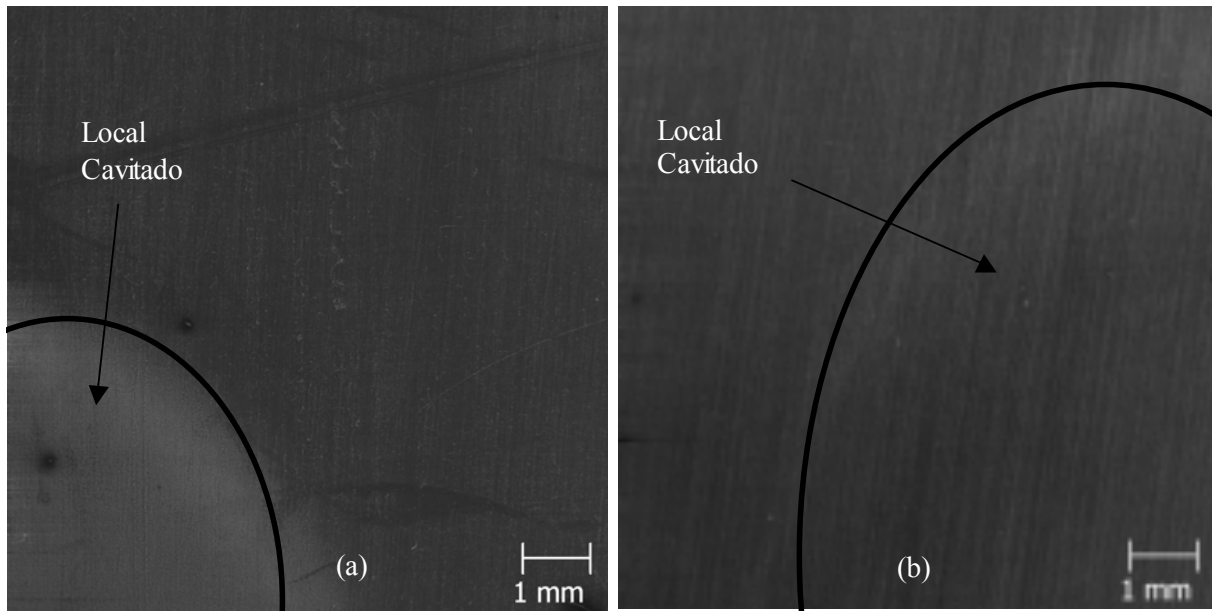
A caracterização das superfícies das amostras cavitadas foi realizada com o auxílio de microscopia eletrônica de varredura, em equipamento Carl Zeiss DSM 94A e interferometria laser em equipamento UBM Microfocus Expert.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

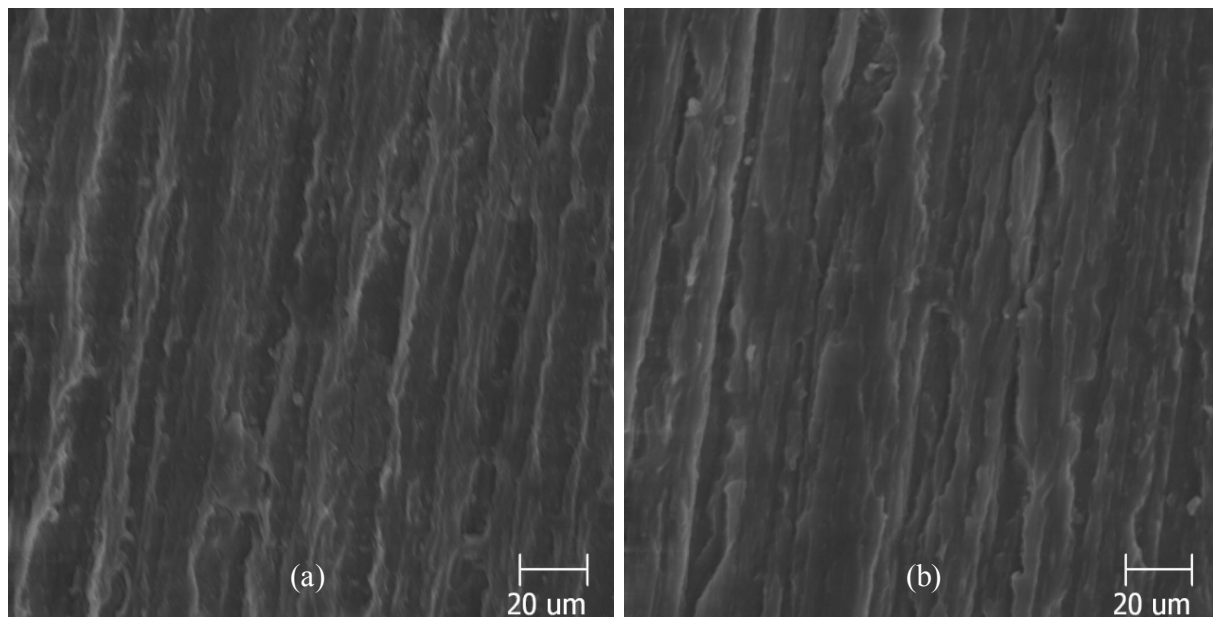
Na Figura 2 tem-se a morfologia das superfícies das amostras, obtidas através do MEV, mostrando as partes cavitada e não cavitada, onde a parte localizada no interior do envoltório é a área cavitada. Observa-se que o poliuretano resistiu mais a cavitação quando comparado com o nylon, pois o nylon apresentou uma região cavitada mais destacada.

A superfície da amostra de poliuretano pode ser observada na Figura 3. Pode-se notar que não há diferença visível entre a superfície cavitada e a que não sofreu cavitação.

Na Figura 4 observa-se que na superfície da amostra de nylon, a diferença entre as partes cavitada e a não cavitada é bem mais destacada, observando-se a presença de microfaturas na região desgastada por cavitação. O mesmo não ocorreu com a amostra de poliuretano. Mesmo sendo submetida a menos tempo de ensaio, 12 horas, o nylon apresentou um desgaste maior que a amostra de poliuretano, que foi ensaiada por 36 horas.

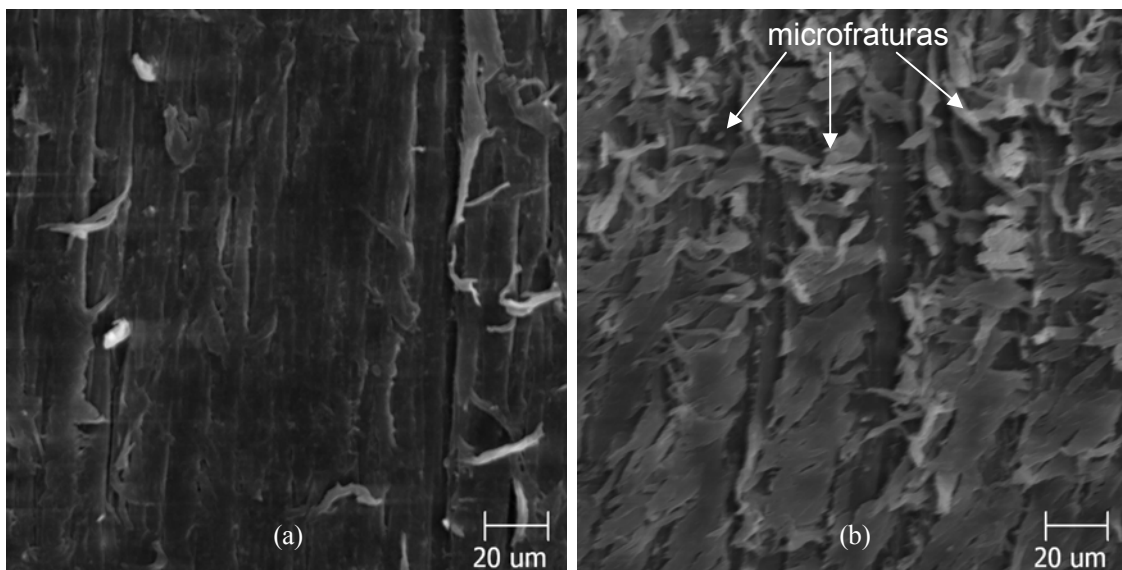


**Figura 2.** Morfologia das superfícies das amostras: (a) – nylon, (b) – poliuretano. MEV.



**Figura 3.** Morfologia de superfície da amostra de poliuretano (a) sem cavitação e (b) após cavitação. MEV.

Como nos ensaios de cavitação realizados na amostra de poliuretano e de nylon não apresentaram perda significativa de massa, a força da cavitação não foi testada, como é tradicionalmente mensurada em ensaios de cavitação. A força de cavitação é medida pela massa do material perdida através da verificação pelo tempo. Quanto maior a perda de massa, pior é a resistência à cavitação do material. Mesmo a amostra de nylon que apresentou maior desgaste, quando comparada com o aço essa perda é desprezível. De acordo com Da Silva et al. em 2003,<sup>(3)</sup> a média de perda de massa para o aço DIN 1.8550 temperado e recozido é de 26,5 mg para 12 horas de ensaio.



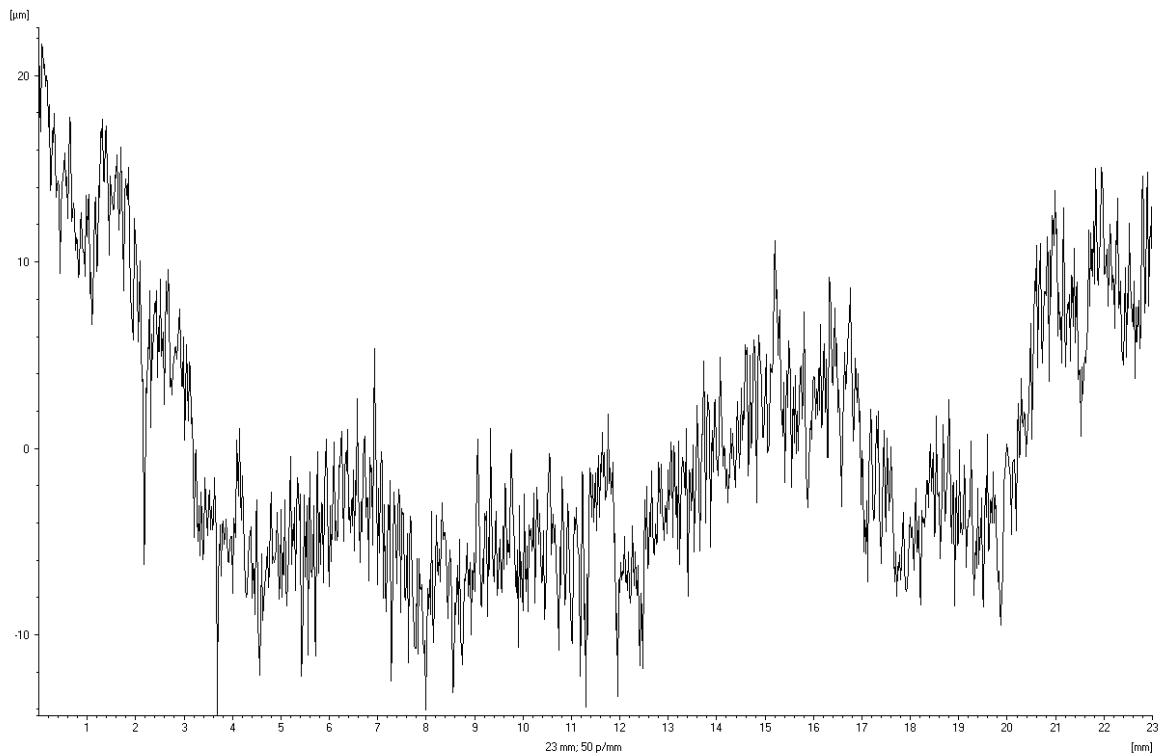
**Figura 4.** Morfologia de superfície da amostra de nylon (a) sem cavitação e (b) após cavitação, presença de microfraturas. MEV.

Para os resultados de interferometria laser, Tabela 1, observa-se que os valores de rugosidade média ( $R_a$ ) para as amostras de poliuretano são aproximadamente iguais, evidenciando o pouco efeito de desgaste por cavitação no poliuretano. Já para o nylon, a região cavitada apresentou uma rugosidade maior que a região não cavitada. O mesmo pode ser dito para os outros parâmetros mensurados,  $R_q$  (raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos desvios do perfil em relação ao plano médio) e  $R_{max}$ , que corresponde ao  $Z_{max}$  (profundidade máxima), onde o nylon apresentou um contraste entre a região cavitada e a não cavitada. Novamente, a amostra de poliuretano não apresenta diferença entre as regiões.

**Tabela 1.** Rugosidade média das amostras de nylon e de poliuretano

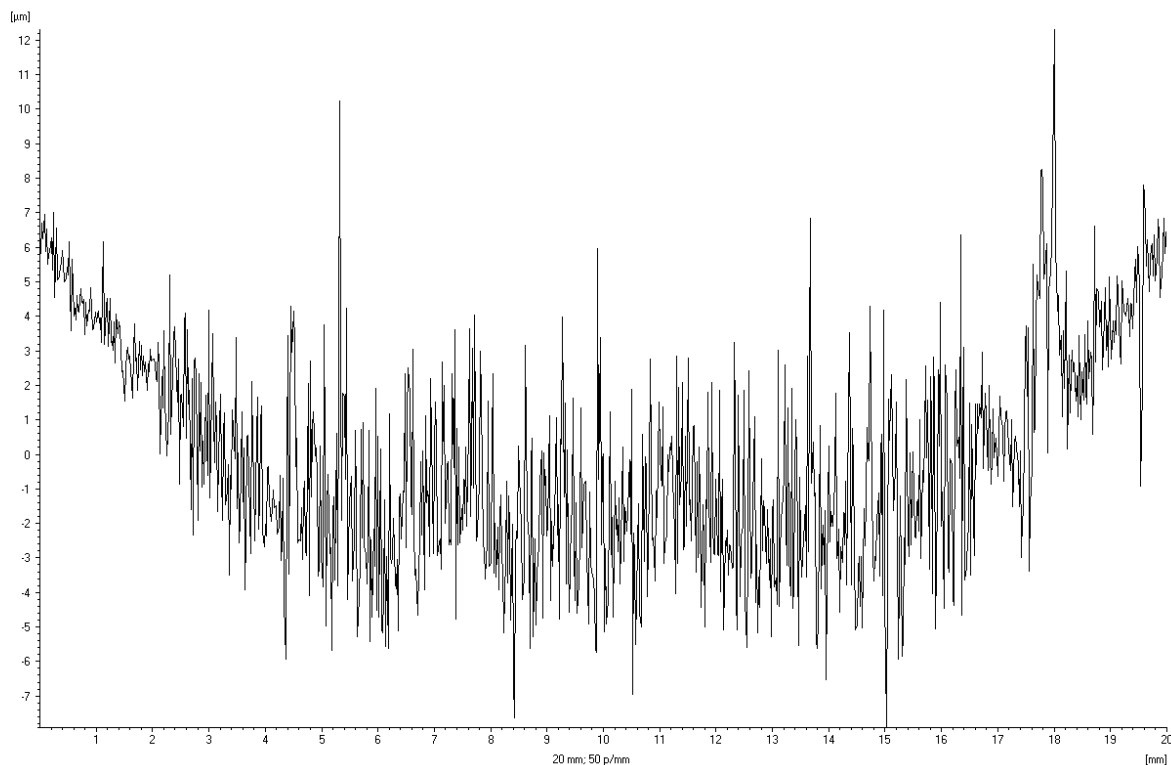
	Poliuretano		Nylon	
	Região interna ( $\mu\text{m}$ )	Região externa ( $\mu\text{m}$ )	Região interna ( $\mu\text{m}$ )	Região externa ( $\mu\text{m}$ )
$R_a$	$1,82 \pm 0,24$	$1,73 \pm 0,47$	$1,88 \pm 0,29$	$0,78 \pm 0,13$
$R_q$	$2,31 \pm 0,36$	$2,17 \pm 0,52$	$2,41 \pm 0,33$	$1,02 \pm 0,18$
$R_{max}$	$16,38 \pm 2,87$	$16,68 \pm 1,66$	$19,00 \pm 1,11$	$11,58 \pm 0,62$

O perfil de superfície da amostra de poliuretano pode ser observado na Figura 5, onde a região cavitada é representada pela depressão, se iniciando no ponto de 2 mm e termina no ponto 21 mm. A região cavitada é evidenciada pela depressão formada. Porém, a diferença entre picos e vales da superfície se manteve na depressão, o que não ocorreu na Figura 6, onde esta representa o perfil de superfície da amostra de nylon. A amostra de nylon além da depressão observada, nota-se também uma diferença entre as regiões, na região cavitada a diferença entre picos e vales se mostra maior que na região não cavitada.



**Figura 5.** Perfil de superfície da amostra de poliuretano.

O alto rendimento do poliuretano à cavitação tem como origem a sua boa elasticidade e sua grande capacidade de resistir a impactos. Embora macio, ele se auto-endurece superficialmente devido ao efeito do próprio trabalho, ou seja, as ligações sofrem algumas transformações causadas por deformações oriundas dos colapsos das bolhas e/ou microjatos contra a superfície. Algumas hipóteses são sugeridas para tentar explicar a alta resistência à cavitação. Uma delas é que o ponto de nucleação do arrancamento da liga é pequeno, pois o poliuretano (sem porosidade) tem uma estrutura em bloco, por isso é preciso arrancar uma cadeia de átomos para ocorrer perda de material, enquanto nos aços é necessário arrancar apenas átomos individuais.



**Figura 6.** Perfil de superfície da amostra de nylon

Como foi dito anteriormente, os danos da cavitação resultam da energia de vibração do choque das ondas. Quando os materiais absorvem energia e não podem liberá-la ocorre uma deformação plástica dos materiais. O poliuretano por possuir uma interpenetração entre redes lineares e redes de interligação faz com que a liberação e transferência da energia sejam mais fáceis. Ao invés da deformação plástica, ocorre deformação elástica.

O bom rendimento do nylon está relacionado com o seu baixo peso específico (1/8 em relação ao bronze), sua alta resistência ao desgaste e abrasão, sua alta resistência ao choque e o seu baixo coeficiente de atrito.

Li e Mão, em 1996,<sup>(1)</sup> investigaram a resistência à cavitação de revestimentos à base de poliuretano, *epoxy*, misturas de poliuretano - *epoxy* e de aços. Tanto o poliuretano quanto o *epoxy* tiveram um desempenho bastante inferior aos aços e à mistura epoxy-30% poliuretano. Entretanto, os ensaios de cavitação foram realizados com as amostras imersas em um meio corrosivo, não especificado pelos autores. Além disso, são vários os tipos de poliuretano eles podem ter utilizado um poliuretano pouco resistente. Esses dois fatores podem explicar a divergência em relação aos resultados do presente trabalho.

## CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos nos ensaios de cavitação de amostras de poliuretano e nylon, conclui-se que:

- tanto o nylon quanto o poliuretano apresentaram uma elevada resistência ao desgaste por cavitação;
- o poliuretano apresentou uma resistência à cavitação superior ao nylon;
- estes materiais podem ser usados em aplicações que requeiram resistência ao desgaste por cavitação, como no revestimento de pás de turbinas hidroelétricas.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o IFM – Instituto Fábrica do Milênio pelo suporte financeiro e ao doutorando Flávio José da Silva pelo apoio técnico.

## REFERÊNCIAS

- 1 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.
- 2 Pelizer, M.C., Santos, F.C. e Raslan, A.A. Resistência à cavitação de pás de turbinas hidráulicas revestidas com poliuretano. In: 61<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM, 2006, Rio de Janeiro /RJ. **Anais...** Rio de Janeiro, 2006, CD-Room.
- 3 Da Silva, F.J., Alves, E.B., Marinho, R.R., Paes, M.T.P. e Franco, S.D. Avaliação dos Efeitos da Camada Branca Sobre a Resistência à Cavitação do Aço 34 CrAlNi 7 Nitretado. In: VI CIBEM - Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica 2003, Coimbra-Portugal. **Anais ...**, Coimbra, 15-18 de outubro de 2003, CD-Room.
- 4 ASTM G32-98, “Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus”, American Society for Testing and Materials, 1998.