

INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO RECOBRIMENTO DE Cr-N EM AÇO QUANDO SUBMETIDO AO DESGASTE POR EROSÃO CAVITACIONAL¹

Robson Leandro Silva²
Cristina Godoy³
Marília Mendonça de Lima⁴
Rafael Drumond Mancosu⁵
Paulo José Modenesi⁶

Resumo

Este trabalho objetivou avaliar o desempenho frente à cavitação de conjugados de aço ABNT 1045 recobertos por PAPVD com filmes de Cr-N com três diferentes espessuras: 3µm, 5µm e 15µm. Os conjugados foram avaliados utilizando: testes de adesão por dureza Rockwell-C, Raios-X, microdureza Vickers, cavitação e análises microscópicas. Nos ensaios de adesão os conjugados não apresentaram delaminação do filme indicando boa adesão para as cargas aplicadas. A difratometria de raios-X identificou as mesmas fases presentes nos filmes, independente da espessura. Análises do substrato aço mostraram que o processo de deposição modificou sua microestrutura e propriedades mecânicas. A deposição de filmes de Cr-N levou à melhoria no desempenho frente à cavitação em relação ao aço ABNT 1045. Embora os conjugados mais espessos tenham apresentado uma perda de massa maior no estágio inicial eles tiveram melhor desempenho quando comparado com o conjugado revestido com filme de 3µm pois levaram tempos maiores para que a cavitação acelerada iniciasse. Como os conjugados com filmes de 5 e 15µm apresentaram comportamentos similares, a utilização do filme mais espesso em aplicações onde de alta resistência à erosão cavitacional não é um procedimento indicado do ponto de vista econômico.

Palavras-chave: Cavitação; Adesão; Recobrimento Cr-N; Espessura.

INFLUENCE OF THICKNESS IN THE CAVITATION EROSION RESISTANCE OF A Cr-N COATED STEEL

Abstract

The cavitation erosion resistance of four systems was investigated as follows: (i) AISI 1045 steel; (ii) PAPVD Cr-N coating on AISI 1045 steel with three different thicknesses 3, 5 and 15 µm. Adhesion tests, X-Rays analyses, Vickers Hardness tests and SEM and optical examination was realized for the characterization. Adhesion tests indicated that no system have presented delamination. X-Rays analyses identified the same phases in all films, independent of the thickness. Analyses of the steel-substrate showed that the deposition process have modified the microstructure and mechanical properties. Mass loss plots were obtained as a function of time and statistical analyses (piecewise linear regressions) were performed in order to evaluate the cavitation erosion wear rates. All coated systems showed lower cavitation rates than the uncoated steel. In spite of the systems with 5 and 15 µm films have presented the major lost of the mass in the initial time, they presented better result in comparison of the system with 3µm film, since the cavitation process have taken bigger time for the accelerated cavitation regime started. However the systems with films with thickness of 5 and 15 µm have presented similar behavior, the use of a conjugate with a thicker coating, it is not indicated of the economical view.

Key words: Cavitation; Adhesion; Cr-N coating; Steel ABNT 1045.

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

² Bolsista de Iniciação Científica CNPq.

³ Professora Adjunta do DEMET/UFMG, Dra.

⁴ Bolsista Pós Doutorado Júnior CNPq, Dra.

⁵ Bolsista Recém Doutor FAPEMIG, Dr.

⁶ Professor Adjunto do DEMET/UFMG, PhD.

1 INTRODUÇÃO

Materiais resistentes à erosão por cavitação devem possuir dentre outras propriedades, boa resistência à corrosão, alta resistência à propagação de trincas, ou seja alta tenacidade e além disso, são desejáveis tensões residuais de compressão na superfície assim como, uma textura superficial topográfica que não ofereça sítios nucleadores de implosão de bolhas, ou seja, com baixa rugosidade. Recobrimentos processados por PAPVD apresentam-se potencialmente como materiais que podem contribuir com um significativo aumento na vida útil de componentes sujeitos à cavitação.^[1-3]

Godoy et al.^[4] verificaram que as propriedades mecânicas do substrato exercem grande influência sobre o desempenho frente à erosão cavitacional. Substratos com maior resistência mecânica associados a recobrimentos de alta dureza apresentam maior resistência à cavitação.^[4]

A construção de recobrimentos de Cr-N com espessuras maiores poderia resultar em um conjugado onde a máxima profundidade de solitação decorrente do processo cavitacional não seja capaz de atingir o substrato e, dessa forma, o recobrimento, que apresenta alta dureza, sofreria as maiores solitações levando a um aumento da vida útil do conjugado. Assim espera-se que o aumento da espessura de recobrimentos de Cr-N influencie de forma que a máxima profundidade de solitação na erosão por cavitação seja dentro do recobrimento de modo a oferecer maior resistência ao desgaste cavitacional

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Corpos de prova de aço ABNT 1045 foram usinados segundo a norma ASTM G32-85^[5] para os ensaios de erosão cavitacional. Parte desses corpos de prova foram recobertos com Cr-N pelo processo de PAPVD “Physical Vapor Deposition Plasma Assisted” e os conjugados foram divididos em três grupos com espessuras de recobrimentos diferentes: 3 μ m, 5 μ m e 15 μ m. Amostras para caracterização dos recobrimentos também foram produzidas.

Foram realizados testes comparativos de adesão Rockwell C para avaliar a adesão dos filmes dos conjugados, utilizando o Durômetro Zwick δ Co.KG- Einsinger bei ULM (modelo Z302), com indentador cônico (padrão Rockwell C). Imagens via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram obtidas para o monitoramento das indentações O equipamento utilizado foi o Microscópio Eletrônico Modelo JEOL JSM 6360LV. Para a identificação das fases presentes no filme utilizou-se o Difratômetro PW1710.

A caracterização das amostras revestidas foi realizada após corte na seção transversal atacada com Nital (2%) e observadas ao Microscópio Ótico.

Realizaram-se testes de microdureza Vickers, no aço e nos conjugados, com o Microdurômetro da marca TESTER da FUTURE-TECH. Foram utilizadas cargas de 100g a 1000g durante um tempo de 15s no topo dos conjugados e na seção transversal.

O aço ABNT 1045 e as amostras recobertas com diferentes espessuras, foram avaliados com relação ao desempenho frente à erosão cavitacional empregando o equipamento TELSONIC. Este equipamento usa um transdutor ultra-sônico de 20KHz e com potência de saída entre 250W e 500W. Este transdutor é ligado a um

transformador de velocidade, onde a amostra é fixada. A superfície da amostra é imersa em um recipiente com água destilada e a temperatura da água durante o teste é mantida em torno de 22°C.^[5] A Figura 1 esquematiza o teste de cavitação. As amostras foram submetidas ao ensaio de cavitação por determinado tempo e a massa perdida, em decorrência do processo erosivo, foi determinada com o auxílio de uma balança digital, com medida em gramas, com cinco algarismos significativos.

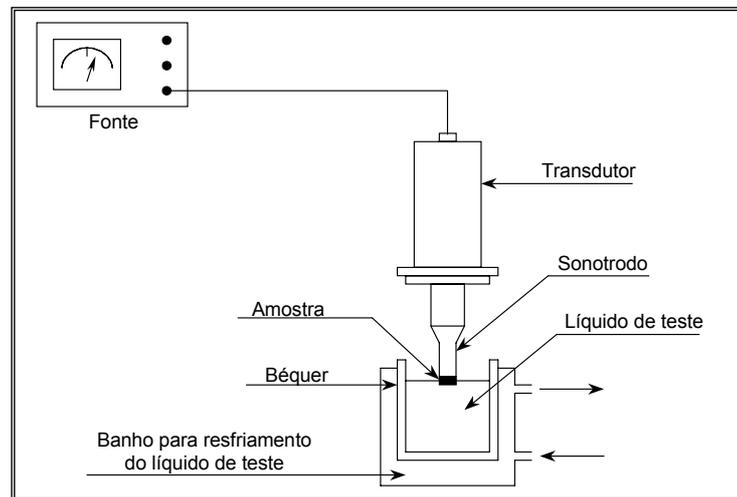


Figura 1. Esquema de um equipamento utilizado no ensaio de cavitação.^[5]

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das análises de difração de raios-X para os conjugados em estudo indicaram a presença das fases α -Cr, γ -Cr_{1-z}N_z e β -Cr₂N_{1-z} independente da espessura do filme de Cr-N provando que os filmes são estruturalmente semelhantes.

As imagens obtidas através da microscopia ótica da seção transversal do substrato aço estão mostradas na Figura 2. Através das micrografias verifica-se que houve uma mudança na microestrutura do aço após a deposição do filme de Cr-N. Embora a temperatura máxima atingida dentro da câmara durante o processo de deposição seja baixa, da ordem de 500°C, a baixa pressão dentro da câmara pode ter sido o fator responsável pelo aumento do tamanho dos nódulos de perlita no aço ABNT 1045. Essa mudança na microestrutura certamente resultou em alterações nas propriedades mecânicas do aço. Isso pode ser confirmado através dos valores da microdureza Vickers (Tabela 1) e seus intervalos de confiança, com 95% de confiabilidade, do substrato antes e após a deposição do filme de Cr-N. A redução da dureza do aço após a deposição do filme de Cr-N é um fator negativo no que diz respeito à resistência à erosão por cavitação dos conjugados em estudo pois, segundo Godoy et al.,^[4] substratos com maior resistência mecânica associados a recobrimentos de alta dureza apresentam maior resistência à cavitação.

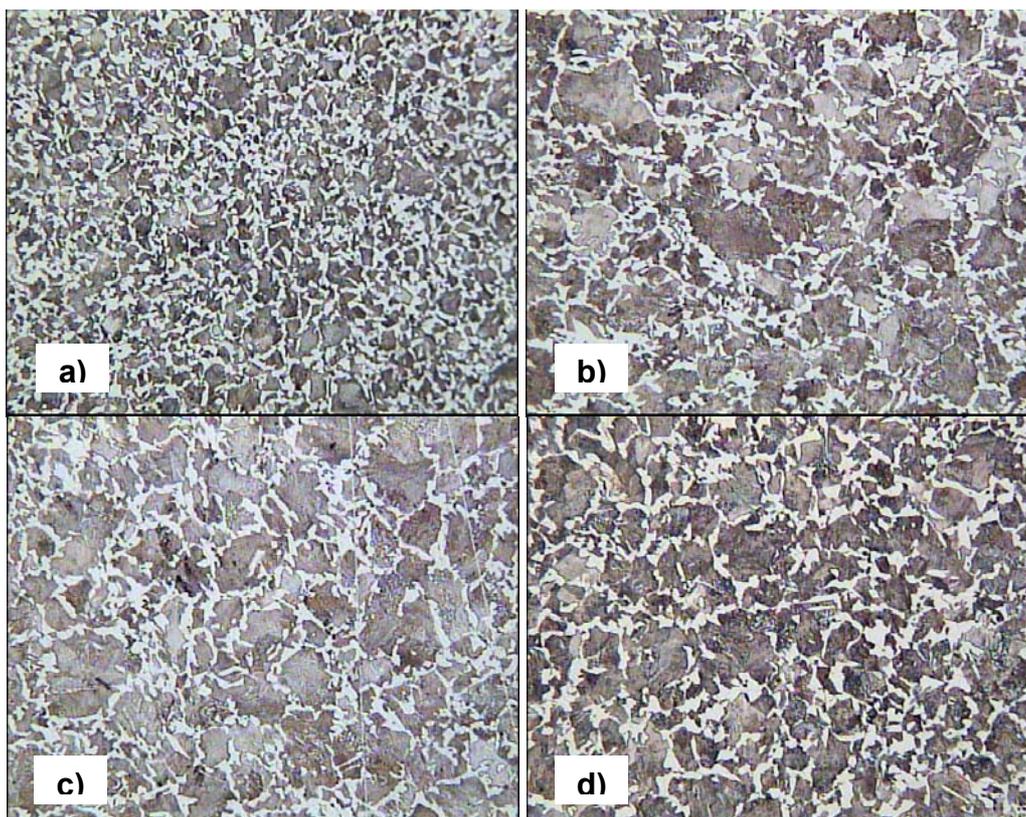


Figura 2. Imagens do aço obtidas a partir da seção transversal: a) aço ABNT 1045 sem revestimento; b) substrato com revestimento de $3\mu\text{m}$; c) substrato com revestimento de $5\mu\text{m}$; d) substrato com revestimento de $15\mu\text{m}$. 200X.

Tabela 1. Valores de dureza HRC do aço antes e após a deposição do filme de Cr-N.

Conjugado	Microdureza de Topo		Dureza seção Transversal
	HV ₁₀₀	HV ₁₀₀₀	HV ₁₀₀₀
Aço ABNT 1045	268±6	263±6	264±4
3μm	378±25	283±3	244±6
5μm	783±47	328±7	244±5
15μm	2293±123	442±14	246±4

Os valores de microdureza Vickers, de topo, com cargas de indentação de 100g e de 1000g também podem ser observados na Tabela 1. Verifica-se que, em ambas as cargas, a microdureza Vickers é maior para o conjugado de maior espessura. No entanto, na carga menor (100g) a microdureza é mais influenciada pela dureza do revestimento indicando uma resistência mecânica intrínseca ao do revestimento de Cr-N. Já, para a maior carga (1000g), a microdureza é mais influenciada pela resistência mecânica do aço-substrato.

As imagens de MEV das indentações realizadas no teste de adesão com carga de 1471N estão indicadas na Figura 3. A partir dessas imagens verifica-se que, embora as morfologias das trincas tenham sido diferentes para os três conjugados, todos apresentaram boa adesão uma vez que nenhuma delaminação do filme de Cr-N foi observada. Nas imagens da Figura 3 dois padrões de trincas foram observados: trincas radiais e trincas circulares. Os conjugados com menores espessuras (3 e 5 μm) apresentaram, para essa carga de indentação de 1471N, além de trincas radiais

(observadas também em cargas menores), trincas do tipo circulares (Figuras 3(a), 3(b), 3(c) e 3(d)). Entretanto, essas trincas circulares não foram identificadas para o conjugado revestido com filme de 15 μm de espessura até a carga de 1471N, onde se verificou apenas a presença de trincas chamadas radiais (Figuras 3(c) e 3(f)). Embora este resultado não tenha diferenciado a aderência dos conjugados estudados ele indicou que o modo de propagação da trinca muda com o aumento da espessura do recobrimento. Em recobrimentos mais finos o efeito da resistência mecânica baixa do substrato (aço ABNT 1045) levou à formação de trincas radiais seguido do aparecimento prematuro de trincas circulares. No recobrimento mais espesso, caso do conjugado recoberto com Cr-N com 15 μm de espessura, uma profundidade maior de dureza levou ao aparecimento apenas de trincas radiais. É importante observar que quando a espessura do filme aumenta tanto o espaçamento entre as trincas radiais quanto o espaçamento entre as trincas circulares aumentam. Esse resultado está de acordo com aqueles encontrados por Souza e colaboradores^[6] que observaram que a densidade de trincas circulares produzidas por um indentador esférico aumenta à medida que a espessura de filmes de alta resistência mecânica diminui. Em seu trabalho Souza et al.^[6] estudaram apenas substratos macios.

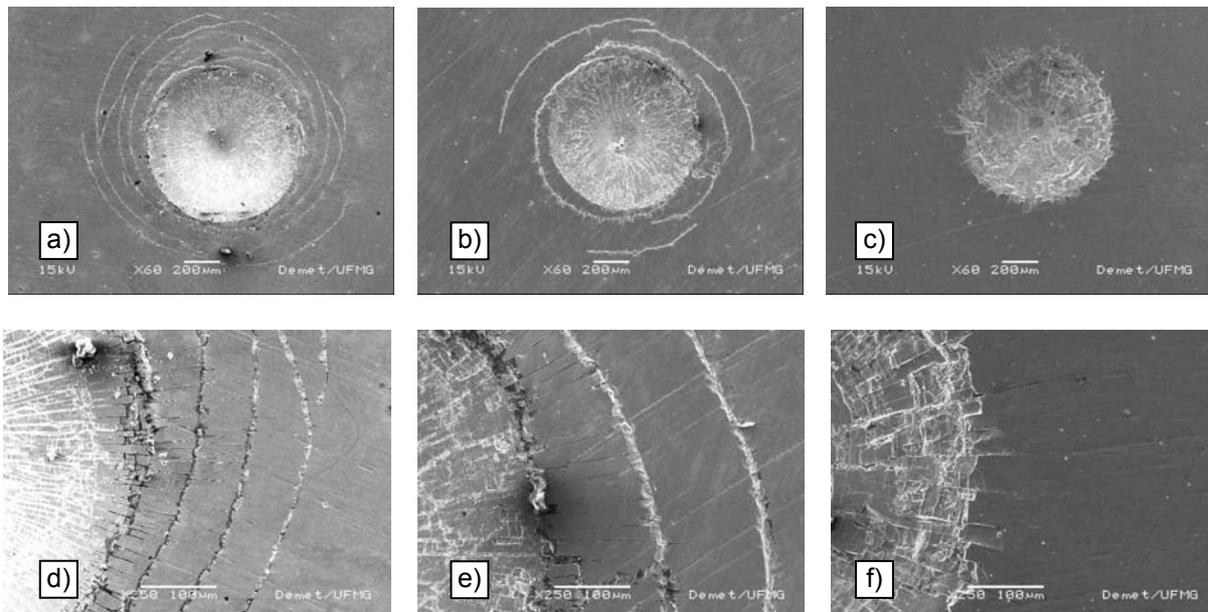


Figura 3. Imagens das trincas por indentação, a) filme de 3 μm ; b) filme de 5 μm ; c) filme de 15 μm . Aumento de 60X. d) filme de 3 μm ; e) filme de 5 μm ; f) filme de 15 μm . Aumento de 250X.

Através do ensaio de cavitação a perda de massa das amostras de aço com recobrimento e sem recobrimento foi monitorada, sendo assim possível determinar o período onde a taxa de cavitação é desacelerada. Esse período é observado no estágio inicial do ensaio de cavitação. A determinação da extensão desse estágio depende muito do procedimento matemático utilizado para determiná-lo. Uma das formas de estimar este período é utilizando a função distribuição de Weibull^[7] para estabelecer uma função de ajuste aos pontos experimentais e a partir da mesma determinar o tempo associado a uma profundidade de 1 μm de erosão. Neste trabalho utilizou-se uma nova metodologia para a sua determinação. A partir de análises estatísticas de regressão não linear segmentada^[8] determinou-se os diferentes regimes de desgaste existentes no processo cavitacional assim como os

tempos de duração de cada um e suas taxas de desgaste relativa. Fazendo uso desse método de regressão, utilizando o programa STATISTICA,^[9] estimou-se as taxas de cavitação, suas respectivas extensões e os períodos de perda de massa desacelerada. Os valores de perda de massa devido ao desgaste e o tempo de cavitação foram utilizados para a construção dos gráficos mostrados na Figura 4. Os modelos ajustados de regressão segmentada também estão mostrados na mesma Figura. Nessa Figura a região hachurada corresponde ao período inicial de cavitação. A Tabela 2 mostra as taxas encontradas e os pontos de quebra (mudança de regime de cavitação) estimados pelo programa STATISTICA, para todos os sistemas, com um intervalo de confiança de 95%. O 2º ponto de quebra foi associado à cavitação predominante do aço ABNT 1045.

Observa-se na Tabela 2 e na Figura 4 que o aço e os conjugados com recobrimento de 3 e 5µm de espessura apresentaram inicialmente uma taxa de desgaste menor que aquela apresentada pelo conjugado com filme de 15µm. Este conjugado teve um desgaste inicial muito alto em relação aos diferentes regimes de desgaste. Isso foi atribuído ao fato do filme ser espesso e provavelmente associado a um problema de decoesão entre as subcamadas do filme presentes em função de sucessivas corridas no processo de deposição.

Embora para conjugado com filme de 3µm o primeiro ponto de quebra estimado, correspondente ao período onde a taxa de cavitação é desacelerada, tenha sido superior em comparação com aqueles encontrados para os conjugados recobertos com filmes de 5 e 15µm, esse apresentou menor proteção ao substrato pois no segundo regime, a taxa de cavitação foi semelhante àquela encontrada para o aço e, no terceiro regime, sua taxa de cavitação foi superior àquela apresentada pelo aço ABNT 1045 sem revestimento. Esse resultado provavelmente se deu devido às alterações microestruturais e, conseqüentemente, às mudanças nas propriedades mecânicas observadas no aço ABNT 1045 após o processo de deposição. Num primeiro momento o recobrimento, com boa adesão ao substrato, protegeu o aço levando a um aumento no tempo de cavitação desacelerada mas, no momento em que a solicitação passou a atingir o substrato, sua menor resistência mecânica tornou o conjugado mais vulnerável ao processo de desgaste.

Para os conjugados recobertos com filmes de 5 e 15µm embora a taxa de cavitação inicial tenha sido mais alta, a taxa no segundo regime foi bastante inferior, (4,2±0,2)mg/h e (5,0±0,3)mg/h respectivamente, quando comparada com aquela encontrada para o aço sem recobrimento (7,2±0,1)mg/h. Em ambos os casos, embora tenha ocorrido a redução da resistência mecânica do substrato com a deposição do filme, a espessura do filme foi grande o suficiente para garantir um suporte de carga de forma a não levar a um aumento muito acentuado da taxa de cavitação no segundo regime. É importante ressaltar que essa taxa reduzida de cavitação observada no segundo regime permaneceu por tempos maiores, (3,28±0,02)h e (2,73±0,04)h respectivamente, em comparação com aquele encontrado para o aço no estágio inicial (1,48±0,02)h. O aumento das taxas de cavitação observadas para os conjugados recobertos com filmes de 5 e 15µm em relação ao conjugado com filme de 3µm provavelmente foi decorrente de problemas de decoesão dos recobrimentos mais espessos embora o teste de adesão não tenha fornecido informações suficientes para distinguir o comportamento de aderência (adesão entre recobrimento e substrato) ou coesão (adesão entre as subcamadas do recobrimento) dos sistemas em estudo.

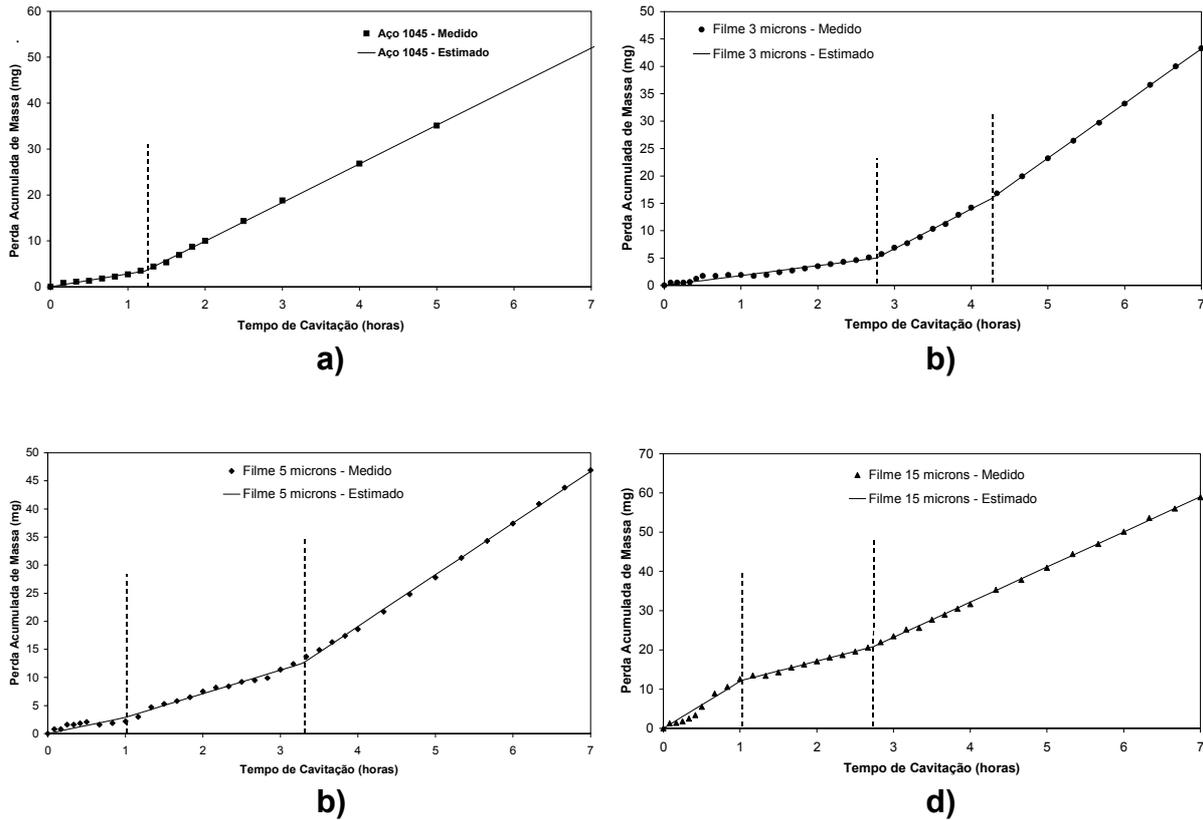


Figura 6. Gráfico da perda acumulada de massa em função do tempo de cavitação, a) aço ABNT 1045; b) aço com recobrimento Cr-N de $3\mu\text{m}$; c) aço com recobrimento de $5\mu\text{m}$; c) aço com recobrimento de $15\mu\text{m}$.

Tabela 2. Valores das taxas e dos pontos de quebra obtidos no teste de cavitação.

	Aço 1045	Cr-N ($3\mu\text{m}$)	Cr-N ($5\mu\text{m}$)	Cr-N ($15\mu\text{m}$)
1ª Inclinação (mg/h)	$1,75 \pm 0,05$	$1,80 \pm 0,02$	$2,90 \pm 0,09$	$12,0 \pm 0,1$
2ª Inclinação (mg/h)	$7,2 \pm 0,1$	$7,3 \pm 0,1$	$4,2 \pm 0,2$	$5,0 \pm 0,3$
3ª Inclinação (mg/h)		$10,0 \pm 0,2$	$9,2 \pm 0,3$	$9,0 \pm 0,4$
1º Ponto de quebra (h)	$1,48 \pm 0,02$	$2,76 \pm 0,01$	$1,0 \pm 0,1$	$1,02 \pm 0,03$
2º Ponto de quebra (h)		$4,26 \pm 0,04$	$3,28 \pm 0,02$	$2,73 \pm 0,04$

Com exceção da taxa inicial de cavitação que foi maior para o conjugado com filme de $15\mu\text{m}$, os conjugados recobertos com Cr-N com 5 e $15\mu\text{m}$ apresentaram comportamentos bastante semelhantes. Esse resultado indica que o recobrimento de $15\mu\text{m}$ não é indicado para essa aplicação, pois além do custo de deposição ser maior devido à espessura do filme, o seu desgaste inicial foi maior que o desgaste acelerado, o que não foi observado para os demais conjugados.

4 CONCLUSÕES

A deposição de filmes de Cr-N melhora o desempenho frente à erosão cavitacional de componentes de aço ABNT 1045 uma vez que aumenta o tempo do regime onde a taxa de cavitação é mais lenta. No entanto, se ocorrer mudanças nas propriedades mecânicas do aço durante o processo de deposição, como redução na sua dureza, o filme de Cr-N deverá apresentar maior espessura.

Dos conjugados estudados nesse trabalho aquele que apresentou melhor desempenho frente à erosão por cavitação foi o conjugado com filme de 5 μ m espessura. Essa conclusão se deve ao fato desse conjugado apresentar taxas de cavitação menores por tempos superiores (3,28 \pm 0,02)h em relação aos demais conjugados.

O pior desempenho apresentado pelo conjugado com maior espessura do recobrimento (15 μ m) no estágio inicial de cavitação provavelmente foi consequência de problemas referentes à decoesão do filme de Cr-N. Dessa forma constata-se que não só do ponto de vista de desempenho como também econômico, conjugados recobertos de Cr-N com espessuras muito elevadas não são indicados para aplicação onde alta resistência à erosão por cavitação se faz necessário.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPEMIG e ao CNPq pelo apoio financeiro concedido para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 HANSSON, C.M., HANSSON I.L.H., Cavitation Erosion, in ASM Handbook: Friction Lubrication and Wear Technology, v.18, First Printing, ASM International, USA, p.214-220, 1992.
- 2 HUTCHINGS, I. M. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, Edward Arnold, London, pp. 171-197, 1992
- 3 LIMA, M. M., Recobrimentos Tribológicos para Aplicação em Meios Mecânicos e Quimicamente Agressivos. 06/2002. 298 f. Tese de Doutorado CPGEM/UFMG, orient: G.C.Godoy.
- 4 GODOY, C., MANCOSU, R.D., LIMA, M.M., BRANDÃO D., HOUSDEN, J., AVELAR-BATISTA, J.C., Influence of plasma nitriding and PAPVD Cr_{1-x}N_x coating on the cavitation erosion resistance of an AISI 1045 steel, Surface and Coatings Technology, in press.
- 5 ASTM G 32-85, Standard method of vibratory cavitation erosion test, p. 116-121, 1985
- 6 SOUZA, R.M., SINATORA, A., MUSTOE, G. G. W., MOORE, J. J., Numerical and experimental study of the circular cracks observed at the contact edges of the soft substrates. Wear, 251, 2001, p.1337-1346.
- 7 MEGED, Y. Modeling of the initial stage in vibratory cavitation erosion test by use of a Weibull distribution. Wear, v. 253, p. 914-923, 2002.
- 8 MONTGOMERY, C.D., PECK, E.A., Introduction to linear regression analysis, 2th edition, New York: John Wiley & Sons, 1992, p. 210.
- 9 Statistica DX for Windows, Version 7, 2005, StatSoft South America.