

Estudo do efeito cavitação e erosão em revestimento Cr₃C₂ 7NiCr depositado por HVOF

Study of cavitation and erosion effect on Cr₃C₂ 7NiCr coating deposited by HVOF

RESUMO

Arthur Gabriel Volpi Fauth
arthurfauth@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz
anderson.pukasiewicz@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, Paraná, Brasil

Este trabalho apresenta a análise de resistência à cavitação e à erosão por jato de lama do revestimento cerâmico Cr₃C₂ 7NiCr, depositado por aspersão térmica por chama de alta velocidade (HVOF), em relação ao aço inox martensítico CA6NM. O objetivo é estudar o comportamento deste revestimento avaliando-se a perda de massa por cavitação pura e por erosão por jato de lama em comparação ao aço CA6NM, usado para fabricação de turbinas hidráulicas. Os procedimentos técnicos foram realizados de forma experimental, com os revestimentos de Cr₃C₂ 7NiCr depositados pelo método de HVOF, em seguida, as amostras foram avaliadas quanto a resistência à cavitação com o auxílio do equipamento ultrassônico Qsonica Q700 e resistência ao desgaste erosivo por jato de lama com o auxílio do equipamento DUCOM - *Slurry Jet Erosion Tester*. O Cr₃C₂ 7NiCr apresenta menor resistência ao desgaste por cavitação em relação ao CA6NM, tendo perdido aproximadamente 45 mg em 90 minutos. Entretanto apresenta maior resistência ao efeito erosivo do jato de areia, perdendo 80 mg em 8 minutos, comparado ao aço CA6NM, que perdeu mais de 130 mg no mesmo período de tempo.

PALAVRAS-CHAVE: Carboneto de Cromo. Cavitação. Erosão por Partículas Sólidas.

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

ABSTRACT

This work presents the analysis of resistance to cavitation and erosion by mud jet of the ceramic coating Cr₃C₂ 7NiCr, deposited by high speed thermal spray (HVOF), compared to the martensitic stainless steel CA6NM. The goal is to study the behavior of this coating by evaluating the loss of mass by pure cavitation and by erosion by mud jet compared to CA6NM steel, used to manufacture hydraulic turbines. The technical procedures were performed experimentally, the Cr₃C₂ 7NiCr coatings deposited by the HVOF method, then the samples were evaluated for resistance to cavitation using a Qsonica Q700 ultrasonic equipment and resistance to erosive wear by a jet of mud using a DUCOM - *Slurry Jet Erosion Tester* equipment. Cr₃C₂ 7NiCr has less resistance to cavitation compared to CA6NM, having lost approximately 45 mg in 90 minutes. However, it presents greater resistance to the erosive effect of the mud jet, losing 80 mg in 8 minutes, compared to CA6NM steel, which lost more than 130 mg in the same period of time.

KEYWORDS: Chromium Carbide. Cavitation. Solid Particle Erosion.

INTRODUÇÃO

No Brasil, a principal fonte de energia elétrica são as usinas hidrelétricas, devido ao grande potencial hídrico do país. Desta forma o grande objetivo dos pesquisadores é o desenvolvimento de novas técnicas mais eficientes para processos de geração de energia e materiais mais resistentes, visando o menor desgaste e otimização do processo (ANEEL, 2017; BERTUOL, 2020).

Assim, grande parte das turbinas hidráulicas são fabricadas em aço inox CA6NM, devido às suas ótimas propriedades mecânicas, boa soldabilidade e fácil fabricação (ALLENSTEIN, 2007). Embora apresente boas propriedades mecânicas como tenacidade e resistência mecânica, o CA6NM ainda sofre com o fenômeno da cavitação (PUKASIEWICZ, 2002; BERTUOL, 2020).

As paradas para manutenção nas turbinas de hidrelétricas representam um problema, pois interrompem a produção de energia da turbina e geram um grande custo para o reparo, sendo necessário dias e equipes especializadas. Para se evitar esses problemas são estudadas as principais causas das paradas, entre elas podemos citar os fenômenos de cavitação e erosão de partículas sólidas (ANEEL, 2017).

A cavitação acontece durante o escoamento do fluido, devido ao aparecimento e colapso de microbolhas ocasionadas pela variação na pressão. Nas turbinas hidráulicas, o desgaste por cavitação é gerado principalmente pela diferença de pressão existente ao longo das pás, oriundas da variação do fluxo hidráulico sobre as mesmas (HARVEY; MCELROY; WHITELEY, 1947;).

Enquanto a cavitação ocorre devido a variação de pressão, o desgaste erosivo se define como mecanismo de desgaste gerado por partículas sólidas quando em contato com a superfície do material, podendo danificar a mesma. O desgaste erosivo causado por jato de lama é criado por um jato contendo uma mistura entre partículas sólidas e líquido, que podem atingir o material com alta energia, gerando efeitos erosivos rigorosos no material (MORE; BHATT; MENGHANI, 2017).

Um dos processos de aspersão térmica mais desenvolvidos é o HVOF, aspersão térmica por chama de alta velocidade, sendo capaz de revestir peças que necessitem resistir a trabalhos em condições críticas, tendo grande resistência ao desgaste. Geralmente para estas aplicações são empregados carbonetos, como por exemplo o carboneto de cromo (Cr_3C_2), empregado nessa pesquisa, e carboneto de tungstênio (WC). Além disso o HVOF apresenta diversas vantagens em relação aos outros processos de aspersão térmica como baixa porosidade, alto nível de aderência, além de não gerar deformação na peça pela baixa temperatura de aplicação (máximo 160°C).

Revestimentos de Cr_3C_2 e WC proporcionam à superfície dos componentes alta resistência ao desgaste, pois apresentam elevada resistência à erosão, corrosão e cavitação (MARQUES *et al.*, 2018).

Assim, neste trabalho é feita a deposição de um revestimento cerâmico à base de carboneto de cromo (Cr_3C_2 7NiCr) utilizando o processo de aspersão térmica de alta velocidade (HVOF), com o objetivo de avaliar o comportamento deste revestimento quanto a resistência ao desgaste por cavitação e erosão por jato de lama.

Como objetivo geral tem-se de estudar o comportamento do revestimento a base de carboneto de cromo, Cr_3C_2 7NiCr, depositado por HVOF, avaliando-se a perda de massa por cavitação pura e por erosão por jato de lama, tendo como referência o aço Inox Martensítico CA6NM, usado como metal base nas turbinas hidrelétricas.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho se classifica como aplicado. Seus procedimentos técnicos foram realizados de forma experimental. A prática foi realizada com os revestimentos de Cr_3C_2 7NiCr depositados pelo método de HVOF, em seguida, as amostras foram avaliadas quanto a resistência à cavitação e resistência ao desgaste erosivo por jato de lama.

ENSAIO DE CAVITAÇÃO

O ensaio de cavitação busca avaliar a resistência do material quando submetido ao fenômeno de cavitação, o modo mais direto de se obter tal resistência é pelo estudo da perda de massa do material.

Os ensaios de cavitação foram realizados com o auxílio do equipamento ultrassônico Qsonica Q700 no Laboratório de Preparação Metalográfica da UTFPR-PG. A imagem do equipamento é apresentada na Figura 1.

Figura 1- Equipamento de Cavitação



Fonte: Autoria Própria

A técnica aplicada segue a norma ASTM G32 (2016) - “Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus”, adaptada para o método indireto, utilizando os parâmetros contidos na Tabela 1.

Tabela 1- Parâmetros Cavitação

Parâmetro	Valor
Frequência de vibração	20 +/- 0,5kHz
Amplitude	(50+-0,5%) μm pico a pico
Diâmetro do sonotrodo	19 mm
Temperatura	25°C
Distância amostra e sonotrodo	500 μm

Fonte: Autoria Própria (2020)

Os ensaios foram realizados em intervalos de 1, 1, 2, 4, 8, 16, 32 minutos e mais uma repetição de 32 minutos, a fim de totalizar um tempo acumulado de 96 minutos de ensaio para o revestimento, sendo realizado uma réplica para se fazer a média. Para o aço CA6NM foram realizadas 2 horas consecutivas de ensaio.

As massas das amostras foram aferidas antes dos ensaios e em cada intervalo, sendo utilizada a balança de precisão Shimadzu AUX 220 localizada no Laboratório de Caracterização de Materiais da UTFPR-PG. Como procedimento de limpeza, as amostras passaram previamente pela máquina de ultrassom por um período de 14 minutos, em seguida foram limpas com o uso de acetona, secas por 5 minutos com auxílio de um secador térmico e posteriormente ficaram no vácuo por 20 minutos. Com o intuito de reduzir erros experimentais, foram realizadas 5 medições da massa de cada amostra e adotado a média aritmética para discussões dos resultados.

Os ensaios de cavitação foram todos realizados utilizando-se de água destilada pura.

ENSAIO DE EROSÃO POR JATO DE LAMA

O ensaio de desgaste erosivo por jato de lama foi realizado com o auxílio do equipamento DUCOM - *Slurry Jet Erosion Tester*, localizado na UTFPR-PG, seguindo a norma ASTM G73-10 (2017) - “*Standard Test Method for Liquid Impingement Erosion Using Rotating Apparatus*” adaptada para o uso de jato de lama.

Os ensaios foram realizados em intervalos de 0.5, 0.5, 1, 2 e 4 minutos, a fim de totalizar um tempo acumulado de 8 minutos de ensaio para o revestimento, sendo realizado uma réplica para se fazer a média. Para o aço CA6NM foram utilizados os mesmos tempos de ensaio.

As massas das amostras foram aferidas antes dos ensaios e em cada intervalo, com o mesmo procedimento e equipamentos já descritos para o ensaio de cavitação.

O equipamento para ensaio consiste das seguintes unidades: uma câmara de mistura onde as partículas de areia e água são misturadas; um bocal de saída e uma placa de suporte da amostra onde a mesma pode ser exposta ao jato de lama sob diferentes ângulos (DUCOM, 2019). A imagem do equipamento é apresentada na Figura 2.

Figura 2- Equipamento de Erosão por Jato de Lama



Fonte: Autoria Própria

Durante o ensaio de erosão podem ser controlados parâmetros como ângulo de impacto, velocidade do jato, vazão de erodente e tempo de ensaio. Deste modo, neste trabalho foi realizado o ensaio por jato de lama segundo dados contidos na Tabela 2, a seguir.

Tabela 2- Parâmetros do Slurry

Parâmetro	Valor
Rotação motor água	750 RPM
Rotação motor areia	30 RPM
Descarga erodente	1788 gms
Velocidade da água	25,48 m/s
Diâmetro bico	4 mm
Inclinação	90°

Fonte: Autoria Própria (2020)

O erodente utilizado nos ensaios de desgaste por jato de lama foi a areia 300.

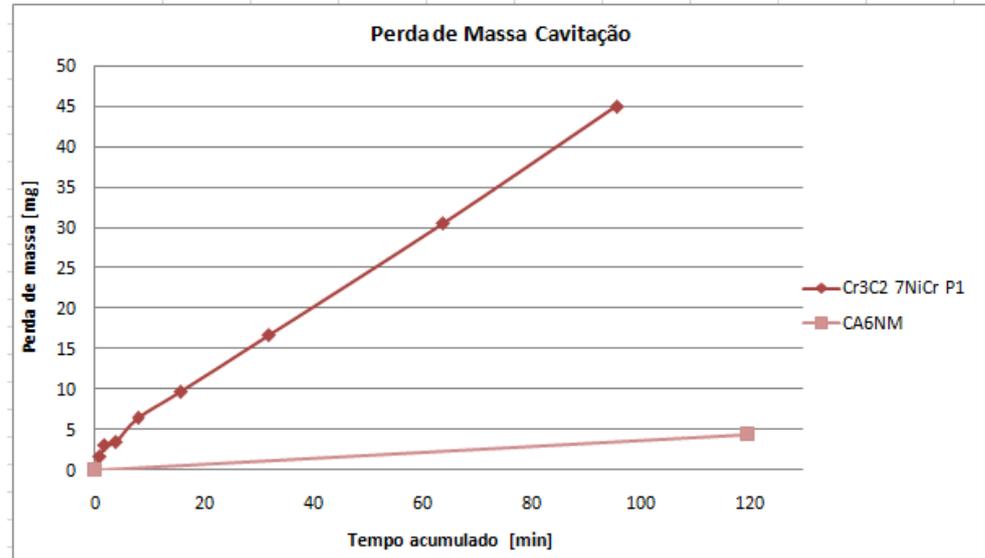
RESULTADOS E DISCUSSÃO

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE POR CAVITAÇÃO

Em comparação com o aço CA6NM, o revestimento Cr₃C₂ 7NiCr apresentou menor resistência ao desgaste por cavitação. O Gráfico 1 apresenta a curva de perda de massa por cavitação do revestimento Cr₃C₂ 7NiCr e do aço CA6NM,

destacando o comportamento do desgaste por cavitação em diferentes intervalos de tempo.

Gráfico 1- Perda de Massa por Tempo em Cavitação Cr₃C₂ 7NiCr e do aço CA6NM



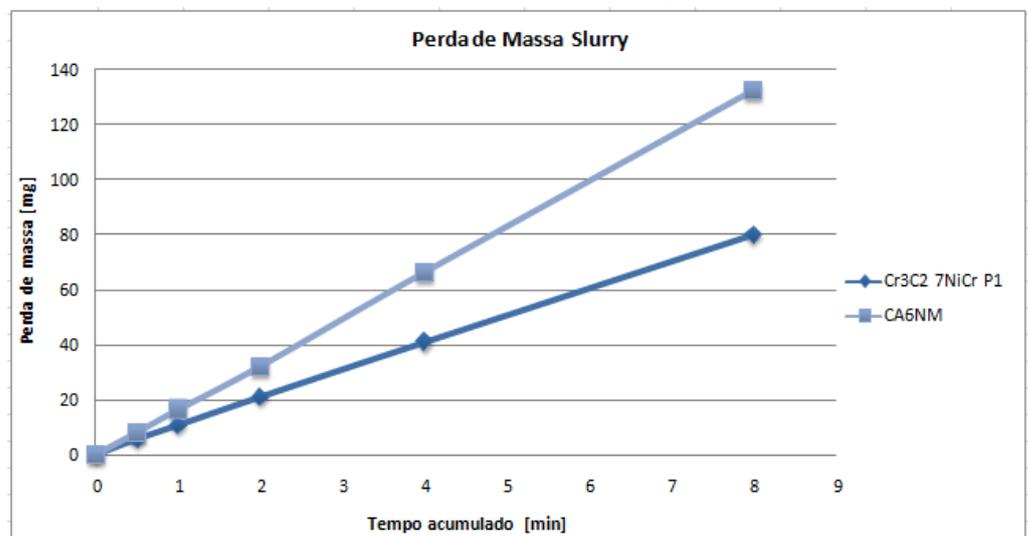
Fonte: Autoria Própria (2020)

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE POR JATO DE LAMA

Os resultados nos intervalos de tempo descritos para o procedimento e a respectiva média de perda de massa por jato de lama dos revestimentos aspergidos com ângulo de impacto de 90° pode ser observado no Gráfico 2, sendo apresentado a média de duas amostras.

O revestimento Cr₃C₂ 7NiCr apresentou maior resistência ao desgaste erosivo por jato de lama em relação ao aço CA6NM. Resultados estes que se diferenciam aos obtidos nos ensaios de resistência à cavitação.

Gráfico 2- Perda de Massa Slurry



Fonte: Autoria Própria (2020)

Pode-se afirmar que a resistência ao efeito erosivo do jato de lama do revestimento aspergido Cr₃C₂ 7NiCr é maior quando comparado o aço CA6NM.

Comparando com os resultados com os dados obtidos por Bertuol (2019) para o revestimento Cr₃C₂ 25NiCr, percebe-se uma menor resistência ao jato de lama por parte do Cr₃C₂ 7NiCr, o que possivelmente ocorre devido à menor quantidade da matriz metálica na amostra.

Vale destacar que os resultados encontrados nos ensaios de jato de lama tiveram comportamentos inversos aos encontrados nos ensaios de cavitação, enquanto o Cr₃C₂ 7NiCr apresentou menor resistência à cavitação, este mesmo revestimento apresentou melhor resistência ao jato de lama quando comparado ao CA6NM.

CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos de ambos os revestimentos submetidos aos ensaios de desgaste por cavitação e jato de lama foi possível concluir que:

- O Cr₃C₂ 7NiCr apresenta menor resistência ao desgaste por cavitação, tendo perdido aproximadamente 45 mg em 90 minutos, comparado ao aço CA6NM que perdeu aproximadamente 4 mg no mesmo intervalo de tempo.
- Quanto ao efeito erosivo do jato de lama a resistência do revestimento aspergido Cr₃C₂ 7NiCr é maior, tendo perdido cerca de 80 mg em 8 minutos, comparado ao aço CA6NM, que perdeu mais de 130 mg no mesmo tempo.
- No ambiente em que as pás de turbinas estão expostas a perda de massa por erosão de jato de lama é maior que a perda por cavitação, sendo os resultados obtidos experimentalmente compatíveis com a realidade encontrada nas usinas hidrelétricas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao LACTEC (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento) pelo apoio financeiro, além de disponibilizar equipamentos e materiais para realizar este trabalho.

Agradeço também ao Prof. Dr. Anderson Pukasiewicz pela orientação e ajuda ao longo desse ano.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Desenvolvimento de técnicas de deposição de revestimentos por aspersão térmica robotizada para redução de desgaste por erosão e cavitação em turbinas hidráulicas**. 1. ed. Curitiba, LACTEC, Formulário de Projeto: 2017. 20f.

ALLENSTEIN, Â. N. **Estudo da resistência à cavitação do aço inoxidável martensítico CA6-NM nitretado por plasma**. 113 f. 2007. Dissertação (Mestrado

em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2007.

ASTM G32, N. Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus. **ASTM International**, 2016. Disponível em: www.astm.org .

ASTM G73-10, N. Standard Test Method for Liquid Impingement Erosion Using Rotating Apparatus. **ASTM International**, 2017. Disponível em: www.astm.org .

BERTUOL, Kauê. **Estudo do efeito sinérgico cavitação/erosão em revestimentos de carboneto de cromo e tungstênio depositados por aspensão térmica de alta velocidade**. 2020. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2020.

HARVEY, E. N.; MCELROY, W. D.; WHITELEY, A. On cavity formation in water. **Journal of Applied Physics**, v. 18, n. 2, p. 162-172, 1947.

MARQUES, A. S.; DALCIN, R. L.; OLIVEIRA, L. F.; DA SILVA, L. A. V.; DOS SANTOS, G. R.; DA SILVA ROCHA, A. Comparative Analysis of the Friction and Microstructural Properties of WC-10Co-4Cr and Cr3C2-25NiCr Coatings Sprayed by High-Velocity Oxy-fuel (HVOF). **American Journal of Materials Science**, v. 8, n. 3, p. 51-57, 2018.

PUKASIEWICZ, A. G. M. **Propagação de trincas por fadiga em juntas soldadas do aço inoxidável martensítico tipo CA6NM**. 119 f. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2002.