
Copyright 2018, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2018, em São Paulo, no mês de maio de 2018.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Análise da resistência à corrosão em revestimentos a base de cobalto depositadas pelo processo GMAW-CW.

Tárcio dos S. Cabral^a, Lino A. S. Rodrigues^a, Ademir A. Castro Filho^b, Francisco F. Barbosa Junior^c, Eduardo de M. Braga^d

Abstract

This work aims at the study of the cavitation resistance of cobalt based metallic coatings submitted to the accelerated cavitation test, for the possible application of these in turbine blades. The coatings were produced using the GMAW welding and its variant, the GMAW-CW. The coatings were produced by deposition of three layers, the first two with the AWS ER 309L wire, through the GMAW process and the last layer used the AWS ER 309L wire (main wire) and the cobalt wire (additional wire) by the GMAW-CW process, using a deposition ratio for the additional wire. The cobalt-based wire addition ratios consisted of the proportions of 30 e and 90% by the feed rate of the main wire. The deposited coatings provided surfaces with excellent surface finish, free from imperfections. The accelerated cavitation test is based on ASTM G32. The time of the cavitation test used to verify the mass loss was 70 h. Images of the cavitated samples were obtained by optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM). The results showed that the increase of the cobalt percentage directly influences the cavitation resistance.

Keywords: welding, coating, cobalt alloys, cavitation and ASTM G32.

Resumo

Este trabalho visa o estudo da resistência à cavitação de revestimentos metálicos a base de cobalto submetidos ao ensaio de cavitação acelerada, para a possível aplicação destes em pás de turbinas hidráulicas. Os revestimentos foram produzidos utilizando a soldagem GMAW e sua variante, o GMAW-CW. Os revestimentos foram produzidos através da deposição de três camadas, as duas primeiras com o arame AWS ER 309L, através do processo GMAW e a última camada empregou o arame AWS ER 309L (aramé principal) e o arame a base de cobalto (aramé adicional) pelo processo GMAW-CW, utilizando uma relação de deposição para o arame adicional. As razões de adição de arame a base de cobalto consistiram nas proporções de 30 e 90% através da velocidade de alimentação do arame principal. Os revestimentos depositados proporcionaram superfícies com excelente acabamento superficial, isentos de imperfeições. O ensaio de cavitação acelerada baseia-se na norma ASTM G32. O tempo do ensaio de cavitação utilizado para verificação da perda de massa foi 70 h. Imagens das amostras cavitadas foram obtidas através de microscopia ótica e microscopia eletrônica

^a Doutorando, PRODERNA, Universidade Federal do Pará - UFPA

^b Mestrando, PPGEM, Universidade Federal do Pará - UFPA

^c Graduando, FEM, Universidade Federal do Pará - UFPA

^d Prof. Dr. Universidade Federal do Pará - UFPA

de varredura (MEV). Os resultados mostraram que o aumento do percentual de cobalto influencia diretamente na resistência a cavitação.

Palavras-chave: revestimento metálico, cavitação, erosão, soldagem GMAW_CW

Introdução

A cavitação em máquinas hidráulicas afeta não só o seu desempenho, mas também reduz a vida útil dos componentes devido aos danos da erosão resultante, tais como, instabilidades de fluxo, vibrações excessivas, danos em superfícies de materiais. SREEDHAR *et. al.* (1) e ESCALER *et. al.* (2). FRANC E MICHEL (3) e KUMAR E SAINI (4), descrevem o processo de cavitação como o aparecimento de bolhas de vapor ou cavidades no interior de um meio líquido inicialmente homogêneo que pode ocorrer em diversas situações de acordo com o fluxo, a configuração e as propriedades físicas do líquido. A implosão das bolhas de vapor provoca a formação de ondas de choque, por micro jatos, que resulta em danos erosivos aos materiais expostos a cavitação, NIEDERHOFER *et al.* (5). Na atualidade a manutenção das turbinas hidráulicas vem utilizando os aços inoxidáveis ao cobalto, esses materiais promovem boa resistência à erosão por cavitação XIAOJUN *et al.* (6) e RICHMAN E MCNAUGHTON (7). Pode-se citar a influência do cromo, que tende a melhorar a resistência à corrosão a quente e a resistência à oxidação, o níquel é estabilizante para a estrutura CFC, o molibdênio melhora a resistência a meios corrosivos e o silício pode estar contribuindo para o aumento da dureza/resistência a cavitação, MATTHEWS *et al.* (8) e ANTONY (9), e o cobalto que é um elemento facilitador da formação de austenita retida.

Neste contexto, uma linha de pesquisa desenvolvida pela Universidade Federal do Pará – UFPA para a deposição de revestimentos, emprega a adição de um arame não energizado na região do arco de soldagem, denominado processo GMAW-CW. Esse processo é uma alternativa técnica e econômica em relação à soldagem GMAW Duplo Arame, CABRAL *et al.* (10) e RIBEIRO *et al.* (11). No processo GMAW-CW o arame adicional se funde juntamente com o arame energizado, utilizando o calor do arco elétrico e/ou a energia térmica da poça de fusão, promovendo a coalescência dos consumíveis utilizados. Uma das vantagens que o novo processo traz é a possibilidade de se usar arames com composições químicas diferentes, o que pode gerar uma melhoria metalúrgica, resultando, por exemplo, em um aumento de dureza, resistência mecânica e resistência a erosão por cavitação. Neste trabalho foram comparados diferentes revestimentos de ligas a base de cobalto aplicados pelo processo GMAW-CW, a superfície revestida foi avaliada através do ensaio de cavitação acelerada, conforme descrito na norma ASTM G32-12 (12).

Metodologia

A deposição do revestimento foi dividida em duas etapas. Na etapa “i” ocorreu a realização de testes preliminares pelo processo GMAW para escolha do pacote operacional, conforme descrito na Tabela 1. Os revestimentos foram realizados em chapas de aço carbono SAE 1020 nas dimensões de 100 mm x 150 mm x 12,5 mm, com uma distância bico de contato peça (DBCP) de 22 mm e com o uso de uma fonte eletrônica multiprocessada do tipo tensão constante. Foi empregada a técnica de tecimento horizontal, com amplitude de 9,25 mm e frequência de 1,1 Hz para maximizar a deposição dos cordões.

Foi arbitrado o depósito de duas camadas de revestimento com arame austenítico AWS 309L de 1,2 mm de diâmetro, na forma de cordões sobrepostos em 30% como amanteigamento

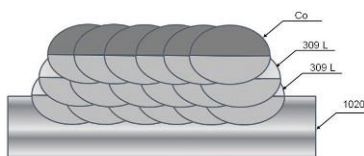
(Figura 1A), o gás de proteção utilizado foi o Ar + 2% de O₂. A temperatura de interpasse foi de 100 °C medida com pirômetro ótico infravermelho, este procedimento foi utilizado em todas as etapas do trabalho.

Na etapa “ii” as peças teste revestidas com as camadas do arame austenítico AWS 309L receberam uma nova camada, Figura 1A, formando assim ao final da soldagem três camadas de revestimento. A terceira camada de revestimento foi depositada fundindo simultaneamente o arame AWS 309L com o arame a base de cobalto 21E. Esta operação foi realizada pelo processo de soldagem GMAW-CW (Figura 2 – Montagem dos equipamentos), que utilizou os mesmos parâmetros do amateigamento. O ângulo entre a tocha de soldagem e o injetor de arame adicional pode ser visualizado na Figura 1B. Foi utilizado um ângulo α de 56 °, que correspondeu a inserção do arame adicional diretamente na poça de fusão.

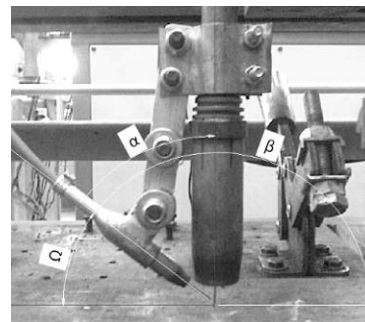
Tabela 1 – Pacote operacional de soldagem utilizado no revestimento

Pacote Operacional						
Tensão U (V)	Vel. al. (m/min)	Vel. al. arame ã energizado (m/min)	V.gás (l/min)	Vel. de Sol. (cm/min)	DBCP (mm)	α (°)
34	8	R_{CW} 30% (CP 1 e 2)	15	30	22	5
		R_{CW} 90% (CP 5 e 6)				6

Sendo: α – Ângulo de fixação do injetor adicional de arame (tocha injetor). CP – Corpo de prova.



A



B

Figura 1 – (A) Esquema da deposição dos cordões de solda e (B) Ângulos de trabalho do injetor de arame adicional.

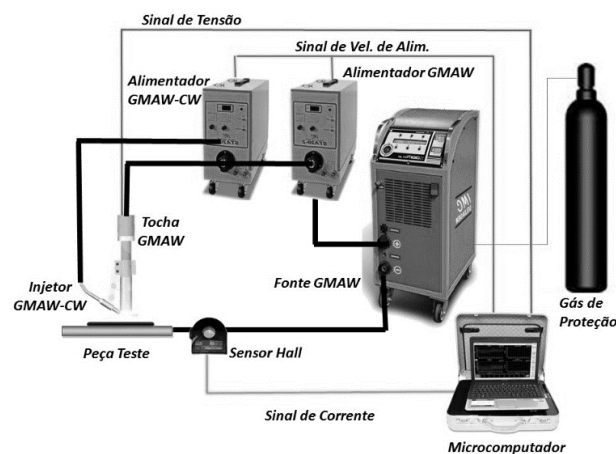


Figura 2 – Representação esquemática da montagem do processo GMAW-CW.

Neste trabalho foi proposto a utilização de uma *Relação de Deposição* (R_{CW}) para o arame adicional, dada pela equação (1), que é a razão entre a velocidade de alimentação de arame adicional (V_{ACW}) e a velocidade de alimentação do processo principal (V_A).

$$R_{CW} = \frac{V_{ACW}}{V_A} \quad \text{Equação 1}$$

Através da equação 1, foi encontrada as velocidades de alimentação para o arame adicional, com as relações de deposição R_{CW} de 30 % e 90 %, que correspondeu a velocidades de 2,4 m/min e 7,2 m/min, respectivamente. Cada valor de alimentação para o arame adicional foi depositado em duas peças teste, gerando um total de 4 peças teste. As etapas “i” e “ii” podem ser visualizadas na Figura 3.

Após as peças teste serem revestidas, foi aplicado o ensaio de líquido penetrante na superfície dos cordões e após a usinagem superficial. Foram retiradas amostras para a análise química e para o ensaio de cavitação acelerada, com duas amostras para cada velocidade de alimentação adicional. Na Figura 4, pode ser visualizado o ciclo de corte das amostras, nas dimensões de 23 mm x 23 mm x 30 mm.

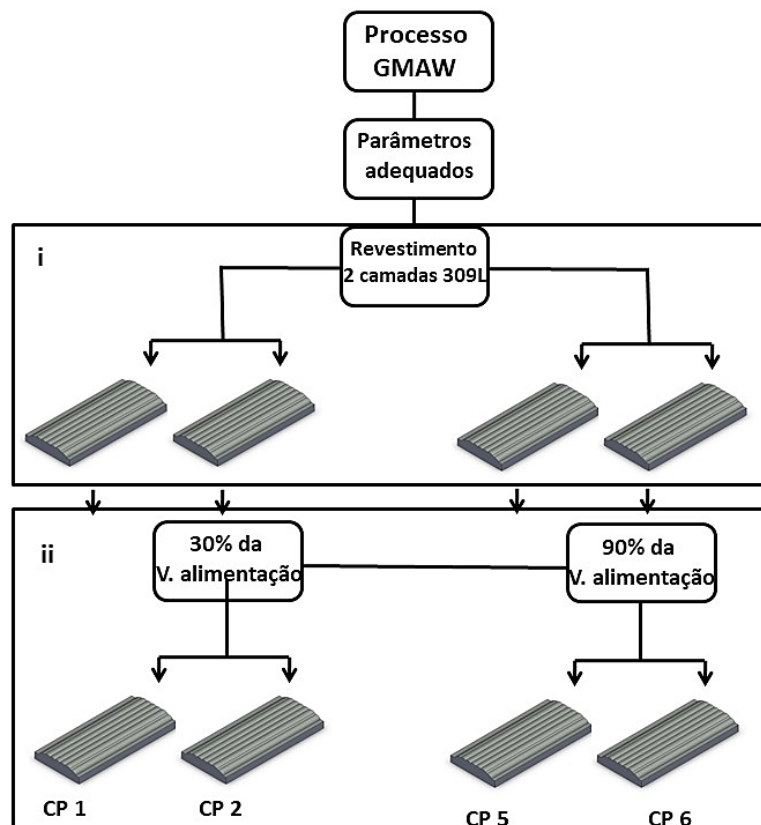


Figura 3 – Representação das etapas para o processo de revestimento das peças teste

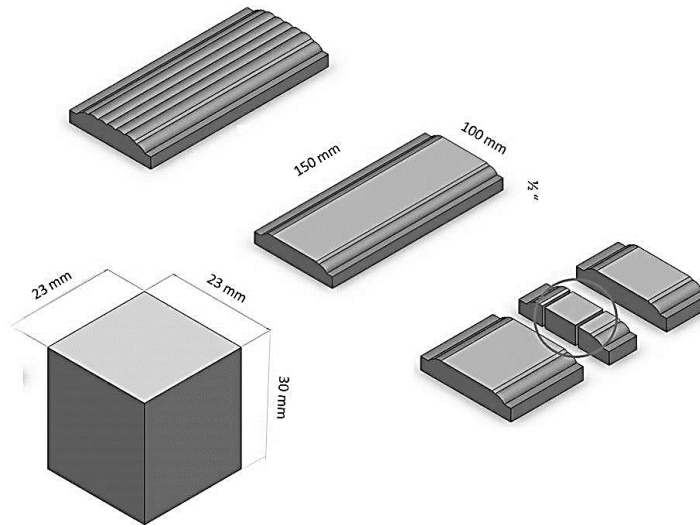


Figura 4 – Esquema do corte para o ensaio de cavitação acelerado.

Pela Figura 5 pode ser visualizado o esquema da metodologia indireta de cavitação. É importante ressaltar que para o ensaio de cavitação acelerada a temperatura do fluido onde a amostra é cavitada, deve ser mantida a $25\text{ °C} (\pm 2\text{ °C})$, e a distância entre o sonotrodo e a amostra deve ser de $0,5\text{ mm} (\pm 5\%)$, (20, 21, 22). Para o ensaio de cavitação acelerado foi proposto a utilização de setenta horas (70 h) de ensaio, objetivando a determinação da taxa de erosão em regime permanente. Para cada medição de massa, a peça foi limpa com uma solução 20% de etanol em água deionizada no equipamento de limpeza ultrassônica, de forma a retirar qualquer produto do desgaste que permanecesse como resíduo do processo (ASTM G1-17)(13).

Para as primeiras vinte horas (20 h) de ensaio, foi realizada a parada do equipamento em intervalos de uma hora, para retirada dos dados de perda de massa no período de incubação. Após as 20 h de ensaio, o corpo de prova teve sua massa verificada em intervalos de 5 h até um total de 70h.

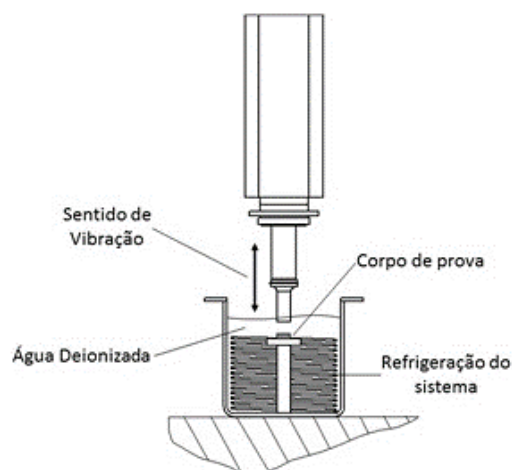


Figura 5 – Metodologia para o ensaio de cavitação acelerada, método indireto, ASTM G32 (12), adaptada.

Resultados e discussão

De forma geral os revestimentos apresentaram boa qualidade superficial, não apresentando descontinuidades que acarretassem o descarte dos corpos de prova, a comprovação da qualidade superficial dos revestimentos foi realizada através do ensaio de líquido penetrante. A composição química média dos materiais de adição e dos corpos de prova foram obtidas e podem ser visualizadas pelas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Composição química média dos arames a base de cobalto (21E) e o 309L em %. Dados fornecidos pelo fabricante.

Liga	Co	Fe	Cr	Ni	C	Si	Mn	Mo	Cu
21E	61,75	2,00	27,00	2,50	0,25	1,50	0,00	5,00	0,00
309L	0,00	59,27	24,00	13,00	0,03	0,45	1,75	0,75	0,75

Tabela 3 – Composição química dos corpos de prova em %.

Corpo de prova	Co	Fe	Cr	Ni	C	Si	Mn	Mo	Cu
R_{CW} 30%	7,84	48,90	27,90	11,90	0,05	0,45	1,60	0,87	0,06
R_{CW} 90%	21,20	38,60	23,30	7,85	0,12	0,75	1,77	2,43	0,03

Pela Tabela 3 pode-se observar que os teores de cobalto aumentaram com o acréscimo da alimentação do arame adicional, tal fato é devido este arame ter o cobalto em maior quantidade em peso na sua composição. Além do aumento do cobalto, houve também um aumento de silício, que atua na formação da martensita ϵ e molibdênio que tem influência na estabilização da estrutura HC, enquanto o ferro e o níquel a estrutura CFC, YAEDU (14). Ainda observando a Tabela 3, verifica-se que o valor do ferro teve uma sensível redução. Para corpos de prova (CP) com R_{CW} de 30% e 90%, o cobalto teve um aumento de 170 % e o ferro uma redução de 21%.

A influência do teor de ferro sobre a erosão por cavitação foi abordada nos estudos de WOODFORD (15), o autor faz alusão a transformação microestrutural de CFC (cúbica de face centrada) para HC (hexagonal compacta) de uma liga de cobalto e ferro, variando o percentual de ferro. As amostras foram analisadas após 10 h do processo de erosão por cavitação. O referente autor observou que a resistência à cavitação diminui à medida que se aumenta o percentual de ferro na liga. Para ligas contendo 2% de ferro a estrutura final foi a HC, estrutura mais resistente a cavitação, e para ligas com 15% de ferro a estrutura final foi a CFC. Dessa forma a diminuição do teor de ferro é um ponto a ser considerado no aumento da resistência a cavitação. A variação de R_{CW} teve influência direta no aumento do volume de material depositado e na variação dos elementos de liga que formaram a solução sólida nos cordões, como o cromo, níquel, molibdênio e o silício.

Pela Figura 6A foi observado múltiplas crateras, com a maior profundidade obtida entre as três razões de R_{CW} analisadas. A amostra erodida da Figura 6B apresenta uma superfície

menos erodida, em comparação com a amostra da Figura 6A, gerando uma área desgastada com mais regiões de “planicidade”, com crateras mas largas e menos profundas, sendo o valor de perda de massa aproximadamente 80% menor que a amostra com R_{CW} de 30 %. Para a amostra mais erodida, com R_{CW} de 30 %, Figura 6C, sua superfície apresenta uma região com material retirado de pequenas dimensões, comparada com a área retirada da amostra de R_{CW} de 90 %, Figura 6 D, amostra que obteve o menor valor de perda de massa, com uma região de retirada de material, mais grosseira que a da Figura 6C.

Essa região menos erodida pode ser resultado da interação dos elementos de liga provenientes do arame adicional (Cr, Co e Mo), que em determinadas concentrações facilitam a transformação de fases, γ -Co para martensita, melhorando assim as propriedades metalúrgicas, XIAOJUN et al. (6) e RIBEIRO et al. (16). A Tabela 4 apresenta os valores de perda de massa para as amostras cavitadas e o comportamento da perda de massa acumulada com relação ao tempo pode ser visualizado na Figura 7.

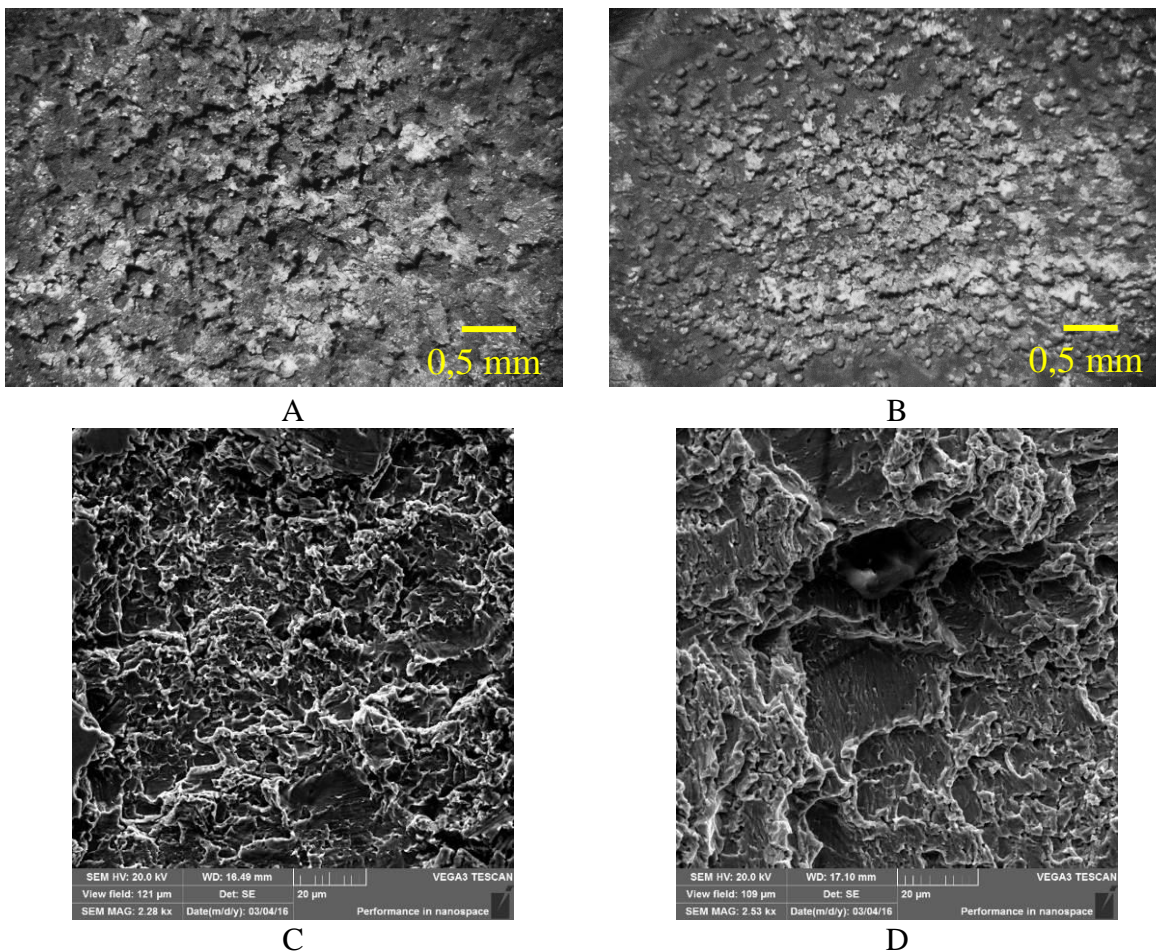
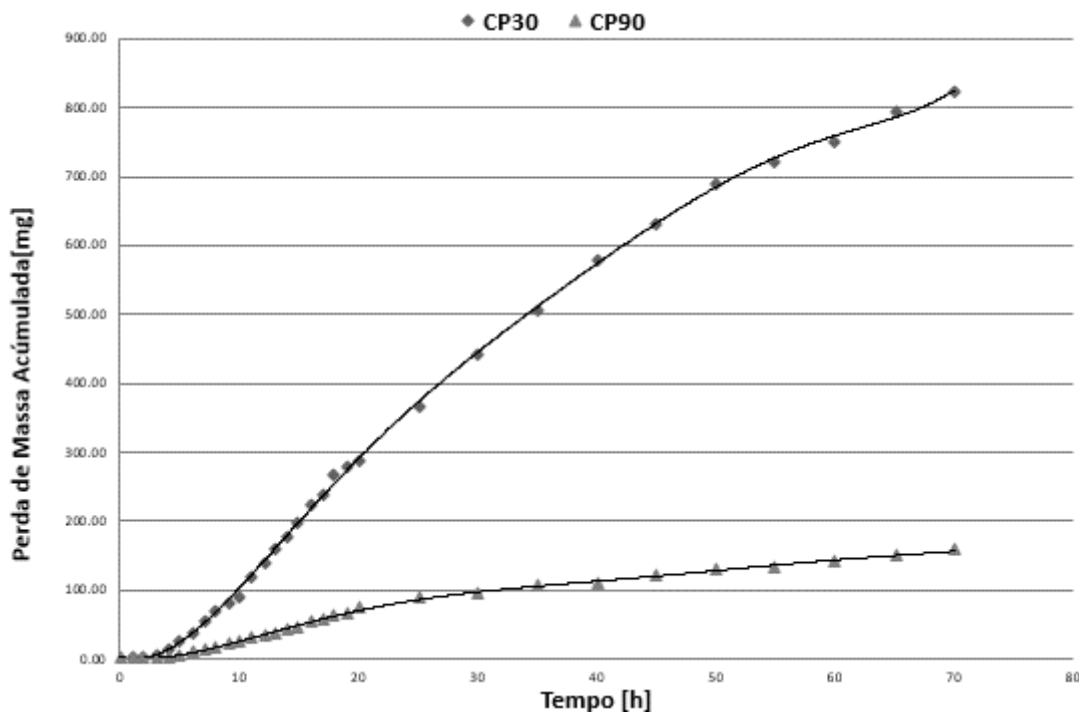


Figura 6 – Característica da erosão por cavitação para: (A) Imagem da região central da amostra de R_{CW} 30 % e (B) Imagem da região central da amostra de R_{CW} 90 %, (C) Detalhe da área cavitada por microscopia eletrônica para a amostra de R_{CW} 30 %, (D) Detalhe da área cavitada por microscopia eletrônica para a amostra de R_{CW} 90 %.

Tabela 4 – Parâmetros característicos de cada curva de perda de massa.

	A (h)	B (°)	tgB (mg/h)	C (°)	tgC (mg/h)	Perda de massa total (mg)
$R_{CW}^{30\%}$	5,21	87	20,31	81	6,67	822,33
$R_{CW}^{90\%}$	4,30	77	4,41	54	1,39	156,27

Sendo (A) tempo nominal de incubação, (tg B) máxima taxa de erosão e (tg C) taxa de erosão terminal.



Com base no que foi abordado, pode-se estabelecer que o processo de cavitação é dependente de vários fatores, dentre eles, as transformações de fases, os elementos de liga, os processos de revestimento da superfície cavitada e acabamento superficial. Existem diversas considerações a serem feitas para o completo entendimento do resultado de perda de massa, uma delas é a definição absoluta de resistência a erosão. Esses fatores inferem na comparação entre os valores analisados do experimento, impossibilitando a comparação entre outros experimentos, sendo possível apenas a comparação em experimentos com o mesmo material e mesmas condições de ensaio.

Um aspecto a ser considerado é a relação da resistência à cavitação de um dado material com o efeito da injeção do arame adicional. A versatilidade da inserção de inúmeros materiais de adição, conforme a mudança do arame adicional, poderá formar diversas ligas com maior grau de resistência à cavitação.

Outro ponto de análise que pode ser mencionado é a diminuição da temperatura da poça de fusão. Em trabalhos anteriormente analisados, FERREIRA (17) e RODRIGUES (18),

observaram na junta soldada pelo processo GMAW-CW, a diminuição da zona afetada pelo calor, o que contribuiu para a formação de uma estrutura mais refinada. Nos estudos de BREGLIOZZI et al. (19), foi visto que uma estrutura mais refinada contribui para o aumento da resistência à cavitação.

Conclusões

A soldagem GMAW-CW utilizada para fabricação de revestimentos metálicos a base de cobalto atendeu os objetivos desejados, proporcionando corpos de prova isentos de descontinuidades e com excelente acabamento superficial.

A análise química da superfície das amostras exibiu a variação da composição das ligas formadas conforme a variação da relação de deposição. Os elementos que obtiveram as maiores variações foram o cobalto e o ferro. O aumento do cobalto influi em uma maior resistência à cavitação e, conseqüentemente, menor perda de massa acumulada. A diminuição do percentual de ferro age de forma contrária a variação de cobalto. Entretanto, não se pode descartar que os outros elementos de liga tenham sua parcela de contribuição para o aumento ou diminuição da resistência à cavitação, porém com menor intensidade.

O revestimento que obteve melhor resultado de resistência a cavitação foi a liga com relação de deposição de 90%. A liga formada alcançou resistência à cavitação cerca de 80% a menos perda de massa que a menor amostra de menor percentual, 30 %.

Referências bibliográficas

- (1) SREEDHAR, B. K.; ALBERT, S. K.; PANDIT, A. B. Cavitation erosion testing of austenitic stainless steel (316L) in liquid sodium. **Wear**. 328-329 (2015) 436-442.
- (2) ESCALER, X.; EGUSQUIZAA, E.; FARHATB, M.; AVELLANB, F.; COUSSIRATA, M. Detection of Cavitation in Hydraulic Turbines. **Mechanical Systems and Signal Processing**. 20 (2006) 982-1007.
- (3) FRANC, J. P.; MICHEL, J. M. **Fundamentals of Cavitation. Fluid Mechanics and its Applications**. 1th Ed, Kluwer Academic Publishers, 2005 (ISBN 978-1-4020-2233-3).
- (4) KUMAR, P.; SAINI, R. P. Study of cavitation in hydro turbines-A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 14 (2010) 374-383.
- (5) NIEDERHOFER, P.; HUTH, S.; THEISEN, W. Cavitation erosion and hydroabrasion resistance of cold work tool steels produced by powder metallurgy. **Wear** 332-333 (2015) 1059-1069.
- (6) XIAOJUN, Z.; PROCOPIAK, L. A. J.; SOUZA, N.C.; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. Phase transformation during cavitation erosion of a Co stainless steel. **Materials Science and Engineering-A**. 358 (2003) 199-204.
- (7) RICHMAN, R. H.; MCNAUGHTON, W. P. Correlation of cavitation erosion behavior with mechanical properties of metals. **Wear**. 140 (1990) 63-82.
- (8) MATTHEWS, S. J.; CROOK, P.; FLASCHE, L. H.; TACKETT, J. W. Weldability Characteristics of a New Corrosion and Wear-Resistant Cobalt Alloy. In 72 nd anual AWS Meeting. **Welding Research Supplement**. (1991) 331-338.
- (9) ANTONY, K. C. Wear resistant cobalt based alloys. **Journal of Metals**. 35 (1983.) 52-60.
- (10) CABRAL, T. S.; BRAGA, E. M.; MENDONÇA, E. A. M.; SCOTT, A. Influence of procedures and transfer modes in MAG welding in the reduction of deformations on marine structure panels. **Welding International**. 29 (2015) 339-348.

-
- (11) RIBEIRO, R. A.; SANTOS, E. B. F.; ASSUNÇÃO, P. D. C.; MACIEL, R. R.; BRAGA, E. M. Predicting Weld Bead Geometry in the Novel CW-GMAW Process. **Welding Journal**. 94 (2015) 301s-311s.
- (12) ASTM G32. Standard Test Method for cavitation Erosion Using Vibratory apparatus: Annual Book of ASTM Standards. **ASTM International**. 2011.
- (13) ASTM G01. Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens: Annual Book of ASTM Standards. **ASTM International**. 2017.
- (14) YAEDU, A.E. **Influência do Substrato na Deposição de Stellite 1 com Plasma de Arco Transferido** (Master thesis). Federal University of Paraná. Curitiba, Brazil. 2003.
- (15) WOODFORD, D. A. Cavitation-erosion-induced phase transformations in alloys. **Metallurgical Transactions**. 3 (1972) 1137-1145.
- (16) RIBEIRO, H. O.; BUSCHINELLI, A. J. A.; DUTRA, J. C.; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. Resistência à Erosão por Cavitação de Aços Inoxidáveis Austeníticos CrMnSiN depositados por PTA. **Revista Soldagem e Inspeção** 15 (2010) 121-129.
- (17) FERREIRA, A. S. A. **A influência do teor de silício na microestrutura e propriedades mecânicas do aço ASTM 131-grau a soldado por GMAW-CW e GMAW-DCW**. (Master thesis). 104p. Federal University of Pará. Belém, Brazil. 2014.
- (18) RODRIGUES, L. A. S. **Caracterização microestrutural e de propriedades mecânicas de soldas do aço ASTM A 131 pelos processos FCAW convencional e com adição de arame frio**. (Master thesis). 144p. Federal University of Pará. Belém, Brazil. 2011.
- (19) BREGLIOZZI, G.; SCHINOB, A.; AHMEDA, S. I.; KENNYB, J. M.; HAEFKEA, H. Cavitation wear behaviour of austenitic stainless steels with different grain sizes. **Wear**. 258 (2005) 503-510.