

Copyright 2016, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2016, em Búzios/RJ no mês de maio de 2016.

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

Análise da resistência à corrosão mecânica em revestimentos depositadas pelo processo GMAW-CW, empregados na recuperação de pás de turbinas hidráulicas

Tárcio dos S. Cabral^a, Lino A. S. Rodrigues^a, Sileno S. Dias^b, Eduardo de M. Braga^c

Abstract

This study presents developing an alternative method for applying cobalt based coatings used against erosion by cavitation in hydraulic turbine blades, through a variant of the GMAW welding process, called GMAW-CW. The consumables used were AWS ER 309L and a wire of cobalt base. The coating consisted of three layers of deposit. The first two layers obtained with the wire the AWS ER 309L applied through the GMAW process, with the feed speed of 8 m/min. and the last layer obtained with AWS ER 309L wire (main wire) and cobalt base (additional wire) applied through GMAW-CW process, using a deposition ratio for the additional wire. The additional power ratios correspond to 30 %, 60 % and 90% of the main wire speed (8 m/min.). The deposited coating surfaces presented excellent surface finish and free of imperfections. Through accelerated cavitation test (ASTM G32), the best result of mass loss per cavitation corresponded to sample of 90 % deposition ratio. The sample with worst result of mass loss was equivalent to 30 % deposition ratio.

Keywords: welding, coating, erosion, cavitation and ASTM G32.

Resumo

Este estudo apresenta o desenvolvimento de uma alternativa para aplicação de revestimentos a base de cobalto usados contra erosões por cavitação de pás de turbinas hidráulicas, através de uma variante do processo de soldagem o GMAW, denominada GMAW-CW. Os consumíveis utilizados foram o AWS ER 309L e um arame a base de cobalto. O revestimento consistiu do depósito de três camadas, as duas primeiras com o arame AWS ER 309L, através do processo GMAW, com a velocidade de alimentação de 8 m/min. 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 alimentação adicional corresponderam a 30 %, 60 % e 90 % da velocidade de arame principal, (8 m/min.). Os revestimentos depositados proporcionaram superfícies com excelente acabamento superficial, isentos de imperfeições. Por meio do ensaio de cavitação acelerado segundo a norma ASTM G32. Verificou-se que o melhor resultado da perda de massa por cavitação correspondeu a amostra da relação de deposição de 90 %. A amostra com pior resultado de perda de massa foi a correspondente a relação de deposição de 30 %.

Palavras-chave: soldagem, revestimento, erosão, cavitação e ASTM G32.

^a Doutorando, Universidade Federal do Pará - UFPA

^b Mestrando, Universidade Federal do Pará - UFPA

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

Introdução

Segundo Sreedhar et al. (1) e Escaler et al. (2), 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, instabilidade de fluxo, vibrações excessivas, danos em superfícies de materiais, 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 (5). Na atualidade a manutenção das turbinas hidráulicas vem utilizando os aços inoxidáveis ao cobalto. Segundo Xiaojun et al. (6) e Richman e McNaughton (7), esses materiais promovem boa resistência à erosão por cavitação.

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. De acordo com Cabral et al. (8) e Ribeiro et al. (9), este processo é uma alternativa técnica e econômica em relação à soldagem GMAW Duplo Arame. 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, aumento da resistência a erosão por cavitação. Para a validação da superfície revestida foi empregado o ensaio de cavitação acelerado por ultrassom, através da metodologia indireta, conforme descrito na norma ASTM G32 (10).

Neste trabalho foi proposto formular, depositar e avaliar o revestimento a base de cobalto, pelo novo processo de soldagem GMAW-CW, a fim de se obter satisfatória resistência à cavitação. A avaliação do revestimento aplicado foi realizada através de exame visual em busca de descontinuidades superficiais. A avaliação dos revestimentos foi realizada através do ensaio de cavitação acelerada.

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, descrito na Tabela 1. O modo de transferência predominante foi o tipo spray, por ser o modo de transferência com deposição mais constante e estável. A deposição do revestimento ocorreu sobre uma chapa 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. Foi empregada a técnica de tecimento horizontal, com amplitude de 9,25 mm e frequência de 1,1 Hz. Foi utilizada uma fonte eletrônica do tipo multiprocessos, tensão constante com tensão em vazio de 50 V, corrente máxima de 600 A e tensão máxima de 85 V.

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 amateigamento (Figura 1A), o gás de proteção utilizado foi o Ar + 2 % de O₂. Foi empregada uma temperatura de interpasse de 100 °C medida com pirômetro ótico, ou seja, entre cada novo cordão depositado esta foi a temperatura superficial da peça, este procedimento foi utilizado tanto para a etapa “i” como para a etapa “ii”.

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. O terceiro revestimento depositado foi a interação do arame AWS 309L com o arame a base de cobalto 21E, arame adicional. A terceira camada de revestimento foi depositada pelo processo de soldagem GMAW-CW, que utilizou o mesmo pacote operacional do arame AWS 309L. 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	30% da vel. al. (CP 1 e 2)	15	30	22	56
		60% da vel. al. (CP 3 e 4)				
		90% da vel. al. (CP 5 e 6)				

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

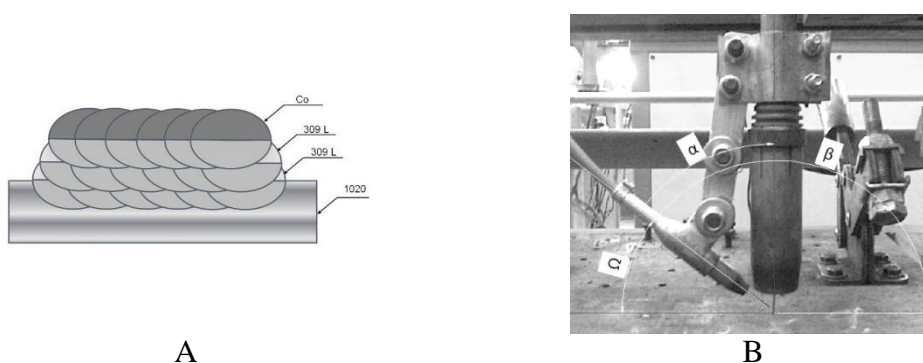


Figura 1 – (A) Esquema da deposição dos cordões de solda e (B) Ângulos de trabalho do injetor de arame adicional.

Neste trabalho, foi proposta 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).

$$R_{CW} = \frac{V_{ACW}}{V_A}$$

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 %, 60 % e 90 %, que correspondeu a velocidades de 2,4 m/min; 4,8 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 seis peças teste. As etapas “i” e “ii” podem ser visualizadas na Figura 2. O esquema de montagem para o processo GMAW-CW é ilustrado 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 acelerado, 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.

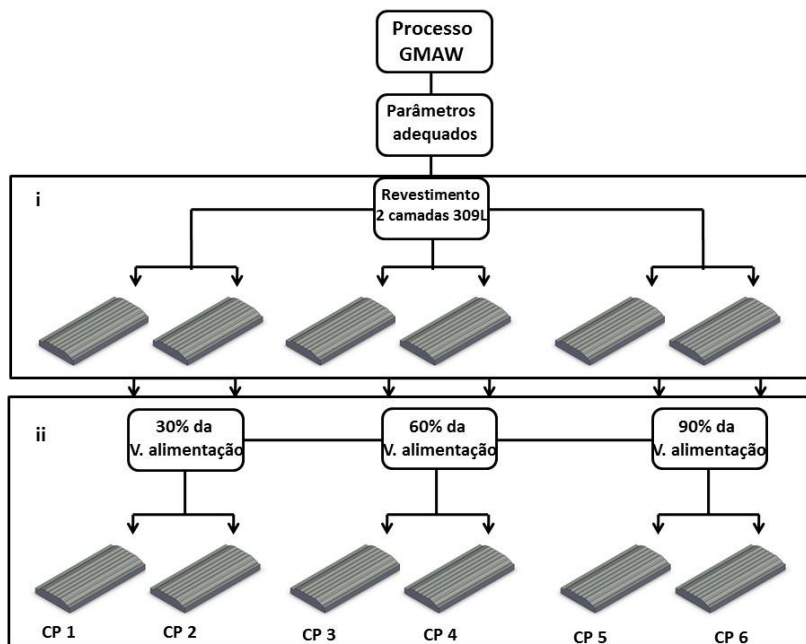


Figura 2 – Representação das etapas para o processo de revestimento das peças teste

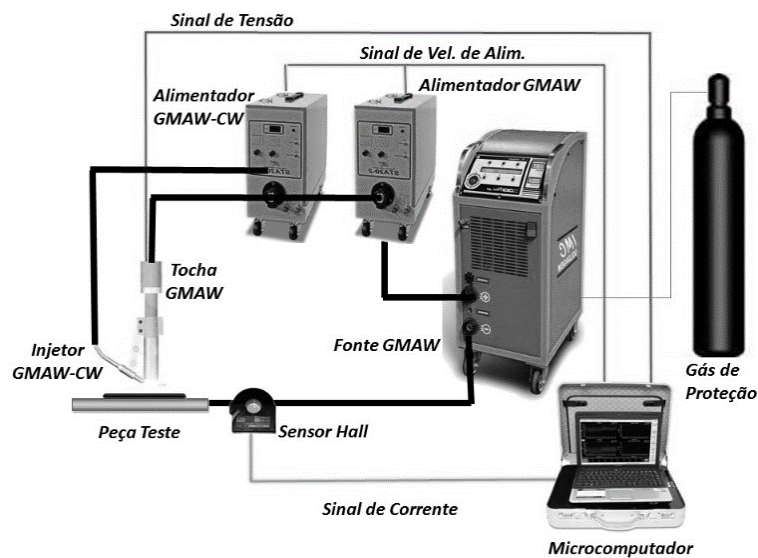


Figura 3 – Representação esquemática da montagem do processo GMAW-CW.

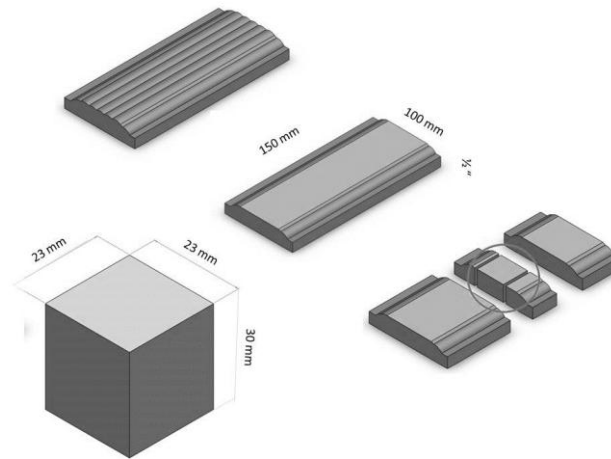


Figura 4 – Esquema do corte para o ensaio de cavitação acelerado.

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 será cavitada deve ser mantida a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$), 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 proposta a utilização de setenta horas (70 h) de ensaio pelo método indireto, 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 grão ou pó que permanece como resquício do processo. Após a limpeza a amostra era pesada, o procedimento de limpeza e pesagem foi repetido cinco vezes até que o corpo de prova não apresentasse variação significativa na massa.

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 vinte horas de ensaio, o corpo de prova teve sua massa verificada em intervalos de 5 h até um total de 70 h.

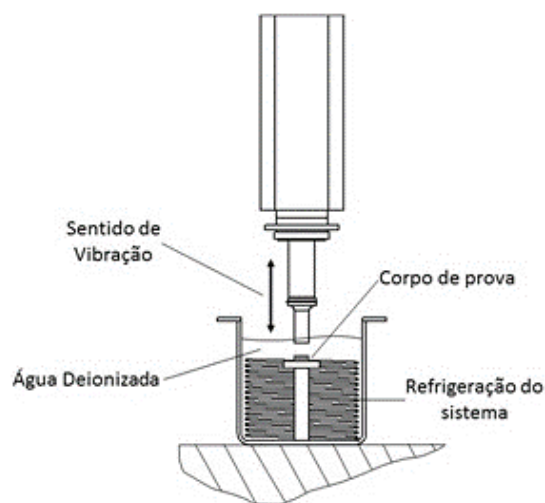


Figura 5 – Metodologia para o ensaio de cavitação acelerada, método indireto, ASTM G32 (10), adaptada.

Resultados e discussão

De forma geral, os revestimentos apresentaram boa qualidade superficial, com pouca incidência de respingos, com largura e reforço constantes, 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. Devido à boa qualidade superficial e sobreposição dos cordões em 30 %, a deposição do revestimento garantiu a redução dos vales formados entre um cordão e outro, possibilitando uma remoção mínima de revestimento para que se possa alcançar uma superfície plana das amostras para o ensaio de cavitação.

Como arame adicional foi direcionado diretamente na poça de fusão, houve a tendência do aumento do reforço à medida que havia o aumento da velocidade de alimentação do arame adicional, a largura dos cordões permaneceu constante, o que corrobora com os resultados obtidos por Assunção (11).

A composição química média dos materiais de adição e dos corpos de prova foi obtida 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
CP (1 e 2) 30%	7,84	48,90	27,90	11,90	0,05	0,45	1,60	0,87	0,06
CP (2 e 3) 60%	16,00	42,00	22,00	7,88	0,13	0,57	1,53	1,85	0,03
CP (5 e 6) 90%	21,20	38,60	23,30	7,85	0,12	0,75	1,77	2,43	0,03

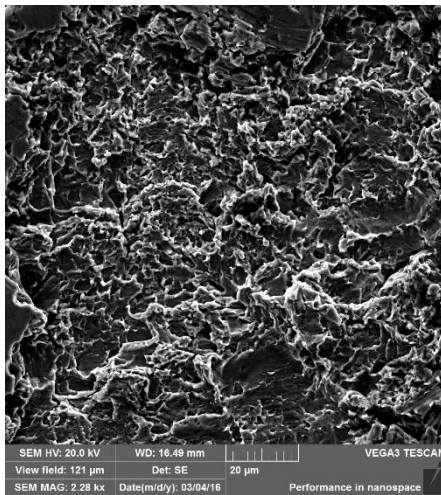
Pela Tabela 3 pode-se observar que os teores de cobalto aumentaram com o aumento da alimentação do arame adicional, tal fato é devido o arame adicional possuir cobalto em maior quantidade em massa na sua composição. Além do aumento do cobalto, houve o aumento de silício e molibdênio. Ainda observando 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, para estes mesmos percentuais de R_{CW} , teve uma redução de 21 %.

A influência do teor de ferro sobre a erosão por cavitação foi abordada nos estudos de Woodford (12), 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 dez horas do processo de erosão por cavitação. O referente autor observou que a resistência a cavitação diminui à medida que se aumenta o

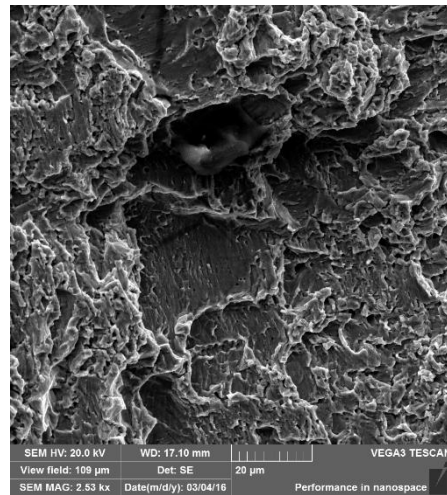
percentual de ferro na liga. Para ligas contendo 2 % de ferro a estrutura final foi a HC, estrutura mais resistente à cavitação, e para ligas com 15 % de ferro a estrutura final foi a CFC. Dessa forma a diminuição do teor de ferro é um ponto a ser considerado na diminuição da resistência à cavitação.

Além do aumento do volume de material depositado no revestimento, a variação de R_{CW} teve influência direta nos elementos de liga que formaram a solução sólida nos cordões. 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, o silício pode estar contribuindo para o aumento da dureza/resistência a cavitação (13,14), e o cobalto que é um elemento facilitador da formação de austenita retida.

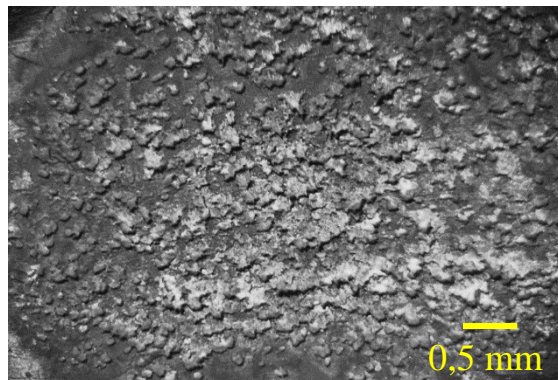
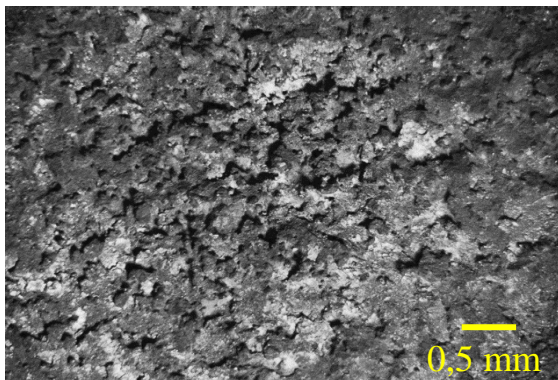
Para a amostra mais erodida, com R_{CW} de 30 %, Figura 6 A, sua superfície apresenta uma região com material retirado de pequenas dimensões, comparada com a área retirada da amostra de R_{CW} de 90 %, amostra que obteve o menor valor de perda de massa (Figura 6 B), com uma região de retirada de material mais grosseira que a da Figura 6A. Pela Figura 6 C pode-se observar múltiplas crateras, com a maior profundidade obtida entre as três razões de R_{CW} analisadas. A amostra erodida da Figura 6 D apresenta uma superfície menos erodida, gerando uma área desgastada com mais regiões de “planicidade”, com crateras mais largas e menos profundas, sendo o valor de perda de massa aproximadamente 80% menor que a amostra com R_{CW} de 30 %.



A



B



C

D

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

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, (6,15). 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.

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)
CP (1 e 2) 30%	5,21	87	20,31	81	6,67	822,33
CP (2 e 3) 60%	3,14	84	9,97	62	1,92	326,65
CP (5 e 6) 90%	4,30	77	4,41	54	1,39	156,27

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

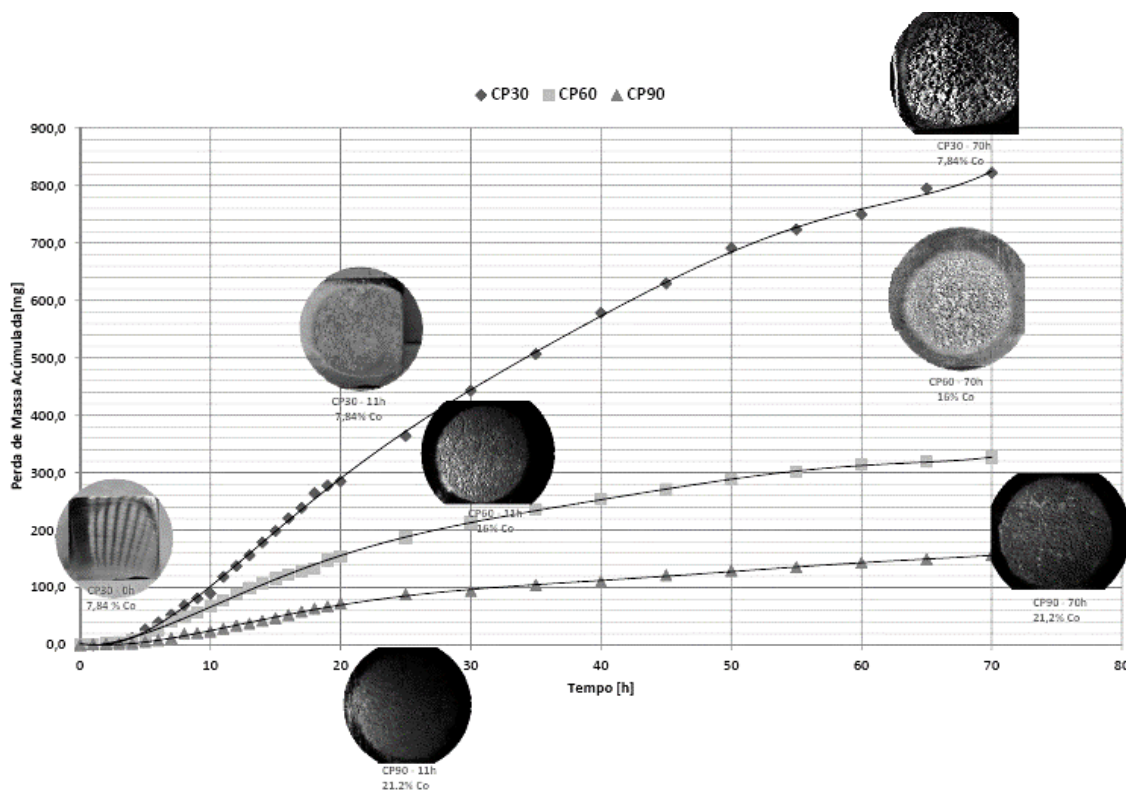


Figura 7 – Curvas da perda de massa acumulada das amostras revestidas com suas respectivas relações de deposição.

Com base no que já foi abordado, pode-se estabelecer que o processo de cavitação é dependente de vários fatores, dentre eles, a influência das transformações de fases, elementos de liga, 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 à erosão. Esses fatores inferem uma comparação entre os valores analisados no experimento, impossibilitando a comparação entre outros experimentos, sendo possível apenas a comparação em experimentos com o mesmo material e mesmas condições de ensaio. Outro aspecto a ser considerado é a relação da resistência à cavitação de um dado material com o efeito da injeção de um arame adicional, além da versatilidade da adição de inúmeros materiais de adição conforme a mudança do arame adicional, isto poderá formar diversas ligas, com maior grau de resistência a cavitação. Outro ponto de análise que pode ser mencionado é a diminuição da temperatura da poça de fusão. Em trabalhos anteriormente analisados (16), foi observado na junta soldada pelo processo GMAW-CW há ocorrência da diminuição da zona afetada pelo calor e a formação de uma estrutura mais refinada, fato que também possui uma contribuição para o aumento da resistência a cavitação(17).

Conclusões

O pacote operacional GMAW-CW desenvolvido atendeu os objetivos desejados, proporcionando corpos de prova isentos de discontinuidades 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 R_{cw} . 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, sendo também levada em consideração a variação dos demais constituintes da liga.

O revestimento que obteve melhor resultado de resistência a cavitação foi a liga com relação de deposição de 90 %, a liga formada alcançou resistência a cavitação cerca de 80% a menos perda de massa que a menor amostra de R_{cw} de 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. et al. Detection of Cavitation in Hydraulic Turbines. **Mechanical Systems and Signal Processing**. v. 20 p. 982-1007. 2006.
- (3) FRANC, J.P. MICHEL, J.M. **Fundamentals of Cavitation: Fluid Mechanics and its Applications**. New York: Kluwer Academic Publishers, 2004. 306p.
- (4) KUMAR, P.; SAINI, R. P. Study of cavitation in hydro turbines—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 1, p. 374-383, 2010.
- (5) NIEDERHOFER, P.; HUTH, S.; THEISEN, W. Cavitation erosion and hydroabrasion resistance of cold work tool steels produced by powder metallurgy. **Wear**, v. 332, p. 1059-1069, 2015.
- (6) XIAOJUN, Z. H. A. O. et al. Phase transformation during cavitation erosion of a Co stainless steel. **Materials Science and Engineering: A**, v. 358, n. 1, p. 199-204, 2003.

-
- (7) RICHMAN, R. H.; MCNAUGHTON, W. P. Correlation of cavitation erosion behavior with mechanical properties of metals. **Wear**, v. 140, n. 1, p. 63-82, 1990.
- (8) CABRAL, T. S. et al. Influence of procedures and transfer modes in MAG welding in the reduction of deformations on marine structure panels. **Welding International**, v. 29, n. 12, p. 928-936, 2015.
- (9) 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 301s-311s. 2015.
- (10) ASTM G32. Standard Test Method for cavitation Erosion Using Vibratory apparatus: Annual Book of ASTM Standards. ASTM International. 2011.
- (11) ASSUNÇÃO, P. D. C. **Estudo da viabilidade do processo de soldagem GMAW-DCW (double cold wire)** 2014. 180f, Dissertação (Mestrado). Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica; Universidade Federal do Pará. Belém, Brasil. 2014.
- (12) WOODFORD, D. A. Cavitation-erosion-Induced phase transformations in alloys. **Metallurgical Transactions**, v. 3, n. 5, p. 1137-1145, 1972.
- (13) MATTHEWS, S. J. et al. Weldability Characteristics of a New Corrosion and Wear-Resistant Cobalt Alloy. **Welding Journal, Research Supplement**, v. 70, 1991.
- (14) ANTONY, Kenneth C. Wear-resistant cobalt-base alloys. **JOM**, v. 35, n. 2, p. 52-60, 1983.
- (15) RIBEIRO, H. O. et al. Resistência à Erosão por Cavitação de Aços Inoxidáveis Austeníticos CrMnSiN Depositados por PTA. **Revista Soldagem & Inspeção**. ABS. v.15 n.02 p.121-129. 2010.
- (16) 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**. 2014. 104f, Dissertação (Mestrado). Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica; Universidade Federal do Pará. Belém, Brasil. 2014.
- (17) BREGLIOZZI, G. et al. Cavitation wear behaviour of austenitic stainless steels with different grain sizes. **Wear**, v. 258, n. 1, p. 503-510, 2005.