

RECUPERAÇÃO DE TURBINAS HIDRÁULICAS CAVITADAS POR DEPOSIÇÃO DE REVESTIMENTOS A BASE DE COBALTO – ASPECTOS MICROESTRUTURAIS ⁽¹⁾

Gustavo Borges Musardo ⁽²⁾
Márcia Regina Vieira de Araújo ⁽²⁾
Wyser José Yamakami ⁽³⁾
Vicente Afonso Ventrella ⁽⁴⁾
Juno Gallego ⁽⁵⁾

Resumo

Neste trabalho foi investigada a microestrutura de amostras preparadas conforme o procedimento usado no reparo de danos causados por cavitação em turbinas hidráulicas. Foram depositadas por soldagem com proteção gasosa (SAMG) camadas de eletrodos dos tipos E70-S6, E309-T1 e E410NiMo sobre substratos similares aos materiais das turbinas. As camadas exteriores foram preparadas com o uso de um aço inoxidável com adição de cobalto, indicado para reparos que requerem resistência ao desgaste causado pela cavitação. Usando microscopia ótica como técnica de análise foram explorados e discutidos aspectos microestruturais associados às diversas camadas de revestimento e suas possíveis implicações sobre a dureza das mesmas. Verificou-se que tanto a microestrutura quanto as medidas de microdureza foram influenciadas pela composição do eletrodo e pelo ciclo térmico de soldagem aplicado na deposição do revestimento.

Palavras-chave: Cavitação; Liga ao cobalto; Revestimento soldado; Microestrutura.

⁽¹⁾ Trabalho a ser apresentado no 60º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. Belo Horizonte, 25 a 28 de julho de 2005.

⁽²⁾ Aluno de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UNESP – Ilha Solteira

⁽³⁾ Doutor em Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica, UNESP – Ilha Solteira

⁽⁴⁾ Doutor em Engenharia de Materiais. Departamento de Engenharia Mecânica, UNESP – Ilha Solteira

⁽⁵⁾ Doutor em Engenharia de Materiais. Departamento de Engenharia Mecânica, UNESP – Ilha Solteira. Sócio da ABM. Endereço eletrônico: gallego@dem.feis.unesp.br

1 INTRODUÇÃO

Em nosso país as maiores provedoras de energia elétrica são as usinas hidroelétricas, responsáveis por mais de 90% da demanda [1]. No estado de São Paulo destaca-se o Complexo Hidroelétrico de Urubupungá, com três usinas instaladas dentro de um raio de 50km (Ilha Solteira, Três Irmãos e Jupia) e que aproveitam a vazão dos rios Paraná e Tietê. Nessas usinas numerosas turbinas hidráulicas estão instaladas, que podem diferir em aspectos construtivos dependendo do fluxo de água disponível. Em Ilha Solteira e Três Irmãos foram instaladas turbinas do tipo Francis (máquinas com palhetas fixas, construídas em aço-carbono), enquanto em Jupia estão em funcionamento turbinas Kaplan (máquinas com palhetas móveis, construídas em aço inoxidável martensítico).

Embora as turbinas sejam projetadas visando o máximo rendimento e durabilidade, a utilização dessas máquinas por longos períodos de tempo leva a ocorrência de um fenômeno causado por variações dinâmicas de pressão – a cavitação. Sendo um evento de ação contínua, a cavitação causa grandes perdas de massa em áreas específicas da turbina e que leva ao dano catastrófico se não forem tomadas medidas corretivas [2]. A reposição do material removido pela cavitação é feita por processos de soldagem, sendo consumidos com frequência mais de uma tonelada de eletrodos para repor essas perdas [1]. Objetivando garantir maior resistência ao processo cavitativo e aumentar o período entre as manutenções programadas faz-se o uso de procedimentos de soldagem e consumíveis adequados [3]. Assim, o metal de adição usado para repor a maior parte do dano causado pela cavitação tem características/composição semelhantes às do material usado na fabricação da turbina. Próximo a superfície é feito um amanteigamento, no qual utiliza-se normalmente um arame de aço inoxidável. A camada superficial, mais exposta aos efeitos da cavitação, é feita a partir da soldagem de um consumível que seja resistente ao desgaste cavitacional. Por se tratar de um problema tecnológico de grande importância econômica diversos grupos de pesquisa nacionais [1, 2, 4] e internacionais [5] tem dedicado esforços para desenvolver materiais adequados para esta finalidade. Diversas ligas com cobalto têm sido satisfatoriamente empregadas no reparo de turbinas hidráulicas cavitadas. O propósito deste trabalho é apresentar aspectos microestruturais associados aos materiais utilizados no reparo de turbinas danificadas por cavitação, parte de uma investigação mais ampla que pretende analisar os mecanismos de resistência à cavitação oferecida por certas ligas comerciais e a sua relação com os processos de soldagem. Para tanto foram analisadas, por microscopia ótica e medidas de microdureza Vickers, amostras que foram confeccionadas seguindo o procedimento padrão estabelecido.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A partir de retalhos extraídos de turbinas hidráulicas, construídas em aço-carbono tipo A-36 e aço inoxidável tipo 410, foram usinadas placas com dimensões 140 x 50 x 15 milímetros de espessura. Essas peças serviram como substrato para a deposição das camadas de revestimento, cujo procedimento seguiu a prática recomendada para este tipo de reparo (danos por cavitação) [6]. A deposição do metal de solda sobre o substrato foi feita pelo processo de arco elétrico com proteção gasosa (SAMG). Exceto para a liga ao cobalto, que utilizou uma mistura 2% O₂ – 98% Ar, a deposição dos demais arames foi realizada com gás 25% CO₂ –

75% Ar. A Tabela 1 apresenta a composição nominal dos materiais empregados, enquanto na Tabela 2 são especificados os parâmetros de soldagem. A temperatura interpasses foi fixada em 150°C, sendo a mesma monitorada durante o processamento por um termômetro infravermelho. A identificação das camadas depositadas nas amostras preparadas é apresentada de maneira esquemática na Figura 1.

Tabela 1. Composição nominal dos materiais usados na soldagem (% peso).

especificação	arame	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si
A-36	(substrato)	0,25	-	-	-	1,00	0,30
Inox 410	(substrato)	0,15	11,5	-	-	1,00	1,00
E70-S6	sólido	0,10	-	-	-	1,65	1,00
E309-T1	tubular	0,06	23,0	12,8	-	1,40	0,80
E410NiMo	tubular	0,06	12,0	4,5	0,55	1,00	0,80
Liga Co	tubular	0,15	19,5	-	0,28	9,80	1,90

Tabela 2. Parâmetros de soldagem.

CDP	M.B.	arame	camada	I [A]	V [V]	v [mm/min]	IC [kJ/mm]
S2	A-36	E70-S6	(1)	150	27	534	0,364
		E70-S6	(2)	150	27	420	0,463
		E309-T1	(1)	150	27	474	0,410
		E309-T1	(2)	150	27	450	0,432
		Liga Co	(1)	148	29	348	0,592
		Liga Co	(2)	148	29	336	0,606
S5	A-36	E70-S6	(1)	150	27	522	0,372
		E70-S6	(2)	150	27	414	0,470
		Liga Co	(1)	148	29	342	0,601
		Liga Co	(2)	148	29	330	0,624
S10	Inox 410	E410NiMo	(1)	150	27	450	0,432
		E410NiMo	(2)	150	27	390	0,498
		Liga Co	(1)	148	29	342	0,601
		Liga Co	(2)	148	29	324	0,635

onde **M.B.** é o metal base (substrato) usado na amostra, **I**, **V** e **v** correspondem respectivamente a corrente, a tensão e a velocidade médias de soldagem, enquanto **IC** equivale ao insumo de calor médio na respectiva camada.

Após a soldagem os corpos-de-prova foram cortados com disco abrasivo, visando a preparação de amostras para caracterização por microscopia ótica. Embutidas as peças em resina seguiu-se o lixamento de maneira convencional, sendo o polimento feito com alumina 1,0 μm . A revelação da microestrutura foi feita com a aplicação de uma solução descrita por Shin e colaboradores [7] (100ml H₂O, 10ml HNO₃, 50ml H₂SO₄, 10g FeCl₂). Medidas de microdureza Vickers (carga

padrão de 40g) foram efetuadas em espaçamentos padronizados de 0,5mm, desde a superfície do revestimento até o substrato (metal base).

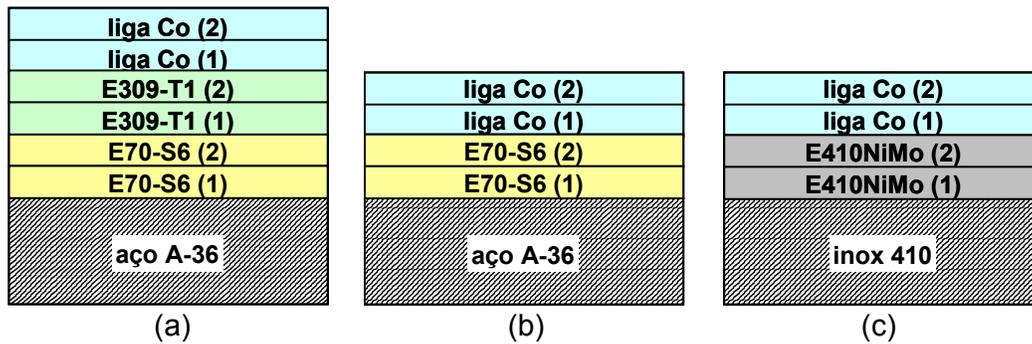


Figura 1. Representação esquemática da seqüência das camadas de recobrimento sobre o substrato. Amostra S2 em (a), S5 em (b) e S10 em (c).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A observação da superfície polida das amostras permitiu identificar, com facilidade, as inclusões existentes no material. As micrografias da Figura 2 exemplificam as partículas observadas nas diversas camadas depositadas.

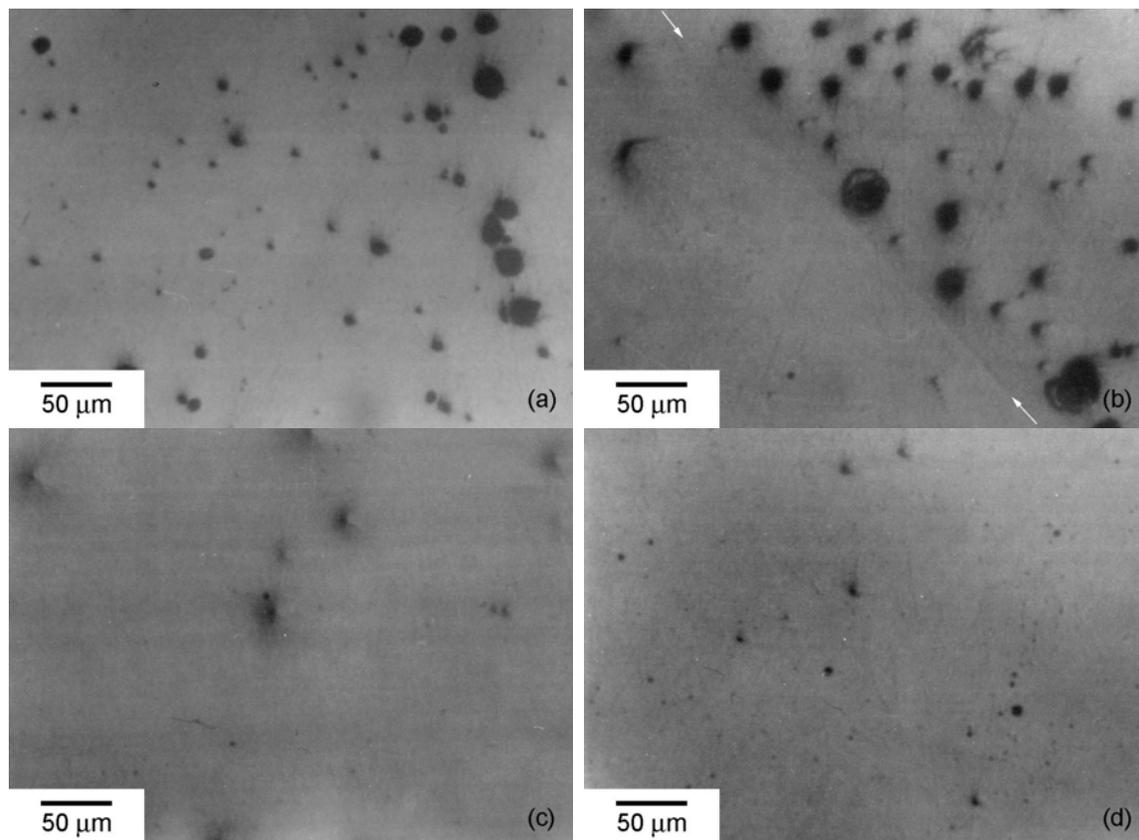


Figura 2. Inclusões tipicamente identificadas nas camadas depositadas com arame E70-S6 (a), E309-T1 (b), E410NiMo (c) e na liga com cobalto (d). Amostra não atacada. Aumento padrão: 200 vezes.

Grande número de inclusões globulares, com tamanho variando normalmente entre 2 a 20 μm , foi observado nas camadas de aço-carbono E70-S6 das amostras S2 e S5. A sua formação foi atribuída à diluição dos elementos químicos na poça de fusão, provenientes do metal de adição e do metal base, particularmente silício e alumínio (desoxidantes) e manganês (controle de sulfetos). Distribuições de partículas grosseiras semelhantes não foram observadas nas demais camadas de revestimento, onde as inclusões mostraram ser menores (1 a 5 μm) e mais dispersas. Nas amostras S2 e S5 verificou-se que na interface entre a camada feita com E70-S6 e o revestimento adjacente (E309-T1 ou liga Co) havia um intenso acúmulo de partículas no lado do aço-carbono. Esta aglomeração freqüentemente “decorava” a linha da poça de fusão, como mostrado na Figura 2(b), e pode estar associada a falhas ocorridas em serviço [3]. A natureza frágil das inclusões e o seu “alinhamento” facilitariam a propagação de trincas que poderiam levar a ruptura do revestimento nestas regiões [8].

O ataque químico realizado revelou a microestrutura das camadas de revestimento resistente à cavitação. As micrografias apresentadas na Figura 3 mostram a região da interface entre a primeira camada da liga com cobalto e o respectivo substrato. Confirmou-se a presença de uma região planar, cuja espessura variou com o substrato (mais espesso com o aço E309-T1 e mais delgado com a aplicação do arame E70-S6), de onde se originou o crescimento de dendritas. Apesar do aporte térmico usado na soldagem desta camada da liga Co ser semelhante nas amostras analisadas, constatou-se a ocorrência tanto do crescimento dendrítico do tipo celular quanto do tipo colunar. Tal comportamento foi atribuído a gradientes de concentração existentes na poça de fusão [9].

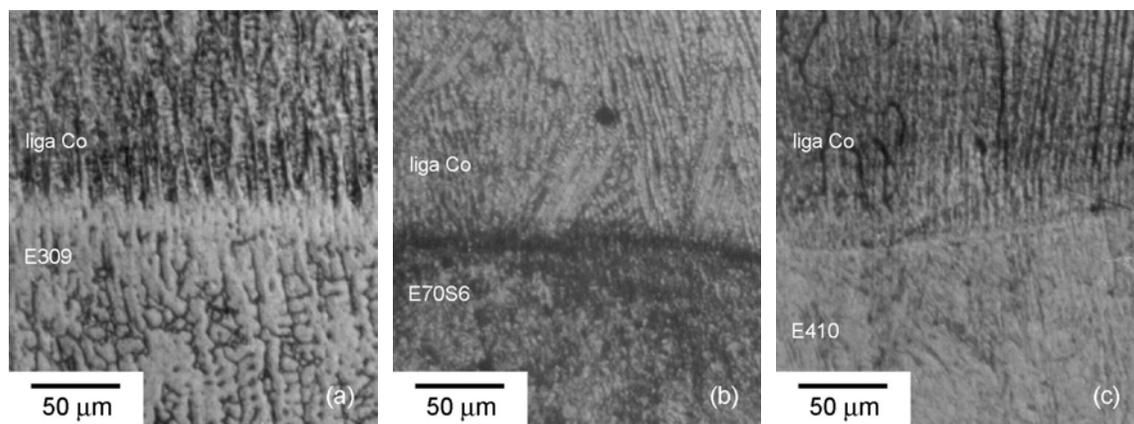


Figura 3. Região da interface entre a liga com cobalto e o respectivo substrato. Amostra S2 em (a), S5 em (b) e S10 em (c). Ampliação padronizada em 250 vezes.

As micrografias mostradas na Figura 4 mostram o aspecto microestrutural dos demais revestimentos depositados. Embora a morfologia dendrítica tenha sido identificada em todas as camadas revestidas com a liga Co notou-se entre elas algumas diferenças, as quais foram atribuídas mais ao efeito da composição química (diluição) do que ao ciclo térmico realizado durante a soldagem (Tabela 2). A liga Co que recobriu o revestimento feito com o arame E410NiMo (Figura 4a) mostrou ramos primários e bolsões interdendríticos mais finos que nas demais amostras. O revestimento feito com aço inoxidável austenítico E309-T1 (Fig. 4b) também apresentou uma estrutura dendrítica, com ramos primários de austenita entrelaçados com regiões ferríticas do tipo vermicular [10]. A micrografia da Figura 4c mostra uma

região da camada revestida com o arame de aço-carbono E70-S6, revestimento que se caracterizou pela alta concentração de inclusões e pelo aparecimento de constituintes aciculares. O recobrimento feito com a soldagem do arame E410NiMo (Figura 4d) mostrou extensas áreas com morfologia martensítica.

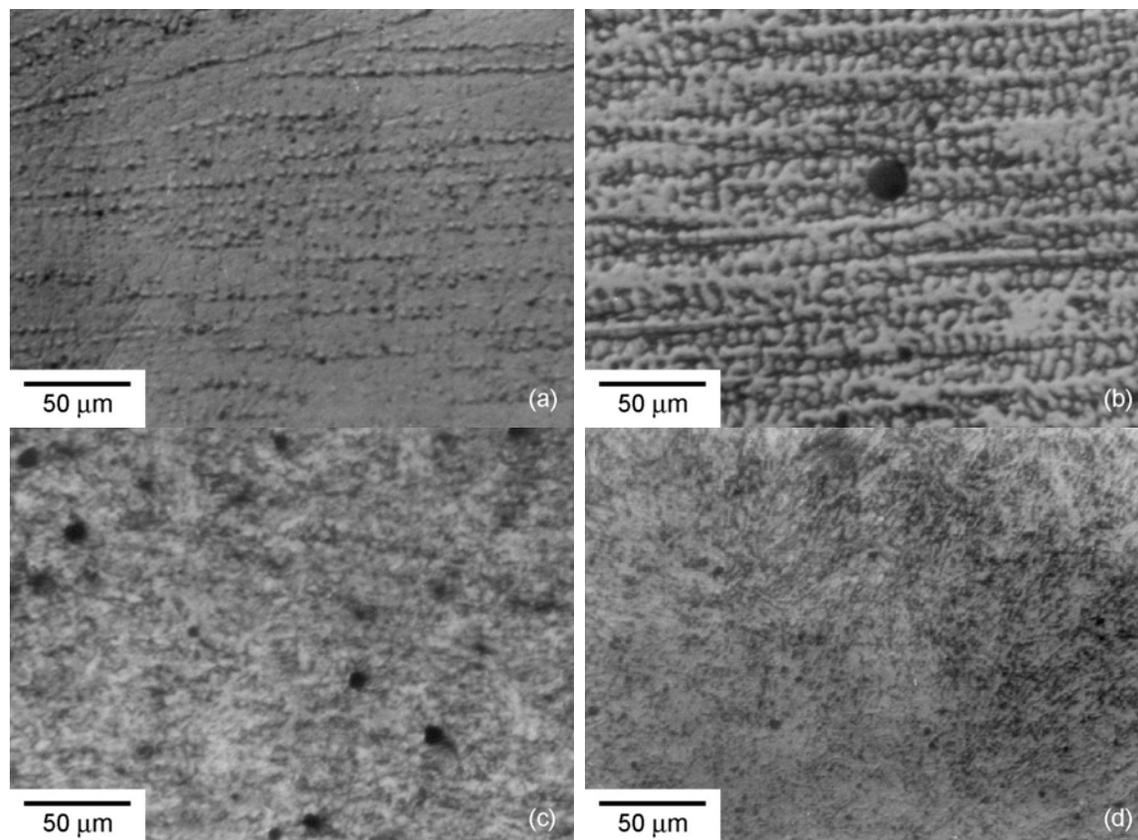


Figura 4. Microestruturas tipicamente observadas nas diversas camadas de revestimento. Liga com cobalto em (a), arame E309-T1 em (b), arame E70-S6 em (c) e arame E410NiMo em (d). Aumento padrão: 300 vezes.

A Figura 5 mostra a variação da microdureza nas camadas depositadas. Foi observado que na amostra S2 ocorreu um decréscimo na dureza do revestimento resistente à cavitação. Houve, entretanto, um endurecimento na região de transição da liga Co com o aço inoxidável E309, provavelmente causado pelo efeito da diluição e do ciclo térmico de soldagem. Embora não tenha sido possível identificar exemplares por microscopia ótica, a formação de carbonetos de cromo promoveria o endurecimento observado. A aplicação de técnicas adequadas (microscopia eletrônica) será feita futuramente com o objetivo de caracterizar a presença de tais partículas mas estudos realizados em ligas contendo cromo e maior teor de cobalto (stellites) creditaram uma parcela expressiva da dureza ao efeito causado pela existência de carbonetos cuboidais do tipo $M_{23}C_6$ [11]. Na amostra S5 o aumento de dureza na interface entre seria favorecido pela partição do carbono entre a liga com cobalto e o aço E70-S6. Os níveis de dureza medidos nas camadas de aço inoxidável martensítico (E410NiMo) foram bastante aproximados aos observados no recobrimento feito com a liga com cobalto, ao contrário das outras amostras onde o amateigamento mostrou menor endurecimento. Tal comportamento pode ser devido ao uso de CO_2 na soldagem do arame pois foi verificado experimentalmente

o aumento da dureza do aço E410NiMo com a utilização de misturas mais ricas em dióxido de carbono [12]. Nas três amostras ensaiadas foi constatado um aumento na dureza da camada depositada sobre o metal base, comportamento que foi correlacionado com o refinamento da microestrutura nestas regiões.

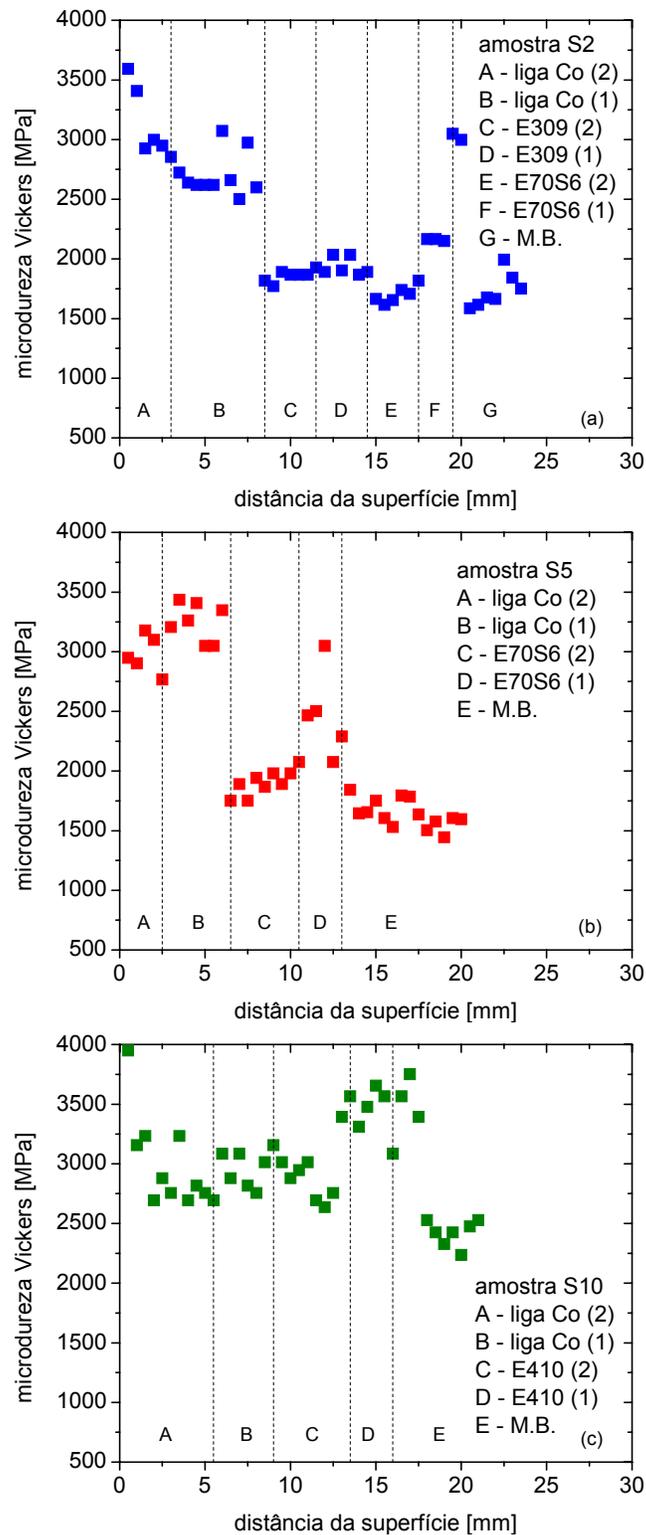


Figura 5. Variações de microdureza verificados nos revestimentos feitos por soldagem. Amostra S2 em (a), S5 em (b) e S10 em (c). Carga padrão: 40 gf.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados e discutidos sobre a microestrutura de revestimentos aplicados por soldagem, feitos conforme o procedimento estabelecido para o reparo de turbinas hidráulicas danificadas por cavitação, podem ser tiradas as seguintes conclusões:

- A microestrutura dos diversos revestimentos analisados mostrou ser complexa, resultado da interação entre os efeitos da diluição e dos ciclos térmicos aplicados nos processos de soldagem;
- A análise metalográfica permitiu constatar a inexistência de microporosidades sendo, no entanto, identificados um grande número de inclusões grosseiras (morfologia globular com tamanhos entre 2 a 20 μ m) principalmente nas camadas revestidas com o aço-carbono E70-S6;
- O crescimento das dendritas, tanto do tipo celular quanto colunar, ocorreu a partir de uma região planar existente na interface entre camadas de composição diferente;
- A microestrutura mostrou depender da composição do revestimento, mostrando ser preponderantemente dendrítica na liga com cobalto e na camada de aço inoxidável austenítico (E309-T1) e colunar/acicular no revestimento feito com o aço-carbono E70-S6. Na camada depositada com o arame E410NiMo a microestrutura mostrou aspecto martensítico;
- O comportamento da dureza mostrou ser complexo nos revestimentos analisados. A dureza do revestimento resistente a cavitação mostrou ser da ordem de 3000MPa, decaindo à medida que se afasta da superfície. O amanteigamento feito com o arame de aço inoxidável, seja o E309-T1 ou o E410NiMo, resultou em camadas com maior uniformidade de dureza se comparado ao uso do aço-carbono.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Companhia Energética de São Paulo e a Servtec Serviços Técnicos Terceirizados Ltda. que gentilmente cederam os materiais e amostras usadas neste trabalho, e também aos senhores Renato Barela e Mário Alberto Almeida Artoni pela valiosa colaboração prestada durante o desenvolvimento do projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 CALAINHO, J. A. L., HORTA, C. A., GONÇALVES, C. e LOMÔNACO, F. G. Cavitação em Turbinas Hidráulicas do Tipo Francis e Kaplan no Brasil. In: ANAIS DO XV SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 6p., Foz do Iguaçu, 1999. 1 CD.
- 2 MARQUES, P. V. Proteção de Turbinas Hidráulicas contra o Desgaste Cavitacional. **Soldagem e Inspeção**, V. 8, n. 2, pp. 47-58, 2003.
- 3 ARTONI, M. A. A. Comunicação Particular. Setembro, 2004.
- 4 BARRA, S. R., DUTRA, J. C. e RIBAS, F. A. Avaliação dos Efeitos da Variação dos Parâmetros/Procedimentos de Soldagem e Automação sobre a Planicidade e Aspecto Superficial dos Revestimentos Empregados em Turbinas Hidráulicas. In: ANAIS DO XXIV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM. 9p. Fortaleza, 1998. Associação Brasileira de Soldagem, ABS, 1998. 1 CD.

- 5 LEE, M.-W., KIM, Y.-K., KIM, Y., LEE, S.-H., HONG, H.-S. and KIM, S.-J. Study on the Cavitation Erosion Behavior of hardfacing Alloys for Nuclear Power Industry. **Wear**, V. 255, pp. 157-161, 2003.
- 6 BARELA, R. Comunicação Particular. Setembro, 2004.
- 7 SHIN, J-C, DOH, J-M, YOON, J-K, LEE, D-Y and KIM, J-S. Effect of Molybdenum on the Microstructure and Wear Resistance of Cobalt-base Stellite Hardfacing Alloys. **Surface and Coating Technology**, V. 166, pp. 117-126, 2003.
- 8 SCHUMANN, G. O. and FRENCH, I. E. Effect of Microstructure and Non-Mettalic Inclusions on the Impact Properties of Flux-Cored Weld Metals. **Scripta Materialia**, V. 36, n. 12, pp. 1443-1450, 1997.
- 9 LINNERT, G. E. Simple Welds in Iron and Steel. In: _____. **Welding Metallurgy – volume 1**. Miami, American Welding Society, 4th ed., 1994. Cap. 9, pp. 786-891.
- 10 OATES, W. R. and SAITTA, A. M. (eds). Stainless and Heat-Resisting Steels. In: _____. **Welding Handbook – volume 4**. Miami, American Welding Society, 8th ed., 1998. Cap. 5, pp. 234-332.
- 11 ATAMERT, S. and BHADESHIA, H. K. D. H. Comparison of the Microstructures and Abrasive Wear Properties of Stellite Hardfacing Alloys Deposited by Arc Welding and Laser Cladding. **Metallurgical Transactions A**, V. 20A, n. 6, pp. 1037-1054, 1989.
- 12 CARDOSO, R. L., PRADO, E. M., OKIMOTO, P. C., PAREDES, R. S. C., PROCOPIAK, L. A. Avaliação da Influência de Gases de Proteção Contendo Diferentes Teores de CO₂ nas Características dos Revestimentos Soldados Visando o Reparo de Turbinas Erodidas por Cavitação. **Soldagem e Inspeção**, V. 8, n. 2, pp. 68-74, 2003.

MICROSTRUCTURAL FEATURES OF AUSTENITIC-COBALT COATING ALLOY USED TO REPAIR CAVITATION EROSION IN TURBINE BLADES

Gustavo Borges Musardo⁽²⁾
Márcia Regina Vieira de Araújo⁽²⁾
Wyser José Yamakami⁽³⁾
Vicente Afonso Ventrella⁽⁴⁾
Juno Gallego⁽⁵⁾

Abstract

The cavitation erosion is one of the main reasons for the damage of flow machines, being responsible for significant loss of mass in their parts. Cobalt-base alloys have been traditionally used in water turbines as an effective hardfacing coating, which are usually deposited by gas metal arc welding (GMAW) process on cavitation erosion surface. In the present work several flux-cored and solid wires, such as AWS E70-S6, E309-T1, E410NiMo and an austenitic stainless steel containing cobalt, were used to make buttering and hardfacing layers. Samples from welding procedures were prepared for microstructure characterization by light microscopy. Vickers microhardness tests have been carried out on these layers, which results have been analysed and discussed with their respective microstructures. It was concluded that austenitic stainless steel with cobalt addition have allowed higher microhardness values but these results were dependent on the kind of substrates or deposited layers and their microstructural features.

Key-words: Cavitation; Cobalt-austenitic stainless steel; Hardfacing; Microstructure.