

A INFLUÊNCIA DO APORTE TÉRMICO NA METALURGIA DE SOLDAGEM DE REVESTIMENTOS DE AÇO INOXIDÁVEL COM COBALTO

Rodrigo de Geus Kruppa (UTFPR) E-mail: rodrigokruppa@yahoo.com.br
Anderson Geraldo Marenda Pukasiewicz (UTFPR) E-mail: anderson@utfpr.edu.br
João Luiz Kovaleski (UTFPR) E-mail: kovaleski@utfpr.edu.br
Andréia Antunes da Luz (UTFPR) E-mail: andreia-luz@hotmail.com

Resumo: O aço inoxidável ASTM A743-CA6NM vem sendo utilizado em turbinas hidráulicas devido a sua boa soldabilidade e resistência à cavitação satisfatória, mas ainda possui restrições com relação à soldagem em regiões erodidas ou que apresentem trincas. A deposição de revestimentos resistentes à cavitação em pás de turbinas é um importante modo de redução de danos à cavitação. Aços inoxidáveis ligados com cobalto são uma das classes dos materiais resistentes à cavitação. Estas ligas apresentam ótima resistência à cavitação devido ao elevado endurecimento induzido por deformação, à transformação de fase e à menor energia de falha de empilhamento. O propósito deste trabalho é avaliar a metalurgia dos revestimentos de aços inoxidáveis ligados ao cobalto depositados sobre aço inoxidável martensíticos macio pelo processo MIG (*Metal Inert Gas*). O revestimento de aço inoxidável ao cobalto é avaliado, bem como a influência da tensão de soldagem na diluição, dimensão, microdureza e composição química da amostra, largura e microdureza da ZTA. Estudos preliminares demonstram boa soldabilidade sem a presença de trincas ou porosidades. O aumento da tensão de soldagem promove o aumento da diluição, maior tendência de formação de martensita e aumento da microdureza.

Palavras chave: Cavitação, metalurgia da soldagem, aço inoxidável martensíticos macio.

HEAT INPUT INFLUENCE ON WELDING METALLURGY OF COBALT STAINLESS STEEL COATINGS

Abstract: The ASTM A743-CA6NM steel have been used in hydraulic turbines, because its adequate cavitation resistance and good weldability, but still it shown restrictions with reference to the welding recovery of eroded areas. The deposition of cavitation resistant materials coatings in turbine blades is an important way to reduce the cavitation damage. The cobalt stainless steel is a class of cavitation resistant steel. These alloys exhibit a great cavitation resistance because a high induced strain hardening, phase transformartion and lower stacking fault energy. The purpose of this work is to evaluate the metallurgy of Co Stainless Steel coatings welded over soft martensitic stainless steel with MIG process. Metal cored Cobalt Stainless Steel welded coating was evaluated, as well as the influence of the heat input in dilution, dimensions, microhardness and chemical composition, as well as HAZ microhardness and length. Preliminary results indicate a good weldability without crack and porosity. The increase in heat input promotes a dilution increase as well as width/height relation. With argon+2%O₂ gas protection use it was observed a increase in dilution. Voltage increase promote dilution increase, martensite phase formation and higher microhardness.

Keywords: Cavitation, welding metallurgy, soft martensitic stainless steel

1. INTRODUÇÃO

A perda de massa por cavitação ocorre quando uma superfície é exposta a um fluido com uma variação local de pressão. A redução de pressão promove a formação de bolhas seguido do colapso de bolhas de vapor de água na superfície em uma região de elevada pressão. Conforme March; Hubble (1996), a cavitação é frequentemente encontrada na operação de equipamentos hidráulicos, tais como: turbinas hidráulicas, bombas e propulsores de navios. Os aços inoxidáveis são os revestimentos mais utilizados para reparos de cavitação. A liga AWS ER309LSi é a liga mais utilizada devido a sua boa soldabilidade, adequada resistência à cavitação e baixo custo. Aços inoxidáveis com cobalto, comercialmente conhecidos por Cavitec e Cavitalloy, apresentam melhor comportamento frente à cavitação comparado a aços

inoxidáveis sem cobalto. Estas ligas apresentam baixa energia de falha de empilhamento (SFE) e transformação martensítica induzida por deformação (SIMONEAU, 1987 e 1991).

Verifica-se que o problema encontrado em turbinas hidráulicas esta relacionado ao tempo de operação após a recuperação das pás e do rotor da turbina, uma vez que não há estudos experimentais que demonstrem o desempenho superior dos aços inoxidáveis com cobalto em relação aos materiais utilizados como revestimento atualmente.

Este artigo tem como objetivo central avaliar a metalurgia de soldagem de revestimentos de aços inoxidáveis com cobalto sobre aços inoxidáveis martensíticos macios pelo processo MIG (*Metal Inert Gas*). A tensão de soldagem é avaliada com ênfase na diluição, dimensões do cordão de solda, microdureza e análise da composição química, bem como a microdureza e perfil da ZTA.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

De acordo com Bilmes et al. (2000), desde os anos 60, aços inoxidáveis martensíticos contendo 12-13% de cromo, 2-5% de níquel e menos de 0,06% de carbono vêm sendo utilizados na fabricação de turbinas hidráulicas. Estes aços apresentam alta tensão de escoamento e tenacidade, alta resistência à cavitação e boa soldabilidade. Aços martensíticos com baixo teor de carbono, como o aço ASTM A743-CA6NM, são sempre temperados e revenidos. A excelente tenacidade destes materiais é proveniente da fina dispersão de austenita na martensita durante o tratamento de revenido na temperatura da ordem de 600 °C, Figura 1.

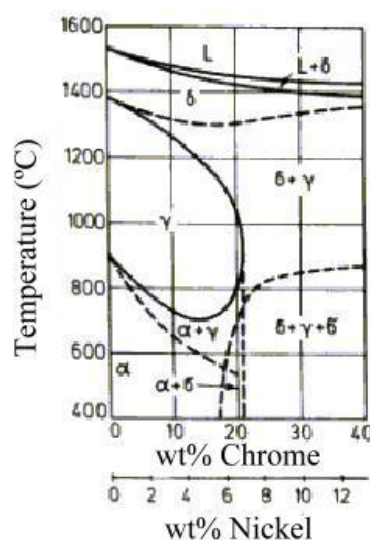


Figura 1 – Diagrama de fases ferro-cromo-níquel para razão cromo/níquel igual a 3:1

Fonte: Folkhard (1988); Lippold e Kotecki (2000)

A redução do teor de carbono promove a formação da martensita macia, que é mais resistente às trincas induzidas por hidrogênio do que ligas martensíticas comuns (FOLKHARD, 1988, LIPPOLD E KOTECKI, 2005).

Mesmo com boa soldabilidade e menor demanda de requisitos no que diz respeito ao pré-aquecimento e temperatura de interpasso, o metal de solda (MS) e a zona termicamente afetada (ZTA) tem menor energia de impacto e tenacidade à fratura do que o metal base (MB). Em geral, as propriedades mecânicas da região soldada são piores em relação ao metal

base, conforme o processo de soldagem resulta em maiores mudanças microestruturais, com a formação de estruturas mais duras e frágeis (AKHTAR E BRODIE, 1979).

De acordo com Lipplold e Kotecki (2005), o metal de adição AWS ER309LSi é um dos mais recomendados para se usar com aços inoxidáveis martensíticos devido às propriedades mecânicas similares e elevada resistência à indução de trincas por hidrogênio. Com este metal de adição e baixo aporte térmico, é possível minimizar a dureza e espessura da ZTA. No entanto a superior resistência à cavitação do aço inoxidável com cobalto, como o Cavitec, pode ser interessante no aumento do intervalo de operação e na minimização da perda de massa que ocorre durante a cavitação.

O material utilizado é um aço inoxidável martensítico macio, ASTM A743-CA6NM temperado à 1050°C e revenido ao ar à 580°C, fornecido pela companhia Voith Siemens. A dimensão dos corpos de prova são 75x25x25mm, A composição química do aço e do arame de aço inoxidável com cobalto utilizado como metal adição de diâmetro 1,2mm, estão contidos na Tabela 1, e os parâmetros de soldagem podem ser observados pelo Quadro 1.

Tabela 1 – Composição química dos materiais

| Material | C (%) | N (%) | Si (%) | Mn (%) | Cr (%) | Ni (%) | Co (%) | Mo (%) | P (%) | S (%) |
|-----------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| ASTM A743-CA6NM | 0,02 | 0,0 | 0,0 | 0,64 | 12,4 | 3,7 | 0,0 | 0,42 | 0,008 | 0,0018 |
| Cavitec | 0,21 | 0,20 | 2,4 | 10,0 | 13,6 | 0,12 | 11,3 | 0,0 | 0,03 | 0,0 |

Fonte: Will (2008); Pukasiewicz (2008)

Quadro 1 – Parâmetros de soldagem MIG

| Amostra | Tensão (V) | Velocidade de soldagem (cm/min) | Velocidade do arame (m/min) | Gás de proteção | Vazão de gás de proteção (l/min) | Temperatura de interpasse (°C) |
|---------|------------|---------------------------------|-----------------------------|-----------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Cav17Ar | 17 | 25 | 4,8 | Argônio | 14 | 150 |
| Cav19Ar | 19 | | | | | |
| Cav22Ar | 22 | | | | | |
| Cav24Ar | 24 | | | | | |

Fonte: Autoria própria

A deposição do revestimento pelo processo MIG foi realizada por um equipamento ESAB Smashweld 315 e controlada com temperatura de interpasse de 150 °C por um termopar tipo K acoplado num multímetro digital Minipa ET3367.

Após a inspeção visual e por líquidos penetrantes, as amostras soldadas foram cortadas com uma cortadeira de precisão Buehler Isomet 4000. Para o lixamento, com rotação de 400 rpm e 10 minutos, foram utilizadas lixas de carbetto de silício com 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh. Para o polimento, com rotação de 200 rpm e 8 minutos, foram utilizadas pasta de diamante

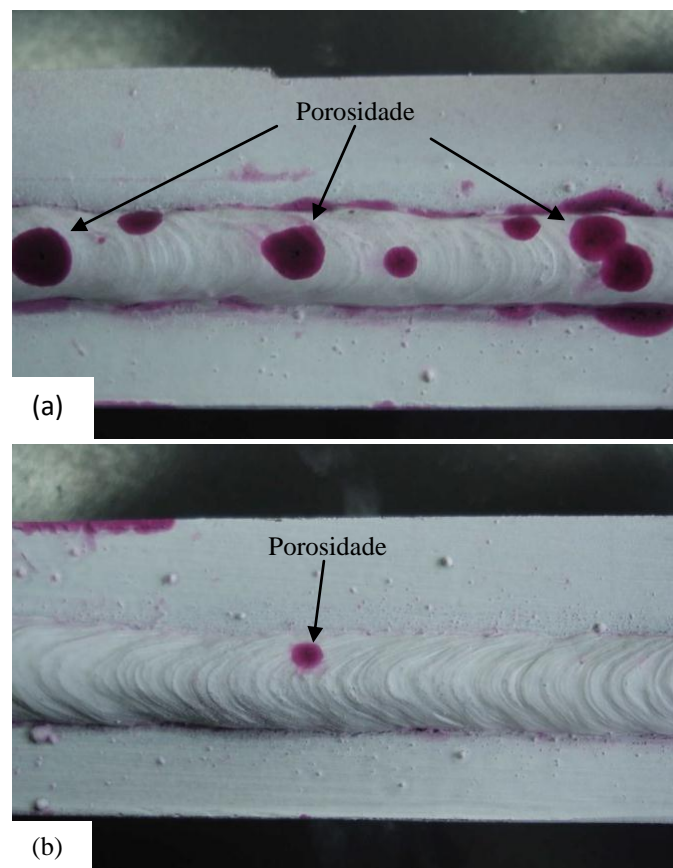
monocristalina de 3,0 e 0,25 μm e sílica coloidal com 0,04 μm . Ambas as etapas foram realizadas com uma politriz semi-automática Buehler Vector.

A caracterização metalográfica foi conduzida pela microscopia ótica com um microscópio Olympus BX60. A aquisição e análise das imagens foram realizadas através do software Analysis 5.1. A microscopia eletrônica foi conduzida por um microscópio eletrônico marca Philips modelo XL30 com análise de composição química por fluorescência de raios X (EDX). Neste estágio foram analisadas a formação microestrutural e a composição química. As propriedades mecânicas foram mensuradas por microdureza Vickers com carga de 300 gf.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 INSPEÇÃO VISUAL E MACROGRAFIAS

As amostras foram submetidas à análise via líquidos penetrantes e podem ser visualizadas pela Figura 2. Percebe-se que à medida que a tensão de soldagem aumenta a porosidade diminui. No entanto, o aumento dos respingos é evidente conforme a tensão de soldagem é elevada.



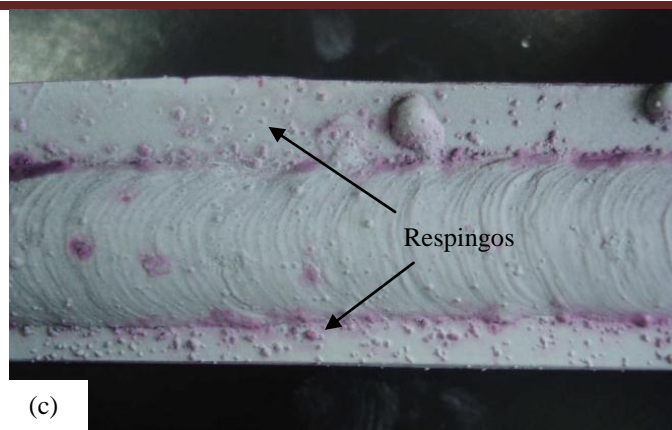


Figura 2 – Cordão de solda após inspeção por líquidos penetrantes. (a) Cav17Ar, (b) Cav19Ar, (c) Cav22Ar
 Fonte: Autoria própria

As amostras foram cortadas e embutidas, sendo possível a análise do cordão de solda, ZTA e metal base na Figura 3. Por outro ponto de vista, é possível visualizar a porosidade excessiva na amostra Cav17Ar e a diminuição da porosidade com o aumento da tensão de soldagem. Não foram observadas trincas ou microtrincas no metal de solda nem na ZTA das amostras. A relação largura/altura e a penetração aumentam conforme a tensão de soldagem é elevada, como pode ser observado na Tabela 3.

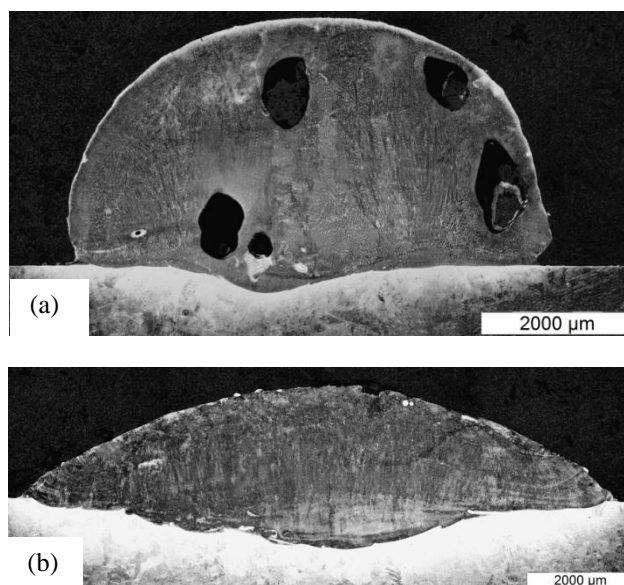


Figura 3 – Cordão de solda de Cavitec (a) Cav17Ar, (b) Cav22Ar
 Fonte: Autoria própria

Tabela 3 – Dimensão e diluição dos cordões de solda das amostras

| Amostra | Diluição (%) | Largura (mm) | Altura (mm) | Penetração (mm) |
|---------|--------------|--------------|-------------|-----------------|
| Cav17Ar | 3,5 | 7,0 | 3,7 | 0,38 |
| Cav19Ar | 8,4 | 7,3 | 3,6 | 0,50 |
| Cav22Ar | 24,1 | 11,6 | 2,5 | 0,94 |
| Cav24Ar | 30,8 | 10,5 | 2,2 | 0,85 |

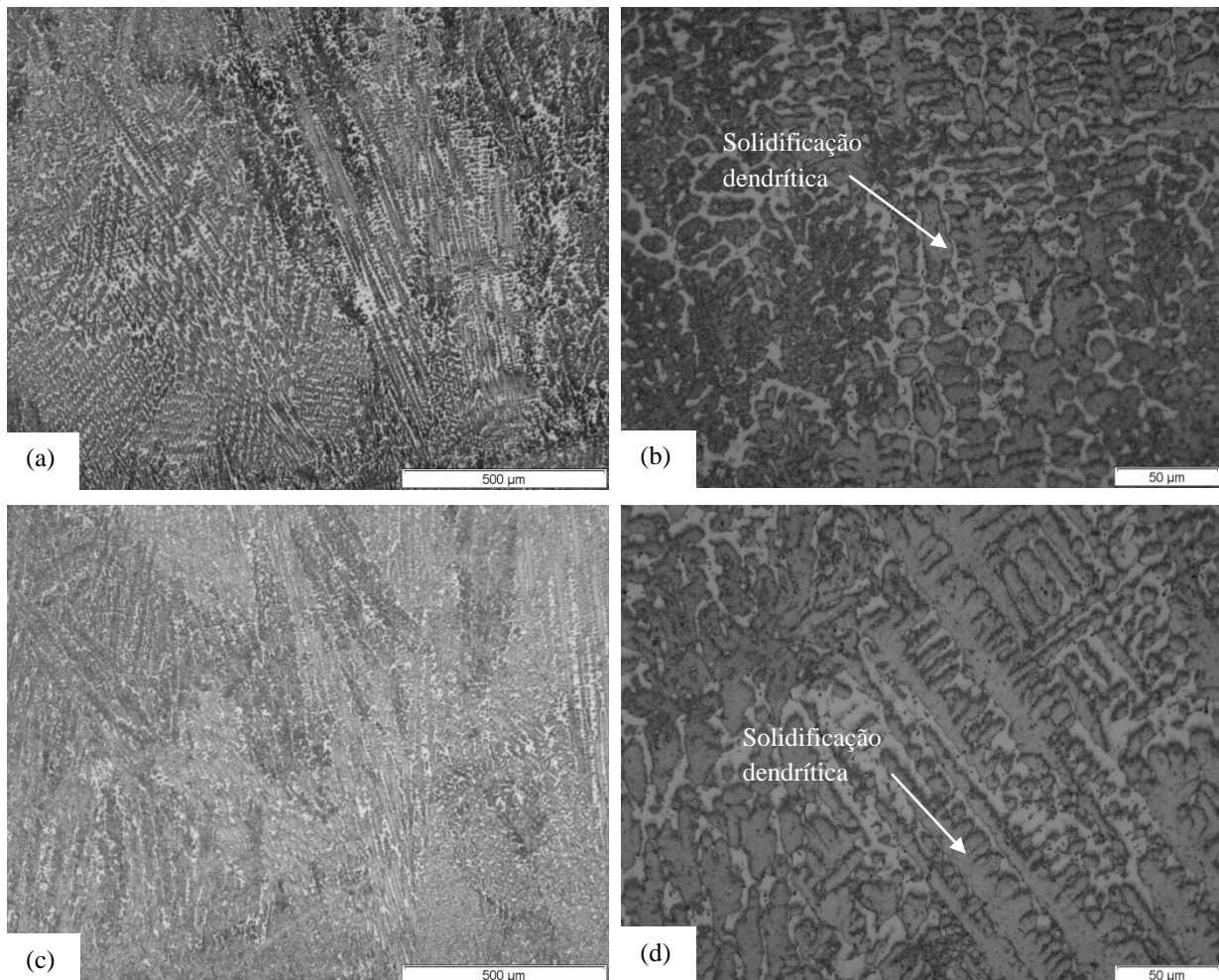
Fonte: Autoria própria

De acordo com a Tabela 3, a redução da altura e largura com o aumento da tensão de 22 para 24 V pode ser observada. Isto ocorreu devido à diminuição na eficiência de deposição, com o aumento na quantidade de respingos devido ao aumento da tensão.

3.2 AVALIAÇÃO DA MICROESTRUTURA E MICRODUREZA

A microestrutura na região de solda das amostras Cav17Ar e Cav19Ar, que podem ser observadas na Figura 4, apresentam solidificação dendrítica orientada. Com o aumento da tensão de soldagem e da diluição, é possível observar a formação da estrutura martensita nas amostras com altas energias de soldagem, em Cav22Ar, Figura 4(f). A estrutura martensítica nas amostras com tensão de soldagem mais elevada podem ser melhor visualizada na Figura 5.

A mudança no tipo de microestrutura é esperada nas amostras com maior diluição devido à estrutura martensítica do metal base, que altera a relação Cr_{eq}/Ni_{eq} e promove a formação martensítica no cordão de solda. Mesmo com essa mudança na solidificação, não foram observadas trincas ou microtrincas.



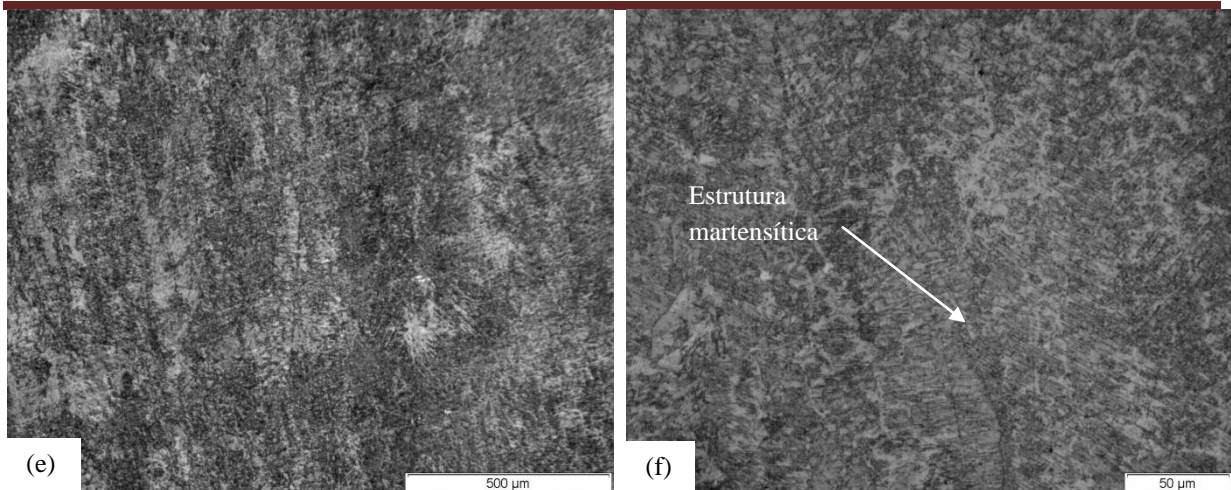


Figura 4 – Microestrutura do aço inoxidável com cobalto (a,b) Cav17Ar, (c,d) Cav19Ar, (e,f) Cav22Ar
Fonte: Autoria própria

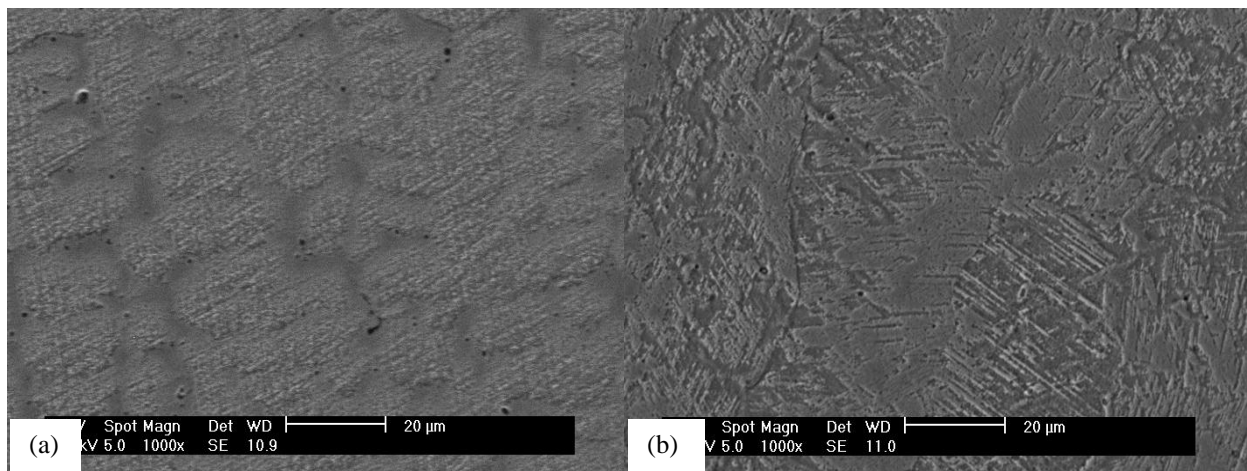


Figura 5. Microestrutura do aço inoxidável com cobalto (a) Cav19Ar, (b) Cav22Ar

Fonte: Autoria própria

A mudança da composição química com o aumento da diluição pode ser observada nas amostras Cav19Ar e Cav22Ar. O perfil de composição química, Figura 6, para estas amostras foram feitos por EDX em um microscópio eletrônico. É possível observar que o Cobalto e o Cromo diminuem com o aumento da diluição, porque estes elementos estão presentes em maior quantidade no metal de adição. Por outro lado, o teor de Níquel aumenta com a diluição, principalmente nas proximidades da linha de fusão, devido ao fato de que estes elementos estão presentes somente no metal base.

Foram medidos os perfis de microdureza dos revestimentos soldados, os quais mostraram uma diferença pouco considerável entre as amostras com diferentes níveis de tensão de soldagem, Figura 7. Foi observada uma tendência de a microdureza diminuir conforme a diluição aumenta. Amostras que apresentaram elevados níveis de níquel próximo a linha de fusão, apresentaram uma diminuição na microdureza. Este comportamento deve ser avaliado por XRD (difração de raios X) para que possa ser possível avaliar as quantidades de austenita e martensita, as quais podem afetar a resistência à cavitação deste revestimento. Neste estudo,

observou-se que a microdureza e a largura da ZTA do aço inoxidável A743- CA6NM, com os parâmetros avaliados, aumentam conforme eleva-se a tensão de soldagem.

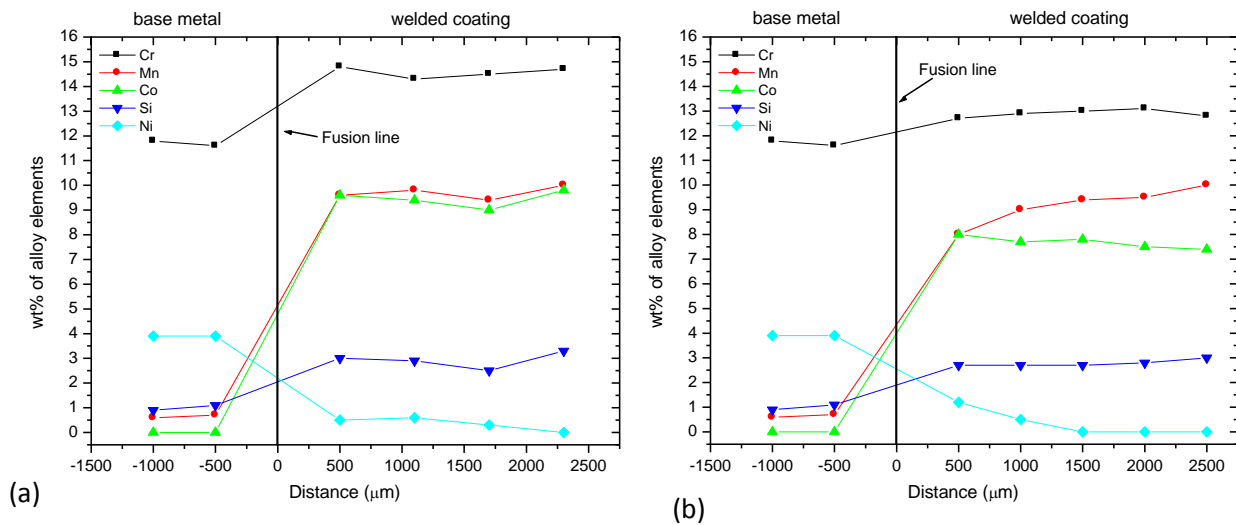


Figura 6 – Perfil de composição química do aço inoxidável com cobalto (a) Cav19Ar, (b) Cav22Ar

Fonte: Autoria própria

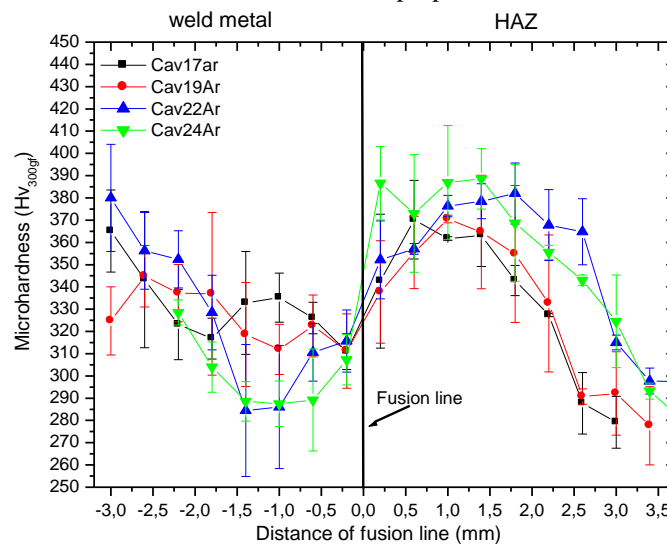


Figura 7 – Perfil de microdureza do aço inoxidável com cobalto

Fonte: Autoria própria

4. Conclusões

Este artigo teve como objetivo central avaliar a metalurgia de soldagem de revestimentos de aços inoxidáveis com cobalto sobre aços inoxidáveis martensíticos macios pelo processo MIG. Para alcançar este objetivo, a tensão de soldagem foi avaliada com ênfase na diluição, dimensões do cordão de solda, microdureza e análise da composição química, bem como a microdureza e perfil da ZTA.

Conclui-se que o aumento da tensão de soldagem faz com que a diluição aumente e a relação entre largura/altura das amostras aumentem, bem como a microdureza e a largura da ZTA. Houve uma redução da porosidade e dos defeitos superficiais com o aumento da tensão de soldagem, por outro lado, a grande quantidade de respingos fez com que a eficiência de

deposição diminuísse à medida que maiores quantidades de energia foram introduzidas nas amostras.

O revestimento soldado de aço inoxidável com cobalto apresentou as fases martensita e austenita. Observou-se também a redução na microdureza do revestimento com o aumento da tensão.

Estes experimentos iniciais são muito importantes para a definição do melhor parâmetro de soldagem para se obter menores níveis de porosidade e boa dimensão do cordão de solda, com menores níveis de diluição e penetração.

REFERÊNCIAS

AKHTAR, A. & BRODIE, N. W. *Field-Welding Large Turbine Runners*. Water Power & Dam Construction, 1979.

BILMES P.D., LLORENTE, C., IPIÑA, J.P. *Toughness and Microstructure of 13Cr4NiMo High-Strength Steel Welds*. Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 9, number 6, p.609-615, 2000.

FOLKHARD, E. *Welding Metallurgy of Sainless Steels*. Springer- Verlag New York, 1988.

LIPPOLD, J.C. AND KOTECKI, D., 2005, “*Welding metallurgy and weldability of stainless steel*”, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005

MARCH, P. & HUBBLE, J. *Evaluation of Relative Cavitation Erosion Rates For Base Materials, Weld Overlays, and Coatings*. Tennessee Valley Authority Engineering Laboratory. Norris, 1996.

PUKASIEWICZ, A. G. M. *Desenvolvimento de revestimentos Fe-Mn-Cr-Si-Ni resistentes à cavitação depositadas por aspersão ASP*. 2008. 192 f. Tese (Doutor) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

SIMONEAU, R.L.P. *Cavitation Erosion and Deformation Mechanism of Ni and Co Austenitic Stainless Steel*, Proceedings of 7th Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact, Cambridge, 1987.

SIMONEAU, R.L.P. *Vibratory, Jet and Hydroturbine Cavitation Erosion*. Cavitation and Multiphase Flow Forum. American Society of Mechanical Engineers, 1991.

WILL, C.R. *Ligas inoxidáveis resistentes à cavitação depositadas por plasma – PTA - arame*. 2008. 79 f. Dissertação (Mestre) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.