

Resistência a Erosão por Cavitação de Revestimentos Depositados pelo Processo de Soldagem a Plasma com Arco Transferido

(Cavitation Erosion Resistance of Deposits Processed by Plasma Transferred Arc Welding)

Víctor Vergara Díaz¹, Jair Carlos Dutra², Augusto José de Almeida Buschinelli², Ana Sofia Climaco D'Oliveira³

¹Universidade de Antofagasta, Departamento Engenharia Mecânica, Antofagasta, Chile, vvergara@uantof.cl

²Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, jdutra@labsolda.ufsc.br

³Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica, Curitiba, Paraná, Brasil, sofmat@ufpr.br

Resumo

Neste trabalho apresenta-se uma inovação do equipamento e avaliação do processo de Soldagem Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó (PTA-pó) com ênfase na sua utilização em revestimentos de superfícies metálicas fora de posição. Diante das expectativas de utilizar o processo na recuperação de turbinas hidráulicas erodidas pela cavitação, procedeu-se à análise do desempenho do processo e da influência do tipo de corrente (corrente contínua constante e corrente contínua pulsada) sobre a resistência à cavitação da liga stellite 6 de acordo com a norma ASTM G-32/92, pelo método indireto. Entre os revestimentos da liga Stellite 6 depositados pelo processo PTA-pó usando corrente contínua constante e corrente contínua pulsada, não foi observado diferença significativa na resistência à cavitação. Por outro lado, a resistência à cavitação dos revestimentos da liga Stellite 6 obtidos pelo processo PTA-pó, apresentaram um desempenho superior aos da liga Cavitec obtidos com os processos MIG e Soldagem Plasma de Arco Transferido Alimentado com Arame (PTA-aramé).

Palavras-chaves: Soldagem Plasma; Arco Transferido; Revestimentos; Stellite 6.

Abstract: On this work an equipment innovation and evaluation of the Powder Fed Plasma Transferred Arc welding process (PTA-powder) are presented. The emphasis is its use on metal surfaces covering out of the flat position. With the expectations to use the process on hydraulic turbine blades repair eroded by cavitation, the studies of the process performance and the influence of the each kind of current to be used (constant direct current and pulsed direct current) over the cavitation resistance of the Stellite-6 alloy were assessed according to the ASTM G-32/92 norm, by indirect methods. Between the Stellite-6 alloy coverings made with constant direct current and pulsed continuous current made by the PTA-powder there were no significant differences on cavitation resistance. On the other hand the Stellite-6 alloy coverings made by the PTA-powder showed higher performance comparing to the Cavitec alloy made by the MIG and PTA-wire process.

Key-words: Plasma Welding; Transferred Arc; Coatings; Stellite 6.

1. Introdução

O processo de deposição por Plasma com Arco Transferido PTA (Plasma Transferred Arc) é um processo de soldagem onde ocorre uma ligação metalúrgica com o substrato. O material de adição pode estar na forma de arame (PTA-aramé) ou na forma de pó (PTA-pó). No processo de soldagem plasma de arco transferido PTA com alimentação de arame é necessário um equipamento capaz de tracionar arames bobinados de diversas bitolas e materiais, com velocidades constantes ou pulsadas. Já no processo de soldagem Plasma de arco transferido PTA, com consumível na forma de pó, para poder transportar o material de aporte até o arco

voltaico para produzir sua fusão e deposição é necessário um equipamento específico.

No processo de revestimento por PTA com alimentação de pó são incorporados três circuitos de gás. O mais interno é chamado de gás de plasma. O gás de transporte é utilizado para carrear o material consumível na forma de pó, liga atomizada ou mistura de pós elementares. O circuito de gás mais externo, denominado gás de proteção, é responsável pela proteção da poça de fusão.

Tipicamente estes circuitos de gases utilizam argônio mas é possível utilizar outros gases até para modificação da composição química da liga depositada [1]. Deve-se mencionar a vantagem associada a utilização de material de adição na forma de pó, em particular a utilização de misturas de pós elementares o que permite contornar problemas de soldabilidade de algumas ligas, e permite processar cada revestimento de forma a que atendam a requisitos específicos

(Recebido em 03/03/2006; Texto Final em 07/11/2007).

Artigo baseado em versão apresentada no XXXI CONSOLDA, São Paulo, 29 de Novembro a 1 de Dezembro 2005.

de operação daquele componente [2,3]. Embora, existam ainda poucas ligas disponíveis, restringindo uma rápida expansão de aplicação, a utilização de material de adição na forma de pó confere ao processo um futuro promissor. Com a mistura de alguns pós pode-se atingir uma grande variedade de ligas, adaptando-as às diferentes necessidades e, com isso, libertando-se da disponibilidade de ligas comerciais. Do ponto de vista de sua aplicação para revestimento, o processo se apresenta adequado porque produz de fato uma diluição do material de adição com o material de base, o que não acontece com os processos de aspersão térmica, mas esta diluição é muito inferior (da ordem de 5%) [4, 5, 6] ao que se obtém com outros processos de soldagem a arco (da ordem de 20 a 25 %). A baixa distorção, pequena zona afetada pelo calor e microestrutura refinada também são destaques desta técnica [6,7].

Os atrativos desta técnica levaram ao desenvolvimento do processo de plasma com arco transferido alimentado com arame [8], visando o processamento fora de posição. A similaridade dos processos, Figura 1, permitiu de forma competitiva a adaptação da técnica para desenvolvimento de equipamento utilizando nesta versão alimentação com material na forma de pó.

Pelo seu caráter inovador, um equipamento para a soldagem PTA é apresentado no mercado como algo muito especial e por isso, com um valor muito alto comparado aos outros processos de soldagem a arco. Esta é uma das razões que induziram a equipe do LABSOLDA a empreender, o que em parte é relatado no presente trabalho. O equipamento foi praticamente todo projetado e construído no próprio LABSOLDA e a aplicação aqui apresentada tem o objetivo de atestar a sua performance. O âmbito da aplicação é a recuperação por soldagem de regiões sujeitas à cavitação.

Pretende-se neste trabalho avaliar depósitos processados pela técnica PTA utilizando o equipamento desenvolvido [9], para deposição de uma liga a base de cobalto na forma de

pó, comercialmente conhecida como Stellite 6, visando a sua caracterização quanto a erosão por cavitação. Os depósitos obtidos foram comparados com depósitos realizados pelos processos plasma com arame e MIG (Resultados gerados pela equipe de LABSOLDA, 2003). O material de adição utilizado nestes últimos foi a liga denominada comercialmente por CAVITEC.

A corrente contínua pulsada se apresenta como uma alternativa interessante em relação à corrente contínua constante tanto do ponto de vista de estabilidade do processo quanto do ponto de vista metalúrgico. As vantagens apresentadas por vários autores motivou para a realização deste estudo.

O Labsolda desenvolve fontes de soldagem com tecnologia que tornam possível a utilização da corrente contínua pulsada, cuja vantagem sobre a corrente contínua constante está na possibilidade de um melhor controle da poça de fusão e, conseqüentemente, sua aplicação em todas as posições de soldagem. Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas com o intuito de avaliar as vantagens da aplicação de corrente contínua pulsada em relação à soldagem em corrente contínua convencional, mas todas elas são referidas quando o material de aporte está na forma de arame [10, 11]. Neste estudo foi aplicada a corrente continua pulsada utilizando material de aporte na forma de pó e os resultados foram comparados com os depósitos realizados com corrente continua constante mantendo níveis similares de corrente média.

2. Materiais e Métodos

2.1. Equipamento desenvolvido

A estrutura principal do sistema foi projetada a partir de equipamentos já desenvolvidos no próprio LABSOLDA e tem similaridade com o processo a plasma por arco transferido alimentado com arame anteriormente desenvolvido [8]. A fonte de soldagem é um equipamento universal que, através

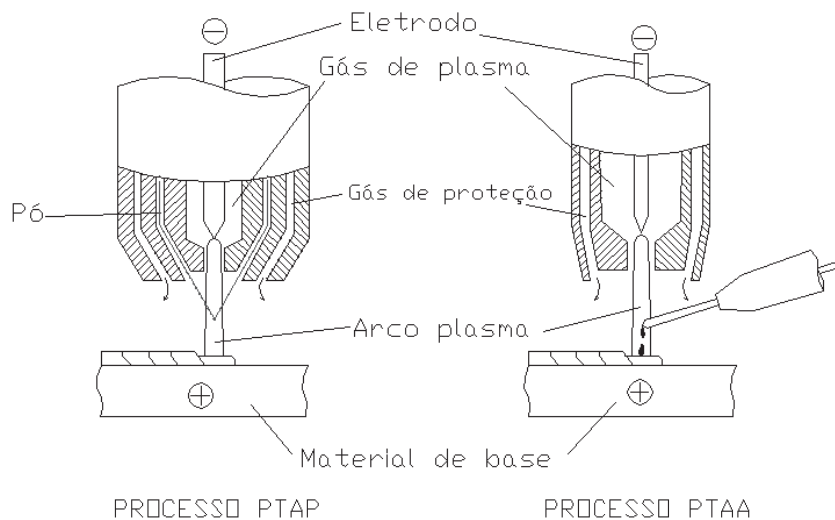


Figura 1. Comparação dos processos de soldagem Plasma de Arco Transferido com pó e Plasma de Arco Transferido com arame [8]

de uma interface, foi conectada a um microcomputador. Por intermédio de um software bastante versátil, quase todas as variáveis do processo podem ser comandadas. Dos três circuitos de gás, o que foi dado maior atenção foi o gás de plasma pela sua grande relevância na qualidade dos depósitos. Por isso, foi usado não simplesmente um medidor de vazão, mas sim um controlador de vazão mássica. O controle é realizado eletronicamente e o sinal de regulagem é uma tensão de referência. Os outros circuitos de vazão de gás são simplesmente monitorados por fluxômetros eletrônicos, porém volumétricos. Uma das partes fundamentais do equipamento é o dispositivo denominado de módulo plasma, o qual viabiliza a soldagem plasma em qualquer versão a partir de fontes de soldagem convencionais para TIG ou eletrodo revestido. Para o deslocamento da tocha de soldagem foi utilizado um dispositivo eletrônico denominado de TARTÍLOPE. O componente do sistema, que foi integralmente projetado para este desenvolvimento específico, foi o dispositivo de alimentação de pó, que funciona com a combinação de um parafuso sem fim e de um fluxo de gás como mecanismos para carrear o pó. A tocha de soldagem foi um desenvolvimento a partir de uma tocha plasma para keyhole. A grande vantagem está no aspecto mutante da mesma, que permite, ora trabalhar

com o plasma com pó e ora que com plasma convencional. Além disso, o projeto de adaptação permite a utilização de bicos constritores de plasma com diferentes ângulos de convergência para a alimentação do pó. Para este projeto foram fabricados dois modelos, um com 30 e outro com 60 graus de ângulo de convergência. O diâmetro do orifício de constricção da tocha é de 4,8 mm. A Figura 2 apresenta uma visão geral do equipamento desenvolvido.

Neste trabalho foi utilizado argônio com pureza de 99,99 % para os gases de plasma, proteção e de transporte. Utilizou-se um eletrodo de tungstênio com 2% de óxido de tório (EWTh-2) com diâmetro de 4,8 mm. O ângulo da ponta do eletrodo foi mantido em 30° para todos os experimentos.

2.2. Caracterização

Depósitos da liga Stellite 6 atomizada, Figura 3, foram processados sobre chapas de aço inoxidável AISI 304 de dimensões 170x110x8 mm, utilizando-se corrente contínua constante e corrente contínua pulsada, conforme apresentado na Tabela 1. A análise química dos diferentes materiais foi realizada através da técnica de espectrometria de emissão ótica e está apresentada nas Tabelas 2 e 3.

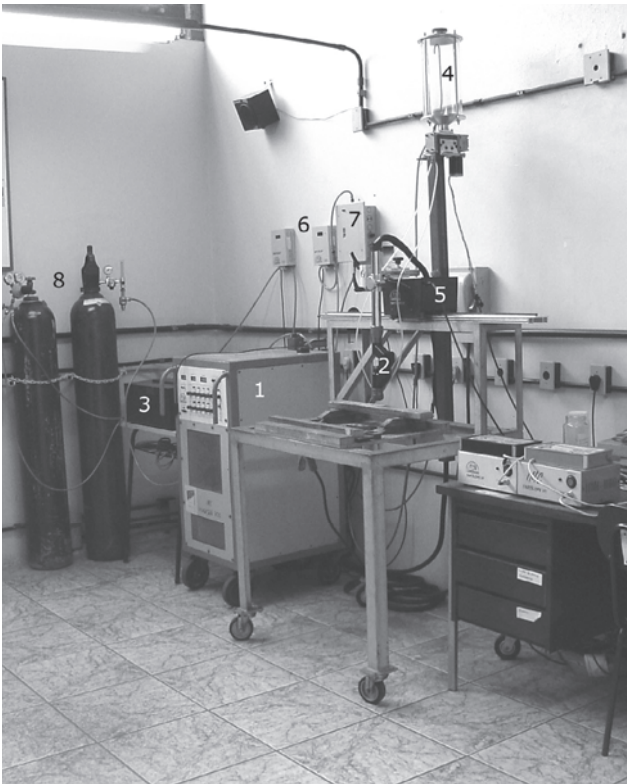


Figura 2. Montagem da bancada no Laboratório de Soldagem LABSOLDA. (1-Fonte de soldagem; 2-Tocha; 3-Modulo plasma; 4-Alimentador de pó; 5-Sistema de deslocamento da tocha; 6-Medidores digitais de gases; 7-Válvula eletrônica de gás; 8-gases)

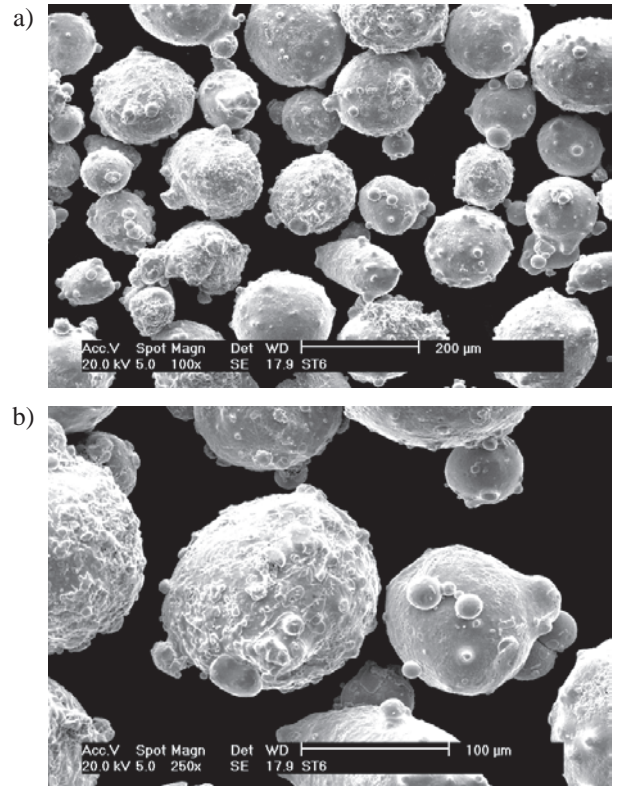


Figura 3. a) Morfologia do pó depositado pelo processo PTA (Stellite 6); b) Detalhe da partícula

Tabela 1. Variáveis e parâmetros de soldagem

Variáveis		
Corrente média de soldagem	Im(A)	160
Corrente de pulso	Ip(A)	200
Corrente de base	Ib(A)	120
Tempo de pulso	tp(s)	0,1
Tempo de base	tb(s)	0,1
Velocidade de soldagem	Vs(cm/min)	16
Gás de plasma	VGP(l/min)	2,4
Gás de proteção	GPr(l/min)	10
Gás de transporte	GTr(l/min)	2
Taxa de alimentação	Tx(kg/h)	1,4
Diâmetro do bico constritor/ângulo de convergência	d(mm)/(°)	4,8/60
Distância bico-peça	DBP(mm)	10
Recuo	Rc(mm)	2,4

Observação: Para a soldagem com corrente contínua constante é utilizada a corrente média Im

Tabela 2. Composição química do substrato de aço inoxidável austenítico AISI 304

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
0,09	0,48	1,37	0,02	-	18,69	0,07	8,58	-
Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	Fe	
0,14	0,06	0,017	-	0,04	0,035	0,17	70,27	

Espessura : 10,25 mm

Tabela 3. Composição química material de aporte Stellite 6 na forma de pó (BT-906)

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Co	W	Fe
1,32	1,30	0,028	30,01	0,24	2,45	Bal	5,21	2,05

Dureza: 38-47 Rc; Granulometria: 45 a 150µm; Densidade: 8,3 g/cm³

Uma camada de revestimento foi processada pela sobreposição de cordões e amostras foram retiradas para as diferentes caracterizações conforme Figura 4.

Inicialmente os depósitos foram submetidos a inspeção visual quanto a presença de defeitos de soldagem, o grau de diluição foi determinado pelo método das áreas [12] em uma macrografia da seção transversal dos depósitos, ataque com nital 6%. Perfis de microdureza Vickers, com carga de 500 g, permitiram avaliar a uniformidade dos revestimentos na seção transversal das camadas processadas, seguindo neste procedimento a norma ABNT6672/81. O levantamento dos perfis de microdureza, média de três medidas, foi feito no centro dos cordões e na região de sobreposição dos mesmos. Para avaliação da microestrutura por microscopia ótica, a preparação da seção transversal seguiu procedimentos padrão

sendo a microestrutura revelada após ataque eletrolítico com ácido oxálico.

A resistência a erosão por cavitação foi determinada por método indireto ultrasônico. As superfícies dos corpos de prova, 30x25x10mm, seguiram procedimentos idênticos a preparação metalográfica sendo o polimento final realizado com alumina 0,3µm. Os corpos de prova (dois para cada condição) foram inicialmente ensaiados por períodos de 2 horas até que a um tempo de 8 horas, posteriormente o período foi de 7 horas até completar 49 horas. Após cada período a amostra foi submetida a uma limpeza ultra-sônica, secagem e pesagem para se avaliar a perda de massa, permitindo o levantamento das curvas de perda de massa acumulada ($\Sigma\Delta m$) em função do tempo, bem como a determinação do período de incubação (Ti) e a taxa de erosão (TE).

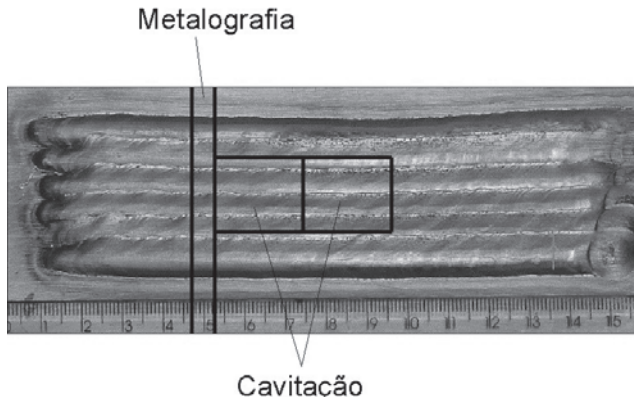


Figura 4. Posições das regiões para a extração dos corpos de prova para os ensaios de cavitação e medição da diluição

3. Resultados e Discussão

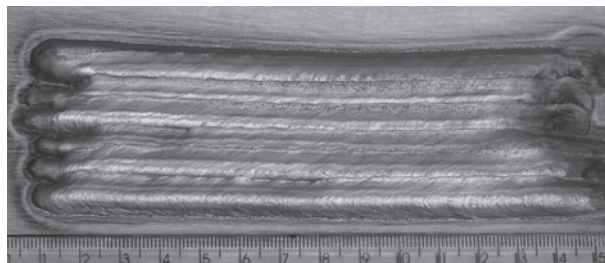
3.1. Caracterização geral

Os depósitos processados foram inicialmente avaliados quanto à presença de defeitos de soldagem, tendo-se verificado que foi atingido um padrão de aceitação dado

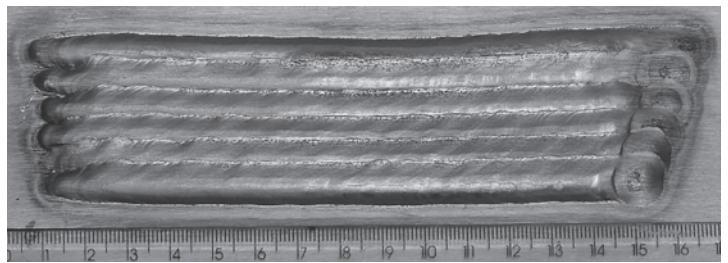
pelo bom aspecto superficial e ausência de defeitos como porosidades, trincas, mordeduras acentuadas ou falta de penetração, para processamento com corrente contínua constante e pulsada, Figura 5.

A boa qualidade dos revestimentos produzidos e a adequação dos procedimentos de deposição pode ainda ser confirmada pela ausência de porosidades na seção transversal, Figura 6. As camadas produzidas apresentaram níveis de diluição de 13,2% e 13% após processamento com corrente contínua constante e pulsada, respectivamente, demonstrando que o tipo de corrente não influenciou a diluição. É interessante mencionar que estes valores são superiores aos medidos em depósitos de um cordão só [9], que exibem diluição inferior a 10% o que está de acordo com previsões da literatura [4,7]. Este aumento na diluição é atribuído ao maior aporte de calor imposto pela sobreposição de cordões quando comparado ao aporte de calor que ocorre na deposição de um cordão único.

A qualidade superior do processamento de revestimentos pelo processo de deposição por plasma com arco transferido com alimentação de pó fica clara quando se comparam os resultados da diluição com aqueles medidos em depósitos realizados por técnicas de soldagem MIG, TIG e Plasma com arco transferido alimentado por arame [8], que exibem níveis de diluição entre 20 e 25%.

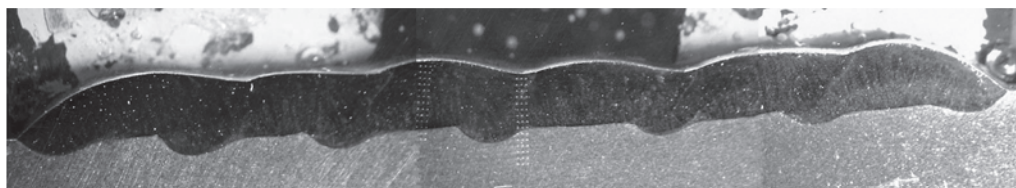


a) Revestimento (uma camada) realizado com corrente contínua constante

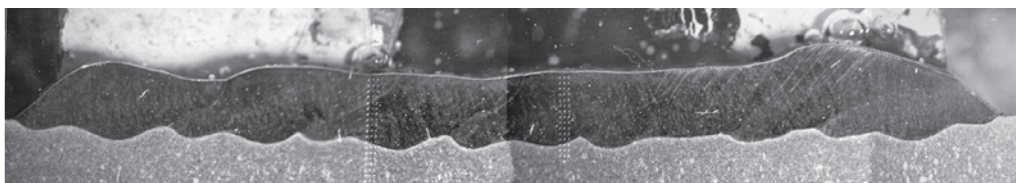


b) Revestimento (uma camada) realizado com corrente contínua pulsada

Figura 5. Aspecto superficial dos revestimentos realizados com corrente contínua constante e corrente contínua pulsada.



a) Revestimento com corrente contínua constante (Uma camada), diluição: 13,22%



b) Revestimento com corrente contínua pulsada (Uma camada), diluição: 13%

Figura 6. Aspecto da seção transversal dos revestimentos

3.2. Microdureza e microestrutura

Os depósitos processados apresentaram um refino da microestrutura se comparados a outros obtidos por diferentes processos de soldagem [9]. A Figura 7 apresenta uma comparação entre microestruturas processadas por plasma com arco transferido com alimentação de pó e por arame confirmando o refino da estrutura.

A pulsação da corrente não afetou a microestrutura como se observa na Figura 8, onde se comparam microestruturas nas condições processadas neste trabalho. Este resultado é acompanhado pelo perfil de microdureza medido na seção transversal dos revestimentos, Figura 9. Observa-se que processamento com corrente contínua constante e corrente contínua pulsada resulta em dureza similares e uniformes ao longo da seção transversal dos depósitos, comportamento já sugerido pela semelhança no nível de diluição. Valores médios de 430HV estão de acordo com os dados apresentados pelo fornecedor do pó (www.stellite.com) o que confirma uma vez mais a boa qualidade dos depósitos realizados. É interessante ainda observar a similaridade da dureza medida no centro dos cordões e na região de sobreposição.

o que confirma uma vez mais a boa qualidade dos depósitos realizados. É interessante ainda observar a similaridade da dureza medida no centro dos cordões e na região de sobreposição.

3.3. Resistência a cavitação

O comportamento a erosão por cavitação dos revestimentos processados está apresentado na Figura 10, em termos de perda de massa acumulada ($\sum \Delta m$) em função de tempo de ensaio. Conforme esperado observa-se um período de incubação seguido por comportamento erosivo acentuado com perda de massa significativa. Seguindo caracterização anterior em termos de diluição, microdureza e microestrutura os revestimentos apresentaram comportamento similares, independente do tipo de corrente utilizada.

A resistência a erosão por cavitação medida é superior a apresentada pelo aço inoxidável ao cobalto, conhecido comercialmente por CAVITEC, depositado pelo processo

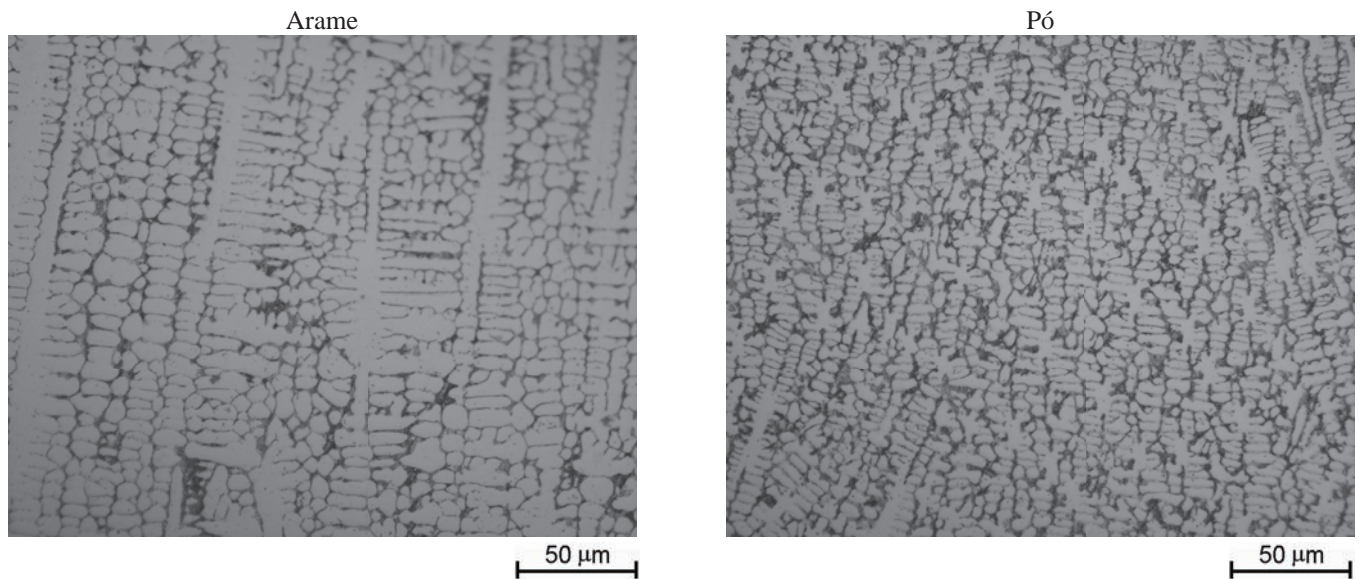


Figura 7. Microestrutura de depósitos realizados através dos processos de soldagem PLASMA com arame e PLASMA com pó. Liga Stellite 6 [9].

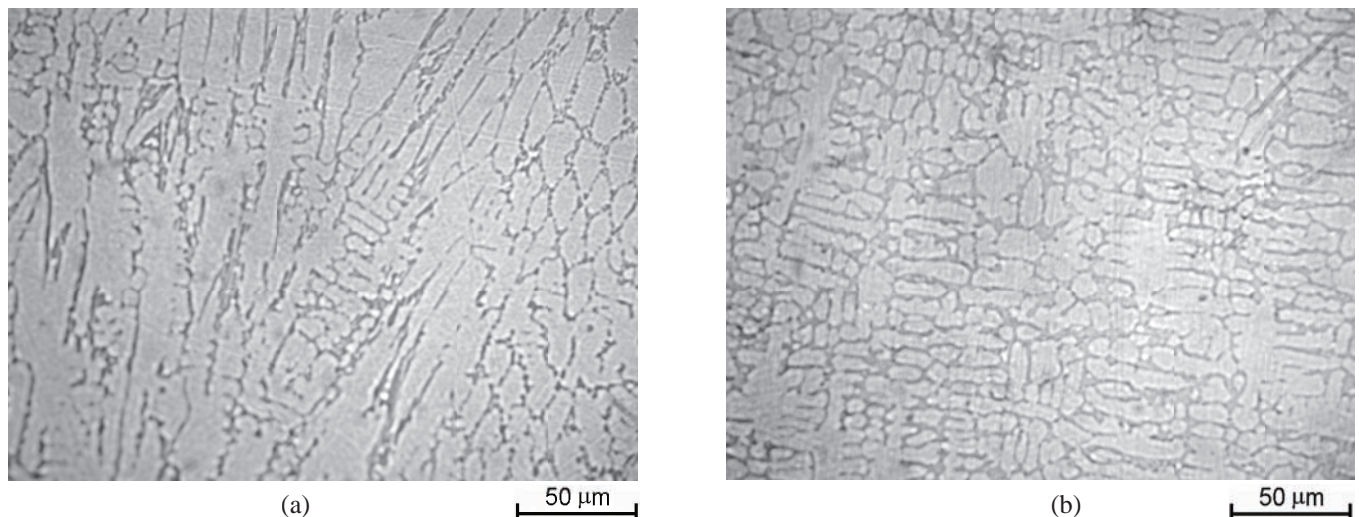


Figura 8. Microestrutura dos depósitos processados com (a) corrente contínua constante e (b) corrente contínua pulsada

MIG ou Plasma por arco transferido alimentado por arame, como apresentado nas Tabelas 4 e 5. Os maiores os tempo de incubação (T_i) e taxas de erosão (TE) exibidos pelos revestimentos de Stellite 6 confirmam o melhor desempenho destes depósitos. No entanto com base nestes resultados apenas se pode afirmar que a liga Stellite 6 é mais resistente a cavitação do que a liga CAVITEC, uma

vez que a composição química desempenha um papel determinante no comportamento a cavitação deixando o processo de deposição em segundo plano. Neste caso a liga a base de Co (Stellite 6) exibe uma maior energia de falha de empilhamento que o aço inoxidável ao Co (Cavitec), o que retarda a transformação da austenita γ em martensita ϵ , pelo que é esperado um desempenho a cavitação superior [13].

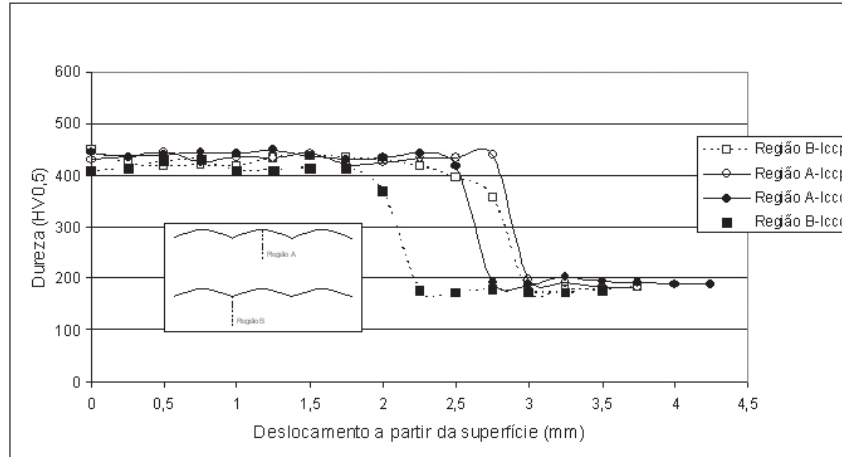


Figura 9. Perfil de dureza apresentado para as regiões A e B do revestimento com corrente contínua constante e corrente contínua pulsada. (Icc: Corrente contínua constante; Iccp: Corrente contínua pulsada)

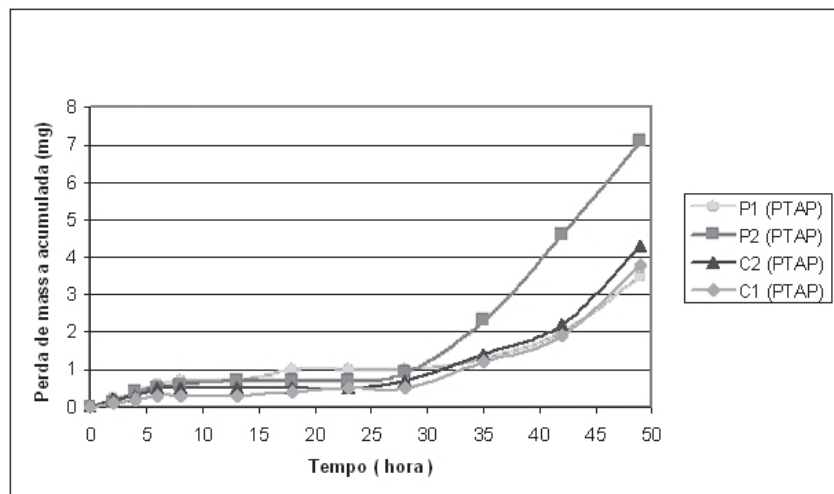


Figura 10. Perda de massa acumulada em função do tempo da liga Stellite 6, na forma de pó, depositada por PTA com diferentes tipos de corrente. (P1, P2: Corpos de prova com corrente contínua pulsada, C1, C2: Corpos de prova com corrente contínua constante, PTA: Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó)

Tabela 4. Tempo de incubação e taxa de erosão da liga Stellite 6 depositada sobre o substrato de aço inoxidável AISI 304.

Amostras PTA-pó	Tempo de incubação (T_i) (horas)	Taxa de erosão (TE) (mg / horas)
I_P1	27,6	0,16
I_P2	28,4	0,34
I_C1	29,6	0,19
I_C2	29,3	0,21

I_P1, I_P2: Corpos de prova com corrente contínua pulsada, I_C1, I_C2: Corpos de prova com corrente contínua constante; PTAP-pó: Plasma de arco transferido alimentado com pó

Tabela 5. Tempo de incubação e taxa de erosão dos revestimentos com arame Cavitec depositados pelos processos PTA-aramé e MIG.

Amostra	Tempo de incubação (Ti) (horas)	Taxa de erosão (TE) (mg / horas)
Cavitec (PTA-aramé)	20	0,56
Cavitec (MIG)	24	0,34

PTA-aramé: Plasma de arco transferido alimentado com arame. Resultados levantados no Laboratório de Soldagem LABSOLDA, UFSC (2003)

4. Conclusões

Com base nos resultados experimentais obtidos neste trabalho as conclusões são as seguintes:

- Além da geração de conhecimento científico do processo, foi desenvolvido um equipamento PTA-pó, tecnologicamente avançado, tanto para pesquisa, como para trabalho industrial, possibilitando fazer revestimentos com excelente acabamento superficial e ausência de defeitos como porosidades e falta de fusão.
- As características dos depósitos processados em termos de microestrutura, microdureza e diluição não foram afetadas pelo tipo de corrente utilizada.
- A resistência à erosão por cavitação dos revestimentos da liga Stellite 6, na forma de pó, depositados pelo processo PTA não é afetada pela utilização de corrente contínua constante ou corrente contínua pulsada.
- A resistência à erosão por cavitação dos revestimentos da liga Stellite 6 obtidos pelo processo PTA com material de aporte na forma de pó (uma camada) é superior a resistência da liga Cavitec obtidos com os processos MIG e PTA com material de adição na forma de arame (duas camadas).

5. Agradecimentos

Agradecemos a Cleide Márquez e Bruno Ventura pela realização dos ensaios de cavitação.

6. Referências Bibliográficas

- [1] BELKANCEM B. et al., Utilisation of high-temperature plasmas containing nitrogen for reactive coating by means of plasma-arc weld surfacing, *Welding&Cutting*, Nro 8, p. E170 a E173, 2001.
- [2] ALMEIDA, V., D'OLIVEIRA, A. S. C. M., Ni/Al intermetallics Plasma Transferred Arc processing. *Transactions of Materials and Heat treatment, China*, v. 25, n. 5, p. 948-951, 2004.
- [3] TAKEYAMA, R. R., D'OLIVEIRA, A. S. C. M., Aumento da resistência de revestimentos de Co pela adição

de carbonetos de tungstênio In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2004, Porto Alegre. Anais do XVI CBECIMAT, CD-Rom.

- [4] DEUIS, R.L., YELLUP, J.M. E SUBRAMANIAN, C., Metal-matrix composite coatings by PTA surfacing, *Composites Science and Technology*, vol58, p.299-309, 1998.
- [5] PLASMA TEAM: Powder Plasma Arc Weldings and Equipments. Località LE VAIE I-15061 ARQUATA SCRIVIA (AL), ITALY, 2002.
- [6] LUGSCHEIDER, E. E OBERLANDER, B. C., Surface Modification technologies V, Ed: TS Sudarshan e J. F. Braza, p.383, 1992.
- [7] D'OLIVEIRA, A.S.C.M. E SILVÉRIO, R.B., Revestimento de ligas de Co por PTA com alimentação de pó e arame, II Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia/MG, Abril 2003
- [8] OLIVEIRA, M. A., Estudo do processo plasma com alimentação automática de arame, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- [9] VERGARA et al, "Desempenho do processo plasma de arco transferido alimentado com pó na posição horizontal e sobre-cabeça", XI Congresso de Ingeniería Mecánica COCIM 2004, Antofagasta, Chile, 2004.
- [10] KOU, Sindo. *Welding Metallurgy*. Book, John Wiley & Sons. 1987
- [11] LUCAS, W. TIG and Plasma Welding: Process techniques, recommended practices and applications. In: *Metal Construction*, p. 659-667. 1982.
- [12] *Metals Handbook, Welding, Brazing and Soldering*, vol 6 ASM International, 1992
- [13] D'OLIVEIRA, A. S. C. M. ; XIAOJUN, Z. ; PROCOPIAK, L. A. ; SOUZA, N. C. Phase transformation during cavitation erosion of a co stainless steel. *Materials Science And Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure And Processing*, v. 358, n. 1-2, p. 199-204, 2003.