

CT-08 DESEMPENHO DO PROCESSO DE SOLDAGEM PLASMA DE ARCO TRANSFERIDO ALIMENTADO COM PÓ (PTAP) SOBRE A RESISTENCIA À CAVITAÇÃO⁽¹⁾ **Víctor Vergara Díaz**⁽¹⁾ **Jair Carlos Dutra**⁽¹⁾ **Raul Gohr Junior**⁽¹⁾ **Guilherme Fantin Rebelo**⁽¹⁾ **Moises Alves de Oliveira**⁽¹⁾ **Augusto José de Almeida Buschinelli**⁽¹⁾ **Ana Sofia Climaco D'Oliveira****RESUMO**

Neste trabalho é apresentada uma inovação do equipamento e avaliação do processo de Soldagem Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó (PTAP) 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 ao análises 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 PTAP usando corrente contínua constante e corrente contínua pulsada, não foi observada diferença significativa na resistência à cavitação. Por outro lado, a resistência à cavitação dos revestimentos da liga Stellite 6 obtidos pelo processo PTAP, apresentaram um desempenho superior aos da liga Cavitec obtidos com os processos MIG e PTAA.

Palavras chave: 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 (PTAP) 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 continues current made by the PTAP there were no significant differences on cavitation resistance. On the other hand the Stellite-6 alloy coverings made by the PTAP showed higher performance comparing to the Cavitec alloy made by the PTAP and MIG process.

Keywords: Plasma Welding, Transferred Arc, Coatings, Stellite 6

⁽¹⁾ Dep. Eng. Mecânica – LaMaTS – UFPR, Jardim das Américas - CEP: 81531990 Curitiba - PR

1. INTRODUÇÃO

O processo denominado PTA em função do nome inglês “Plasma Transfer Arc”, nesta versão, é denominado de Arco Transferido Alimentado com Pó, com abreviatura PTAP. Esta versão do processo plasma tem uma relativa similaridade com a versão PTAA - Plasma de Arco Transferido Alimentado com Arame^[1], de acordo com a Figura 1.1 O processo incorpora três sistemas de gás. O primeiro é chamado de gás de plasma, o qual quase sempre é argônio. O segundo gás é chamado de proteção. O terceiro sistema de escoamento de gás, chamado de gás de transporte, é utilizado para carrear o material consumível durante a aplicação do revestimento. Por utilizar metal de adição na forma de pó, o **PTAP** permite hoje em dia, a deposição de algumas ligas, o que em um futuro próximo, pode-se transformar na deposição de um amplo espectro de metais e fácil variação na composição química entre camadas, uma vez que não se tornaria restrito à disponibilidade de arames comerciais. Esta tecnologia foi inicialmente desenvolvida como um método alternativo de fabricação de revestimentos de alta qualidade sobre componentes utilizados na indústria nuclear^[2]. A proposta do LABSOLDA de estudar o Processo de Soldagem Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó surge em função das vantagens que lhe são atribuídas ^[2, 3].

- O processo PTAP produz uma diluição da ordem de 5%, muito inferior aos valores típicos de 20-25% obtidos com processos MIG e TIG. Para avaliar a qualidade do revestimento, um requisito importante é a diluição que quantifica o grau de mistura entre o metal de base, de baixa resistência a abrasão ou desgaste, e o metal de adição, este de alta resistência. Assim, quanto menor a diluição, maior será a eficiência do revestimento aplicado na proteção a erosão, corrosão ou desgaste;
- Microestruturas mais finas quando comparadas com os processos MIG, TIG e PTAA. A Figura 2 mostra a microestrutura obtida com os processos PTAA e PTAP utilizando-se as mesmas condições de soldagem ^[4].
- Maior facilidade para a produção de materiais de enchimento para diferentes finalidades experimentais misturando diferentes pós.

Segundo a referencia ^[5], no caso de deposições de ligas de metal duro sobre uma base de ferro, a resistência ao desgaste dos revestimentos foi melhorada adicionando nitrogênio aos gases do processo. As características dos revestimentos são principalmente dependentes das concentrações de nitrogênio no gás de plasma e gás de transporte. Embora existente no mercado mundial, este tipo de equipamento só é disponibilizado, no país, por poucos fabricantes estrangeiros. A grande restrição de aplicação do processo no Brasil seria a necessidade de importação do equipamento. Quando se decidiu por iniciar o projeto no LABSOLDA, foi considerado importar uma tocha de soldagem e um alimentador de pó. O fator custo foi considerado essencial, visto que o elevado investimento de aquisição destes equipamentos acabou por restringir sua importação. Desta forma se decidiu por adaptar os equipamentos existentes no laboratório e por outra parte projetar e fabricar aqueles que não estavam disponíveis no LABSOLDA. O resultado dos estudos realizados no projeto de adaptação da tocha de soldagem direcionou ao desenvolvimento de uma tocha multifuncional permitindo trabalhar com a deposição com pó, arame ou realizar soldas pela técnica “keyhole” (furo de fusão).

Em relação ao alimentador de pó, dentre os diversos modelos gerados em ambiente CAD, identificou-se a concepção que melhor atendeu aos objetivos do projeto, tanto em termos de funcionamento na faixa de operação, quanto na capacidade de fabricação. A primeira contribuição deste trabalho é a inovação do equipamento e o estudo realizado sobre o processo, o que permitiu conhecer o comportamento de cada uma das variáveis que formam o ciclo de soldagem. O estudo foi realizado na posição

plana, em uma bancada de ensaios montada no Laboratório de soldagem da UFSC – LABSOLDA. De forma a se ter um maior conhecimento do processo buscando ampliar o campo de utilização, como na posição sobrecabeça, foram realizados ensaios fora de posição plana. Obtiveram-se muito bons resultados, viabilizando desta forma a aplicação do processo na recuperação de pás de turbinas hidráulicas e em equipamentos do setor de petróleo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Bancada de ensaios

Para a realização dos experimentos foi utilizada uma fonte de soldagem operando em conjunto com um módulo plasma. Para o controle da taxa de deposição de pó foi utilizado um sistema alimentador de pó (ADP). Para a monitoração do gás de plasma, gás de transporte e gás de proteção foram utilizados medidores digitais de vazão de gás (MVG). A vazão de gás de plasma foi controlada através de uma válvula de controle de vazão que com um circuito eletrônico realimentado, controla a vazão de gás a partir de uma tensão de referência colocada pelo sistema. A faixa de operação é de 0,1 l/min a 5,0 l/min. A movimentação da pistola de soldagem foi realizado através do TARTILOPE V1. A Figura 3 mostra a bancada montada no laboratório de soldagem. Inicialmente, uma tocha de soldagem precisou ser adaptada para o processo a ser desenvolvido. O projeto considerou o desenvolvimento de dois bicos constritores com diferentes ângulos de convergência para a saída do pó (30° e 60°), diâmetro do orifício constritor de 4,8 mm. Quando são utilizados os processos MIG/MAG ou mesmo, TIG/PLASMA alimentado automaticamente, é necessário um equipamento capaz de tracionar arames bobinados de diversas bitolas e de diferentes matérias, com velocidades constantes ou pulsadas. Já no processo de soldagem Plasma de arco transferido PTAP, o consumível muda de característica e ele se apresenta na forma de pó, e para poder ser transportado até o arco voltaico para produzir o revestimento é necessário de um equipamento específico.

Corpos de prova. Os ensaios foram realizados em chapas de aço inoxidável 304 de dimensões 170x110x8 mm. A análise química foi realizada através da técnica de espectrometria de emissão ótica. A Tabela 1 apresenta a composição química correspondente.

Material de aporte. O material de aporte utilizado foi a liga Stellite 6 na forma de pó. A Tabela 2 apresenta a composição química correspondente. A Figura 4 mostra a morfologia do pó depositado pelo processo PTAP.

O argônio com pureza de 99,99 % foi utilizado nos 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 Metodologia experimental

A Liga Stellite 6 foi depositada (uma camada) sobre o substrato de aço inoxidável 304 de dimensões 170x110x8 mm. Foram realizados revestimentos com duas condições de soldagem: Corrente contínua constante e corrente contínua pulsada. As condições de soldagem estão indicadas na Tabela 3. Para cada condição de soldagem foram retiradas 2 (duas) amostras de dimensões de 25x30x10 mm:

- Amostras I_C₁ e I_C₂ :Corrente contínua constante
- Amostras I_P₁ e I_P₂ :Corrente contínua pulsada

Os corpos de prova foram extraídos dos depósitos por meio de disco abrasivo de corte e a través de fresagem foram determinadas as dimensões exigidas para o ensaio de cavitação (30x25x10 mm). Em seguida as superfícies foram preparadas para ensaio de cavitação ou metalografia, por lixamento (iniciando com lixa de 180 a um lixamento final com lixa 1000) e polimento com alumina de 0,3 μm . A Figura 5 mostra a região da extração dos corpos de prova.

Preparação das amostras para exame metalográfico. As amostras foram preparadas para exame metalográfico de acordo aos procedimentos padrões de embutimento, lixamento e polimento. Ataque com nital a 6% (macrografia) e ataque ácido utilizando o ácido oxálico como eletrólito (micrografia).

Padrão de aceitação. O padrão de aceitação adotado foi: revestimentos com bom aspecto superficial e ausência de defeitos tais como porosidades, trincas, mordeduras acentuadas e falta de penetração.

Determinação do grau de diluição. Com o emprego do estereoscópio foram obtidas imagens macrográficas da seção transversal dos corpos de prova para a determinação do grau de diluição. A avaliação foi feita através das medições das áreas A e B como mostra a Figura 6a, utilizando-se um programa comercial.

Perfil de microdureza. O perfil de microdureza Vickers foi medido na seção transversal da amostra, na direção perpendicular à superfície do substrato, iniciando numa distância de 125 μm do topo do cordão, com espaçamento entre impressões de 250 μm de modo a ter um afastamento entre impressões de no mínimo 2,5 vezes a diagonal das mesmas (ABNT NBR 6672/81). No total foram executados 3 perfis de dureza, para calcular um valor médio. Empregou-se o microdurômetro HMV 2000 da Shimadzu, com carga aplicada de 500g (HV 0,5). A Figura 6b mostra um esquema da seção transversal do cordão, indicando a localização das impressões de microdureza.

Procedimento do ensaio de resistência à cavitação. Método indireto. As amostras foram inicialmente ensaiadas de 2 em 2 horas até que completasse 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. Com os dados obtidos foi possível o levantamento das curvas de perda de massa acumulada ($\Sigma\Delta m$) em função do tempo, bem como a determinação do período de incubação (T_i) e a taxa de erosão (TE).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 7 mostra o aspecto dos revestimentos e a Figura 8 mostra a seção transversal. Através da Figura 8 foram medidos os valores de diluição: 13,22% para corrente contínua constante e 13% para corrente contínua pulsada. Isto significa que o tipo de corrente empregada, no processo de soldagem, não apresenta uma influência significativa sobre o grau de diluição. Em seguida foram levantados os perfis de dureza (veja a Figura 9) em duas regiões, da seção transversal, denominadas com A e B, donde a região A, corresponde a medições no centro do cordão e a região B, corresponde a aquela região afetada pelos cordões adjacentes. Da Figura 9 pode ser observar que, não existe uma diferença significativa na dureza entre os revestimentos realizados com corrente contínua constante e com corrente contínua pulsada. Estes resultados de dureza eram esperados devido aos valores similares de diluição entre os revestimentos. A Figura 10 mostra a perda de massa acumulada ($\Sigma\Delta m$) em função do tempo de ensaio de cavitação. Observa-se que todas as amostras apresentaram uma

Associação Brasileira de Soldagem

resistência alta com relação à erosão por cavitação, já que houve uma perda de massa pouco acentuada com relação ao tempo de ensaio (baixa taxa de erosão). Os tempos de incubação (Ti) foram altos para este material. A Tabela 4 mostra os valores de Ti e TE para os quatro corpos de prova correspondentes ao processo PTAP, observando-se que não existe uma diferença significativa na resistência à cavitação dos corpos de prova soldados com corrente contínua constante em relação aos corpos de prova soldados com corrente contínua pulsada. A Figura 10 faz uma comparação entre a perda de massa acumulada em função do tempo, dos revestimentos com Stellite 6 x arame Cavitec, depositados pelo processo de soldagem Plasma (Cavplasma) e Mig (CavMig). A comparação com este revestimento é importante pois foi considerado o melhor até o momento, dentro dos que foram ensaiados por este processo. A Tabela 5 mostra os valores do Ti e TE para o Cavplasma e CavMig.

4. CONCLUSÃO

- Além da geração de conhecimento científico do processo, foi desenvolvido um equipamento PTAP, 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.
- Os ensaios de cavitação revelaram que não existe uma diferença significativa na resistência à cavitação dos revestimentos da liga Stellite 6 depositados pelo processo PTAP usando corrente contínua constante e corrente contínua pulsada.
- A resistência à cavitação dos revestimentos da liga Stellite 6 obtidos pelo processo PTAP, apresentaram um desempenho superior aos da liga Cavitec obtidos com os processos MIG e PTAA.

5. AGRADECIMENTOS

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

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

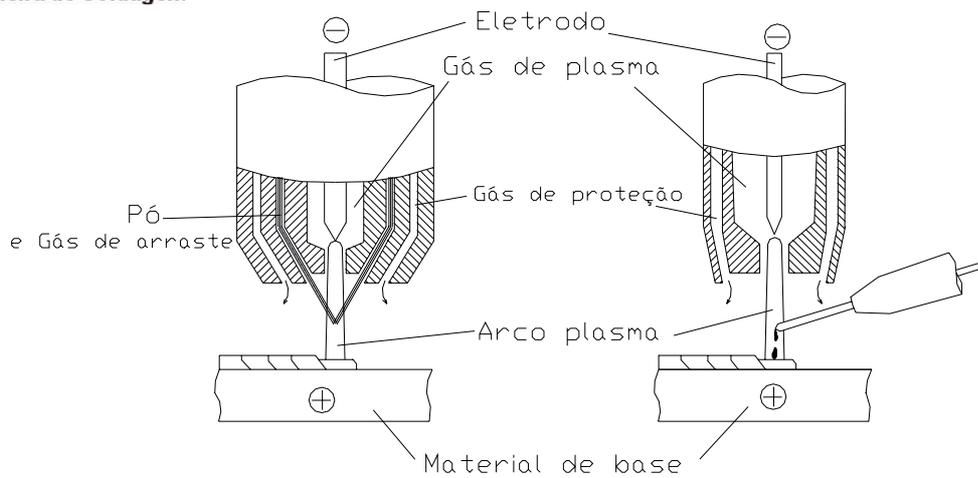
[1] OLIVEIRA, M. A. “Estudo do processo plasma com alimentação automática de arame”, Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 2001.

[2] DEUIS R. L. et al “Metal Matrix composite coatings by PTA surfacing”, University of South Australia, p.299-309,1997. (ELSEVIER).

[3] PLASMA TEAM: Powder Plasma Arc Weldings e Equipments. Località LE VAIE I-15061 ARQUATA SCRIVIA (AL) -ITALY. 2002.

[4] VERGARA et al “Desempenho do processo plasma de arco transferido alimentado com pó na posição horizontal e sobre-cabeça”, XI Congreso de Ingeniería Mecánica COCIM 2004, Antofagasta, Chile, 2004.

[5] 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.



PROCESSO PTAP

PROCESSO PTAA

Figura 1- Comparação dos processos de soldagem Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó-PTAP e Plasma de Arco Transferido Alimentado com Arame-PTAA [2]

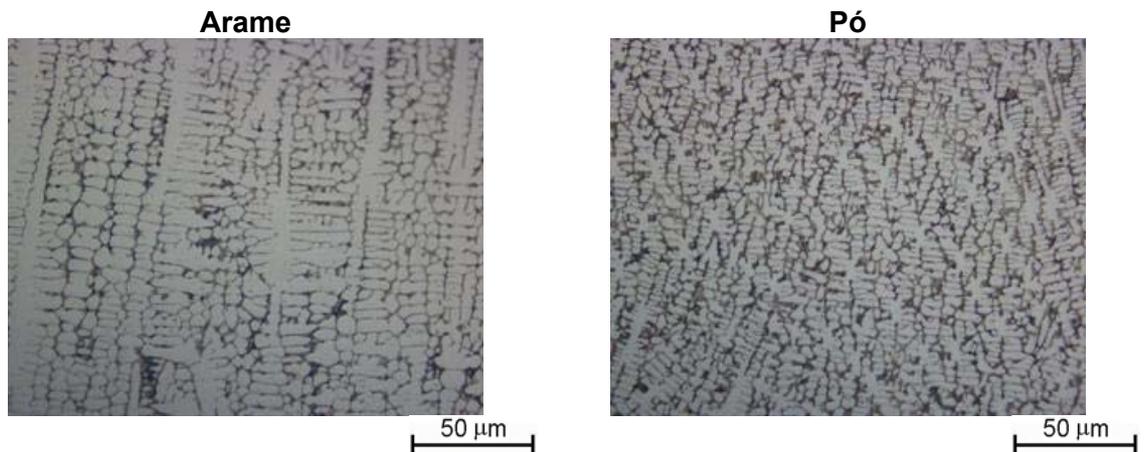
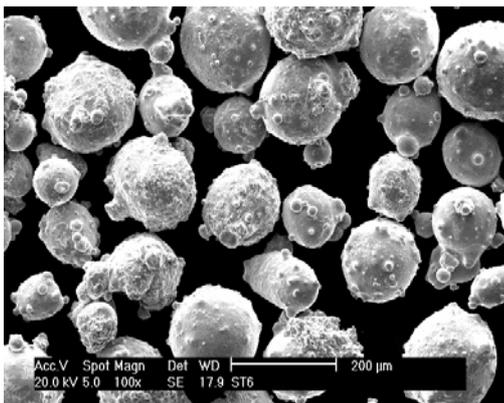


Figura 2 – Microestrutura de depósitos realizados através do processo PTAA e PTAP. Liga Stellite 6

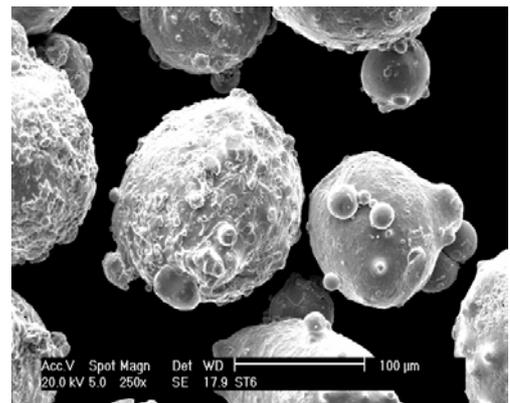


1-Fonte de soldagem; 2-Tocha; 3-Modulo plasma; 4-Alimentador de pó; 5-Sistema de deslocamento da tocha; 6-Medidores digitais de gases; 7-Válvula eletrônica de gás; 8-gases

Figura 3 – Montagem da bancada no Laboratório de Soldagem LABSOLDA



a)



b)

Figura 4 – a) Morfologia do pó depositado pelo processo PTAP (Stellite 6); b) Detalhe da partícula

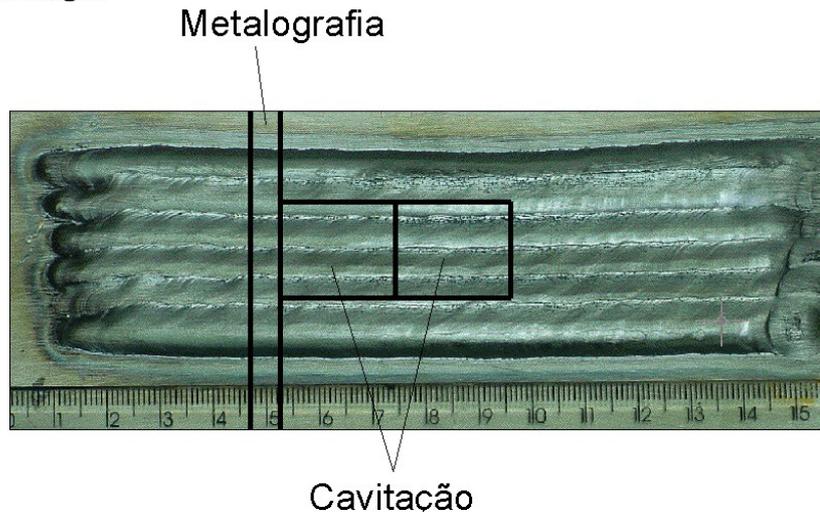


Figura 5 – Posições das regiões para a extração dos corpos de prova para os ensaios de cavitação e medição da diluição

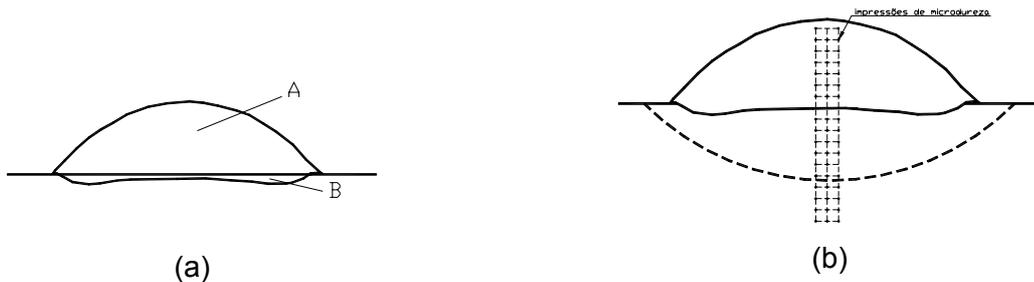
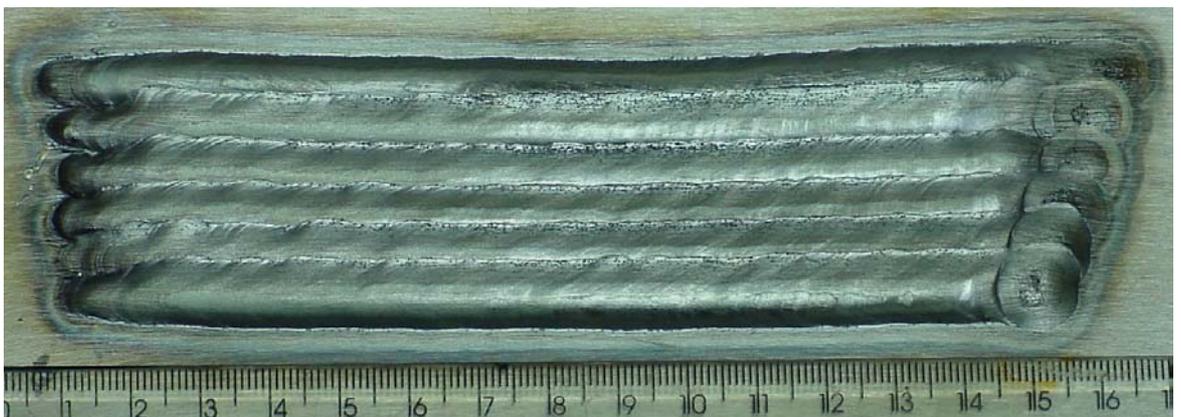


Figura 6 – (a) Determinação do grau de diluição. (b) Diagrama da seção transversal do cordão, indicando a localização das impressões de microdureza

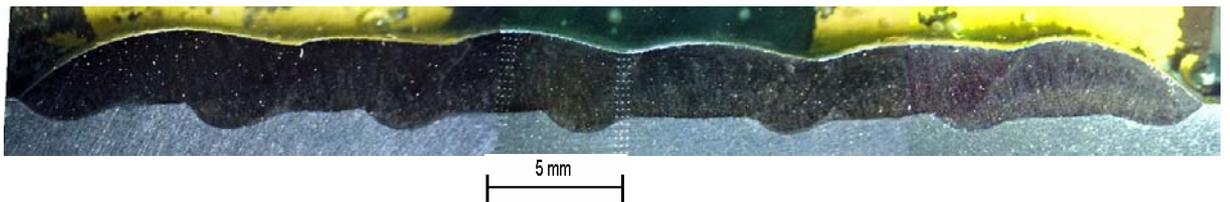


a) Revestimento realizado com corrente contínua constante

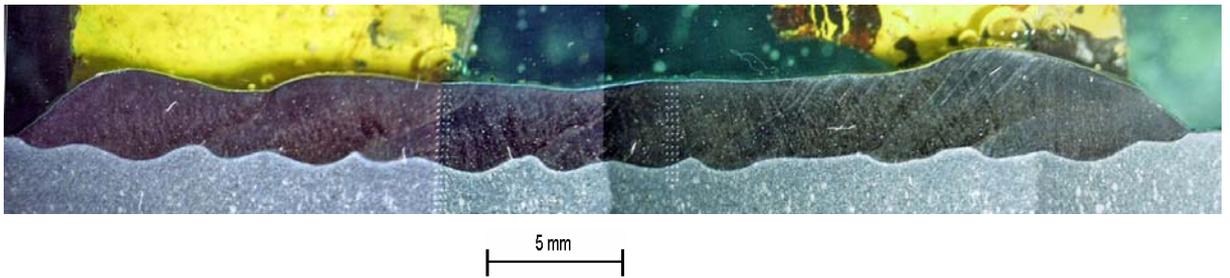


b) Revestimento realizado com corrente contínua pulsada

Figura 7 – Aspecto superficial dos revestimentos realizados com corrente contínua constante e corrente contínua pulsada. Uma camada.

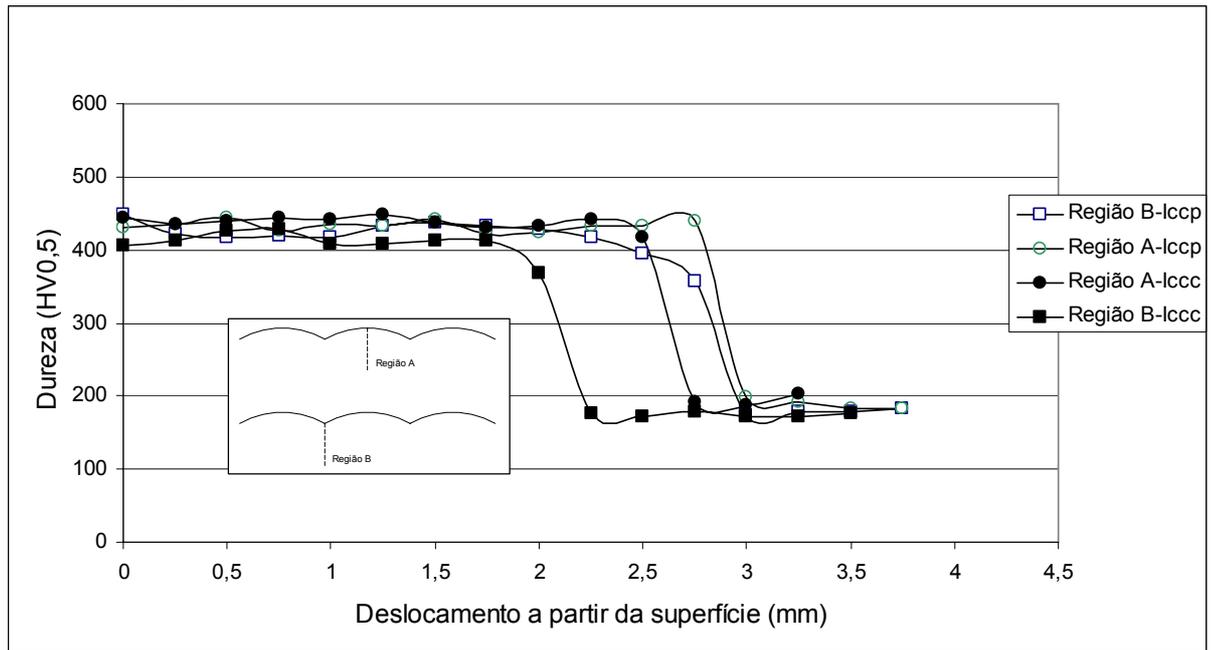


a) Revestimento com corrente contínua constante, diluição: 13,22%



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

Figura 8 – Aspecto da seção transversal dos revestimentos



lccc: Corrente contínua constante; lccp: Corrente contínua pulsada

Figura 9 – Perfil de dureza apresentado para as regiões A e B do revestimento com corrente contínua constante e corrente contínua pulsada

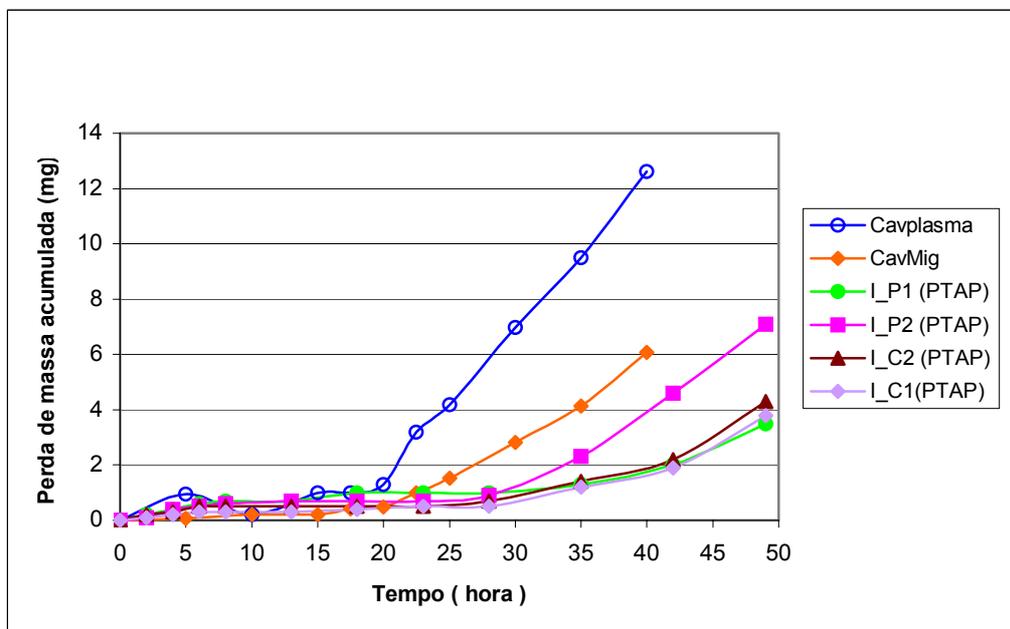


Figura 10 – Perda de massa acumulada em função do tempo da liga Stellite 6 x arame Cavitec.

Tabela 1 – 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 2– 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

Tabela 3 – 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

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

Amostras PTAP	Tempo de incubação (Ti) (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

Tabela 5 – Tempo de incubação e taxa de erosão dos revestimentos com arame Cavitec depositados pelos processos Plasma (Cavplasma) e Mig (CavMig).

Amostra	Tempo de incubação (Ti) (horas)	Taxa de erosão (TE) (mg / horas)
Cavplasma	20	0,56
CavMig	24	0,34