

DESEMPENHO DO PROCESSO PLASMA DE ARCO TRANSFERIDO ALIMENTADO COM PÓ NA POSIÇÃO HORIZONTAL E SOBRE-CABEÇA

Víctor Vergara Díaz - Jair Carlos Dutra - Thiago Victor de Souza Álvares – Raul Gohr Junior
Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Engenharia Mecânica - Laboratório de Soldagem LABSOLDA
Campus Universitário - UFSC - Caixa postal - 476 - Trindade - CEP 88 040 900 (**55 48) 331-9471
Florianópolis - BRASIL

Ana Sofia Climaco D'Oliveira
Universidade Federal do Paraná
Centro Politécnico - Dep. de Eng. Mecânica - LaMaTS
Jardim das Américas - CEP: 81531990
Curitiba - BRASIL

RESUMO

Uma análise da literatura mostrou que a grande maioria dos trabalhos realizados através do processo de Soldagem Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó (PTAP) aborda somente a soldagem na posição plana, não apresentando procedimentos para a deposição em outras posições. Ocorre que, para viabilizar a aplicação do processo na recuperação de pás de turbinas hidráulicas que sofreram erosão por cavitação, a identificação de resultados em outras posições é uma condição fundamental. Com o objetivo de conhecer o comportamento do processo fora da posição foram conduzidos alguns experimentos com corrente contínua pulsada, utilizando-se a liga Stellite 6, e comparados com os resultados obtidos na posição plana. São avaliadas as características geométricas dos cordões, grau de diluição, dureza e microestrutura. Na posição horizontal e sobre-cabeça foram encontrados resultados inéditos, tornando-se o LABSOLDA pioneiro em revestimentos fora da posição plana neste processo de soldagem. O corte transversal do revestimento e ensaios com líquidos penetrantes permitiram observar ausência de defeitos tais como porosidade, falta de fusão e mordeduras.

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 (Oliveira, 2001), de acordo com a Figura 1.

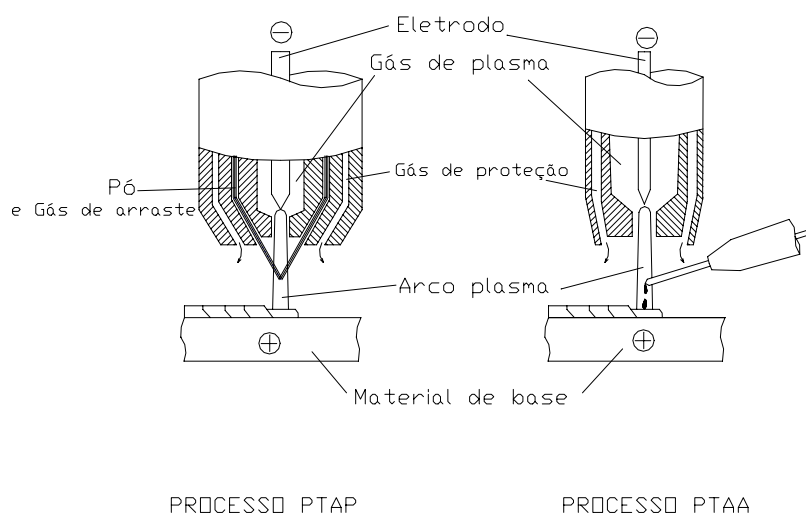


Figura 1- Comparação dos processos de soldagem Plasma de Arco Transferido Alimentado com Pó-PTAP e Plasma de Arco Transferido Alimentado com Arame-PTAA (Deuis R. L. et al., 1997).

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. Varias são as vantagens atribuídas ao processo. Estas vantagens compreendem (Deuis R. L. et al., 1997; PLASMA TEAM, 2004):

- 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. Dados levantados no laboratório de soldagem LABSOLDA/UFSC.
- Maior facilidade para a produção de materiais de enchimento para diferentes finalidades experimentais misturando diferentes pós.

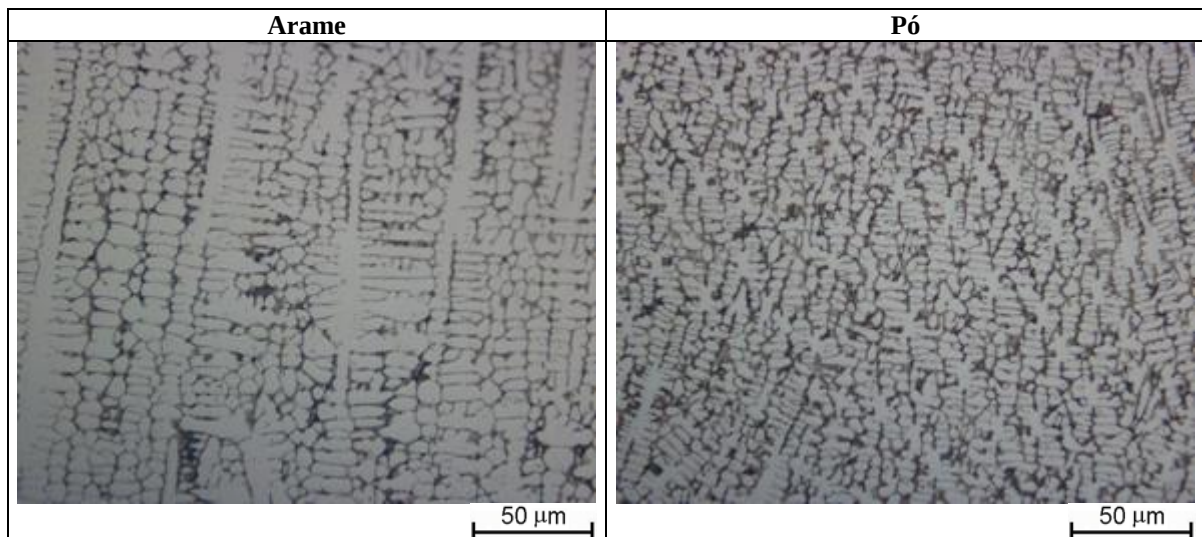


Figura 2 – Microestrutura de depósitos realizados através do processo PTAA e PTAP. Liga Stellite 6

Segundo Belkacem B. (2001), 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.

MATERIAIS E MÉTODOS

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, Figura 4. 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. A Figura 5 mostra o bico constritor projetado.

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. A Figura 6 mostra o alimentador de pó utilizado nesta pesquisa.



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

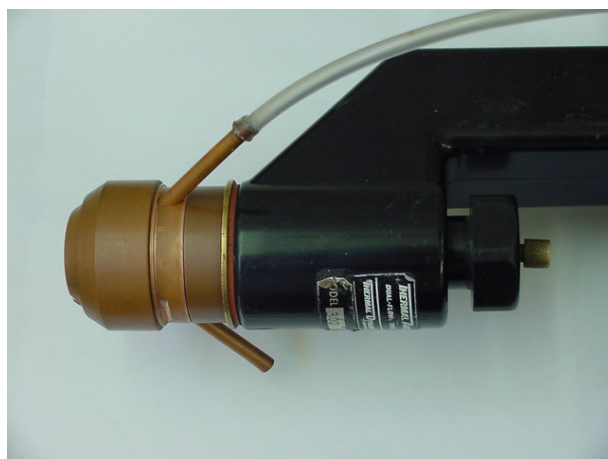


Figura 4 – Montagem tocha PTAP desenvolvida pelo LABSOLDA



Vista superior



Vista inferior

Figura 5 - Bico constritor projetado.



Figura 6 –Alimentador de Pó desenvolvido neste projeto

Corpos de prova. Os ensaios foram realizados em chapas de aço baixo carbono. 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 9 mostra a microestrutura do pó depositado pelo processo PTAP.

Tabela 1 – Composição química substrato aço baixo carbono

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
0,11	0,22	0,74	0,021	0,008	0,027	0,024	0,011	0,06
Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Sn	Fe	
-	0,016	-	-	0,015	0,026	0,065	98,6	

Espessura : 12,7 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 HRC; Granulometria: 53 a 150µm

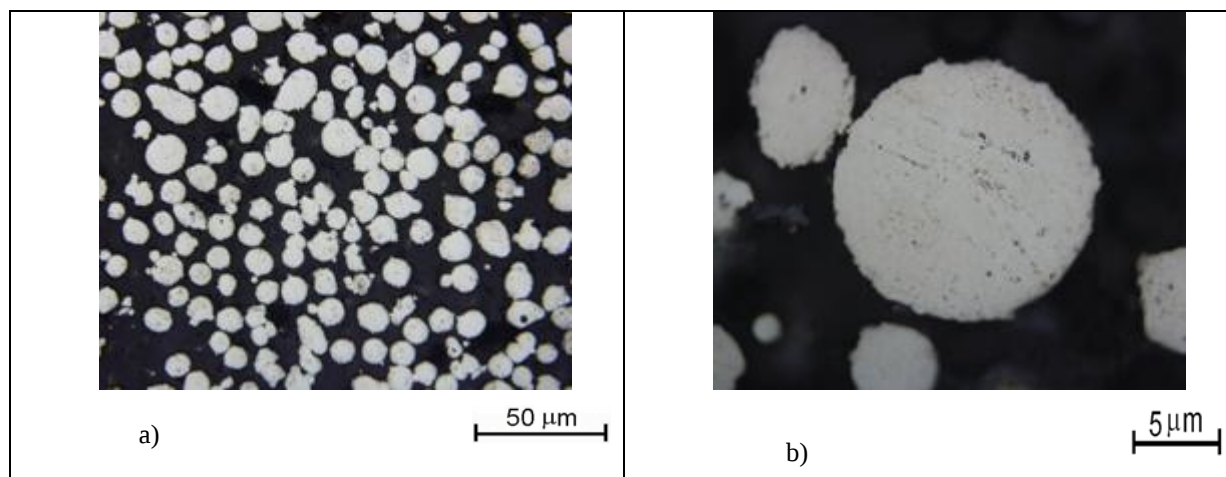


Figura 7 – a) Microestrutura do pó depositado pelo processo PTAP (Stellite 6); b) Detalhe da partícula

O argônio com pureza de 99,99 % foi utilizado nos gases de plasma, proteção e de arraste. 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. As variáveis e parâmetros de soldagem utilizados para a condução de ensaios na posição plana, horizontal e sobre-cabeça são apresentados na Tabela 3. Realizaram-se testes sobre chapas de aço carbono da classe ABNT 1020, cortadas nas dimensões de 12,5x60x235 mm e esmerilhadas para remoção da camada de óxido.

Metodologia experimental

Análise geométrica das amostras. Os corpos de prova foram seccionados no sentido transversal ao cordão de solda e submetidos a uma preparação metalográfica. A Figura 8a mostra as dimensões medidas nos cordões de solda: largura (L), reforço (R), penetração (P) e profundidade da ZAC (Pzac).

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: soldas com bom aspecto superficial e ausência de defeitos tais como porosidades, trincas, mordeduras acentuadas e falta de penetração nas laterais.

Determinação do grau de diluição. Com o emprego do estereoscópio foram obtidas imagens macrográficas da secção 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 8b, utilizando-se um programa comercial.

Perfil de microdureza. O perfil de microdureza foi medido na seção transversal da amostra (ABNT NBR 6672/81). No total foram executadas medições ao longo de 3 colunas, e calculado o valor médio de microdureza para a obtenção do gráfico “Distância da superfície x Dureza Vickers”. A carga calibrada no instrumento de ensaio de microdureza Vickers foi de 500g (HV 0,5). A Figura 8c mostra um diagrama da seção transversal do cordão, indicando a localização das impressões de microdureza.

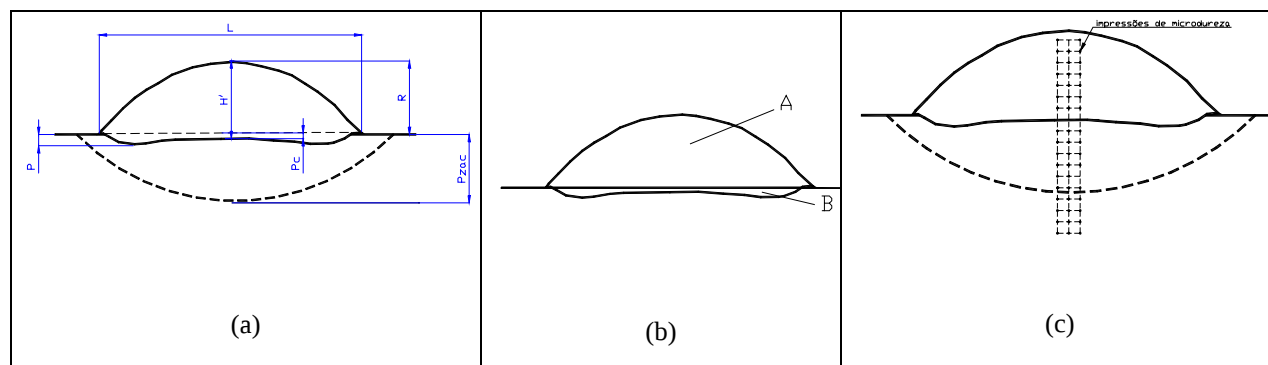


Figura 8 – (a) Dimensões geométricas do cordão de solda; (b) Determinação do grau de diluição. Seção transversal de um dos revestimentos depositados por PTAP; (c) Diagrama da seção transversal do cordão, indicando a localização das impressões de microdureza

Tabela 3 – Variáveis e parâmetros de soldagem

Variáveis		
Corrente média de soldagem	Im(A)	160
Frequência de pulsação	f(Hz)	5
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 deposição	Tx(kg/h)	1,4
Diâmetro do bico constritor/ângulo de convergência	d(mm)/(°)	4,8/30-4,8/60
Distância bico-peça	DBP(mm)	10
Recuo	Rc(mm)	2,4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 9 mostra a posição da tocha de soldagem quando foram realizados os ensaios na posição horizontal. As soldagens realizadas sobre-cabeça foram feitas em um plano inclinado a 45° com o plano horizontal, a Figura 10 mostra a posição da tocha de soldagem em relação ao substrato.

Antes de iniciar o estudo, foi verificado o desempenho do tipo de bico constritor. As Figuras 11a e 11b mostram as diferenças do aspecto superficial dos depósitos sobre-cabeça para os dois tipos de bicos constritores. Observe-se que quando é empregado o bico constritor de 30°, fica pó

aderido nas laterais dos depósitos, Figura 11a, fato que não é observado no bico constritor de 60°, Figura 11b. Resultados semelhantes foram encontrados na posição plana.

A influência da variação na vazão do gás de arraste, é verificada neste trabalho, onde foi utilizada uma vazão de gás de arraste de 2, 4 e 6 l/min. As Figuras 12a, 12b e 12c mostram o aspecto superficial. As Figuras 13a, 13b e 13c mostram a secção transversal dos depósitos para três níveis de vazão de gás de arraste. Foi observado que para uma vazão de gás de arraste de 6 l/min, ocorreu falta de fusão em praticamente 71% do cordão, Figura 13c.

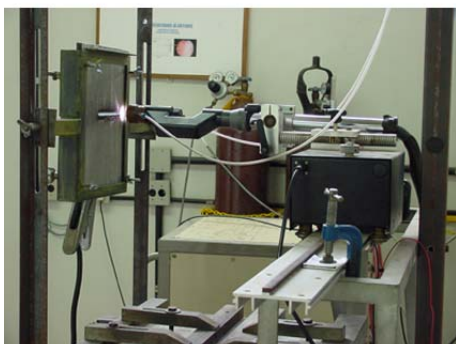


Figura 9 – Foto ilustrativa da posição da tocha para soldagem horizontal

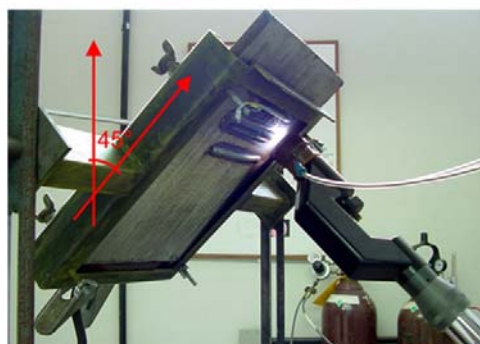


Figura 10 – Foto ilustrativa da posição da tocha para soldagem sobre-cabeça

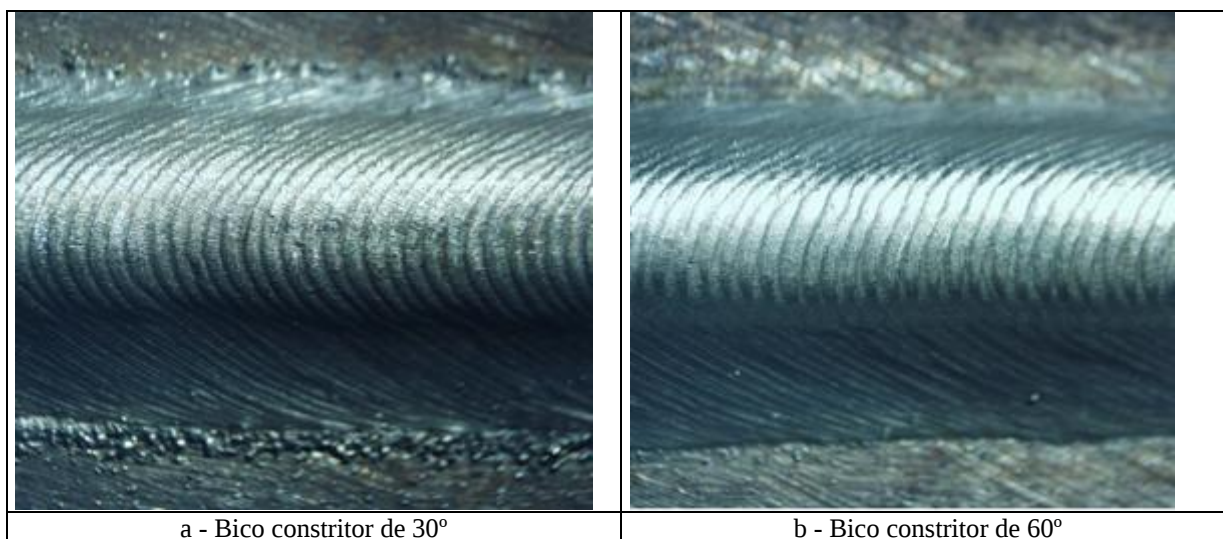


Figura 11 – Aspecto superficial para dois tipos de bico constritor

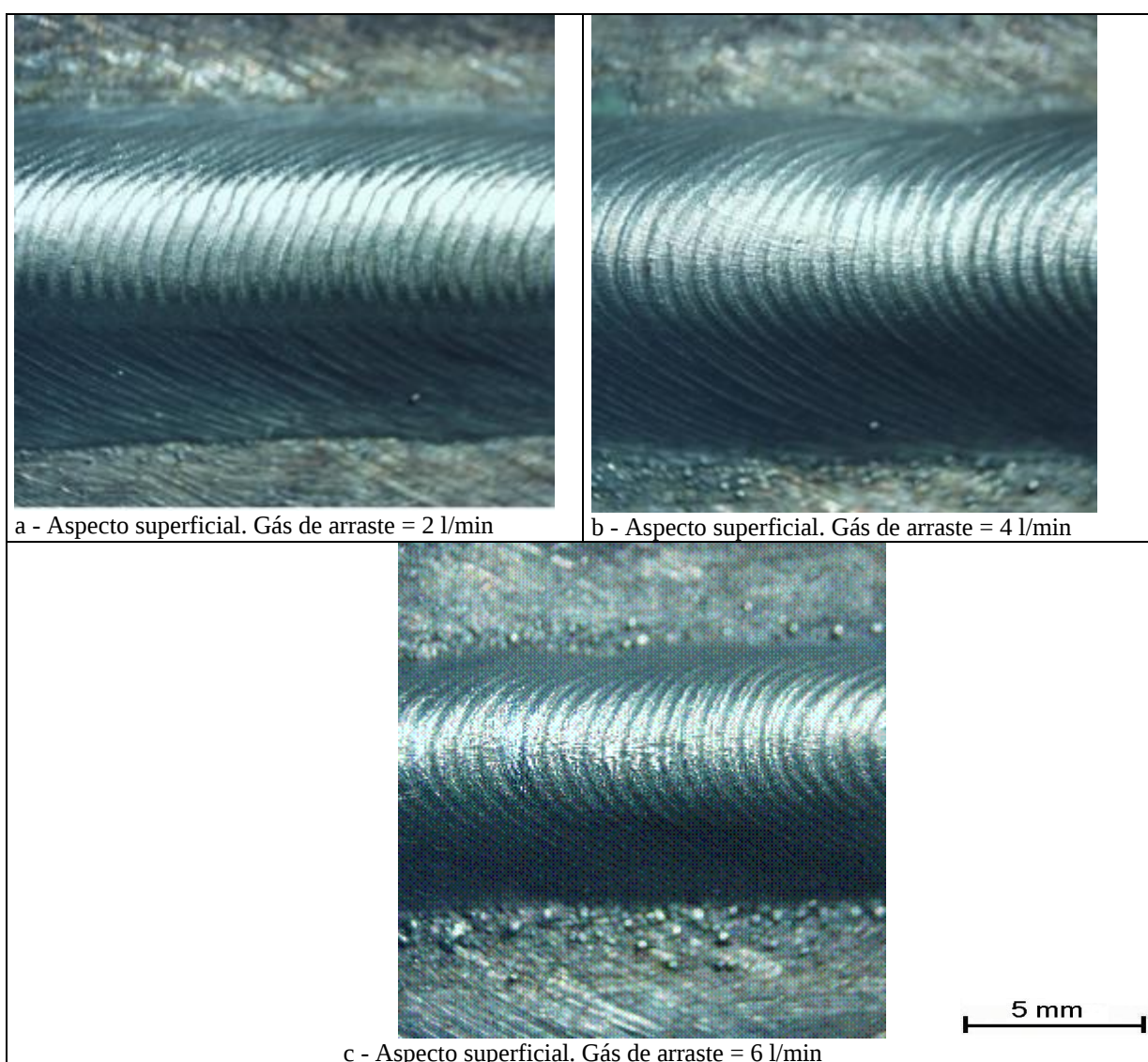


Figura 12 – Aspecto superficial para três níveis de vazão de gás de arraste

Devido a estes fatos, optou-se por trabalhar com um bico de 60° e com uma vazão de gás de arraste de 2 l/min. As Figuras 14, 15 e 16 mostram o aspecto

superficial dos cordões obtidos na posição plana, horizontal e sobre cabeça, respectivamente. As Figuras 17, 18 e 19 mostram a secção transversal

dos cordões, aonde é possível observar, que o cordão realizado na posição plana, Figura 17, apresenta uma diferença significativa na geometria da interface entre o revestimento e o material de base, em relação as outras posições de soldagem, Figuras 18 e 19. Observe-se na Figura 17, que a penetração do cordão

de solda está localizado nas laterais e não na região central do perfil do cordão. É uma observação que deve ser considerada no análise dos resultados de dureza, devido a que o perfil de microdureza é realizado no centro do perfil do cordão.

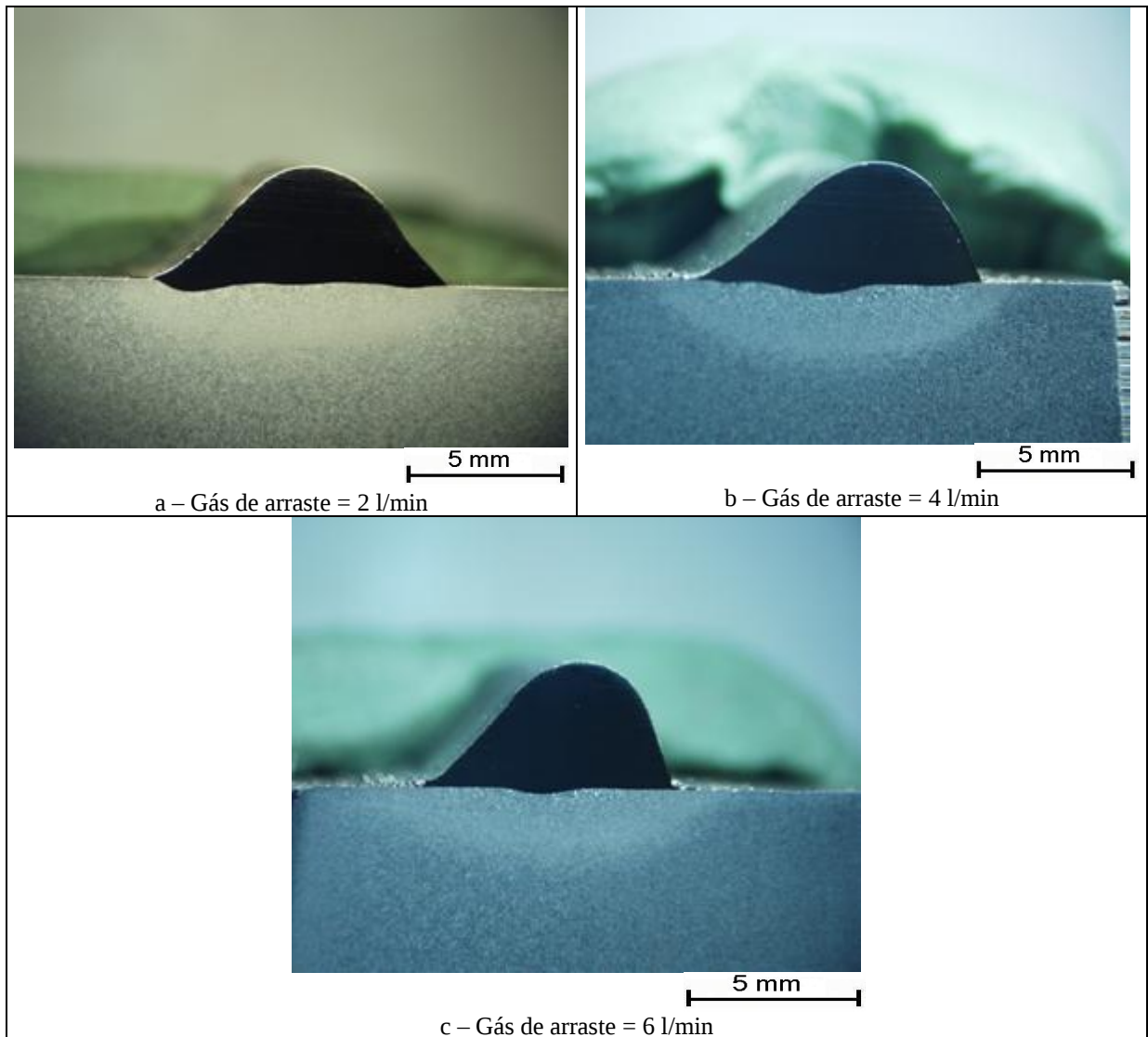


Figura 13 – Secção transversal dos depósitos para três níveis de vazão de gás de arraste

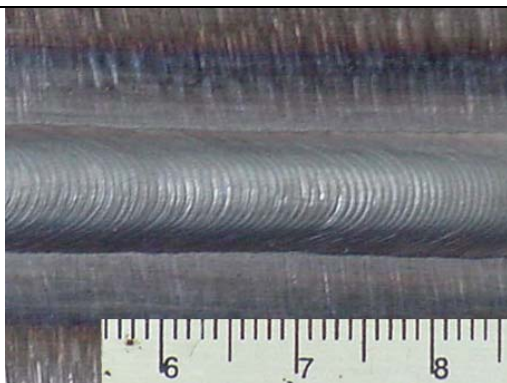


Figura 14 - Aspecto superficial do cordão na posição plana

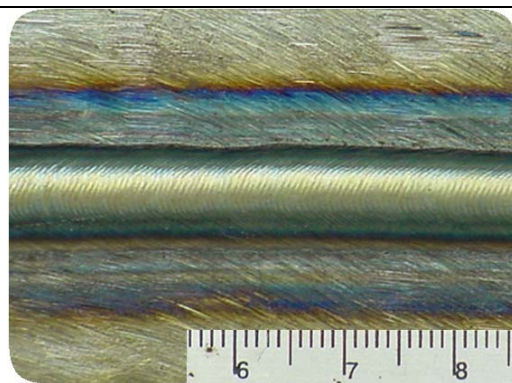


Figura 15 - Aspecto superficial do cordão na posição horizontal

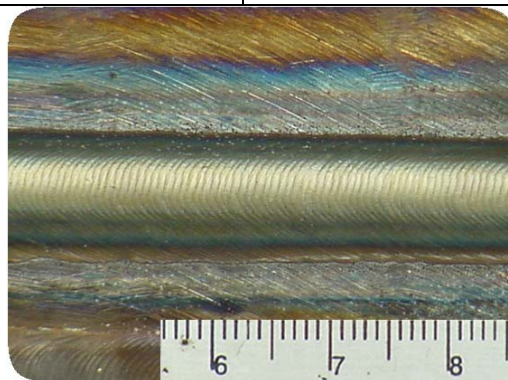


Figura 16 - Aspecto superficial do cordão na posição sobre-cabeça

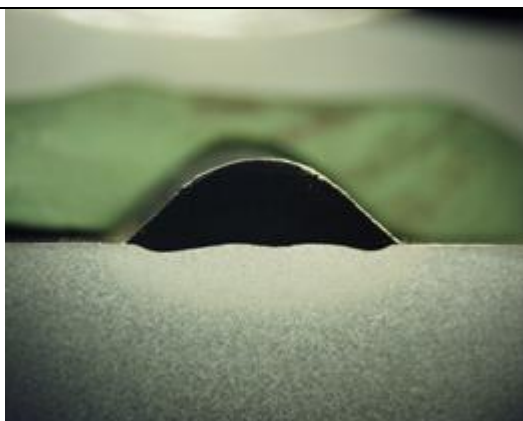


Figura 17 - Posição plana

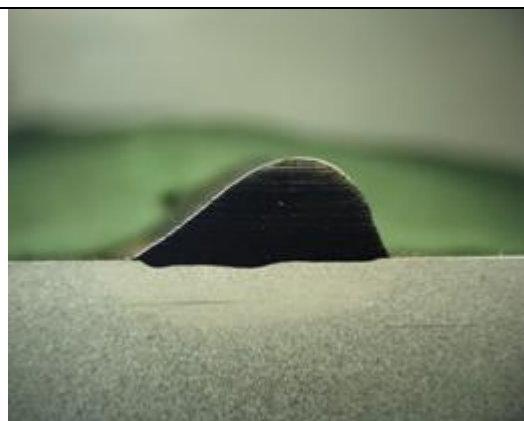


Figura 18 - Posição horizontal

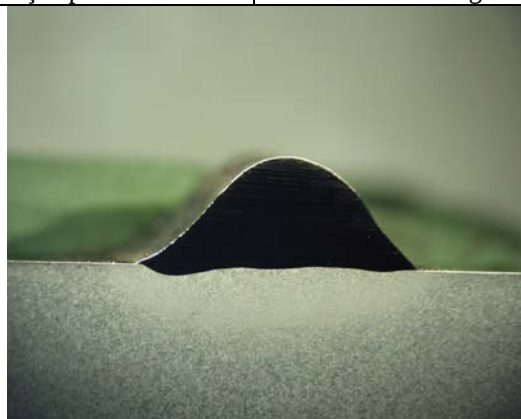


Figura 19 - Posição sobre-cabeça

A Tabela 4 apresenta os resultados sobre as condições geométricas, tais como largura, reforço, penetração, profundidade da ZAC, grau de diluição e dureza. A Figura 20 indica o efeito da posição de soldagem sobre as condições geométricas e a Figura 21 indica o efeito da posição de soldagem sobre o grau de diluição.

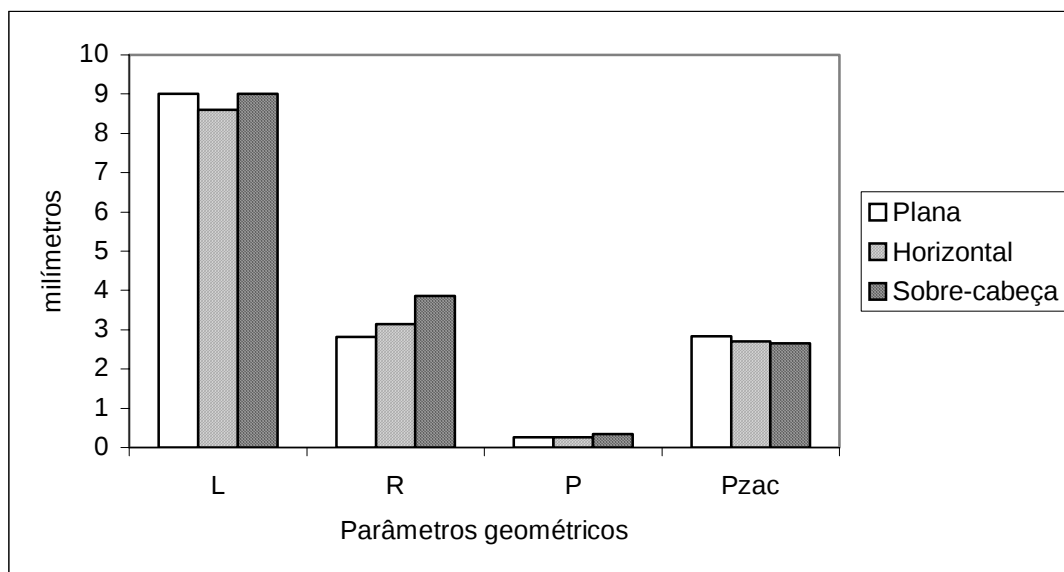
O análise da Figura 20, indica que, de uma forma geral, a posição de soldagem não afeta significativamente na largura, penetração e

profundidade da ZAC. Pela análise da Figura 20, apoiada com a análise de variância da Tabela 5, percebe-se um efeito significativo no tamanho do reforço, apresentando-se os maiores valores na posição sobre cabeça e horizontal, devido a que nesta posição a poça fundida é afetada fortemente pelo efeito da gravidade. O análise da Figura 21, mostra que a posição de soldagem não afeta significativamente sobre o grau de diluição dos depósitos.

Tabela 4 - Características geométricas dos cordões

	L(m m)	R(mm)	P(m m)	Pzac(mm)	δ (%)
Plana	9,0	3,05	0,26	2,7	5,8
Horizontal	8,6	3,5	0,26	2,66	6,4
Sobre-cabeça	9,0	3,7	0,34	2,84	5,5
Revestimento Sobre-cabeça	17	3,0	0,6	3,0	

L: Largura; R: Reforço; P: Penetração; Pzac: Profundidade da ZAC; δ : Diluição



L: Largura; R: Reforço; P: Penetração; Pzac: Profundidade da ZAC

Figura 20 – Parâmetros geométricos

Tabela 5 – Resultados de análise de variância para o reforço da solda

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Média dos quadrados	Fobservado	F crítico
Reforço	1,11436	2	0,55718	20,02 >	3,89
Residual	0,334	12	0,027833		
Total	1,44836	14			

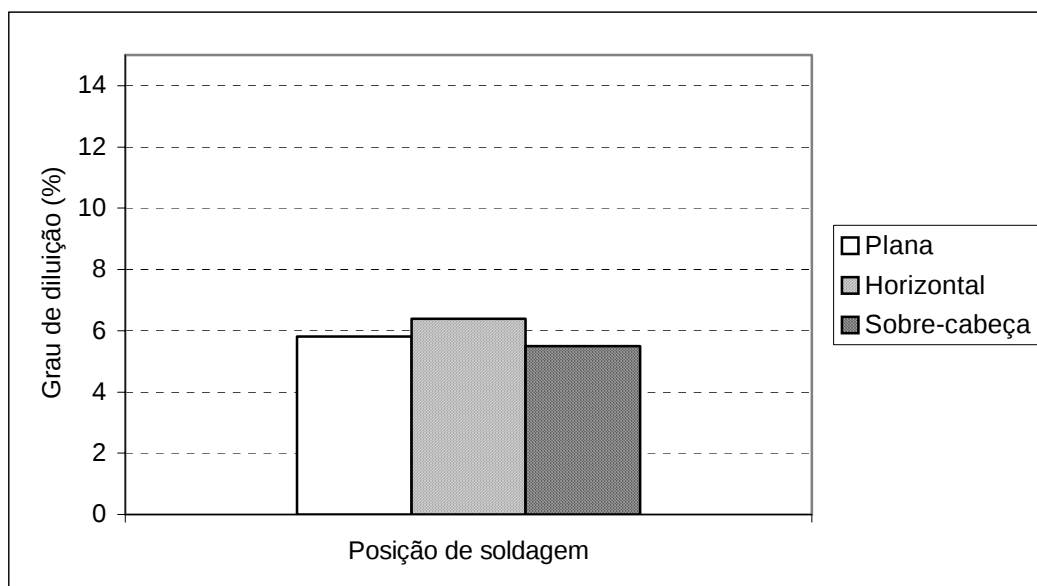


Figura 21 – Efeito da posição de soldagem sobre o grau de diluição

A Figura 22 mostra o perfil de microdureza para as três posições testadas. O deslocamento entre as curvas de dureza representa o tamanho do reforço e a penetração no centro do cordão (H'). A análise da Figuras

22, reforçada com a análise de variância da Tabela 6, indica que, de uma forma geral, a posição de soldagem não afeta significativamente na dureza da região fundida.

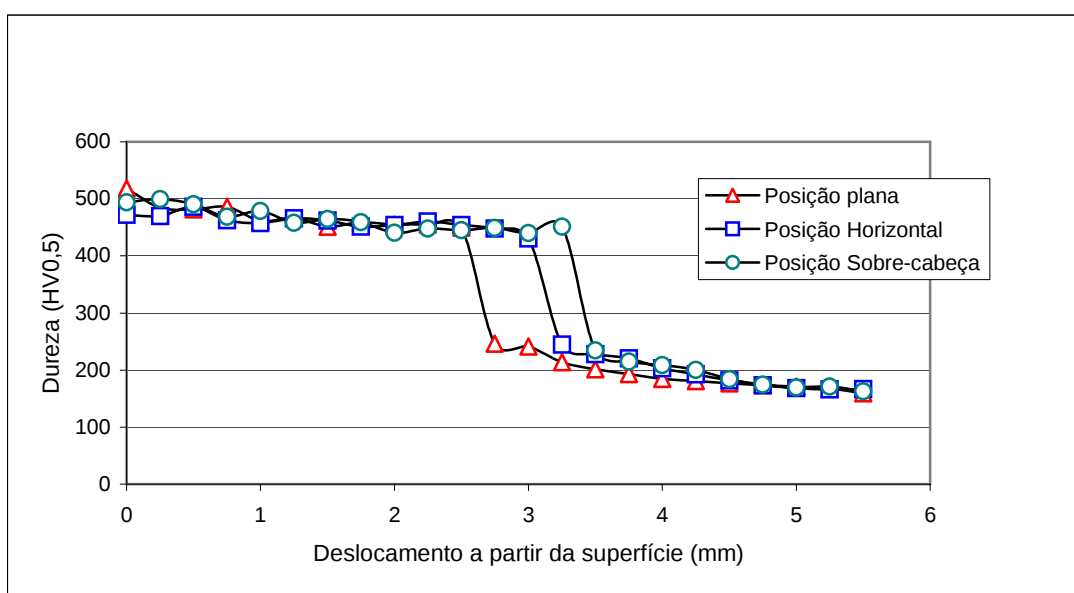


Figura 22 – Dureza Vickers ao longo da secção transversal dos cordões para diferentes posições de soldagem

Tabela 6 – Resultados de análise de variância para a dureza na região fundida

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	F observado	F crítico
Posição de soldagem	632,1267	2	316,0633	0,94 <	3,27
Residual	11781,49	35	336,614		
Total	12413,62	37			

As Figuras 23 e 24 mostram as microestruturas típicas devido aos modos de solidificação com dendritas ricas em cobalto e uma região interdendrítica. A microestrutura consiste de uma região planar, celular e dendrítica a partir da interface em direção a superfície.

Devido a este resultado, foi realizado um revestimento sobre-cabeça. A Figura 25 mostra a secção transversal.

Finalmente o teste de líquido penetrante, realizados sobre o revestimento, mostrou que não ocorreram defeitos como porosidades e falta de penetração. A Figura 32, mostra a superfície ensaiada.

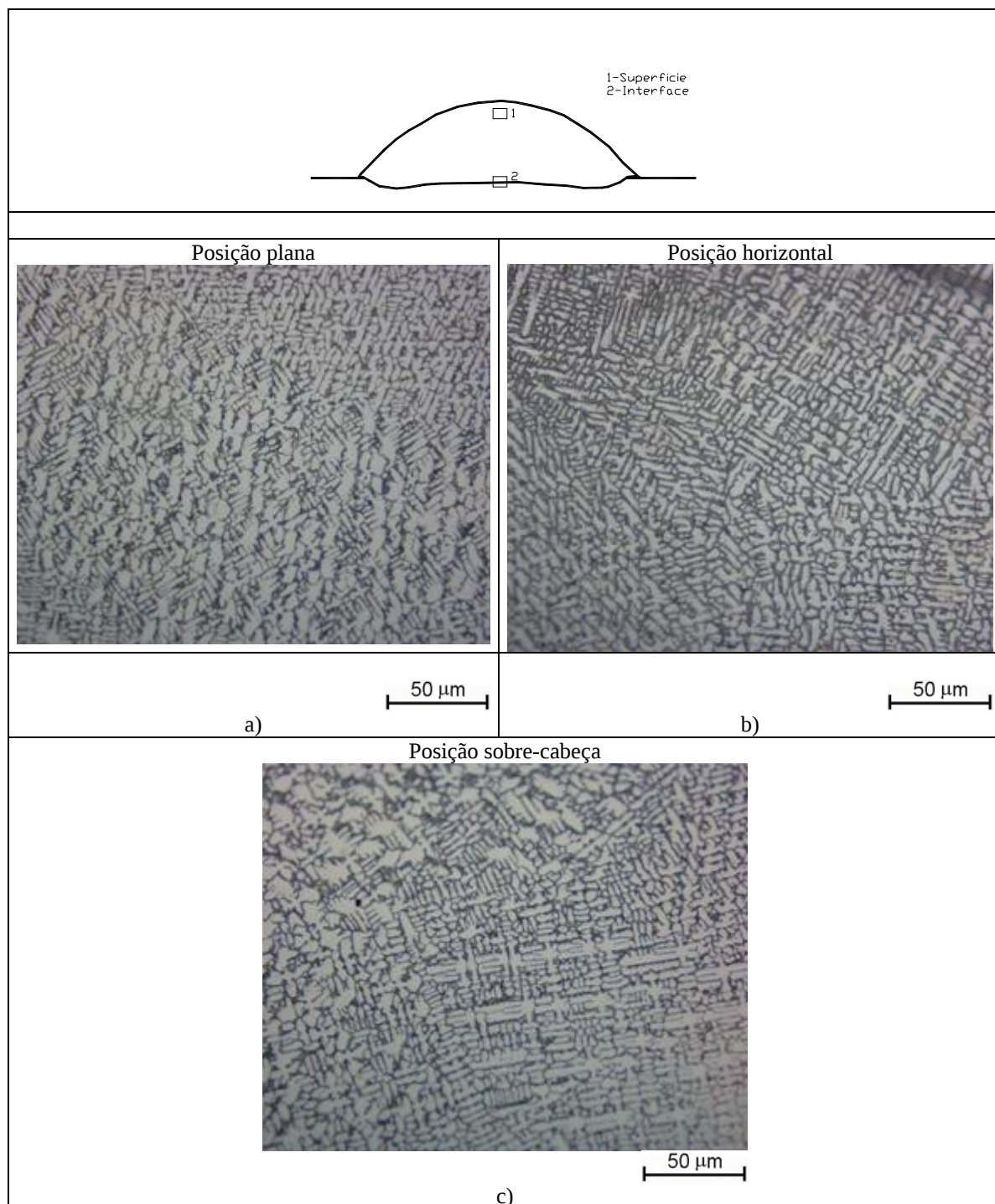


Figura 23 - Micrografias das amostras de Stellite 6 junto à superfície. Posição plana/posição horizontal/posição sobre-cabeça

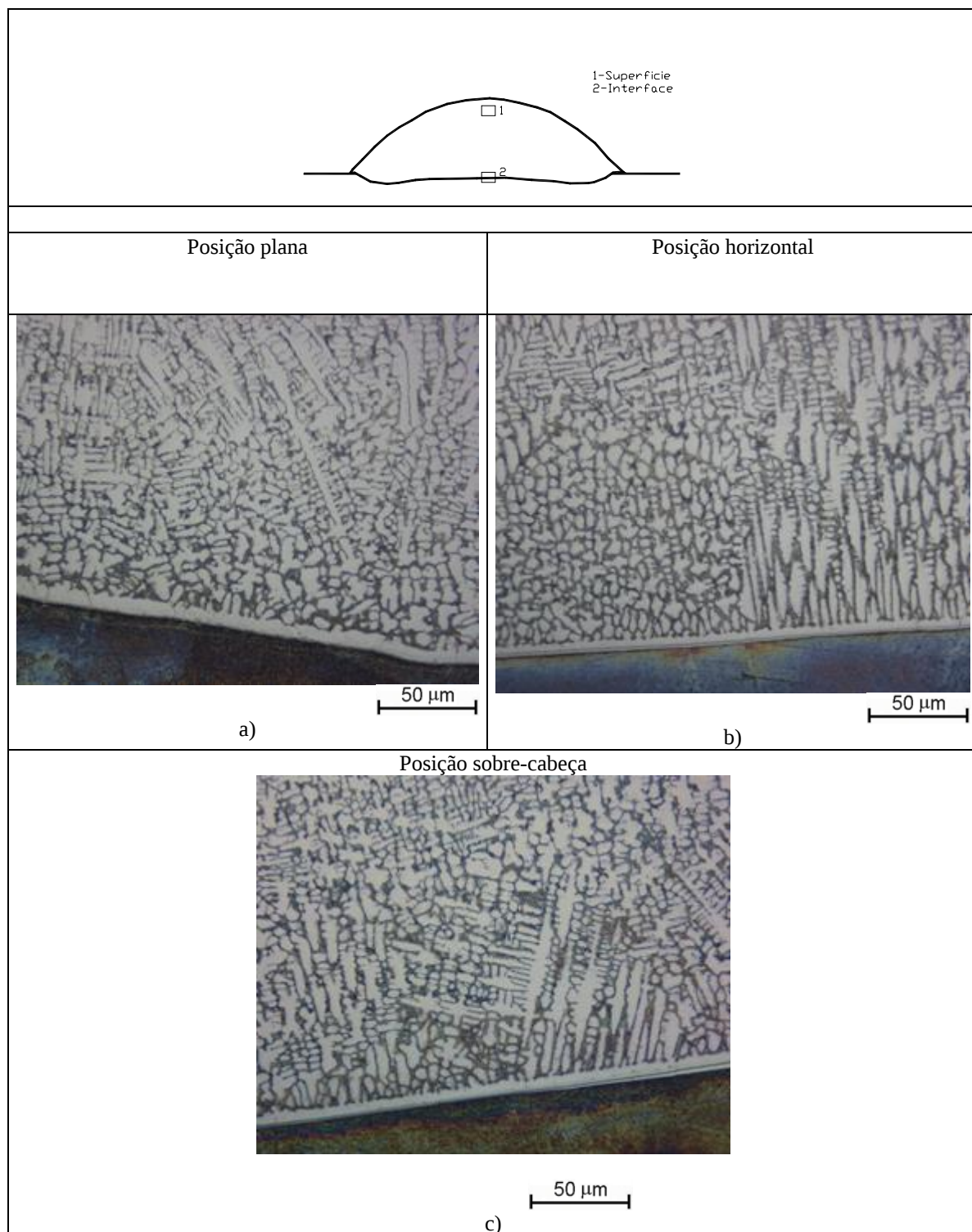


Figura 24 - Micrografias da região de ligação substrato-depósito. Posição plana/posição horizontal/posição sobre-cabeça

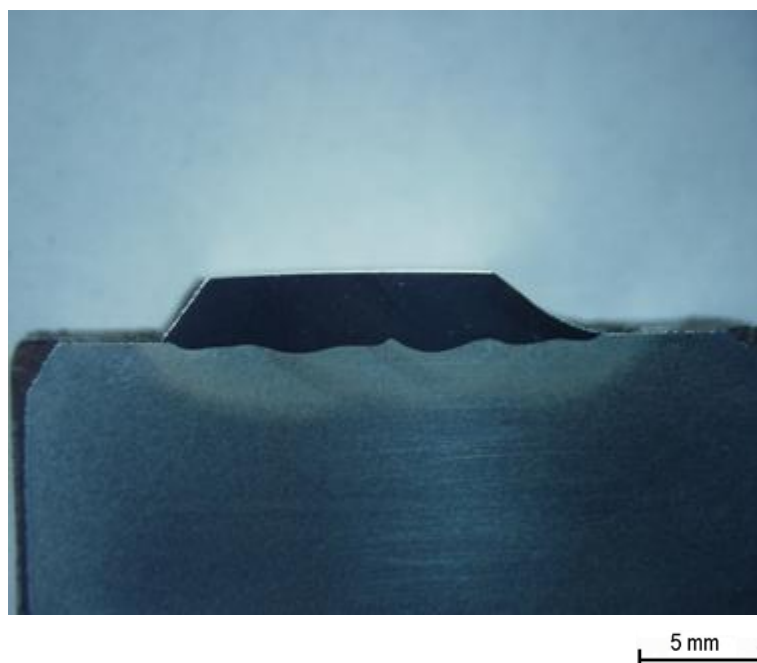


Figura 25 – Corte da secção transversal. Características do perfil de penetração e ZAC

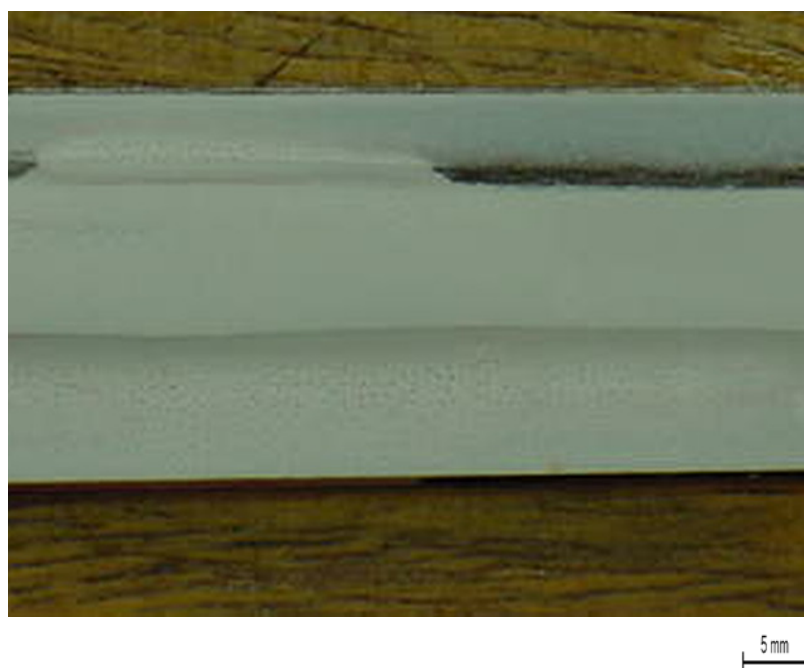


Figura 26 - Resultado do ensaio com líquido penetrante

CONCLUSÕES

Os resultados experimentais apresentados, dentro das condições utilizadas, permitem concluir que:

- Para a posição horizontal e sobre-cabeça foram conseguidos resultados inéditos, se tornando o LABSOLDA pioneiro em revestimentos fora da posição plana neste processo de soldagem.
- Para níveis altos de vazão de gás de arraste (6 l/min) ocorreu falta de fusão em praticamente 71 % do cordão.
- Os revestimentos apresentaram bom aspecto superficial. O reforço dos depósitos é influenciado pela posição de soldagem.
- A posição de soldagem não afeta significativamente na largura, penetração e profundidade da ZAC.

- A posição de soldagem não apresenta um efeito significativo sobre o grau de diluição e dureza.
- O corte transversal do revestimento e ensaios com líquido penetrante permitiram observar ausência de defeitos tais como porosidade, falta de fusão e mordeduras.

REFERENCIAS

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.

Deuis R. L. et al. “Metal Matriz composite coatings by PTA surfacing”, Univesrsity of South Australia, p.299-309,1997. (ELSEVIER).

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

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