



AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS/PROCEDIMENTOS DE SOLDAGEM E AUTOMAÇÃO SOBRE A PLANICIDADE E ASPECTO SUPERFICIAL DOS REVESTIMENTOS EMPREGADOS EM TURBINAS HIDRÁULICAS.

Sérgio Rodrigues Barra ⁽¹⁾

Jair Carlos Dutra ⁽²⁾

Fernando A. C. Ribas ⁽³⁾

RESUMO

Neste trabalho foram avaliados os efeitos que a variação dos parâmetros/procedimentos de soldagem (ângulo da tocha, velocidade de soldagem, distância contato-peça, distância entre cordões, tipo de mistura gasosa, oscilação da tocha, temperatura de interpasse, entre outros) exercem sobre o aspecto superficial e planicidade dos depósitos feitos com a utilização de uma célula de soldagem. Nos depósitos foram empregados arame 309L maciço e tubular, de liga inox ao Co, todos com $\phi=1,2$ mm, no amanteigamento e revestimento respectivamente. As posições de soldagem utilizadas foram a plana e sobre-cabeça a 45° do plano horizontal, as quais são as posições mais comumente encontradas no processo de recuperação das áreas erodidas em pás de turbinas hidráulicas. Como forma de melhorar o aspecto superficial e planicidade, reduzir defeitos e tempo gasto com esmerilhamento e, conseqüentemente, otimizar as características metalúrgicas do material depositado, durante a deposição empregou-se oscilação da tocha controlada por robô, MIG pulsado com pulsação térmica e monitoramento, em tempo real, da transferência metálica e da temperatura de interpasse durante o processo de soldagem. Os resultados obtidos mostram que, sob condições automatizadas, os depósitos apresentam, como esperado, planicidade e aspecto superficial com qualidade bem superior àquela obtida nas mesmas condições em soldagem manual. Além disso, pode-se fazer uma melhor avaliação dos defeitos que venham a surgir nos depósitos, isto é, eliminar a possibilidade da causa do defeito estar relacionada ao soldador e, por último, que os resultados da automação podem servir não só como base para treinamento dos soldadores, mas também como incentivo à viabilização da automação do processo de recuperação de áreas erodidas, *in-situ*.

Palavras-chave: automação; pulsação térmica; revestimento

ABSTRACT

This work evaluates the effects of the variation that the welding parameters/procedures exerts on the surface aspect and flatness of the layers, made with 309-L solid wire and austenitic Co alloys tubular wire, in the buttering and hardfacing respectively. The deposition was carried out in a robotic welding cell. The welding positions used were the flat and overhead with 45° to horizontal, the later considered key in the process of repair of the areas under cavitation in turbines blades. It was still used oscillation (waving) of the torch controlled by robot, MIG pulsed arc with thermal pulsation and checking, in real time, of the transfer process and of the interpass temperature during the welding. The results show that it is possible to make a better check-up of the defects that may to appear in the deposit and in addition to serve as a base for welders qualification.

Keywords: Automation; Thermal pulsation; Hardfacing.

⁽¹⁾ Eng. Mec., Mestre Eng. Mecânica/UFSC. Pass. São Judas Tadeu, 80 - Bairro: Condor. Belém - Pará. CEP 66033-740 Fone (091) 249-8802. E-mail barra@emc.ufsc.br.

⁽²⁾ Dr. Eng. Mec., Prof. LABSOLDA/UFSC.

⁽³⁾ Eng. Mec., Gerasul.



INTRODUÇÃO

O processo erosivo nas pás de turbinas hidráulicas, provocado pelo fenômeno de cavitação, constitui-se num limitador da vida útil destas e determinará, em função da taxa erosiva apresentada pela região exposta à cavitação, o intervalo de tempo necessário entre reparos. Neste caso, quanto mais rápido e qualificado for o processo de recuperação das áreas erodidas, maior será o tempo disponível, das turbinas, para geração. Deste modo, a erosão por cavitação constitui-se num importante problema para as companhias hidrelétricas e, paralelamente, um vasto campo de pesquisa a nível de engenharia, em busca da minimização das perdas econômicas e sociais, que o fenômeno traz como consequência.

O interesse nas pesquisas relacionadas ao assunto são recentes e, de uma maneira geral, enfocadas em dois campos distintos, mas intimamente interligados. O primeiro, **processual**, preocupa-se com aspecto macro do problema, onde é focado a questão fundamental de operacionalidade e fatores conseqüentes. Disto resulta a seleção do processo e de procedimentos que viabilizem depósitos isentos de defeitos macroscópicos e que sejam economicamente aceitáveis. O segundo enfoque, **metalúrgico**, dedica-se em estudar a relação entre a estrutura cristalina apresentada pelo revestimento e sua resistência ao processo erosivo e, a partir daí, propor alterações na composição química do consumível utilizado e/ou controle dos ciclos térmicos impostos pelo processo de soldagem empregado.

Este trabalho, deter-se-á apenas ao campo processual onde será abordada a metodologia empregada para o levantamento e avaliação dos procedimentos/parâmetros de soldagem com a utilização de um robô industrial em conjunto com a aplicação de corrente de soldagem pulsada com pulsação térmica, nas posições plana e sobre cabeça a 45° do plano horizontal. Desse modo, mostrar-se-á a viabilidade de se automatizar o processo de recuperação das áreas erodidas além de se fazer um comparativo em termos de planicidade e aspecto superficial entre depósitos feitos manualmente e os executados pelo robô. Ênfase também se dará ao estudo das possíveis alterações que as misturas gasosas, de caráter inerte ou ativo, poderão gerar durante o processo de soldagem.

MATERIAIS E METODOLOGIA

a) Consumíveis

Devido ao tipo de aplicação e da utilização da pulsação térmica durante a execução das camadas de amateigamento (duas) e das de revestimento (duas), selecionou-se metais de adição que possibilitassem a aplicação de corrente pulsada e que apresentassem características de alta resistência à cavitação, principalmente para o revestimento. Para o revestimento empregou-se arame tubular ligado ao cobalto com característica final austenítica no metal depositado e para o amateigamento arame maciço inoxidável. O objetivo de se aplicar duas camadas, tanto para o amateigamento, quanto para o revestimento, está relacionado ao fato de que a partir de duas camadas não se tem, para os consumíveis selecionados, modificações na composição química oriundas da diluição imposta pelo processo [1].

As características e composições químicas apresentadas pelos consumíveis, na segunda camada depositada, são sumarizadas na tabela 1.

Com relação às misturas gasosas empregadas no processo (GMAW), para esta finalidade, observou-se diferentes abordagens entre as informações propostas em literatura [2,3] e as colhidas e aplicadas atualmente no campo, isto é, a literatura sugere que se utilize uma mistura tripla de Ar, He e CO₂ ou uma mistura de **Ar + 1 a 2% de O₂** (M1) quando da soldagem de arames inoxidável com corrente pulsada. A utilização de uma mistura Ar e CO₂ em corrente pulsada, girando em torno de 5% máximo, aplica-se extensivamente na soldagem de arames de aço carbono, não sendo recomendado em soldagem de arames inoxidáveis devido a problemas de ordem metalúrgica. Para as aplicações em campo, os trabalhos realizados [4], empregando os consumíveis selecionados, apresentam uma



participação de 8% em volume de CO₂ e o restante em Ar e, tendo como resposta bons resultados de resistência à cavitação. Outro ponto importante abordado em literatura [2], está relacionado ao fato de que uma atmosfera rica em CO₂ possui a característica de que o carbono, presente na região do arco, possa ser transferido para a poça de fusão ou extraído desta, o que acarretaria uma carbonização ou descarbonização do metal depositado, isto é, estes dois fenômenos estão relacionados ao que se denomina **potencial de carbono (PC)**. De uma maneira geral, para a soldagem de aços, o carbono tende a se estabilizar em torno de um valor próximo a 0,10%. Caso o arame apresente um teor de carbono inferior a 0,05% haverá uma tendência a carbonização do depósito e por outro lado se o arame de solda apresentar teor maior do que 0,10% o depósito tenderá a ser descarbonizado.

Dessa forma, com o intuito de se observar as possíveis alterações que estas diferentes misturas pudessem acarretar sobre o modo de transferência e a estabilidade do arco, o aspecto superficial e a planicidade do depósito, optou-se pela aplicação de duas misturas, onde a primeira seguiria as recomendações propostas em [3], isto é, 99% Ar + 1% O₂ e a última seguiria as condições aplicadas em campo ou seja, 92% Ar + 8% CO₂ (M2) denominada de **C8**.

b) Bancada de ensaios

Com o objetivo de simular as condições reais de campo, tornou-se necessário a montagem de uma bancada de teste (célula de soldagem) que pudesse ao mesmo tempo incorporar os equipamentos de soldagem, robô industrial, **softwares** de monitoração desenvolvidos para esta finalidade e, finalmente, as diferentes posições de soldagem impostas pelo perfil hidrodinâmico e posição no espaço das pás das turbinas encontradas *in-situ*.

A figura 1, mostra uma representação da mesa de soldagem e modo de acoplamento ao robô (a) e o processo de interação entre os diversos equipamentos e **softwares** que compõem a bancada de ensaio (b).

As características e relação dos equipamentos e **softwares** empregados nos experimentos são descritas abaixo em:

- Fonte transistorizada (MTE DIGITEC 300), selecionada no processo MIG Pulsado com pulsação térmica;
- Robô industrial V15 da REIS, com 6 graus de liberdade e precisão de repetição dos movimentos na ordem de $\pm 0,1$ mm;
- Termopares tipo K;
- Microcomputadores AT 486 e XT;
- Impressora RIMA;
- Softwares de monitoramento OSCILOS e CICLOTER, utilizados no controle do processo de transferência e das temperaturas de interpasse e pré-aquecimento, respectivamente;
- Softwares de programação e gerenciamento do robô OFF-LINE e ROBOSTAR 2.

c) Corpos de prova

Os corpos de prova (CP's), utilizados no experimento, foram extraídos de chapas de aço ABNT 1020 (1" x 25 cm x 30 cm) [5]. Os cortes dos CP's foram executados por meio de oxi-corte, passando estes em seguida por uma limpeza da superfície através de lixamento, escovamento e lavagem com álcool para retirada de óxidos, graxa e poeira.

As características dos CP's, bem como a forma de deposição das camadas de amateigamento e revestimento e acoplamento na bancada, são apresentadas na figura 2.

d) Seleção das variáveis/procedimentos e método de deposição

Quando se fala em automação, o conceito do que vem a ser variável ou procedimento



fica um pouco ambíguo. Quando se fala em tecimento em soldagem manual tem-se a idéia de estar se executando um procedimento uma vez que não se pode controlar e nem se repetir com precisão os movimentos oscilatórios da tocha, porém, quando se fala em tecimento sob condições automatizadas tem-se agora a idéia de variável já que se pode determinar com precisão toda a trajetória. Neste trabalho, as variáveis de entrada (I_b , I_p , t_p , t_b , V_a , T_1 e T_2) para o amanteigamento foram obtidas em dois pacotes, um para a fase de pulso térmico e o outro para a fase de base térmica, conforme a metodologia proposta por AMIN [6] e DUTRA [7] para cálculo das variáveis em corrente pulsada e pulsação térmica respectivamente. Estes artigos, abordam as condições necessárias para que se atinja uma adequada estabilidade no processo de transferência metálica em corrente pulsada. Estas condições, recaem basicamente em duas exigências: a primeira relaciona a necessidade de se ter um equilíbrio médio entre a velocidade de alimentação de arame (v_a) e a sua velocidade de fusão (v_f), isto é, $v_a = v_f$; a segunda mostra a necessidade de que em cada pulso de corrente seja expelida apenas uma gota metálica e, sendo esta condição, expressa pela função $I_p^a \cdot t_p \geq K_{vg}$, onde: $a \approx 2$ e K_{vg} é uma constante que depende do volume da gota expelida.

Para o caso da soldagem em corrente pulsada com pulsação térmica, as condições, acima citadas, são adicionadas ao fato de se trabalhar com pulsação em dois níveis de frequência, em tempos pré-determinados T_1 e T_2 , para as fases de pulso térmico e base térmica respectivamente. Estes diferentes níveis de frequência, permitem ao mesmo tempo um controle sobre a transferência metálica e um efeito benéfico sobre a poça e metal de solda solidificado [7].

As deposições das camadas de amanteigamento e revestimento foram executadas seguindo as recomendações apresentadas em literatura [8, 9], as quais relacionam os procedimentos para o controle das temperaturas, tanto de pré-aquecimento, quanto as de interpasse, dos CP's. O monitoramento destas temperaturas foi realizado pela colocação de termopares nos CP's com conversão instantânea do sinal em saída gráfica. Os cordões eram executados, em célula de soldagem, sempre que a temperatura dos CP's atingisse o valor previamente estabelecido (150^0 C). Ao término de cada cordão a CPU do robô desacionava a fonte e aguardava que a temperatura do corpo de prova atingisse a temperatura pré-definida para interpasse.

O monitoramento, da estabilidade do processo de transferência era estabelecido, em tempo real, pela utilização osciloscópio digital, que permitia através do sinal, de tensão e corrente, enviados da fonte de soldagem, plotar o comportamento das ondas de pulso.

O processo de tecimento da tocha empregado para as duas posições, objetivava-se em melhorar as características metalúrgicas e, principalmente, para o enfoque dado neste trabalho, atingir condições de planicidade e aspecto superficial superiores aos obtidos em soldagem manual (reduzir a ondulação provocada entre os reforços dos cordões). Aplicou-se soldagem sem tecimento e com tecimento em dois níveis de frequência (1 e 2 Hz), com amplitudes pico a pico constante e igual a três vezes o diâmetro do eletrodo. A tabela 2, apresenta um sumário dos valores das variáveis de entrada, tanto para o amanteigamento, quanto para o revestimento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos no experimento serão apresentados e discutidos na mesma seqüência estabelecida em laboratório, uma vez que os valores de algumas variáveis estavam na dependência e conhecimento prévio de uma ou mais variáveis envolvidas no processo de deposição e, desta forma, tornar mais fácil a explanação dos resultados. Salienta-se ainda que, todas as etapas abaixo apresentadas do experimento foram realizadas em condições totalmente automatizadas e na realidade o que se almejava era uma condição que apresentasse melhor característica de planicidade e aspecto superficial em conjunto com um processo de soldagem estável.



a) Distância entre o tubo de contato e o corpo de prova (**dcp**)

Tanto para a posição plana, quanto para a posição 45° , variou-se a distância contato-peça numa faixa entre 15 e 25 mm. Para esta variável, a preocupação principal era a de se obter uma distância mínima onde as condições de estabilidade do arco fossem satisfatórias e reduzir a probabilidade de se ter captação de ar da atmosfera vizinha ao arco.

Para as duas posições observou-se, dentro da faixa analisada, uma mesma **dcp** ótima (transferência mais estável), com valor aproximado de 20 mm, conforme representado na figura 3a.

b) Ângulos de posicionamento da tocha (**deslocamento e trabalho**)

Durante todo o experimento manteve-se um ângulo de trabalho (vide figura 3b) igual a 0° para a posição plana, preocupando-se apenas em determinar qual seria o ângulo de deslocamento (vide figura 2) que apresentasse um arco mais estável para esta posição. Para a posição 45° , manteve-se constante o ângulo de deslocamento com valor de 0° , preocupando-se aqui em achar um valor para o ângulo de trabalho. Para o caso da posição 45° , a preocupação principal era a de obter um cordão de solda o mais simétrico possível, isto é, tentar minimizar ao máximo a influência da gravidade sobre a poça fundida por meio da variação do ângulo de trabalho numa faixa de valores compreendida entre 0° e 30° no plano de trabalho. Com relação a posição plana, foram testados uma faixa de valores variando de -10° a 10° no plano de deslocamento.

Os melhores resultados obtidos para as duas posições foram: ângulo de deslocamento igual a -5° para a posição plana e um ângulo de trabalho igual a 20° para a posição 45° . A figura 4, apresenta o posicionamento da tocha para as duas condições de soldagem.

c) Velocidade de soldagem (**V_s**)

Para esta variável, a preocupação era a de se ter um cordão de bom aspecto superficial como também isento de defeitos como porosidades superficiais e mordeduras. Havia ainda o cuidado quanto ao aporte de calor que o processo provocaria em função desta velocidade. A faixa de velocidade utilizada no levantamento estava compreendida entre valores de 10 a 30 cm/min, obtendo-se melhores resultados para valores na faixa de 20 a 25 cm/min, tanto para a posição plana quanto para a posição 45° do plano horizontal.

d) Distância entre cordões (**d**)

Esta era a variável que mais dependência tinha em relação as outra envolvidas no experimento e o que se almejava era a obtenção de uma camada depositada (composta de 18 cordões) o mais plana possível (menor ondulação provocada pelo reforço). Para a faixa de valores ensaiados (5 a 10 mm entre centros dos cordões) nas duas condições impostas, plana e 45° , observou-se em ambos os casos uma diferença no valor ótimo de **d**, na 1ª camada de amateigamento (7 mm) em relação as demais camadas depositadas (8 mm), em função principalmente dissipação de calor provocada pelo metal de base. Outra observação importante, esta relacionada ao fato de **d** não apresentar dependência com a técnica de tecimento, isto é, obteve-se uma boa planicidade independente da aplicação ou não de tecimento. A figura 4, traz uma representação de **d** para ambas as posições e a figura 6, traz um comparativo entre as características de macrografias obtidas com referência ao reforço, observa-se que mesmo fora de posição o cordão soldado com o robô apresenta um reforço com aspecto simétrico em consequência dos valores otimizados de **d** e dos ângulos de posicionamento da tocha (deslocamento e trabalho).

e) Pré-aquecimento, temperatura de interpasse e mistura gasosa

A utilização de uma temperatura de pré-aquecimento de 150°C , possibilitou uma



melhor estabilidade do arco no início do amateigamento, sendo que o controle nas etapas seguintes seria feito por intermédio do monitoramento da temperatura de interpasse no mesmo patamar de temperatura. Com relação as misturas gasosas, observou-se uma ligeira melhoria na estabilidade do arco, representada pela variação no nível de tensão, quando da soldagem com a mistura **99% Ar + 1% O₂**, em comparação a mistura **C8**, não só pelos oscilogramas apresentados como também pela quantidade de salpicos apresentados pelas diferentes misturas.

A figura 5, apresenta os oscilogramas de corrente e tensão, da soldagem com pulsação térmica empregando distintas misturas gasosas. Nestes oscilogramas observa-se uma diferença na largura das ondas de tensão imposta pelas diferentes misturas gasosas ensaiadas, isto é, para a soldagem com **Ar + O₂** (figura 5a) o processo de transferência apresentou-se mais estável com ondas de tensão mais estreitas e com menor tendência a presença de curto circuito (formação de salpicos), em comparação a onda de **C8** (figura 5b).

CONCLUSÕES

Os resultados experimentais obtidos neste trabalho mostram que:

- Como esperado, as características de planicidade e aspecto superficial, obtidas em laboratório, sob as mesmas condições, são superiores as deposições manuais;
- O processo de automação permite além da possibilidade de um controle mais seguro sobre o reparo, uma melhor avaliação das origens de possíveis defeitos, isto é, eliminar uma possível influência do soldador sobre o processo;
- Os valores das variáveis obtidos em laboratório, quando da aplicação *in-situ*, tiveram uma boa aceitação por parte dos soldadores e os resultados obtidos de planicidade e aspecto superficial, mesmo sob soldagem manual, foram superiores aos apresentados anteriormente;
- As condições de planicidade e aspecto superficial permitem supor que o tempo necessário de usinagem do depósito para reposição do perfil original da turbina será reduzido em relação ao processo manual;
- As condições levantadas em laboratório podem servir de base para qualificação da mão de obra empregada no reparo;
- As características apresentadas pelas diferentes misturas empregadas, sugere que, para este tipo de aplicação, um nível reduzido de gás ativo na mistura tende a melhorar a estabilidade do arco e, conseqüentemente, o processo de transferência metálica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à **Gerasul** o apoio prestado e fundamentalmente pela aplicação dos resultados em condições reais de trabalho. Ao Prof. Dr. Augusto Buschinelli do **LABSOLDA/UFSC** pelas orientações de cunho metalúrgico. Aos bolsistas Fábio Demarchi e Carlos A. Porfírio pelo apoio na realização dos experimentos. A todos os membros do **LABSOLDA** que de alguma maneira contribuíram na realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BOCCANERA, L.; BARRA, S. R.; BUSCHINELLI, A. J.: "Influência do Acabamento Superficial, Porosidade e Diluição Sobre a Resistência à Cavitação de Revestimentos Soldados", XXIV ENTS, Fortaleza, 1998.
- [2] MACHADO, I. G.: "Soldagem e Técnicas Conexas: Processo". Livro, Editado pelo autor, Porto Alegre, 1996.
- [3] AMERICAN WELDING SOCIETY. Welding Handbook, Welding Process, 8th ed., Vol. 2, Miami, 1991.



- [4] DUTRA, J. C; TEICHMANN, E. W.: "Assessoria Técnica na Recuperação por Soldagem das Partes Erodidas por Cavitação da Turbina N^o 2 de Salto Santiago". Relatório, UFSC/ELETROSUL, 1997.
- [5] BARRA, S. R.: "Influência dos Procedimentos de Soldagem Sobre a Resistência à Cavitação de Depósitos Obtidos com a Utilização de Arames Tubulares de Aços Inoxidáveis Ligados ao Cobalto". Dissertação de Mestrado, UFSC, 1998.
- [6] AMIN, M.: "Pulsed Current Parameters for Arc Stability and Controlled Metal Transfer in Arc Welding". Metal Construction, May, 1983.
- [7] DUTRA, J. C.: "O Processo MIG/MAG Pulsado com Pulsação térmica". XXI ENTS, Caxias do Sul, 1995.
- [8] FOLKHARD, E.: "Welding Metallurgy of Stainless Steels". Livro, Springer-Verlag Wien, New York, 1988.
- [9] KOU, S.: "Welding Metallurgy". Livro, John Wiley & Sons, Inc, 1987.

Características		Elemento químico e sua participação na deposição							
Diâmetro (ϕ)	Nomenclatura	C	N	Cr	Ni	Mn	Mo	Co	Si
1,2 mm	REV2	0,17	0,18	17,0	-	10,0	-	9,50	3,50
1,2 mm	AMAN2	0,04	-	22-24	12-14	0,5-2,5	0,50	-	0,90

Tabela 1: Características e composição química obtida na deposição dos consumíveis (% em peso) [5].

Fase de pulso térmico							
Arame	l_p	l_b	t_p	t_b	V_a (m/min)	V_s (cm/min)	T_1
AMAN2	300	60	3,6	3,2	7	25	0,5
REV2	300	30	0,0053	0,008	8	25	0,5

Fase de base térmica							
Arame	l_p	l_b	t_p	t_b	V_a	V_s	T_2
AMAN2	300	60	3,6	10	3,5	25	0,5
REV2	300	30	0,0053	0,018	3,5	25	0,5

Tabela 2: Resumo das variáveis de soldagem utilizadas no experimento [5, 4].

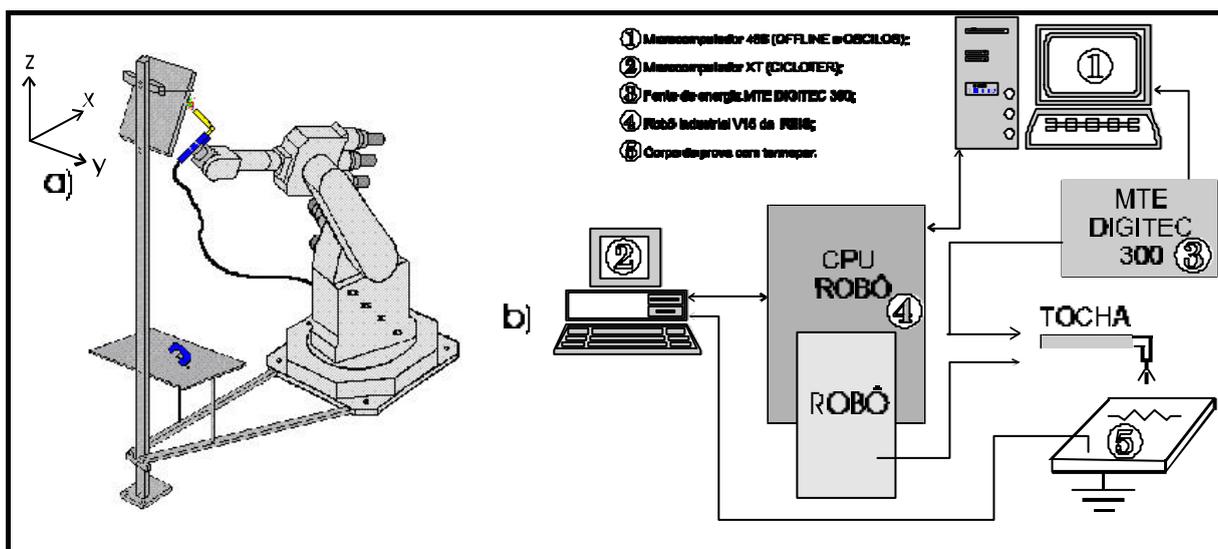


Figura 1: Aspectos construtivos e de acoplamento da mesa ao robô (a) e modo de interação entre os componentes e softwares que compõem a célula (b) [5].

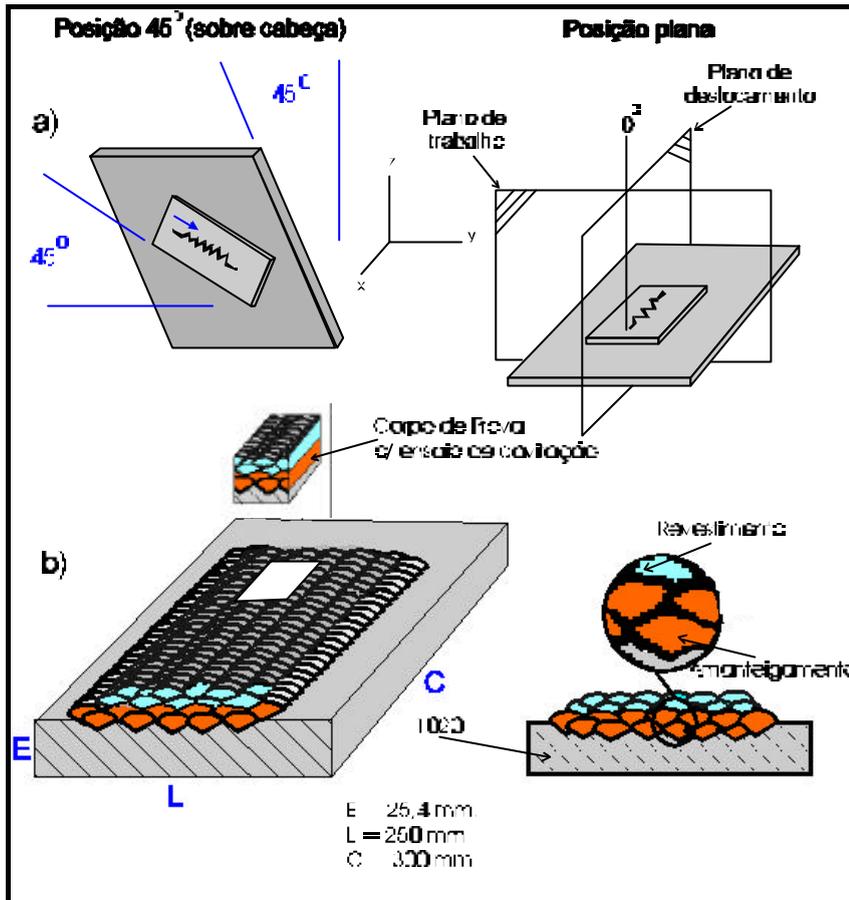


Figura 2: Posições de soldagem e planos de posicionamento empregados no experimento (a) e características construtiva e de deposição (b) [5].

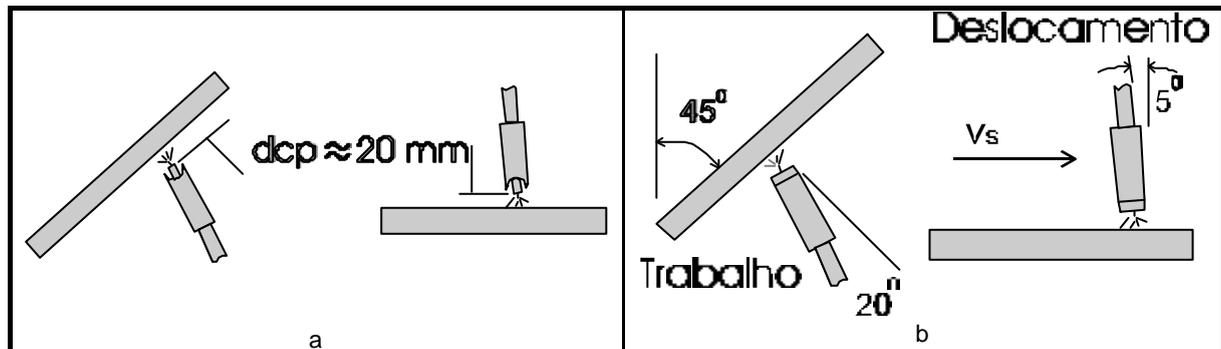


Figura 3: (a) Valor otimizado de dcp e (b) ângulos de posicionamento da tocha.

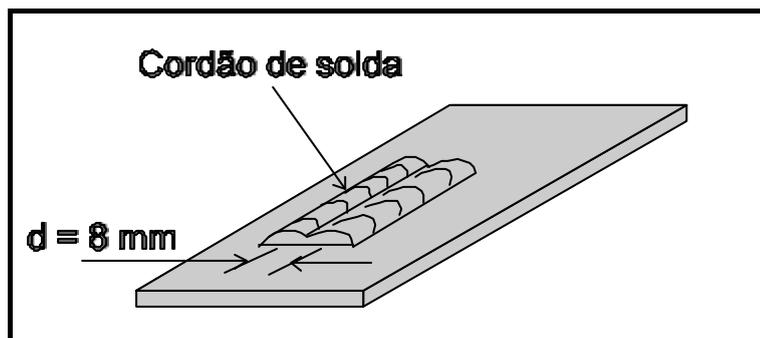


Figura 4: Representação de d para ambas as posições.

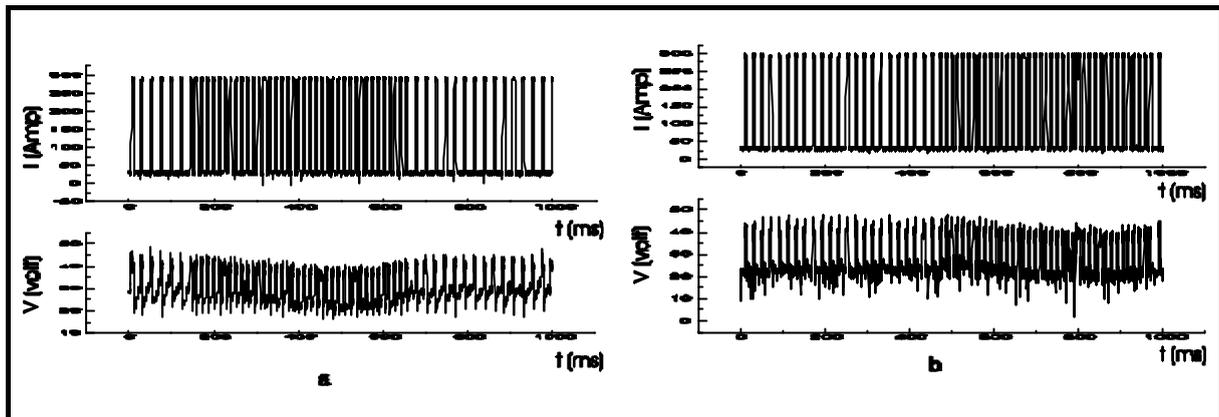


Figura 5: Oscilogramas de corrente e tensão mostrando a influência da mistura gasosa (estabilidade). Onde: (a) 99% Ar + 1% O₂ e (b) 92% Ar + 8% CO₂.

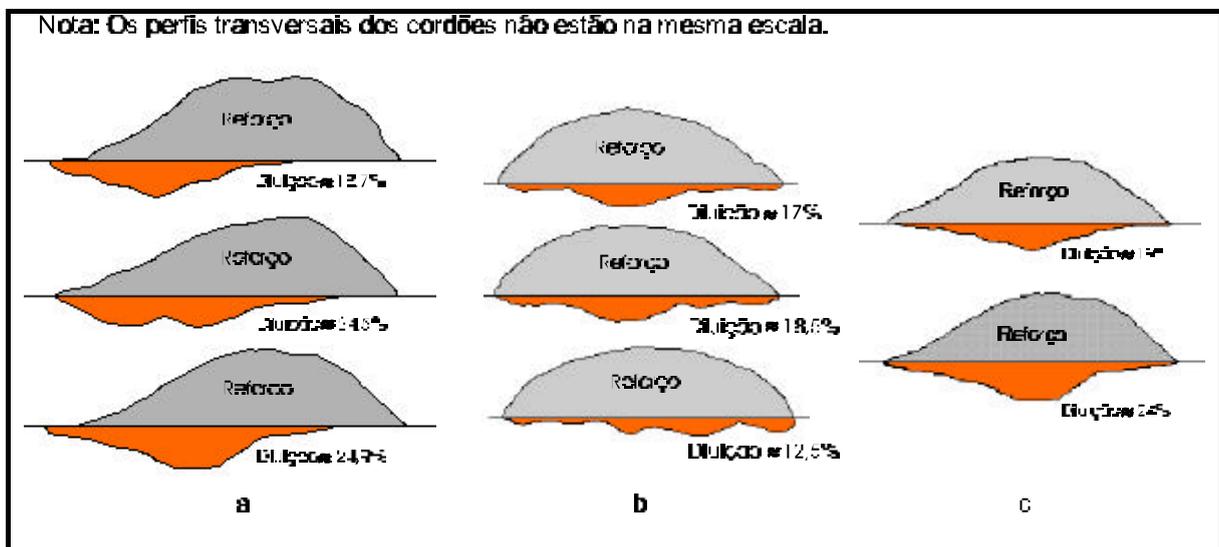


Figura 6: Características macrográficas mostrando a simetria obtida no reforço do cordão (a) para a soldagem fora de posição em comparação a soldagem na posição plana (b e c).