



O EFEITO DOS PARÂMETROS DE AJUSTE NA ESTABILIDADE E GEOMETRIA DE CORDÃO NA SOLDAGEM TIG COM ONDA RETANGULAR

*Américo Scotti⁽¹⁾
Jair Carlos Dutra⁽²⁾.
Hilton Alvarenga Sanches⁽³⁾.*

RESUMO

A utilização de fontes de soldagem com saída AC com onda retangular para soldagem de alumínio tem crescido rapidamente, apesar da falta de informação técnica (não comercial) disponível. O objetivo deste trabalho é contribuir sobre o conhecimento sobre o assunto, fornecendo uma ferramenta para usuários e projetistas. Um estudo da influência dos parâmetros de ajuste de soldagem sobre a geometria e estabilidade de arco é apresentado. Um planejamento experimental baseado na técnica de Projeto Robusto foi aplicado para viabilizar o número de experimentos. As tendências obtidas foram confirmadas por experimentos de validação e comparação com resultados de outros autores. Os resultados sugerem o efeito benéfico da duração do tempo no polo negativo e da velocidade de soldagem sobre a estabilidade de arco e geometria. A amplitude da corrente no polo negativo governa somente a formação do cordão. Os efeitos da duração no polo positivo são dependentes da frequência de inversão de pólos e a amplitude da corrente no polo positivo depende da duração neste polo. Uma explicação teórica para o fenômeno é ao final proposta.

ABSTRACT

The use of power supplies with rectangular wave AC output for GTA welding of aluminum has grown quickly, despite the lack of available technological (not commercial) data. The objective of this work is to give further insight into this matter, providing a tool for users and developers. A study of the influence of the wave parameters and travel speed on welding geometry and arc stability is presented. An experimental design based in the Robust Design technique was applied to make the number of experiments affordable. The obtained tendencies were confirmed by validation experiments and comparison with other authors' results. The results suggest the beneficial effect of the increasing electrode negative duration and increasing travel speed on both arc stability and bead geometry. The negative electrode amplitude current governs only bead formation. The effects of positive electrode duration and amplitude cannot be generically predicted since the duration is dependent on the reversal frequency and the amplitude depends on the positive electrode duration. A theoretical explanation of the phenomena is eventually proposed.

⁽¹⁾ - Engenheiro Mecânico, PhD em Soldagem, professor/pesquisador do LAPROSOLDA da Universidade Federal de Uberlândia, 38400-902, Uberlândia, MG, tel (034) 239 4192, fax (034) 239 4206, e-mail: ascotti@ufu.br

⁽²⁾ - Eng. Mecânico, Dr. Eng., professor/pesquisador do LABSOLDA da Universidade Federal de Santa Catarina,

⁽³⁾ - Engenheiro Mecânico, pesquisador do LAPROSOLDA da Universidade Federal de Uberlândia



1 - Introdução

As vantagens do uso de TIG com onda retangular sobre o método convencional para soldagem de alumínio são bastante conhecidas [1,2]. O primeiro propósito é a redução do tempo de transição entre polaridades. Este tempo é muito maior para ondas senoidais, o que requer a sobreposição de um sinal de alta frequência para manter o arco aberto. Infelizmente, a alta frequência é uma poderosa fonte de ruídos elétrico-magnético. Um segundo propósito é o crescimento da eficiência térmica do processo, pelo crescimento do tempo no polo negativo (t-) às custas do tempo no polo positivo (t+). Na verdade, o t+ é ajustado o suficiente para fazer a limpeza catódica da peça. Este método é dito ser capaz de aumentar a área fundida e reduzir o desgaste do eletrodo, aumentando a produtividade do processo. Rehfeldt et al. [3] acreditam que a energia imposta torna-se mais constante, fato importante para soldagem de chapas finas.

Entretanto, apesar de todo o conhecimento descrito na literatura, existem poucas informações sobre o ajuste otimizado dos parâmetros. Considerando que a limpeza catódica é uma condição essencial na soldagem TIG de alumínio, ainda não está totalmente entendido se a mobilidade dos pontos catódicos não termiônicos pode levar a uma instabilidade de arco. Não está claro também qual a influência da zona de limpeza catódica sobre a geometria do cordão. Por isto, o propósito deste trabalho é estudar a influência de algumas variáveis da onda retangular do TIG sobre o desempenho do processo em soldagem de alumínio.

2 - Fundamentos

Emissão termiônica acontece quando um cátodo refratário é aquecido a uma temperatura suficiente para emitir elétrons. Somente materiais com ponto de ebulição de no mínimo 4000K, como o W, podem trabalhar como cátodo termiônico [4]. Adições de alguns óxidos de baixa função trabalho, como os de Th, Zr e La, permitem que eletrodos de W possam operar abaixo de seu ponto de fusão. A emissão termiônica típica de TIG não acontece tão facilmente quando se solda ligas de alumínio, pois estas formam uma camada refratária superficial de óxido. Esta camada, cuja temperatura de fusão é muito maior do que a do metal, dificulta o fluxo de calor para a chapa, fazendo a soldagem mais difícil [1]. A soldagem de ligas de Al com TIG CC- não é possível, a não ser se os óxidos forem previamente removidos e/ou um gás com maior eficiência térmica, como o He ou mistura He (> 65%)-Ar, é usado [5].

Por outro lado, quando este tipo de material é soldado com eletrodo positivo (CC+), quando o Al passa a ser o emissor, um fenômeno de auto limpeza de óxido da peça toma lugar. O fenômeno de auto limpeza é explicado com base na emissão eletrônica, como a seguir:

Emissão de elétrons por materiais não-termiônicos (como o alumínio) só é possível através de um fenômeno denominado "emissão de campo" ou cátodo não-termiônico. No caso da chapa de alumínio agindo como cátodo, é sugerido que íons positivos condensem na superfície do óxido, criando um campo elétrico significativo. No caso de óxidos finos, se este campo é maior do que 10^9 V/m, os elétrons podem penetrar através do filme como em túneis, e criar um ponto de emissão. Para filmes espessos de óxidos, um fenômeno conhecido como "chaveamento" faz com que o filme torne-se condutor [6, p.157].

Desta forma, emissão de campo em ligas de alumínio é uma resultante de um alto gradiente de tensão criado entre o metal catódico e uma camada de óxido carregada positivamente. Esta camada é formada devido à incidência de íons positivos sobre a superfície de óxidos, óxidos estes que agem como fonte de elétrons, devido à usual menor função trabalho em relação ao metal [4]. Aparentemente este alto gradiente acontece porque os elétrons se concentram em alguns pontos. Estes pontos (pontos catódicos)



individuais de emissão são de aproximadamente 1 nm de diâmetro e movem sobre a superfície catódica [6]. O tempo de vida destes pontos para óxidos finos é reportado [4] ser tão curto como 1 ns.

A temperatura gerada nestes pontos é suficiente para fundir ou evaporar os óxidos, os quais, por tensão superficial ou vaporização, são removidos da superfície da poça (auto-limpeza). Existem outras teorias para explicar a limpeza de óxidos pelo arco [5]. Na primeira, os elétrons deixando a peça em alta velocidade rompem e quebram a camada de óxido. Em outra, os íons chocando-se com a peça têm energia suficiente para destruir a camada de óxido. Evidência desta última seria que a limpeza com Ar é mais pronunciada do que com He (de menor massa atômica).

Os pontos catódicos movem-se a procura de óxidos frescos, consumindo-os. Este movimento deixa um rastro sobre a superfície onde o óxido ou metal foram removidos [6, p. 115]. É assumido que quanto mais larga for os rastros, mais eficiente foi a ação de limpeza dos óxidos. Tem sido demonstrando [4] que a presença de uma camada muito grossa de óxido tende restringir a mobilidade dos pontos catódicos.

Desta forma, pode ser deduzido que a estabilidade de arco na superfície do alumínio em soldagem TIG CC+ é relacionada com a facilidade de emissão elétrica pelo cátodo. Se existe pouco óxido na superfície da chapa, não haverá emissão. O arco vagueará sobre a superfície procurando por óxidos (arco instável).

Lancaster [6, p. 115] cita que a largura do rastro é proporcional à corrente e inversamente proporcional à velocidade, desde de que a espessura do óxido seja em torno de 25 nm. Isto não acontece para cátodos polidos. Tanto a largura do cordão, quanto a largura do rastro são maiores para t+ mais longos [7]. Barhorst [8] acha que a corrente no polo positivo é que influencia mais a largura do rastro. Rehfeldt et al. [3] demonstram que a frequência de inversão de polaridade influencia em muito este comportamento.

Durante a inversão de corrente em CA, pode haver um atraso, dificultando a reignição na polaridade inversa. Para garantir a inversão de corrente com o mínimo de atraso, é aconselhável manter a indutância do cabo baixa, como por exemplo limitando o comprimento do mesmo. Entretanto, o estado ideal de reversão sem atrasos não pode ser alcançado na prática devido as indutâncias residuais nos cabos (atraso na ignição dura de 5 a 160 ms) [3]. Com a tecnologia moderna, é possível assistir a reignição do arco pela sobreposição de um transiente de alta tensão na passagem da corrente pelo zero [7]. Esta voltagem deve exceder consideravelmente a tensão em vazio da fonte.

Com relação à geometria do cordão, um trabalho anterior [9] mostrou que o nível de corrente em ambas polaridades são mais significantes do que as respectivas durações. Foi também mostrado que melhor estabilidade de arco é alcançado se t+ for muito curto e t- longo. Altas velocidades de soldagem tendem também a uma maior estabilidade.

3 - Procedimento Experimental

Tomando como base o trabalho anterior [9], um planejamento experimental foi proposto para investigar a influência da duração da polaridade negativa (t-), das amplitudes da corrente (I+ e I-) e da velocidade de soldagem (Vsold) sobre a estabilidade de arco e fusão do metal de base. Diferentemente do trabalho anterior, as soldagens foram realizadas como simples deposição sobre chapa e sem alimentação de arame. Este procedimento teve o objetivo de isolar a influência da geometria da junta e da composição do arame sobre o desempenho do arco.

Algumas condições foram mantidas constantes em todos os testes:

Os cordões foram depositados longitudinalmente em chapas de alumínio (ASTM 1060) com dimensões aproximadas de 150 x 70 x 6 mm. Dois cordões sem tecimento foram depositados em cada chapa, situados 10 mm do centro do corpo de prova. Acetona foi usada para pré-limpeza, não usando-se nenhum outro método adicional. A tocha foi



posicionada perpendicularmente à superfície de teste, e movimentada automaticamente. Usou-se eletrodos AWS WTh2%, com 3,25 mm de diâmetro, 30 mm de extensão além do bico de contato e uma ponta de 60° (afiada em afiadores próprios antes de cada teste). Argônio comercialmente puro foi usado a uma taxa de 18 l/min.

Os sinais de tensão e corrente foram monitorados a uma taxa de 12 kHz por canal, a 8 bits, por 9 s (resolução de 0,02 V e 0,22 A, respectivamente). A tensão do arco foi medida entre a peça e o bico de contato. Um sensor de efeito "hall" permitiu a obtenção do formato das ondas de corrente com precisão. Um programa de visualização dos oscilogramas, com uma resolução de aproximadamente 21 ms (inverso da frequência de aquisição + a resolução do monitor, a qual, por sua vez é o tempo total de aquisição dividido por 600 pixels), foi usado para medir os valores médios de amplitude e período de corrente e tensão (de 3 amostras de ciclos).

Para avaliar o efeito das variáveis sobre o desempenho do processo, duas classes de parâmetros foi escolhida. A primeira classe é relacionada com os aspectos geométricos dos cordões, isto é largura (L), penetração (P) e área fundida (AF). A largura foi medida com paquímetro, em 10 medições ao longo de cada cordão. P e AF foram tiradas de 2 seções transversais de cada corpo de prova, usando um sistema digital de imagem.

A segunda classe é relacionada à aspectos de estabilidade. Como estabilidade de arco não é uma grandeza facilmente quantificada, 2 critérios foram propostos. O primeiro foi a largura do rastro de limpeza catódica (LR); quanto mais largo o rastro, maior a mobilidade dos pontos catódicos (menos estabilidade). Como a LR pode ser influenciada pela largura da poça, o parâmetro realmente utilizado reduzia do valor de LR o valor de L, ou seja, usou-se o valor líquido (LRliq). Uma segunda tentativa de critério, um pouco mais subjetivo, foi dar um grau a cada soldagem baseado no sentimento do operador e observações visuais. O GRAU 2 significa um arco sem extinção ou movimento aleatório. O GRAU 0 foi dado a um arco com significativa observações de extinção ou movimento aleatório, ficando o GRAU 1 para situações intermediárias.

Para o planejamento experimental, 3 variáveis de soldagem (fatores) foram inicialmente escolhidas para este estudo, isto é, amplitude de corrente ($I = I+ = I-$) a 3 níveis, velocidade de soldagem (V_{sold}) a 3 níveis e duração no polo negativo ($t-$) a 4 níveis. Tomando como base o número de fatores e níveis (grau de liberdade = 8), selecionou-se a matriz L'16 da técnica de Projeto Robusto [10, cap. 7). Nesta matriz de experimentos, as colunas são mutuamente ortogonais, ou seja, para cada par de coluna, todas combinações de níveis de fatores ocorrem e ocorrem em igual número de vezes. Isto é chamado propriedade de balanço. Entretanto, a matriz L'16 é uma matriz padrão para 5 fatores a 4 níveis.. Para adequar o número de fatores e níveis desejados nesta matriz, 3 mudanças foram subjetivamente implementadas, a saber:

- 1) O número de variáveis foi crescido (I foi separado em $I+$ e $I-$). Este método foi implemente no lugar de deixar uma coluna vazia para aumentar a eficiência experimental (ganho de informações sobre um fator adicional, sem gastar recursos);
- 2) O número de níveis de V_{sold} foi crescido para 4;
- 3) A técnica de nível manequir [10, p. 154) foi aplicada sobre as variáveis $I+$ e $I-$, de tal modo a se manter os número de níveis em 3 (um número maior de níveis poderia confundir estatisticamente os valores, uma vez que a faixa de corrente para um dado eletrodo é curta).

A Tabela 1 apresenta o planejamento experimental resultante, onde as letras maiúsculas de A a D são os fatores $I-$, $I+$, V_{sold} e $t-$, respectivamente, e os sub-índices numéricos de 1 a 4 os níveis. A4 = A2 (A2') e B4 = B2 (B2') foram tomados como níveis manequir. Os seguintes valores nominais para os níveis (valores a serem ajustados no equipamento de soldagem) foram escolhidos:



A = I- (corrente durante o polo negativo): A1 = 150 A, A2 = 180 A e A3 = 210 A;
B = I+ (corrente durante o polo positivo): B1 = 150 A, B2 = 180 A e B3 = 210 A;
C = Vsold (velocidade de soldagem): C1 = 10 cm/min, C2 = 18 cm/min, C3 = 26 cm/min e C4 = 34 cm/min;
D = t- (duração do período negativo): D1 = 5 ms, D2 = 10 ms, D3 = 15 ms e D4 = 20 ms.

Os experimentos foram todos realizados em ordem aleatória com $t^+ = 2$ ms e comprimento de arco = 2 mm. A Tabela 2 mostra os parâmetros reais usados (valores médios obtidos pelo sistema de monitoração), exceto para Vsold, o qual é o valor de ajuste (nominal). Como pode ser visto, os desvios padrão dos valores monitorados é pequeno, mostrando a constância da saída da fonte de soldagem. Entretanto, pode-se perceber uma grande diferença entre os valores de ajuste e os valores reais. Como o erro foi sistemático, a causa foi atribuída a uma falta de calibração da fonte. É importante lembrar que, devido a ordem aleatória dos experimentos, cada experimento teve o ajuste de seus parâmetros separadamente, ou seja, o ajuste no potenciômetro da fonte foi alterado a cada experimento.

É importante mencionar que nos experimentos 1, 10, 11, 15 e 16 foram encontradas dificuldades para acender e manter o arco no início do cordão. Após a estabilização do calor na chapa, o arco corria mais estável. Pode-se notar que estes experimentos são caracterizados por um baixo t^- e/ou Vsold.

Para validar os resultados do planejamento experimental, outros experimentos foram planejados e realizados, como mostra a Tabela 3. Os primeiros dois foram replicagem dos experimentos 6 (exp 6B) e 12 (exp 12B). O outro foi uma modificação do exp 10, invertendo-se os valores de I+ e I- (exp 20). Como o exp 10 mostrou problemas ao iniciar o arco, exp 20 foi iniciado em um apêndice do corpo de prova (o arco já estava mais estável ao entrar no corpo de prova).

Para estudar o efeito do valor da corrente, o exp 20 foi duplicado (exp 20B) ajustando I- a um menor valor. O exp 3 foi também duplicado, mas após 1/3 da solda, I+ foi decrescido para 150 A. Após 2/3 da solda, I+ foi decrescido ainda mais para 120 A.

Para verificar o efeito isolado de t^- , exp 20B foi replicado (exp 20C) usando t^- mais longo. Uma série de experimentos com longos t^- (exp 14B, exp 14C e exp 14D) foi produzido, tomando o exp 14 como base (40 ms é o limite fornecido pela fonte). Foi verificado o aparecimento de uma linha preta na linha de centro do cordão do exp 14C ($t^- = 30$ ms), com aparência de oxidação. A um t^- mais longo (exp 14D), esta linha tornou-se mais pronunciada.

Os efeitos de Vsold e da duração de t^+ foram verificados usando o exp 16 ou com uma maior Vsold (exp 16B) ou com um t^+ mais longo (exp 16C).

4 - Resultados e Análises

A Tabela 4 apresenta as respostas do procedimento experimental e soldas suplementares. A significância de cada fator sobre a resposta foi encontrada usando o método de Taguchi [10, p. 51-59]. Um resumo da análise de variância (ANOVA) dos experimentos 1 a 16 é mostrado na Tabela 5, na qual os fatores com um "número-F" alto e significância de F de pelo menos 5% são considerados os fatores que controlam a resposta. Para visualizar como cada fator influencia a resposta (diretamente ou inversamente proporcional) a técnica de gráfico das médias foi empregada.

A Tabela 5 mostra que LRliq e GRAU parecem ser afetados pelos mesmos fatores, e na mesma forma. Isto significa que eles são correlacionados entre si e qualquer um deles pode ser usado como critério de estabilidade. Considerando que GRAU é mais subjetivo, LRliq foi escolhido como o critério principal. Desta forma, a estabilidade e arco parece ser altamente influenciada por t^- e Vsold, e os valores de I+ e I- pouco afetam esta



propriedade.

Em relação aos aspectos geométricos do cordão, pode-se verificar que a largura do cordão (L) cresce com o decréscimo da V_{sold} e com o crescimentos de I_- e t_- . A penetração (P) não é significativamente influenciada pela V_{sold} , mas ela é também influenciada pela I_- e t_- em proporção direta. O efeito de t_- é enfraquecido na formação da área fundida (AF). I_+ parece não influenciar a geometria da soldagem para a dada condição de curta duração de t_+ .

O método de Projeto Robusto usado neste trabalho para o planejamento e análise dos experimentos assume que todos os fatores principais são independentes e que não há nenhuma interação significativas entre eles. Para verificar esta premissa, gráficos de interação entre cada par de fatores foram traçados [10, p. 63]. A maioria das interações foi do tipo sinérgica (não prejudiciais), mas algumas foram do tipo antisinérgica. Entretanto, a avaliação de interações por gráficos pode se tornar enganosa, uma vez que esta técnica não mostra claramente a amplitude da influência das possíveis interações. A única forma de verificar o quanto as interações afetam a aditividade dos fatores é através da validação, isto é, prever o resultado de uma dada resposta, assumindo que os fatores principais são aditivos, e comparar com resultados experimentais de testes suplementares. A Tabela 6 apresenta esta comparação.

Como pode ser visto na Tabela 6, existe uma boa concordância entre os valores estimados e reais, exceto para as respostas geométricas dos exp 20B e 20C. Nestes experimentos não houve fusão da placa, fato que ocorreu parcialmente somente uma vez nos experimentos usados para modelagem (exp 15), enfraquecendo a qualidade do estimador. Desta forma, pode-se dizer que os fatores principais (I_+ , I_- , V_{sold} e t_-) apresentam a aditividade desejada e a metodologia pode ser usada para estimar a influência de cada fator nas respostas.

Assim, usando-se novamente a Tabela 5, os resultados mostram que o crescimento de t_- é seguido pela melhoria da estabilidade do arco (menor LR_{liq}), aumento da L e P . O crescimento da V_{sold} também mostra favorecer a estabilidade do arco e reduzir a L . Nenhum efeito significativo é esperado sobre a P . Em relação à I_- , seu efeito se pronuncia na geometria do cordão; um aumento de I_- faz um cordão mais largo e profundo. O mesmo efeito não foi evidente para I_+ . Tanto I_- como I_+ parecem não afetar a estabilidade.

5 - Discussão

As previsões dos efeitos de cada fator sobre as respostas confirmam as tendências apontadas no trabalho anterior [9], mesmo considerando as condições diferentes, tais como o não uso de junta e arame de alimentação. Comparando as respostas apresentadas na Tabela 4 para os experimentos exp 20 e exp 20B, o decréscimo de I_- levou a uma significativa redução em P , L e AF , mas a um pequeno acréscimo em LR_{liq} (sem alteração em $GRAU$). Esta tendência também concorda com a análise de predição.

Observando as respostas da série exp 3B ($3B'$, $3B''$ e $3B'''$), pode-se verificar um pequeno acréscimo em L , P e A , e um pequeno decréscimo na LR_{liq} , a medida que I_+ é diminuído. Barhorst [8] também verificou um crescimento da LR_{liq} com o crescimento de I_+ (embora com influência maior do que esperado no presente trabalho). Barhorst trabalhou com tempos mais longos na polaridade positiva ($t_+ = t_- = 8$ ms), período longo suficiente para descobrir o efeito de I_+ . Reis [9], por outro lado, observou uma redução na geometria do cordão à medida que I_+ tornava-se menor. Além do fato desta variação ser muito pequena (dentro de 0,1 mm), a razão para esta discórdia pode estar relacionada com a estabilização térmica ao longo da chapa (condições mudando progressivamente de $3B'$ para $3B'''$). Como a predição mostrada na Tabela 5 é de que o efeito de I_+ é insignificante, um outro estudo sobre este assunto deve ser realizado.

O efeito da duração do eletrodo em polaridade negativa foi mais exaustivamente



estudado no presente trabalho, através dos experimentos 20B, 20C, 14B, 14C e 14D. Comparando os experimentos 20B e 20C, um pequeno crescimento em t_- (de 4.7 para 8.7 ms) não alterou a penetração, apesar de ter melhorado a estabilidade de arco (menor LRliq). Esta observação está de acordo com o encontrado no trabalho anterior [9], onde o efeito de t_- só se pronunciou para valores mais longos de t_- . Na série 14B a 14D, incluindo o exp 14, o efeito torna-se evidente, ou seja, crescendo P e decrescendo LRliq a medida que t_- torna-se mais longo. L parece não se alterar. É importante notar que esta variação é assintótica, isto é, o incremento é progressivamente diminuído para valores de t_- mais longos. Um valor muito longo de t_- leva à produção de óxidos na superfície do cordão e um balanço entre P e oxidação deve ser procurado.

O efeito predito na Tabela 5 para a Vsold foi verificado através do exp 16B, o qual teve a Vsold dobrada em relação ao exp 16. Como visto na Tabela 4, tanto a L, como a LRliq, tiveram seus valores significativamente reduzidos. Entretanto, P não se alterou. Estes resultados foram os que foram exatamente previstos pela Tabela 5. Vsold já havia mostrado [9] não ser significativa sobre a P, mas bastante influente sobre a L. Este efeito fraco da Vsold sobre a P pode ser explicado pela alta condutividade térmica do alumínio.

Em relação à duração do eletrodo no polo positivo (t_+), exp 16C foi realizado com um t_+ mais longo do que o do exp 16. A Tabela 4 mostra um aumento inesperado na L e P. LRliq mostrou não se alterar. Este efeito não havia se manifestado no trabalho anterior [9], no qual a composição da chapa foi diferente e o efeito de t_+ foi insignificante. Um crescimento da LR foi observado [7] para t_+ crescente, somente para baixos valores de corrente. Desta forma, um aprofundamento do estudo do efeito da composição da chapa e do nível de corrente sobre a ação do t_+ parece necessário.

A influência da amplitude de corrente (I_+ ou I_-), Vsold e t_- sobre a geometria do cordão pode ser explicada pelo calor imposto à chapa. É bastante conhecido que em TIG a eficiência térmica é muito maior em polaridade negativa. A ação benéfica de maiores t_- e Vsold sobre a estabilidade de arco merece uma análise mais cuidadosa. Uma hipótese seria de que para t_- longos, haveria proporcionalmente menos tempo na ação de limpeza de óxido (t_+) e mais tempo para formação de óxido responsável pela emissão catódica (desde que t_- não se torne tão longo ao ponto de formar uma barreira de óxidos). Uma Vsold mais lenta irá na prática crescer o tempo em que uma porção da poça fundida que fica sob a ação da limpeza catódica (ainda menores t_+ seriam recomendados para soldas com baixa velocidade).

O processo parece funcionar de tal forma que quando o eletrodo é negativo, a emissão de elétrons é governada pelo mecanismo de emissão termiônica. A tensão requerida não é alta e a transferência térmica é eficiente. Na mudança para a polaridade positiva, a emissão de elétrons passa a ser controlada pelo mecanismo de emissão de campo, o qual requer uma quantidade de óxido sobre a placa e uma voltagem maior. Este processo de emissão é auto-degenerativo, ou seja, consome a própria fonte de existência. Um t_+ muito longo pode provocar limpeza excessiva no cátodo e a emissão de campo pode se interromper. A transição do polo positivo para o polo negativo é menos dramática, pois o eletrodo já se apresenta quente, facilitando a emissão. Ao contrário, a transição inversa requer a presença de alguma quantidade de óxido e normalmente a ajuda de um transiente de alta voltagem para a reabertura do arco.

6 - Conclusão

Para a soldagem do alumínio por TIG, nas condições deste trabalho, conclui-se que:

- A seleção dos parâmetros de soldagem deve satisfazer os requerimentos de estabilidade de arco e formação do cordão;
- A corrente no polo negativo tem forte influência sobre a geometria, mas pouca



influência sobre a estabilidade. Este parâmetro pode ser ajustado livremente para controlar a geometria e produção;

- efeito da corrente no polo positivo sobre a estabilidade e geometria merece mais estudo, uma vez que este parece depender da duração nesta polaridade. Para pequenas durações (< 2 ms), seu efeito parece ser irrelevante sobre a geometria, passando a ser influente para tempos mais longos. Desta forma, I_+ deve ser baixo para t_+ , 2 ms, evitando desgaste do eletrodo;
- efeito da duração do eletrodo no polo negativo depende da frequência de reversão de polaridade. Para baixas frequência (até 100 Hz), o crescimento de t_- leva ao aumento da penetração e da estabilidade. Para altas frequências, t_- parece não afetar a geometria do cordão;
- efeito duração do eletrodo no polo positivo parece ser relacionado com as condições da placa e amplitude de corrente. Um valor baixo de t_+ (aprox. 2 ms) parece ser adequado do ponto de vista da estabilidade do arco, mas um t_+ mais longo pode melhorar a geometria do cordão para alguns tipos de alumínio;
- A velocidade de soldagem parece influenciar mais a largura do cordão e estabilidade de arco do que a penetração.

7 - Referência Bibliográfica

- 1 - AWS, Welding Handbook - V II: Welding Process, Chap. 3, AWS, 8^a ed., 1991, pp. 74-107;
- 2 - NORRISH, J., Advanced Welding Processes, Chap. 6, IOP Pub. Ltd, 1990.
- 3 - REHFELDT, D. et all., Studies into the Use of Higher Frequencies for TIG Welding with Low Alternating Currents, Welding & Cutting, 5, 1996, pp. E90-E93, 1996
- 4 - JÖNSSON, P.G., MURPHY, A.B. & SZEKELY, J., The Influence of Oxygen Additions on Argon-Shielded GMAW Processes, Weld. J., AWS, Feb 1995, pp. 48s-58s
- 5 - ANIK, S. & DORN, L., Metal-Physical Process Involved in Welding – Welding of Aluminium Materials, Welding Research Abroad, vol XXXVIII (3), Mar 1992, pp. 36-41;
- 6 - LANCASTER, J.P., The Physics of Welding, Chap. 5-6, 1st Ed., Pergamon Press, 1986
- 7 - NORRISH, J. & OOI, C.L., Adaptive Asymmetric Waveform Control in Bipolar Gas Tungsten Arc Welding of Aluminium, Weld. & Metal Fabrication, Jun 1993, pp. 230-232.
- 8 - BARHORST, S., The Cathodic Etching Technique for Automated Aluminum Tube Welding, Weld. J., AWS, May 1985, pp. 28-31
- 9 - REIS, R.A., Determinação de Parâmetros de Soldagem TIG com Arame Frio e Onda Retangular, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, 1996.
- 10 - PHADKE, M.S., Quality Engineering using Robust Design, Prentice Hall, USA, 1989, 334 p.



Tabela 1 - Matriz ortogonal L'16 para o planejamento experimental

EXP	FATORES			
	A	B	C	D
1	A1	B1	C1	D1
2	A1	B2	C2	D2
3	A1	B3	C3	D3
4	A1	B2'	C4	D4
5	A2	B1	C2	D4
6	A2	B2	C1	D3
7	A2	B3	C4	D2
8	A2	B2'	C3	D1
9	A3	B1	C3	D2
10	A3	B2	C4	D1
11	A3	B3	C1	D4
12	A3	B2'	C2	D3
13	A'2	B1	C4	D3
14	A'2	B2	C3	D4
15	A2'	B3	C2	D1
16	A2'	B2'	C1	D2

Tabela 2 - Parâmetros reais usados no planejamento experimental

Exp	I - (A)	I+ (A)	t- (ms)	t+ (ms)	Vsold (cm/min)	V - (V)	V+ (V)
1	153 ± 3	158 ± 0	4.90 ± 0.02	1.82 ± 0.11	10	7.3	21.8
2	181 ± 1	158 ± 0	9.80 ± 0.05	1.79 ± 0.05	18	8.2	19.8
3	213 ± 0	158 ± 0	15.37 ± 0.77	1.64 ± 0.14	26	8.8	19.8
4	183 ± 0	158 ± 0	19.91 ± 0.02	1.71 ± 0.10	34	9.3	18.0
5	150 ± 0	189 ± 0	19.90 ± 0.02	1.68 ± 0.11	18	9.6	17.1
6	182 ± 0	188 ± 0	14.87 ± 0.04	1.76 ± 0.03	10	9.5	19.5
7	212 ± 2	189 ± 0	9.78 ± 0.04	1.64 ± 0.16	34	8.5	19.2
8	185 ± 1	188 ± 0	4.83 ± 0.01	1.70 ± 0.08	26	7.8	19.2
9	152 ± 0	219 ± 0	9.78 ± 0.04	1.73 ± 0.08	26	10.6	17.8
10	183 ± 5	219 ± 0	4.78 ± 0.04	1.81 ± 0.08	34	7.7	20.6
11	215 ± 5	219 ± 0	20.01 ± 0.00	1.67 ± 0.02	10	9.8	19.6
12	182 ± 0	219 ± 0	14.76 ± 0.00	1.79 ± 0.04	18	10.8	18.4
13	152 ± 0	188 ± 0	14.95 ± 0.04	1.83 ± 0.00	34	9.9	18.4
14	181 ± 1	188 ± 0	19.79 ± 0.06	1.77 ± 0.09	26	9.5	17.8
15	212 ± 2	188 ± 0	4.67 ± 0.01	1.69 ± 0.07	18	7.4	22.4
16 (*)	182 ± 1	188 ± 0	9.79 ± 0.01	1.74 ± 0.06	10		

(*)- Aquisição de dados perdida. Valores estimados de soldas com mesma regulagem

Tabela3 - Parâmetros reais usados no planejamento experimental para validação

EXP	I - (A)	I+ (A)	t- (ms)	t+ (ms)	Vsold (cm/min)	V - (A)	V+ (A)
6B (*)	182 ± 1	188 ± 0	15.00 ± 0.20	1.74 ± 0.06	10		
12B	188 ± 0	211 ± 7	14.79 ± 0.06	1.49 ± 0.07	18	9.2	18.6
20	219 ± 0	181 ± 0	4.86 ± 0.04	1.78 ± 0.04	34	7.6	19.8
20B	158 ± 0	182 ± 1	4.70 ± 0.07	1.69 ± 0.15	34	7.4	20.6
20C	158 ± 0	182 ± 1	8.70 ± 0.04	1.70 ± 0.11	34	8.7	19.0
14B	190 ± 0	183 ± 0	24.59 ± 0.00	1.82 ± 0.11	26	10.0	17.1
14C	188 ± 0	181 ± 0	29.70 ± 0.00	1.85 ± 0.01	26	9.8	17.0
14D	189 ± 0	181 ± 2	39.28 ± 0.06	1.83 ± 0.00	26	10.8	17.6
16B(*)	182 ± 1	188 ± 0	9.79 ± 0.01	1.74 ± 0.06	20		
16C	190 ± 0	182 ± 1	9.66 ± 0.00	3.64 ± 0.04	10	7.8	22.4

(*)- Aquisição de dados perdida. Valores estimados de soldas com mesma regulagem



Tabela 4 - Respostas paramétrica dos experimentos

EXP	L (mm)	P (mm)	AF (mm ²)	LRliq (mm)	GRAU
1	5.0	0.5	1.2	15.4	0
2	3.4	0.4	0.5	10.2	1
3	3.1	0.4	0.9	6.4	2
4	4.1	0.6	1.2	1.1	2
5	5.3	1.3	4.1	3.7	2
6	7.7	1.4	6.0	8.9	1
7	4.0	0.7	1.6	5.8	2
8	3.2	0.4	0.6	7.3	0
9	5.3	1.2	3.8	4.0	1
10	3.2	0.4	0.9	9.3	0
11	11.2	3.1	24.3	5.3	0
12	7.3	1.9	8.1	3.5	1
13	4.4	1.0	2.8	1.1	2
14	4.8	1.0	2.9	4.0	2
15	4.5	0.0	0.0	12.5	0
16	6.3	0.7	2.0	11.1	0
3B'	3.89	0.43	0.64	4.52	
3B''	3.85	0.49	0.90	4.28	
3B'''	4.06	0.55	1.11	3.81	
6B	7.6	1.4	6.3	7.4	0
12B	5.0	1.0	2.8	6.0	2
14B	4.8	1.2	4.3	2.2	2
14C	4.7	1.3	4.7	2.2	2
14D	4.9	1.4	5.4	1.4	2
16B	4.6	0.8	2.1	5.5	1
16C	7.7	1.0	4.0	10.9	0
20	3.9	0.5	1.2	7.8	1
20B	0.0	0.0	0.0	10.4	1
20C	0.0	0.0	0.0	8.3	2

Tabela 5 - Sumário da Análise de Variância (ANOVA) dos experimentos 1 to 16.

RES POS TAS	FATORES											
	I+ (A)			I- (A)			t- (ms)			Vsold (cm/min)		
	F	Sig.	Tend	F	Sig.	Tend	F	Sig.	Tend	F	Sig.	Tend
L	1.2	ind	ind	13.1	5%	D	6.7	5%	D	17.6	1%	I
P	0.4	ind	ind	9.0	5%	D	6.3	5%	D	2.7	Ind	I
AF	1.8	ind	D	6.5	5%	D	3.4	ind	D	3.1	Ind	I
Lrlq	0.6	ind	D	2.1	ind	I	12.3	5%	I	7.2	5%	I
GRAU	1.0	ind	ind	5.0	ind	I	13.0	1%	D	8.0	5%	D

Onde: F = número F (quanto maior F, maior a influência do fator);

Sig. = a significância do número F em % (1% significa alta; 5% boa);

Tend = tendência da correlação (D = diretamente proporcional; I = inversamente proporcional);

ind = tendência não definida ou tendência estatisticamente não significante.

Células sombreadas = fatores significantes (quanto mais escura, mais significante)

Tabela 6 - valores reais das respostas vs. valores estimados para experimentos suplementares

EXP	L (mm)		P (mm)		AF (mm ²)		LRliq (mm)		GRAU	
	atual	estim.	Atual	estim.	Atual	estim.	Atual	estim.	atual	Estim.
6B	7.6	7.7	1.4	1.5	6.3	6.7	7.4	8.3	0	1
12B	5.0	6.0	1.0	1.1	2.8	5.4	6.0	6.2	2	2
20	3.9	4.1	0.5	0.7	1.2	2.9	7.8	7.4	1	1
20B	0.0	1.3	0.0	-0.5	0.0	-5.4	10.4	10.1	1	1
20C	0.0	2.1	0.0	-0.1	0.0	-4.1	8.3	6.8	2	2

onde: Atual = valor medido nos corpos de prova; Estim = valor estimado a 95% de confiabilidade..