

Fundamentos Científicos e Tecnológicos para o Desenvolvimento do Processo MIG/MAG por Curto-Circuito Controlado (CCC) – Uma Revisão da Literatura. Parte 3 de 3: Princípios dos Sistemas MIG/MAG em Curto-Circuito com Controle de Corrente

(Scientific and Technological Fundamentals for the Development of the Controlled Short Circuiting MIG/MAG Welding Process (CCC) – A Literature Review. Part 3 of 3: Principles of the Controlled Current Short-Circuiting MIG/MAG Systems)

Régis Henrique Gonçalves e Silva¹, Jair Carlos Dutra¹, Raul Gohr Jr.¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Soldagem, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, regis@labsolda.ufsc.br

Resumo

A terceira parte da série contempla, primeiramente, o funcionamento básico do processo MIG/MAG convencional, com comando de tensão e em transferência metálica por curto-circuito, inclusive comportamento estático da fonte de energia. São abordados os mecanismos relativos à dinâmica da transferência da gota metálica à poça de fusão, quando em soldagem por curto-circuito. É apresentado um conjunto de conceitos de estabilidade da soldagem MIG/MAG, para o qual não existe uma unanimidade na comunidade de estudiosos da soldagem. Uma proposta dos autores é colocada. Finalmente, se apresenta o funcionamento de sistemas como o CCC e a experiência científica e tecnológica do LABSOLDA neste processo, desde um controle analógico até o mais moderno, por software e o seu futuro, fazendo parte do Sistema Avançado de Controle (SAC).

Palavras-chave: Soldagem MIG/MAG; CCC; Curto-circuito Controlado; Transferência Metálica Controlada.

Abstract: The third part of the series handles, firstly, the basic functioning of the conventional voltage controlled short-circuiting MIG/MAG welding process and the relating power source static behaviour. Short-circuiting metal transfer dynamics related mechanisms are dealt with. A set of MIG/MAG stability concepts is presented, whereas no total agreement is found in the welding community. An authors' purpose on this matter is suggested. Finally, the functioning of systems like the CCC is explained, along with LABSOLDA's scientific and technological experience in this process, since the first analogic control until the most modern software controlled version. Also, CCC future is described, being part of the Advanced Control System (SAC).

Key-words: MIG/MAG Welding; CCC; Controlled Short-circuiting; Controlled Metal Transfer.

1. O Processo MIG/MAG Convencional

A transferência metálica por curto-circuito, no processo de soldagem MIG/MAG, é caracterizada, como a própria designação sugere, pelo contato entre a gota metálica líquida, ainda ligada ao arame-eletrodo, e a poça de fusão. Sob ação das forças anteriormente descritas, esta gota, inicialmente (e idealmente) esférica, começa a se constringir, assumindo a forma cilíndrica, formando a chamada ponte metálica, qualificada como estável quando chega ao mesmo diâmetro do arame-eletrodo em todo o seu comprimento. A constrição continua e assume uma velocidade crescente, com taxa de variação também crescente até que, enfim, a ponte entra em colapso, caracterizando a transferência da gota formada

no período de arco anterior, porém com a retenção de certa quantidade de metal líquido ainda na ponta do arame-eletrodo. O arco está novamente aberto. O curso descrito é bem conhecido e é descrito oscilograficamente no esquema da Figura 1.

Neste caso, são utilizadas fontes de energia de característica estática do tipo tensão constante (esquema na Figura 2) e, em assim sendo, a variável regulada é a tensão de soldagem (U_{ref}), assim como a velocidade de arame (V_a). A intensidade da corrente de soldagem será, então, uma consequência da junção destas duas.

Abordando o aspecto oscilográfico da Figura 1, observa-se que, ao ocorrer o curto-circuito, a corrente entra numa rampa de subida, um transitório, pois a fonte de energia tenta impor uma tensão entre seus terminais de saída, ou seja, entre a peça e o arame-eletrodo. A inclinação da rampa é função da tensão regulada e da indutância.

Durante o curto-circuito, como a corrente cresce e

(Recebido em 07/04/2006; Texto Final em 05/05/2007).

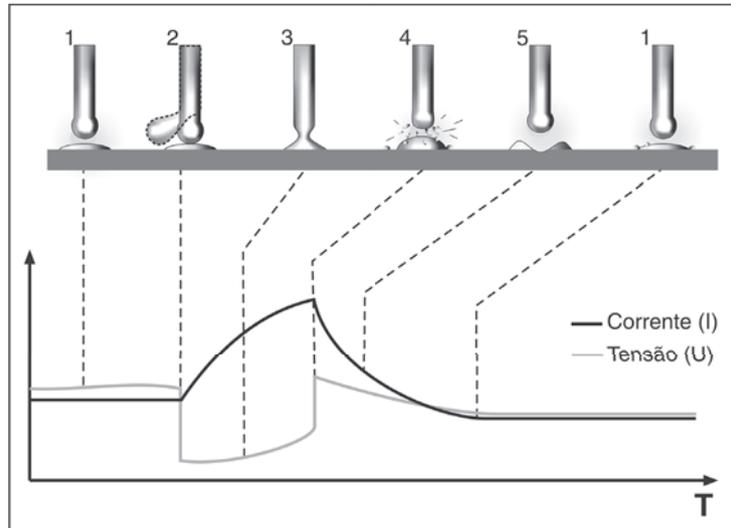


Figura 1 - Curso da transferência metálica por curto circuito no processo MIG/MAG convencional.

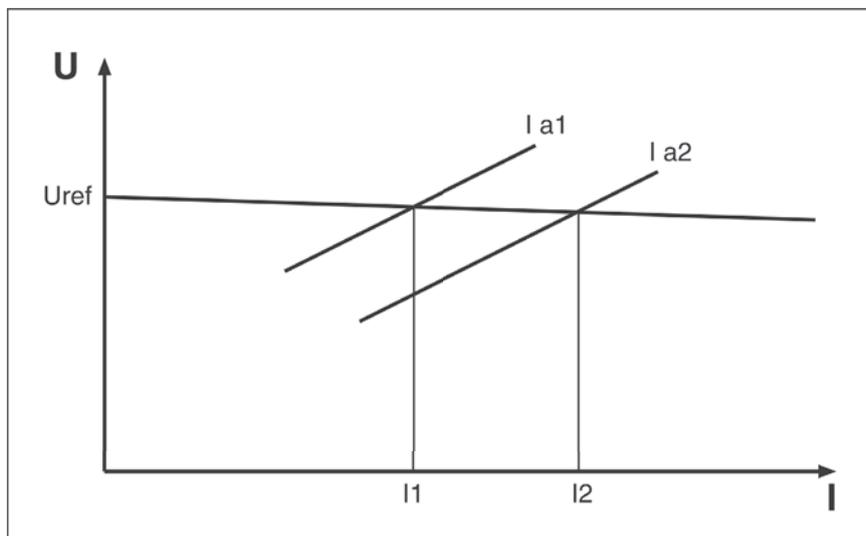


Figura 2 - Curva característica estática para uma fonte de tensão constante. L_a é o comprimento de arco. $L_{a2} < L_{a1}$. Para uma mesma DBCP, L_a depende da V_a .

a área do condutor diminui, pela constrição da ponte metálica, o Efeito Pinch e a componente axial da força de Lorentz crescem em taxa de variação também crescente, pois são proporcionais ao quadrado da corrente e à sua densidade. Assim que a ponte se desfaz, o arco é novamente estabelecido. Neste momento, a corrente está num patamar alto, e a tensão ultrapassa seu valor regulado. A máquina impõe a tensão regulada, causando também redução na corrente. Quando a tensão do arco alcança aquela regulada, a corrente de arco se estabiliza. A corrente, durante o arco, causa a formação de uma nova gota metálica e mantém o aquecimento da poça fundida.

Os itens a seguir tratam mais profundamente os aspectos da transferência metálica por curto-circuito cujo domínio foi considerado fundamental para o desenvolvimento do CCC.

2. Aspectos relevantes do Mecanismo de Transferência Metálica

O método escolhido para realizar o controle da energia no período de curto-circuito do CCC e, conseqüentemente, otimizar a transferência metálica, se baseia na dinâmica da ponte metálica, que pode ser traduzida pelo comportamento da resistência do circuito de soldagem, considerado entre o bico de contato e a peça. Para um melhor entendimento, a dinâmica da transferência metálica foi estudada desde o contato entre a gota e poça, passando pela formação da ponte metálica, até o completo destacamento.

Ao entrar em contato com a poça fundida, a gota metálica, submetida, agora, à tensão superficial daquela, passa a ser puxada em direção à poça. A área de contato inicial é menor que a área transversal do arame-eletrodo.

Devido a esse fato, este momento é crítico, pois como descrito no item sobre forças, existirá uma tendência à expulsão da gota pelas forças eletromagnéticas, caso haja um aumento brusco da corrente de soldagem. A gota, na prática não é esférica nem tampouco simétrica, e está sujeita a vibrações [1]. Além disso, e, principalmente, quando se utiliza uma mistura que contém gás oxidante como gás de proteção, há, devido ao aquecimento localizado, uma tendência à formação de óxidos gasosos que se expandem, causando uma característica repulsiva na transferência [2]. Este é o mecanismo de formação de respingos no início do curto-circuito. Naturalmente, quando se têm parâmetros e variáveis de soldagem regulados adequadamente, isso pode ser mantido num nível aceitável.

Após a estabilização do contato, a área do mesmo cresce, ao passo que a tensão superficial da poça atrai a gota metálica para si. O diâmetro da gota (ponte metálica) se reduz continuamente, até atingir o mesmo diâmetro do arame-eletrodo, tendo atingido, então, a estabilidade da ponte metálica (conceito estipulado para esse estado). A

velocidade de expansão do diâmetro de contato é maior que a velocidade de redução do diâmetro da gota, até ser alcançada a estabilidade. Depois disso, a área de contato continua crescendo, porém o diâmetro da ponte permanece estável e constante por um certo período, apesar de possíveis variações na corrente. Este fato foi visualizado por alguns autores e confirmado por outros, que analisaram o comportamento resistivo do circuito de soldagem durante o curto-circuito, detectando um período onde a resistência se mantém constante [3,4,5], como mostram as Figuras 3 e 4. Para este período, é citado o tempo de 2 ms.

A Figura 4 foi extraída de um trabalho destinado à medição da DBCP, comparando os níveis de resistência no patamar estável. Como se pode ver, também na mesma figura, a resistência reflete o comportamento citado na introdução deste item. Primeiramente, ao ocorrer o contato, a resistência é alta devido à pequena área de condução, seguindo-se uma queda abrupta em seu valor, devido à rápida expansão desta área. Alcança-se a estabilidade da ponte metálica e ocorre um patamar de resistência, seguido

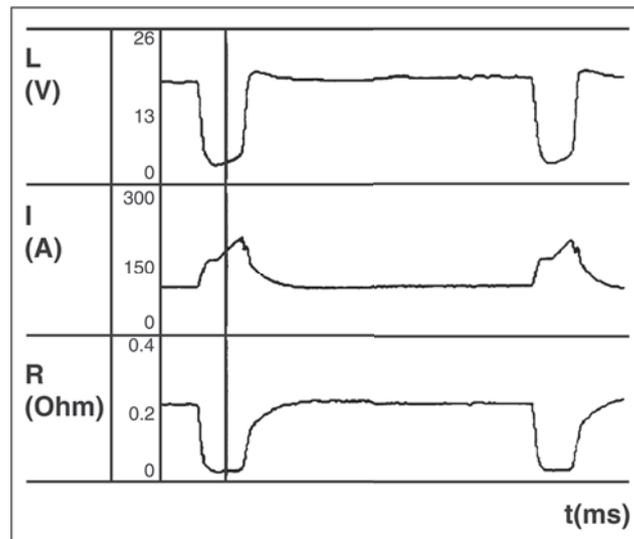


Figura 3 - Comportamento da resistência no período de curto-circuito, mantendo-se num praticamente constante por cerca de 2 ms.[3].

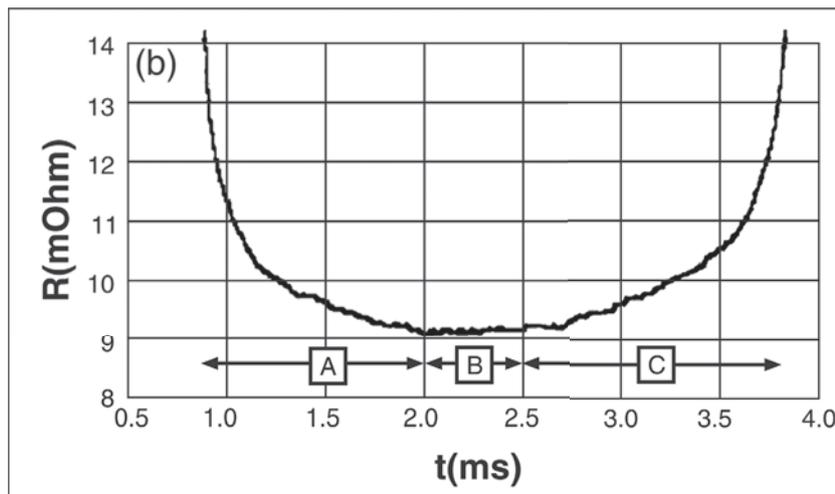


Figura 4 - Comportamento da resistência no período de curto-circuito, mantendo-se praticamente constante por cerca de 2 ms.[5]

de um aumento, em taxa crescente, desse valor, devido ao empescoçamento da gota (redução da área transversal da ponte metálica). Resultados posteriores com o CCC confirmam esse comportamento.

Outro aspecto importante neste assunto são os tempos envolvidos no curso da transferência. O conhecimento destes tempos e dos fatores que os determinam são necessários para que o sistema pretendido (CCC) atue de maneira eficaz.

Sabe-se que o tempo total de destacamento, ou seja, o tempo desde o fechamento do curto-circuito até a reignição do arco, é dependente da corrente de soldagem, numa razão inversa, e do volume da gota, numa razão direta. Esses dois fatores são citados como sendo os mais importantes na dinâmica da transferência [6,7]. Isto é demonstrado tanto em simulações numéricas computadorizadas, como em ensaios de solda (Figuras 5 e 6, respectivamente). É válido lembrar que, quando de simulações, algumas hipóteses são feitas,

como a simetria e esfericidade da gota e a circularidade do contato entre gota e poça.

Em seus ensaios, Ishchenko e Lebedev [8] estratificam o tempo de destacamento em três componentes: tempo de formação da ponte, tempo de pulso de corrente e tempo para fratura da ponte. O primeiro compreende o intervalo entre o contato e a estabilidade da ponte, o segundo determina um pulso de corrente para forçar o empescoçamentno da gota e o terceiro ocorre em corrente baixa e dura do fim do anterior até a fratura da ponte. Uma das informações de interesse é que há aumento do tempo de estabilização da ponte com aumento da corrente durante este estágio. Por outro lado, como já mencionado, há redução no tempo de empescoçamento após a formação da ponte, com o aumento da corrente, o que decorre do Efeito Pinch. Resultados de Choi [6,7] concordam com essa última afirmação, porém concluem que, na fase inicial da transferência, ou seja, até a formação da ponte metálica estável, a corrente não influi

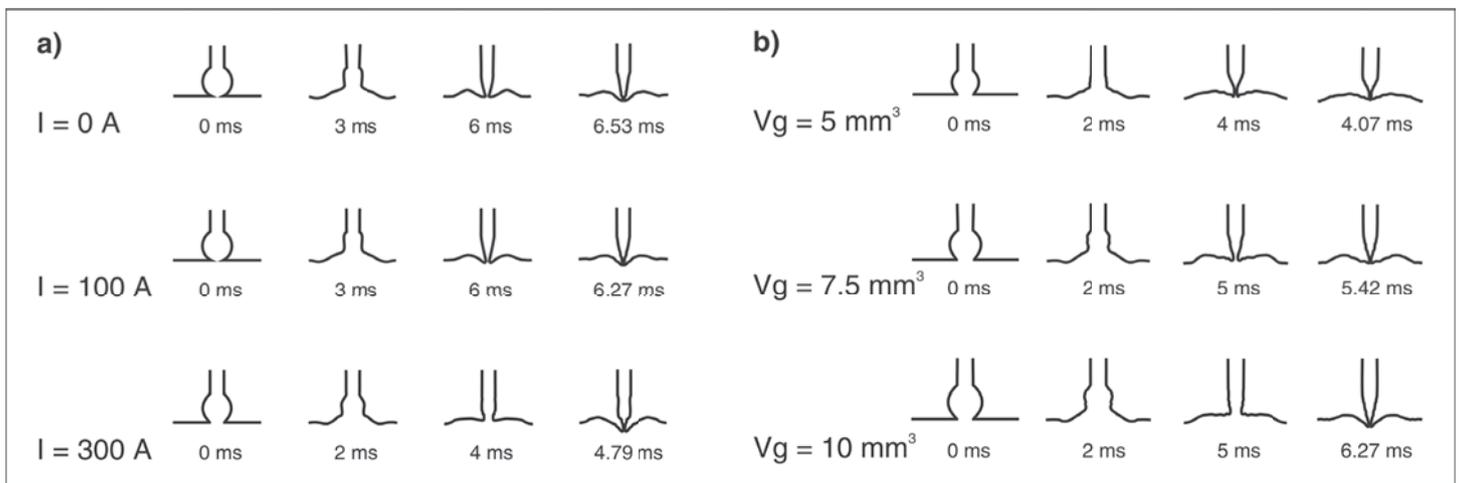


Figura 5 - Simulação da transferência metálica por curto-circuito, evidenciando maior tempo de destacamento para a) menores correntes e b) maiores volumes.[6]

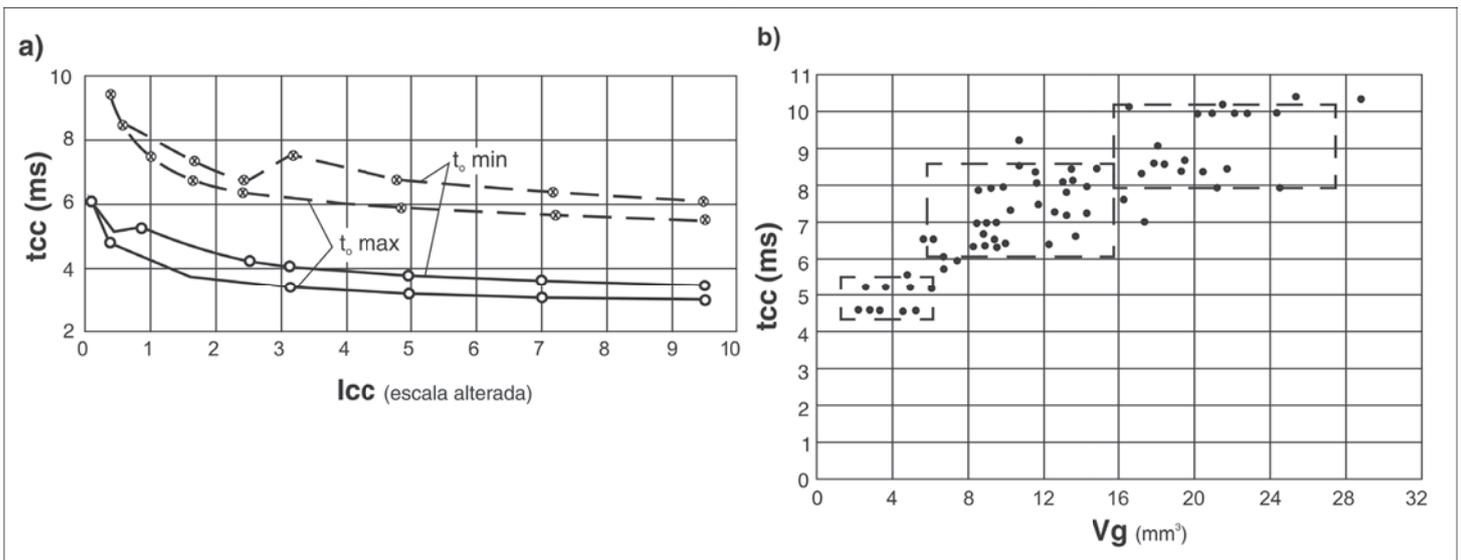


Figura 6 - Transferência metálica por curto-circuito, evidenciando maior tempo de destacamento para soldas em a) menores correntes (escala ilustrativa de corrente) [9] e b) maiores volumes.[8]

na dinâmica da ponte metálica, e a força predominante é devida a tensão superficial.

Considerando os trabalhos aqui citados, não é possível determinar categoricamente o comportamento dinâmico da ponte metálica desde o contato da gota com a poça até a estabilização da ponte. Para isso, seriam necessários novos ensaios de solda, filmados em alta velocidade (quadros/s), em sincronia com a aquisição de dados elétricos. Pode-se assumir, porém, que, para o universo de diâmetros de gota utilizado na realidade deste trabalho, não há variação no tempo de formação da ponte metálica e, além disso, que esta ocorre em redor de 1 ms. Aliado ao fato citado acima, de que a ponte permanece estável entre 1 e 2 ms, e a resultados do próprio CCC, isto dá suporte para determinação de importantes parâmetros do mesmo. Outra conclusão de Choi é que a velocidade de alimentação de arame não influi na dinâmica da transferência metálica, o que já era esperado, devido à grande velocidade de destacamento da gota, como um todo, em relação à velocidade de arame. Os trabalhos citados não foram realizados com o processo MIG/MAG convencional, porém seus resultados puderam ser considerados na descrição da dinâmica da transferência metálica, pois abordaram o modo de transferência por curto-circuito.

Resultados anteriores obtidos no LABSOLDA tendem a concordar com o exposto. A Tabela 1 mostra que, em se mantendo a mesma tensão e velocidade de arame reguladas e aumentado-se a indutância, o efeito da terceira aparece, ou seja, a rampa de corrente após o curto-circuito é mais lenta, e o curto se estende por mais tempo. [10].

Neste sentido, consideram-se as conclusões de Ishchenko e Lebedev mais adequadas, pelo fato de terem filmado a transferência real. Ou seja, como o volume da gota nos dois casos da Tabela 1 é o mesmo em termos médios, supõe-se que, quando o curto acontece em correntes mais baixas e, também, alcançam valores maiores mais rapidamente, os tempos de formação da ponte e de sua estricção até a ruptura caem, resultando na redução do tempo total de curto-circuito. Nota-se que a corrente média permanece a mesma, em termos práticos.

Os resultados de Eassa [11], que dispunha de um sistema que mantinha a corrente de arco constante até o curto-circuito, tendem a confirmar essa suposição, no que tange ao tempo de destacamento (tcc) para um mesmo volume de gota. Ao alterar apenas a inclinação da rampa de subida de corrente, ele observou que a corrente no momento do destacamento era a mesma. Ou seja, para maiores inclinações, o tempo de formação da ponte é maior, mas isso é sobrepujado pelo fato de o Efeito Pinch, proporcional ao quadrado da corrente, ser bem mais acentuado após o

início da estricção, pois a corrente chega a patamares mais altos mais rapidamente. Assim, o tempo de destacamento é menor. Eassa, no entanto, atribui este fato à necessidade de uma mesma quantidade de energia para expulsar a gota, expressa pela área abaixo da curva de corrente x tempo. Essas informações ajudarão na determinação fundamentada de parâmetros e variáveis do CCC.

Assim como no início do curto-circuito, também há tendência à formação de respingos no instante de ruptura da ponte metálica, sendo que o mecanismo atuante agora é diferente em alguns aspectos. Há uma redução na área do condutor, devido ao estriccionamento da ponte metálica líquida e a densidade de corrente aumenta, acompanhada das forças eletromagnéticas. Como a geometria da ponte, na prática, não é simétrica, essas forças podem se desbalancear a um certo ponto em que expulsam material quando há a ruptura. Em correntes mais altas, adicionando-se o aumento da resistência elétrica pela redução da área transversal da ponte metálica líquida, também a temperatura da ponte é maior devido ao efeito Joule, levando à vaporização e conseqüente expansão do material, num comportamento explosivo [6]. Embora o mecanismo de formação de respingos seja similar, no início do curto o efeito das forças eletromagnéticas é o fator proeminente na formação de respingos e estes tendem a ser maiores, pois há tendência de expulsão da gota inteira.

3. Distância Bico de Contato – Peça (DBCP)

Questões relativas à DBCP devem ser colocadas, uma vez que esse parâmetro de soldagem está intimamente relacionado ao fundamento e à razão de existir de sistemas de soldagem MIG/MAG TMCCC (MIG/MAG em transferência metálica por curto circuito com controle de corrente). Variações neste valor acarretam alterações indesejáveis no processo e na solda, em se tratando do método convencional, em controle de tensão, principalmente na soldagem semi-automática. Em certos casos, este fato é plenamente aceitável. Em alguns sistemas de Seguimento de Junta não só é aceitável, como a variação de corrente, advinda da variação da DBCP, é necessária. Porém, para aplicações cujos resultados são submetidos a uma avaliação mais rigorosa, se estimulou o desenvolvimento de sistemas que monitorassem essas variações na DBCP e as realimentassem aos mesmos, aumentando a homogeneidade do resultado como um todo.

Como citado no primeiro artigo desta série, o aumento de L (*stick out*) ocasiona aumento da contribuição do efeito Joule para a fusão do arame-eletrodo. Ao mesmo tempo, há variação na corrente média de soldagem e conseqüente

Tabela 1 - Tempos de curto-circuito para diferentes indutâncias, as quais são inversamente proporcionais aos coeficientes Ks e Kd. Estes traduzem, diretamente, a velocidade de atuação da máquina. Va=5 m/min, Uref=21 V. [10]

Efeitos indutivos Ks e Kd	Corrente Média (Im)	Tempo de curto-circuito (tcc)
10	128 A	3,9 ms
20	124 A	3,2 ms

variação na temperatura e fluidez do metal de solda [12,13]. Ademais, variações em L , conseqüentes de variações na DBCP, normalmente impostas pelo soldador na soldagem semi-automática, significam variações pontuais na frequência de transferência e na deposição de material, pois, na realidade, o que há é uma composição de velocidades, somando-se à velocidade de alimentação regulada na máquina a velocidade de mergulho ou afastamento da tocha pelo soldador [14].

Outras questões sobre esse efeito também devem ser mais bem analisadas. Algumas fontes de informação, por exemplo, relacionam diretamente uma redução da penetração com aumento da DBCP e L [15,16]. Na realidade, o que acontece é uma redução de corrente média de soldagem, tendo os efeitos citados no item 7.1 da segunda parte desta série de artigos e observados em ensaios posteriores com o CCC. Quanto ao fato, regularmente citado na literatura, do aumento na velocidade de arame decorrente de aumento de DBCP, surge também um ponto. Para uma regulação fixa de parâmetros e variáveis, DBCP pode ser alterada, com possíveis conseqüências no resultado obtido, sem que haja alteração na V_a , embora, provavelmente, existam limites para esta variação. Ensaios a serem apresentados neste trabalho, assim como os realizados em [17], e [15] são exemplos.

4. Estabilidade

É muito mencionado, tanto no dia-a dia da soldagem, como também na literatura científica e tecnológica, o termo “estabilidade” para caracterizar o bom andamento de uma solda. Pergunta-se: o que realmente é estabilidade? Como quantificá-la? A soldagem MIG/MAG convencional em transferência metálica por curto-circuito pode ser considerada inerentemente instável, devido à sucessão de curtos-circuitos e períodos de arco. Inclusive, há quem afirme que, para uma solda estável, a transferência metálica deve ser por escoamento goticular axial, ou seja, sem curto-circuito [18,19]. Porém, isso, obviamente, não inviabiliza sua aplicação e essa afirmação parece tendenciosa, de acordo com o que é proposto nestas fontes. Há algum tempo, a estabilidade era tratada apenas qualitativamente, devido, principalmente, à falta de recursos tecnológicos para quantificá-la. Era determinada pelo soldador pelo tipo de ruído que se gerava, ou pela quantidade de respingos, de acordo com sua experiência, habilidade e, por que não citar, vontade [1,20,21,22]. Fala-se também, em estabilidade da poça. Esta, ainda, é tratada em termos qualitativos, na maioria dos casos. Nesse sentido, ela significa o não escorrimento do metal, quando em soldas fora de posição e a homogeneidade na geometria da poça líquida e solidificada ao longo da solda [20]. Assim será tratada neste trabalho, embora existam pesquisas que investigam a característica dinâmica da poça, sua oscilação mecânica durante o processo, etc...[23]

Intrinsecamente, o comportamento do arco na soldagem MIG/MAG por curto-circuito é errático [6], fato que se

agrava com o aumento da porcentagem de CO_2 no gás de proteção. Apesar disso, e com o auxílio de modernas técnicas de software e hardware, o comportamento macro do arco, estreitamente dependente das características da fonte de energia, é passível de ser monitorado e manipulado, factibilizando sua aplicação como ferramenta para soldagem. Sua estabilidade é conceituada, distintamente, por diversos autores, como sendo: o grau de imutabilidade geométrica do arco durante a solda, manutenção do balanceamento entre velocidade de arame e taxa de fusão, a já citada transferência em escoamento goticular axial (*spray*), a qualidade das condições do arco e sua adaptabilidade a operações de soldagem, maior frequência de transferência ou a sincronia entre a última e a frequência de oscilação da poça [11,18,19,20,23]. Esses conceitos se completam, ou então consistem, na realidade, em requerimentos fundamentais do processo MIG/MAG, ou não traduzem a possibilidade de sucesso de uma solda, que é, na opinião do autor, o que uma solda estável deve ser. Ou seja, a estabilidade de um procedimento de soldagem, na visão do autor, se dá quando o resultado do mesmo é uma solda com regularidade na transferência metálica, independente do tipo, e homogeneidade da mesma ao longo do cordão, produzindo um mínimo de respingos, os quais não comprometam o conforto do soldador e nem acarretem em tempos secundários excessivos de retrabalho, produzindo uma poça e metal de solda também geometricamente homogêneos em toda a extensão do cordão.

O comportamento estático do arco (tensão x corrente) na soldagem MIG/MAG com transferência por curto-circuito pode ser obtido com sistemas de aquisição de dados como o utilizado neste trabalho, tendo o poder de fornecer informações palpáveis quanto à estabilidade de um procedimento de soldagem [24]. Dados obtidos neste trabalho, que confirmam a validade deste método de avaliação da estabilidade, serão apresentados adiante. Uma ferramenta utilizada para a quantificação da estabilidade do processo na soldagem MIG/MAG convencional, em transferência metálica por curto-circuito consiste no histograma dos valores dos picos de corrente, e o respectivo desvio padrão [22,25,26]. Trata-se de uma ferramenta potente, uma vez que, indiretamente, traduz a variabilidade do tamanho de gota, da corrente média e dos tempos de arco e curto-circuito, e se materializa em sistemas que englobam instrumentação e softwares de aquisição e tratamento de dados, dedicados a processos de soldagem. Sistemas assim, desenvolvidos no próprio LABSOLDA, foram utilizados neste trabalho, nos ensaios em MIG/MAG convencional. Para o CCC, como a corrente é controlada, esta ferramenta não se aplica, originando um dos objetivos deste projeto: o desenvolvimento de novas ferramentas de avaliação da estabilidade do processo. A verificação da uniformidade no comprimento do arco através da tensão média e seu desvio padrão foi utilizada por Rasajekaram [27] em seu trabalho com corrente pulsada. Como o CCC também trabalha em imposição de corrente, este índice também pode ser utilizado.

5. O Processo MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-circuito com Controle da Corrente (MIG/MAG TMCCC)

5.1 Fundamentos

Como já mencionado, a variante do processo MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito (excluindo-se o caso do chamado controle externo), na qual a corrente é a variável de controle, vem sendo estudada já há mais de duas décadas, tendo os métodos de controle e os equipamentos apresentado melhorias contínuas. Como pode ser verificado no primeiro artigo, os motivos que levaram e levam ao desenvolvimento dessa variante são inúmeros, dependendo da aplicação, e englobam não só aspectos técnicos, mas também econômicos e sociais.

No início, as pesquisas buscavam um processo com as vantagens da transferência metálica por curto-circuito (menor aporte térmico e menor nível de tensões residuais, menor gasto de energia, menor custo de gás, principalmente no Japão, menor nível de hidrogênio difusível, solda fora de posição), suprimindo os inconvenientes do processo convencional, como excesso de respingos e irregularidade na transferência metálica [12,14,29,30]. O menor aporte térmico (5 % a 20 %) e maior rendimento (η) do processo se devem ao menor sobreaquecimento da poça e da gota, em relação ao MIG/MAG convencional em curto-circuito [31,32,33], mas a maior V_s atribuída ao MIG/MAG TMCCC também pode ter contribuído para essa afirmação. Este assunto é abordado detalhadamente nos resultados. Com

o refinamento das técnicas, novos objetivos foram sendo almejados, como controle do aporte térmico e controle da penetração independentemente da velocidade de arame.

De uma maneira geral, o funcionamento destes sistemas se baseia na garantia de que o contato entre a gota metálica e a poça de fusão ocorra em baixo nível de corrente, no fornecimento de uma corrente responsável pela transferência da gota, e na redução de corrente antes que a ponte metálica se rompa e a gota se transfira. A Figura 7 exemplifica algumas formas de onda ($I \times t$) de corrente adotadas [11,33,34,36,37,38].

Para que se possa obter um real controle do processo, todas as técnicas lançam mão de alguma método de monitoração e realimentação, assim permitindo que ele se ajuste à condição instantânea, respondendo a oscilações impostas ao processo de soldagem. Obviamente, isso é possível dentro de limites práticos. Como descrito anteriormente, o processo MIG/MAG convencional não é capaz de responder a estas oscilações, o que acarreta em instabilidade na solda. No processo apresentado na Figura 7 d) [11], por exemplo, a tensão é continuamente lida. Quando cai abaixo de um determinado valor que caracterize o curto-circuito, o sistema impõe uma rampa de corrente, com inclinação determinada. Assim que se detecta a ultrapassagem, pela tensão, daquele valor de curto-circuito, o sistema percebe seu fim e impõe uma corrente de arco.

Em processos mais modernos, como o mostrado na Figura 7 c), há uma maior complexidade. A forma de onda pode ser descrita como sendo composta por fases, abordadas por vários autores [3,28,29,31,33,34,39]. Esta é, também, a

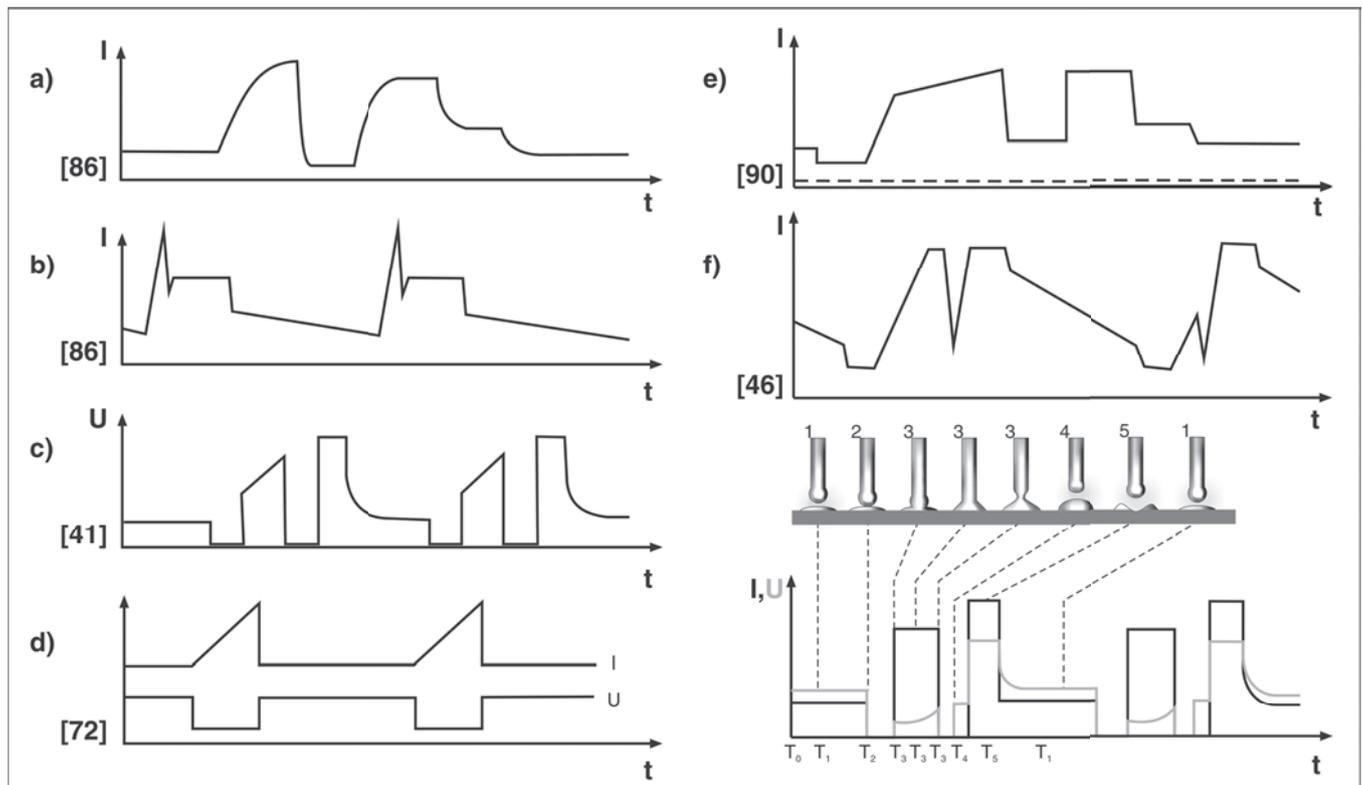


Figura 7 - Formas de onda de corrente (I) de diversos sistemas de soldagem MIG/MAG TMCCC. [11,34,35,36,38] e fases básicas de sistemas MIG/MAG TMCCC modernos (g).

concepção do CCC.

O último oscilograma da Figura 7 mostra, esquematicamente, essas fases.

A fase 1 é a fase de arco aberto. A corrente é mantida em patamar baixo, porém garantindo o aquecimento dos eletrodos (gota e poça) e a fluidez dos mesmos, assim como a manutenção do arco. Segundo a literatura, uma corrente excessivamente baixa pode causar solidificação das partes fundidas e instabilidades na operação. Esta fase também é citada como responsável pelo “controle fino” do aporte térmico [28,29,34,36].

O processo vai para a fase 2 quando a tensão cai abaixo da chamada tensão de curto-circuito (U_{cc}), normalmente 12 V, caracterizando o contato entre a gota e a poça metálica. Alguns autores sugerem que a corrente deve cair antes do contato, porém não explicam como ele é detectado [40,41]. Cogitou-se, no LABSOLDA, que isto poderia ser conseguido por métodos estatísticos. Nesta fase, a corrente é reduzida ainda mais, reduzindo a tendência a se gerarem respingos, deixando que a gota se assente suavemente. Considera-se, aqui, o exposto no sub-capítulo anterior, que cita o fato de que, nos primeiros momentos do curto-circuito, a força da tensão superficial é preponderante sobre a dinâmica da transferência da gota. Daí se origina um dos nomes que existem no mercado, o STT (*Surface Tension Transfer*, ou Transferência por Tensão Superficial) [28]. Permanece-se na fase 2 por um tempo ajustado, após o qual, inicia-se a fase 3.

A fase 3 é caracterizada por uma alta corrente, que gera as forças magnéticas que atuarão no destacamento da gota. Este pulso de corrente deve ser dado após a estabilização da ponte líquida. Nesta fase, ocorre a aquisição dos sinais que traduzirão a situação momentânea da solda, e que serão realimentados ao sistema, o qual atuará no intuito de manter a estabilidade. Um desses sinais reflete a situação geométrica da ponte metálica, e tem como função informar a iminência da reabertura do arco. Quando esta iminência for detectada, a corrente deve ser reduzida à da fase 4, reduzindo a tendência a respingos, inerente a esse momento. O sistema comercial mais conhecido utiliza o sinal de variação de tensão (dU/dt) para isso. (Como será visto adiante, o CCC utiliza o sinal de resistência, R_i .) Quando esse valor ultrapassa um valor estipulado, é detectada a iminência de reabertura [28,34]. O outro sinal aquisitado reflete a DBCP, podendo ser de tensão ou de resistência. (Como será visto adiante, o CCC utiliza o sinal de tensão, U_i .)

A fase 4 também tem um tempo estipulado e é nela que deve ocorrer a reabertura do arco, em corrente baixa.

A fase 5 é composta por um pulso de corrente, destinado à formação de uma nova gota metálica na ponta do arame-eletrodo. A energia deste pulso deve corresponder à necessária para que se forme uma gota de mesmo tamanho que a anterior. Para isso, o sistema utiliza a informação de DBCP lida na fase 3. Há, na literatura, certas contradições, inclusive entre artigos do mesmo fabricante, quanto a funções adicionais da fase 5. Cita-se que ela também seria responsável pelo controle do aporte térmico, ou então

apenas pela penetração [28,32], ou por ambos [3], além de causar uma depressão na poça, evitando contato prematuro desta com a gota em formação [34,37].

À forma da transição da fase 5 para a fase 1 são atribuídas as funções de amortecimento da poça, pela redução suave da corrente, e de “controle grosseiro” do aporte térmico [28,29,32] e fluidez do material fundido. Esta transição é conhecida por *tail out*.

Algumas dessas questões puderam ser verificadas no decorrer deste trabalho, como observado nos resultados. Outras, porém, necessitariam da aplicação de filmagem em alta velocidade para serem estudadas. Além da falta deste equipamento, a grande dificuldade do trabalho foi a falta de informações sobre esse tipo de processo. As explicações sobre as funções e valores de tempo e corrente das fases são genéricas e vagas. As informações se restringem a situações específicas de solda, não abrangendo, por exemplo, uma variedade de materiais, gases, etc...A forma de atuação do controle também não é abordada profundamente.

5.2 Aplicações

O processo CCC é destinado, em princípio, àquelas operações que requerem as características presentes no processo MIG/MAG convencional, em transferência metálica por curto-circuito. Por vezes, porém, sua aplicação está ligada à sua habilidade em obter resultados que ficam entre os obtidos com MIG/MAG convencional em transferência por curto-circuito e os obtidos com outra variante, ou que extrapolam a faixa de aplicabilidade do primeiro. Por exemplo: apesar do baixo aporte térmico e conseqüente possibilidade de soldar menores espessuras, estas estão limitadas a um mínimo no MIG/MAG convencional em curto-circuito. Pesquisas recentes, conduzidas na Alemanha, com um sistema MIG/MAG TMCCC, designado por Chop Arc, obtiveram boas soldas em espessuras de 0,2 mm, em aço [42]. Um outro exemplo de versatilidade é mostrado em [38]. Para a soldagem de ligas de Magnésio, foi tentado o processo MIG/MAG em corrente pulsada e em curto circuito. Ambos apresentaram dificuldades que proibiram seu uso. A solução foi, então, a aplicação do processo MIG/MAG em curto circuito e controle de corrente, cuja forma de onda está na Figura 7 b).

O passe de raiz na união de topo de dutos de parede espessa consiste em uma das aplicações mais freqüentemente citadas do MIG/MAG TMCCC. Seu uso, tanto semi-automaticamente, como totalmente mecanizado, é citado em inúmeros artigos técnicos [28,32,43]. Existem citações de aplicação também em aço inoxidável para construção automotiva, vasos de pressão, trocadores de calor, fabricação de motocicletas, etc... [32,40,41,44]. Também são citados ensaios destrutivos e não-destrutivos, comprovando a eficácia do MIG/MAG TMCCC [32]. Quando há alterações na configuração da solda, a forma de onda (variáveis e parâmetros) deve ser adequada [2,31,41], devendo haver uma metodologia para essa tarefa (não houve menção desta metodologia nos trabalhos revisados).

5.3 Experiência do LABSOLDA

O CCC já vinha sendo estudado e desenvolvido no LABSOLDA, tendo sido abordado em duas teses do doutorado, em trabalhos de parceria com a PETROBRAS e em projetos de iniciação científica. A importância e pertinência de sua continuidade foram verificadas pelos resultados até então gerados e em diálogos com o setor industrial.

Gohr [45], em sua tese, descreveu a primeira tentativa prática de gerar o CCC, objetivando, principalmente, a redução do nível de respingos. Este primeiro conceito utilizava um circuito eletrônico, o qual monitorava a tensão e, de acordo com a mesma, estipulava a passagem ou não de corrente pelo circuito de soldagem (Figura 8).

Ou seja, no momento onde a tensão caía abaixo da estipulada como sendo de curto-circuito (U_{cc}), o sistema desviava a corrente do circuito de soldagem, fechando uma chave paralela ao mesmo por um determinado tempo. Do mesmo modo, esta chave, um IGBT comandado por um sistema de controle, anulava a corrente de soldagem

quando a tensão ultrapassava um limite estipulado como iminência de abertura de arco (U_{ri}), também por um tempo estipulado. Problemas surgiram devido à baixa taxa de redução da corrente e ao fato de que, quando havia alteração na DBCP, o circuito de redução de corrente se confundia e considerava iminência de reabertura quando esta, na realidade, não ocorria. A ausência de corrente no momento de reabertura do arco também se tornou problemática, pois por vezes o arco reacendia, outras não. Não foi encontrada uma explicação para isso, sendo que Gohr [45] sugeriu filmagem em alta velocidade para melhor investigação.

Em face desses inconvenientes, e devido a maior flexibilidade do controle por software, esse foi o caminho adotado em diante. Em seu texto, Gohr [45] descreve o funcionamento do algoritmo de controle e as pesquisas que levaram a definição das estratégias de controle utilizadas desde então. Neste sentido, pesquisou

o comportamento da resistência na fase 3 (Figura 9), verificando um momento adequado para leitura da resistência (R_i). Observou, também, a validade do relacionamento entre a tensão de curto-circuito, revelando a DBCP, e

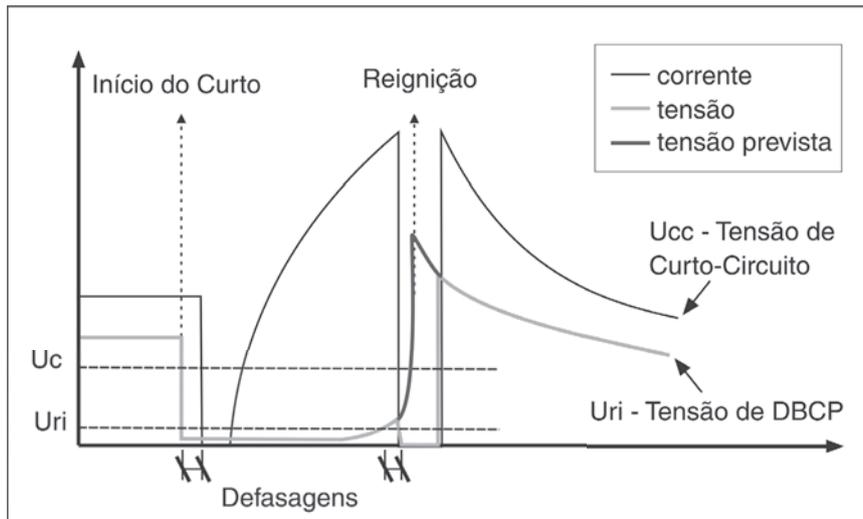


Figura 8 - Forma de onda de corrente com o circuito de redução de corrente. [45]

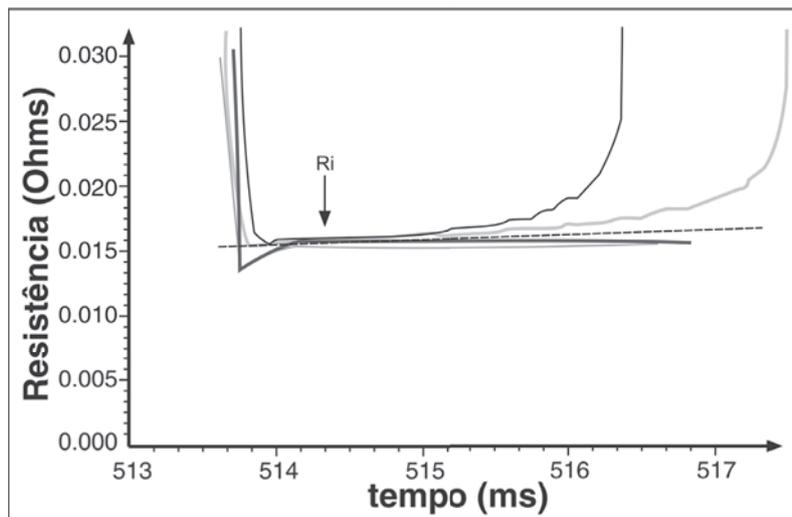


Figura 9 - Comparação da resistência do arame durante o curto-circuito em solda e simulações de curto. [45]

tempos da fase 5 que manteriam uma transferência estável, para uma mesma corrente, (Figura 10). Também sugeri novas formas de onda que poderiam ser investigadas.

Em suas pesquisas, Baixo [2] abordou o processo de soldagem em si, os aspectos da transferência metálica, adotando, nos ensaios, várias configurações possíveis. Estabeleceu relacionamentos entre energia fornecida pela máquina e velocidade de adição de material, e entre aquela e o volume fundido na fase de arco da forma de onda do CCC. Utilizou como critério de estabilidade a produção de salpicos e a não descaracterização da forma de onda por ocorrência de curtos-circuitos em momentos inadequados. O foco não foi a determinação de um método realimentado de autocorreção (ou ajuste) do processo, e também não envolveu investigações que envolvessem controle de aporte térmico, penetração e regulagem do tamanho de gota. Utilizando uma forma de onda em três níveis, obteve

bons resultados, no que tange a regularidade do processo, como visto na Figura 11, abaixo.

Atualmente, um dos objetivos da linha de pesquisa do LABSOLDA que engloba o CCC é integrá-lo ao Sistema Avançado de Controle da Soldagem a Arco (SAC). Ao fim do desenvolvimento, será possível utilizar novas formas de onda e métodos de controle. Uma vantagem adicional é a não necessidade de uma placa de controle específica para o CCC, como é atualmente. Desta maneira, a instalação e manutenção do sistema será facilitada, assim como se agilizará a realização dos eventuais *upgrades*.

6. Conclusão

O entendimento das características apresentadas se mostrou de singular importância quando o objetivo final era justamente controlar os fenômenos por completo, desde

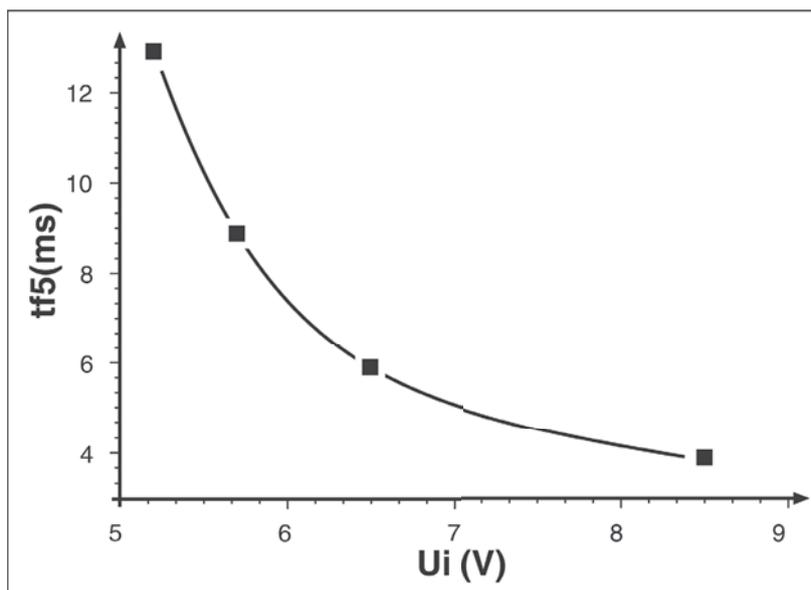


Figura 10 - Relação entre tensão de curto-circuito (U_i) e tempo da fase 5 (tf_5). [45]

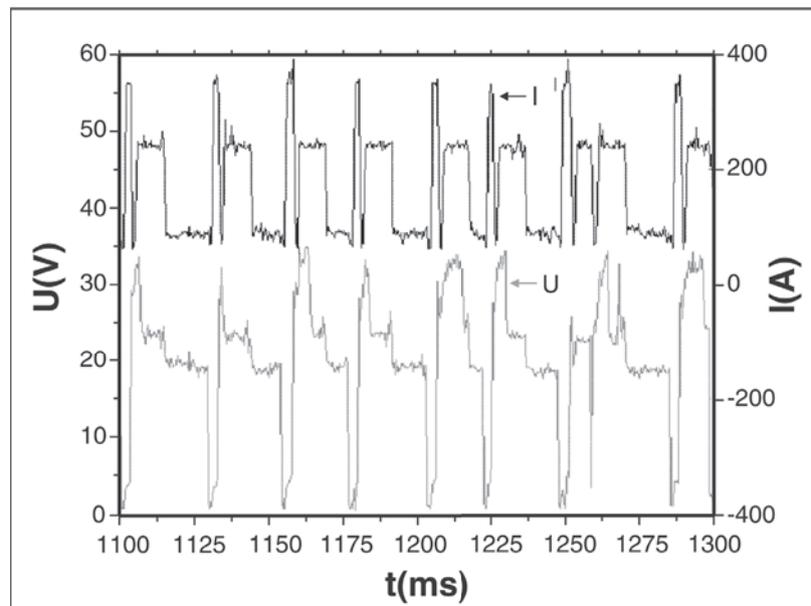


Figura 11 - Oscilogramas de tensão (U) e de corrente (I) em soldagem com controle da forma de onda em três níveis de corrente. [2]

a formação da gota até sua deposição sobre a poça metálica. Neste estudo levou-se em consideração não só experiências práticas, mas também estudos envolvendo modelamento e simulação computacional. Os métodos de monitoramento e a influência da distância bico de contato-peça foram avaliados, sendo fatores de grande importância em sistemas como o CCC. No caso dos métodos de monitoramento da dinâmica da transferência metálica, o know how gerado no próprio LABSOLDA mostrou aplicabilidade prática, com resultados satisfatórios, no que tange à estabilidade do arco e qualidade da solda. Com a integração do CCC ao Sistema Avançado de Controle SAC, se pretende flexibilizar e agilizar o desenvolvimento do processo, assim como estender seu campo de aplicação no Brasil.

7. Referências Bibliográficas

- [1] SLANIA, J. Determination of the Conditions for Stable Transfer of Metal From the Electrode to the Molten Pool During MAG-Welding with Short-Circuiting and Pulsating Arcs. *Welding International*. v.10, p. 849-852. 1996.
- [2] BAIXO, C. E. I. Estudo da soldagem MIG/MAG pela técnica hiperbárica a seco. 1999.169 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [3] HSU, C.; STAVA, E. Wire Extension Measurement During Short Circuiting Metal Transfer. In: *Metal Welding and Applications*. 1999. Proceedings of the Interdisciplinary Symposium. Met Soc, 1999. p. 351-358.
- [4] OGASAWARA, T. et al. A Power Source for Gas Shielded Arc Welding with New Current waveforms. *Welding Journal*, Miami, v. 66, n. 3, p. 57-63, Mar. 1987.
- [5] ORSZAGH, P. et al. Real Time Torch Height Detection Technique for Gas Metal Arc CO₂ Welding. *Science and Technology of Welding and Joining*. v. 3, n. 3, p. 139-143. 1998.
- [6] CHOI, S. K. et al. Dynamic Simulation of Metal Transfer in GMAW. *Welding Journal*, Miami, v. 77, n. 1, p. 38-51, Jan. 1998.
- [7] CHOI, J. H. et al. Simulation of Dynamic Behavior in a GMAW System. *Welding Journal*, Miami, v. 80, n. 10, p. 239-245, Oct. 2001.
- [8] POLOSKOV, S. I. et al. Control of Droplet Transfer in Consumable Electrode Welding with Short Circuiting of the Arcing Gap. *Welding International*. v. 15, p. 873-875. 2001.
- [9] ISHCENKO, Y. R., S. Characteristics of Controlling Droplet Transfer in Consumable Electrode Short Circuit Welding. *Welding International*. v. 7, n. 11, p. 895-897. 1993.
- [10] SILVA, R. H. G. Influência das variáveis e parâmetro da soldagem MIG/MAG por curto-circuito. Florianópolis, 2003. Relatório interno. 27 p.
- [11] EASSA, H. E. et al. A High Performance Welding Power Source and its Application. *IEEE*. p. 1241-1244. 1983.
- [12] KVASOV, F. V. Special Features of Mechanized Welding with Controlled Electrode Metal Transfer. *Welding International*. v. 14, n. 2, p. 158-161. 2000.
- [13] LESNEWICH, A. Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal-Arc Welding Part II – Control of electrode Melting Rate. *Welding Research Supplement*, p. 418-425, Sep. 1958.
- [14] STENBAKKA, N.; PERSSON, K. Shielding gases for Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal*, Miami, v. 8, n. 11, p. 41-47, nov. 1989.
- [15] AICHELE, G. The contact tube distance in gas shielded metal arc welding – How does it work ? *Welding & Cutting*. Duesseldorf, fev. 2002. p. 80-83.
- [16] INFOMET. MIG MAG. Disponível em www.infomet.com.br Acesso em 20/02/2003
- [17] FORTES, C. Arames Tubulares. ESAB, mai. 2004. 103 p.
- [18] AMIN, M. Synergic Pulse MIG Welding. *Metal Construction*. p. 349-353, Jun. 1981.
- [19] AMIN, M. Pulse Current Parameters for Arc Stability and Controlled Metal Transfer in Arc Welding. *Metal Construction*. p. 272-278, May. 1983.
- [20] VAIDYA, V. Shielding gas mixtures for semiautomatic welds. *Welding Journal*. Miami, v. 81, n. 9, p.43-48, set 2002.
- [21] LUCAS, W. et al. Process Stability in MIG Welding. *The Welding Institute Research Bulletin*. p. 329-336, Oct. 1983.
- [22] MITA, T. et al. Quantitative Estimates of Arc Stability for CO₂ Gas Shielded Arc Welding. *Welding International*. n. 2. p. 152-159. 1988.
- [23] DEN OUDEN, G.; HERMANS, M. J. M. Process Behavior and Stability in Short Circuit Gas Metal Arc Welding. *Welding Journal*, Miami, v. 78, n. 4, p. 137-141, Apr. 1999.
- [24] CHAE, Y. M. et al. A New Instantaneous Output Current Control Method for Inverter Arc Welding Machine. *IEEE*. p. 521-526. 1999.
- [25] MORI, R. et al. Validação da metodologia da regularidade na transferência metálica por curto-circuito. Florianópolis. Mar. 2002. Relatório. 13 p.
- [26] DUTRA, J. C. Procedimento computadorizado de determinação e controle das variáveis na soldagem MIG/MAG. 1989. 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [27] ZHANG, Y. M. et al. Double-Sided Arc Welding Increases Weld Joint Penetration. *Welding Journal*, Miami, v.77, n. 6, p. 57-61, Jun. 1998.
- [28] KVASOV, F. V. Special Features of Mechanized Welding with Controlled Electrode Metal Transfer. *Welding International*. v. 14, n. 2, p. 158-161. 2000.
- [29] POWER Wave®455/STT® and Power Feed™10 Dual. Lincoln Electric. p. 5. Disponível em: www.lincolnelectric.com. Acesso em: 15/01/04.
- [30] WELDING'S Wave of the Future. Lincoln Electric Knowledge Articles. Cleveland. p. 2. Disponível em: www.lincolnelectric.com. Acesso em: 25/11/03.
- [31] DERUNTZ, B. D. Assessing the Benefits of Surface

- Tension Transfer® Welding to Industry. Journal of Industrial Technology. v. 19, n. 4, p. 2-8, Aug. 2003 to Oct. 2003.
- [32] STAVA, E. K. et al. Das GMAW-STT-System: Ein Fortgeschrittenes Schweißsystem für Wurzelrohrschweißen und Blechschweißen. DVS. p. 71-79.
- [33] MILLER'S new, software driven RMD process overcomes short circuit MIG limitations. MILLER NEWS RELEASES. Appletown, jan. 2004. Disponível em www.millerwelds.com Acesso em mar. 2004
- [34] STAVA, E. K. A New, Low-Spatter Arc Welding Machine. Welding Journal. p. 25-29, Jan. 1993.
- [35] MILLER'S new, software driven RMD process overcomes short circuit MIG limitations. MILLER NEWS RELEASES. Appletown, jan. 2004. Disponível em www.millerwelds.com Acesso em mar. 2004
- [36] STAVA, E. K. New Surface Transfer Tension Process Speeds Pipe Welding. Pipe Line & Gas Industry. v. 82, n. 9, p. 55-57, Sep. 1999.
- [37] MARUYAMA, T. et al. Current Waveform Control in Gas Shielded Arc Welding for Robotic Systems. Kobelco Technology Review. n. 18, p. 10-14, Apr. 1995.
- [38] WOHLFAHRT, H. et al. Metal inert gas welding of magnesium alloys. Welding and Cutting, Duesseldorf, v. 55, n. 2, p. 80-84, fev. 2003.
- [39] STAVA, E. K. Waveform Control Speeds Root Pass. Welding Design and Fabrication. p. 39-42, Feb. 2001.
- [40] HEAT-INPUT Control Limits Distortion and Spatter. Welding Design and Fabrication. p. 20-22, Aug. 1999.
- [41] STAVA, E. K. Electric Utility Speeds Heat Exchanger Repair with New Welding Technology. Lincoln Electric Knowledge Articles. Cleveland. p. 2. Disponível em: www.lincolnelectric.com. Acesso em: 25/11/03.
- [42] SCHUZ, T. Ein Prozessfehler brachte die zuendende Idee. TU Berlin Medieninformation. Berlin, n. 199, oct. 2000. Disponível em www.tu-berlin.de Acesso em 25/11/2004.
- [43] THE AUTOWELD SYSTEM, Relatório Técnico. Cleveland, 1999. 6 p.
- [44] WALL, K. Honda improves productivity with STT welding process. Lincoln Electric Knowledge Articles, Cleveland. 4 p. Disponível em www.lincolnelectric.com Acesso em 25/11/2003.
- [45] GOHR JR, R. Novos métodos de controle da soldagem MIG/MAG. 2002. 138 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.