

MIG/MAG - Transferência Metálica por Curto-Circuito sob Controle da Forma de Onda da Corrente – Sistemas CCC e STT- Fundamentos

(GMAW – Short Circuit Metal Transfer – Control of the Current Wave Form – Fundamentals of the CCC and STT Systems)

Jair Carlos Dutra¹, Regis Gonçalves e Silva¹

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

Resumo

Este trabalho aborda a transferência metálica por curto-circuito no processo MIG/MAG na situação em que a corrente é a variável de regulação direta, contrastando com o modo convencional em que a variável de regulação direta é a tensão. É apresentada a teoria geral para esta técnica e descrito um novo sistema, ainda não comercial, desenvolvido no LABSOLDA da UFSC. São descritas as bases de controle do processo, apresentando-se resultados oscilográficos e de performance em relação a passes de raiz e de produção de salpicagem. Adicionalmente são apresentados alguns resultados de um sistema já comercial a fim de comparações no tocante às estratégias de controle e de implicações sobre as grandezas dependentes como, diâmetro de gotas, corrente média, eficaz e potência do arco. São salientadas questões como critérios de monitoração das variáveis e cálculos referentes à potência do arco, as quais são mais importantes para estas novas tecnologias do que para o caso do sistema convencional

Palavras-chave: *Transferência metálica. Curto-circuito controlado. Controle da transferência.*

Abstract: *This work, the second of the short-circuiting MIG/MAG process metal transfer, focuses systems that control current waveform. These aim at producing root welds with more repeatability and less spatter than the conventional short-circuiting transfer. A new system is introduced, not yet commercial, which was developed at LABSOLDA / UFSC. Its oscilographic results are presented, as well as its performance results in relation to spattering. Furthermore some results of a commercial system are addressed, in order to enable a comparison concerning control strategies and implications over dependent parameters like drop diameter, average and RMS current and arc power.*

Key-words: *Metal transfer. Controlled short-circuiting. Metal transfer control*

1. Introdução

Embora o processo MIG/MAG convencional (comando em tensão) com transferência por curto-circuito ofereça ao usuário condições de atuação nas variáveis e parâmetros a fim da obtenção de situações satisfatórias, há sempre o fator limitante de que não se pode atuar diretamente na corrente de soldagem. A atuação é sempre indireta e isto restringe determinados objetivos, já que a corrente é a variável de influência determinante para a solda. Um dos problemas que esta versão de processo MIG/MAG proporciona é a dificuldade de se obter um adequado controle de passes de raiz no fundo de chanfros devido à variação da corrente média quando a tocha se desloca lateralmente à junta. Um segundo problema é a dificuldade de redução drástica da salpicagem. O que se tem de ações possíveis para se obter melhores resultados, além da atuação no conjunto clássico de variáveis e parâmetros, é uma atuação sobre a indutância ou efeito indutivo da fonte de soldagem [1], mas sempre significa uma ação indireta sobre a variação da corrente.

Por isso, foram e estão sendo desenvolvidos sistemas em fontes de soldagem para suplantarem este fato, para aplicações nas quais a transferência metálica por curto-circuito é a mais adequada [2]. Nesses equipamentos, a corrente passa a ser uma variável regulada e parcialmente controlada em tempo real durante o processo. Historicamente, o objetivo deste sistema era elevar a qualidade da soldagem com o CO₂, já que este gás em muitos países tem um custo bem reduzido em relação às misturas com argônio. O sistema era normalmente apresentado, focando a sua propaganda na redução de salpicagem. Atualmente, ele começa a ganhar espaço no campo das soldas de raiz, em função da possibilidade de uma maior repetibilidade de resultados. Isto é consequência do fato de que a corrente de soldagem está muito mais definida, não se permitindo variar como acontece no sistema tradicional.

O fundamento do sistema é a harmonização entre os dois principais efeitos atuantes na transferência metálica por curto-circuito: a força devido à tensão superficial e as forças eletromagnéticas. No sistema tradicional, tão logo a gota toca na poça metálica, a corrente começa imediatamente a subir. Com um contato ainda muito tênue, frequentemente acontece que a resultante das forças (de origem da tensão superficial e de origem

(Recebido em 26/06/2007; Texto Final em 03/03/2008).

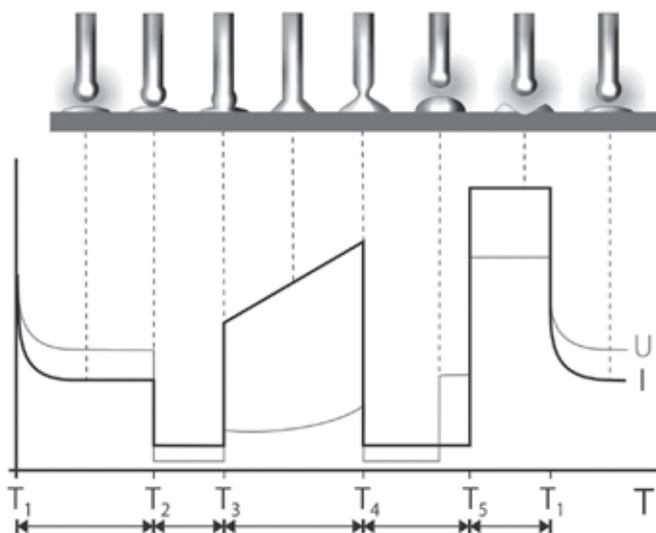


Figura 1. Oscilograma esquemático da transferência metálica em curto-circuito com controle sobre a corrente

eletromagnética) não seja favorável à transferência. Além disso, como a região de contato é muito pequena para uma corrente tão alta, começa a acontecer uma forte vaporização metálica. Ambos os fatos provocam uma tendência a uma eliminação do contato da gota com a peça, produzindo uma intermitência da transferência. Como a gota não se separa no momento apropriado, ela cresce demais e em um novo contato as forças atuantes podem produzir a separação da gota do eletrodo, mas na forma de salpicos grosseiros. Um dos objetivos primordiais do sistema com controle de corrente está na eliminação desta problemática. Isto é realizado por intermédio de uma redução da corrente no momento do contato físico, em total dissonância com o sistema tradicional [3]. A variável que sinaliza o instante do contato é a tensão. Com esta redução de corrente, a gota terá condições de se assentar melhor sobre a peça metálica por intermédio da força devido à tensão superficial. Esta situação corresponde ao instante T2 do oscilograma esquemático da Figura 1 e, por causa da implicação com a tensão superficial, a empresa Lincoln lançou no mercado um equipamento com o nome de STT (Surface Tension Transfer), o que em português significa Transferência por Tensão Superficial. O tempo de permanência da corrente neste valor é de aproximadamente 0,7 ms, que é o tempo em que a região de contato leva para atingir a dimensão idêntica ao diâmetro do eletrodo, geometricamente adequada para o início da próxima fase. Após isto, é aplicado um pulso de corrente, que corresponde ao intervalo T3 a T4 da Figura 1, com o objetivo de atuação sobre a força Pinch para o estrangulamento da gota. No sistema STT este pulso de corrente tem uma forma em rampa, o que resulta em uma evidente rampa de tensão. Este fato pode tornar mais visível a iminência de destacamento, aumentando a eficiência da sua detecção. O tempo deste pulso é uma variável controlada por intermédio das condições da ponte metálica, tentando-se detectar a iminência do destacamento, como mencionado antes. Quando isto é detectado, a corrente é reduzida a valores bastante baixos (da ordem de 30 A) com a finalidade de eliminar uma reabertura do

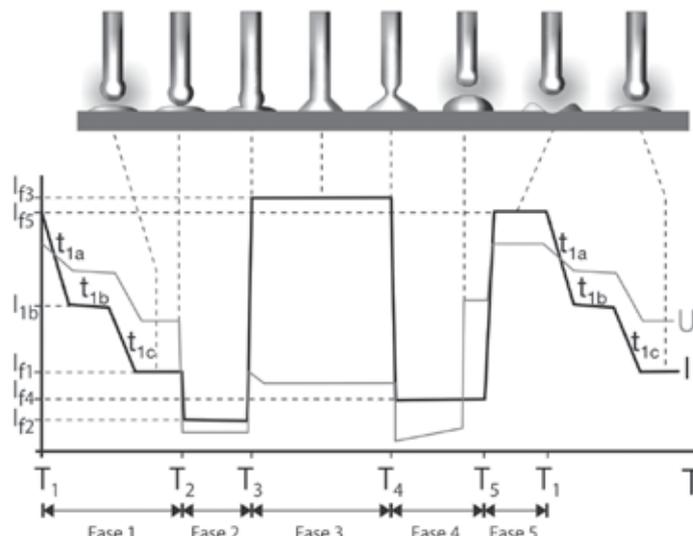


Figura 2. Oscilograma esquemático do sistema LABSOLDA

arco de maneira muito brusca (intervalo T4 a T5), diminuindo-se drasticamente os salpicos finos. O tempo de permanência neste valor é da ordem de 1,0 ms, valor este necessário para garantir a abertura do arco em corrente baixa. No gráfico, o instante de reabertura do arco é realçado pela defasagem da tensão em relação à corrente. Na seqüência, um novo pulso de corrente é dado com a finalidade de formação de uma nova gota. Este

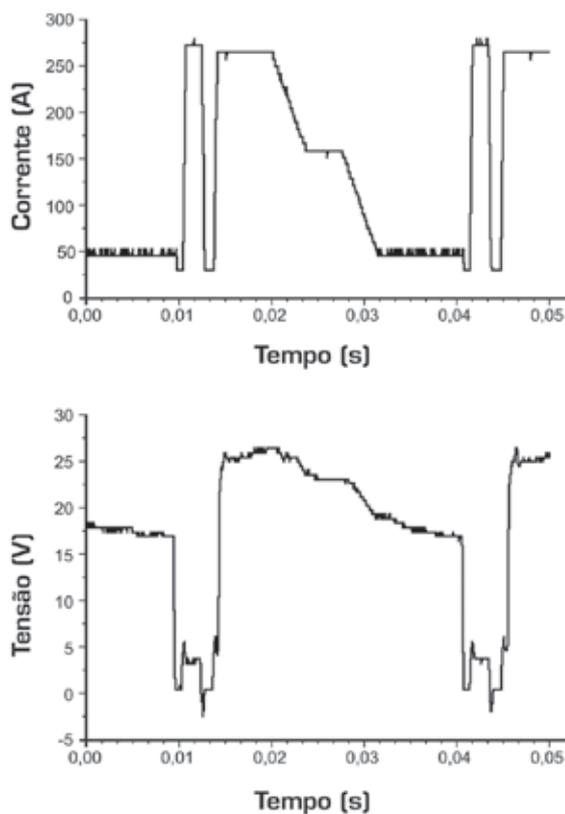


Figura 3. Oscilograma real para o caso do CCC em uma soldagem de raiz com arame ER70S-6 de 1,2 mm, gás argônio com 25% de CO₂ e demais dados, conforme a Tabela 1

é o intervalo T5 a T1 da Figura 1. Sua amplitude e tempo são responsáveis pela manutenção de um diâmetro de gota constante ao longo da solda, independentemente de variações na distância bico de contato-peça (DBCP). Para isso, é aplicado um sistema de auto-controle do tempo desta fase, de acordo com a DBCP medida na fase de curto-circuito. A DBCP deve, então, ser avaliada continuamente, o que pode ser realizado por intermédio da leitura da tensão na referida fase, pois é nesta que se tem uma situação mais estabilizada devido à ponte metálica. A obtenção

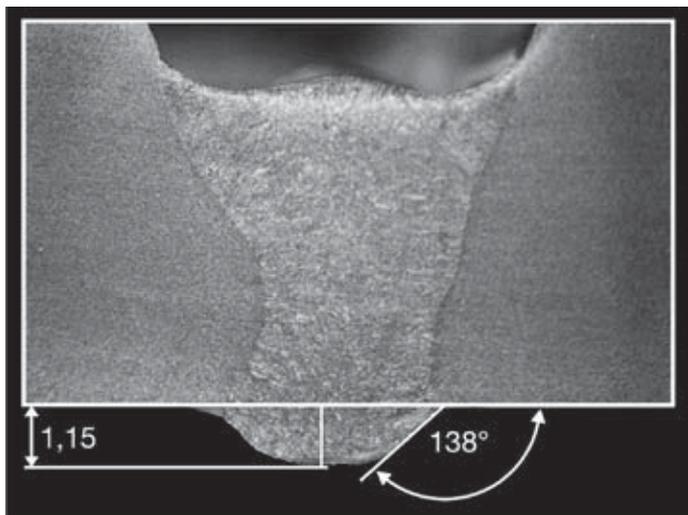


Figura 4. Passe de raiz executado com o procedimento conforme a Tabela 1 e oscilograma da Figura 3

de uma adequada correlação para servir ao citado auto-controle é realizada por ensaios variando-se a DBCP e regulando-se o tempo T5 a T1 para uma corrente arbitrada de tal maneira que se obtenha o mesmo diâmetro de gota. O ciclo completo da transferência termina com a redução da corrente (Instante T1 da Figura 1) a um valor considerado adequado até que a gota toque na peça. A maneira como esta corrente decresce é no sistema STT uma regulagem denominada TAIL-OUT, e é equivalente a uma regulagem de indutância [1]. Esta regulagem influi na frequência de destacamento, e, por consequência, no volume e conteúdo calorífico das gotas com as respectivas ações sobre a estabilidade e geometria do cordão de solda.

O objetivo deste trabalho é, além de uma contribuição ao entendimento físico deste tipo de tecnologia, apresentar uma versão particular da mesma, desenvolvida no Laboratório de Soldagem da UFSC (LABSOLDA). São realizadas considerações e análises de detalhes das grandezas envolvidas, incluindo potência elétrica e dinâmica dos dois sistemas apresentados.

2. Desenvolvimento de um sistema de controle da transferência metálica (CCC)

No sistema desenvolvido pelo Laboratório de Soldagem da UFSC (LABSOLDA), o qual foi denominado CCC (Curto Circuito Controlado), as variáveis que são controladas têm suas fundamentações de controle baseadas em critérios um pouco distintos do sistema STT. Para uma adequada orientação, apresenta-se na Figura 2 o oscilograma idealizado do sistema



Figura 5a - Procedimento de soldagem com o sistema convencional



Figura 5b - Procedimento de soldagem com o sistema CCC

LABSOLDA. A detecção do curto-circuito é pela simples observação da tensão entre bico de contato e peça. O fim do tempo do pulso para haver o estrangulamento da ponte fundida depende da detecção da iminência de destacamento da gota. No sistema STT, isso é realizado por intermédio da monitoração da taxa de variação da tensão. No sistema CCC é por intermédio da monitoração da resistência do contato, o que é realizado pela divisão da leitura da tensão pela corrente. O parâmetro K_{rab} , constante da Tabela 1, é o coeficiente de comparação da resistência elétrica da ponte metálica nos instantes iniciais do contato e na iminência do destacamento. Ou seja, se o K_{rab} está regulado em 120, como é o caso da experiência retratada pelo oscilograma da Figura 3, significa que, quando a resistência instantânea for 20% superior à inicial, o sistema manda descer a corrente para o valor retratado pelo intervalo T4 a T5. Todas as outras variáveis são definidas em direta dependência da velocidade do arame em associação com o seu diâmetro, resultando em uma corrente média adequada a factibilidade do processo.

Como já citado na introdução, as vantagens dos sistemas

de transferência metálica por curto-circuito com controles de corrente são inerentes à controlabilidade do passe de raiz com formatos adequados (Figura 4) e a drástica redução da quantidade de salpicos, conforme mostra as fotos comparativas de um procedimento de soldagem com o sistema convencional (Figura 5a) e sistema CCC (Figura 5b).

Tabela 1- Dados do procedimento para soldagem do passe de raiz (Figura 4)

Variável	Valor adotado
Corrente da fase 1 (If1)	50 A
Tempo da fase 2 (tf2)	0,5 ms
Corrente da fase 2 (If2)	30 A
Corrente da fase 3 (If3)	270 A
Krab	120
Tempo da fase 4 (tf4)	1 ms
Corrente da fase 4 (If4)	30 A
Corrente da fase 5 (If5)	260 A
Tempo da fase 5 (tf5)	Dinamicamente auto-controlada
Tempo da primeira rampa (t1a)	3,2 ms
Corrente do patamar 1 (I1b)	160 A
Tempo do patamar (t1b)	4,2 ms
Tempo da segunda rampa (t1c)	3,5 ms
Tensão de curto-circuito (Ucc)	12 V
Velocidade de arame (Va)	3 m/min
Vazão de gás	13 l/min

3. Análise Dinâmica das Formas de Onda

Em muitas situações a análise de fenômenos físicos é uma tarefa que impõe aos investigadores um profundo conhecimento metrológico, associado aos fundamentos da especialidade em questão. Assim, para quem investiga os processos de soldagem a arco, é mister que conheça os fundamentos de eletricidade, já que a ferramenta de execução do processo, o arco voltaico, é totalmente dependente de variáveis elétricas. Quando na análise que se está procedendo não é importante a dinâmica de variação das grandezas físicas, a tarefa é sempre mais simples. Entretanto, isto não é o caso em questão. A rápida derivada da corrente nos instantes de sua redução na fase de curto-circuito e na fase de reabertura do arco (acima de 800 A/ms), impõe drástica atuação da fonte de soldagem. Esta atuação é realizada sobre a tensão da fonte: se em um instante a corrente se encontra em um determinado valor, por exemplo 300 A, na fase 3 da Figura 1, e é desejado que a mesma caia para um valor de cerca de 30 A, correspondente à fase 4 de reabertura do arco, a fonte de soldagem tem de impor uma força eletromotriz de sinal contrário para vencer a inércia do circuito. Esta inércia é o que é denominada de indutância do circuito e é causada pelos próprios cabos que conectam a fonte de soldagem ao arco. Assim sendo, faz muita diferença, nestes casos de elevada dinâmica, o local onde é captada a tensão para a monitoração.

Para exemplificar, apresenta-se na Figura 6 um oscilograma

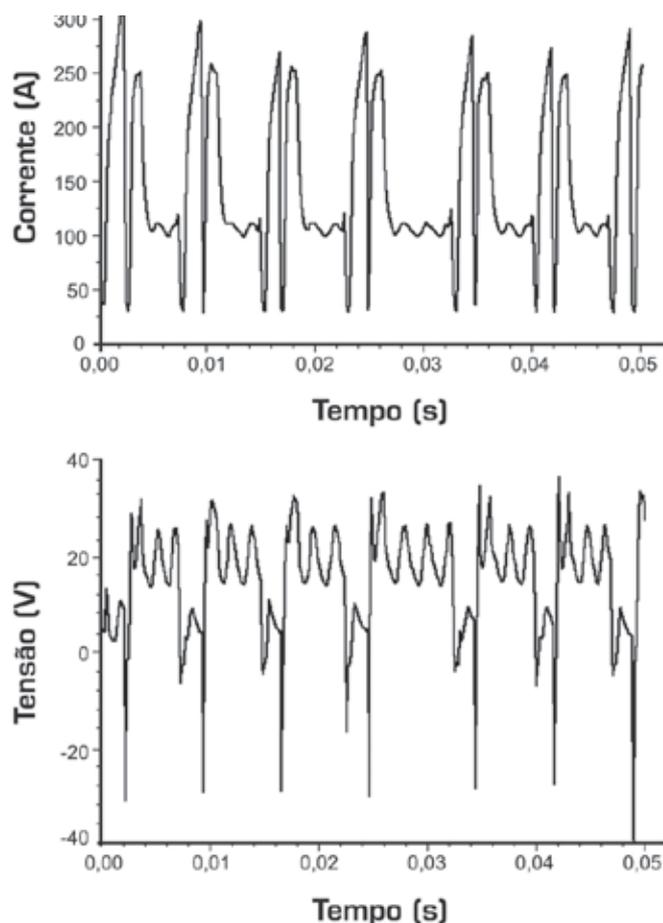


Figura 6 – Oscilograma de uma soldagem executada com o sistema STT com velocidade de arame de 3 m/min e gás argônio com 25 % de CO₂

de uma soldagem com o sistema STT com dados idênticos aos da Tabela 1. Verifica-se que para o caso do instante de reabertura, a tensão que a fonte impõe em seus terminais atinge mais de 30 V negativos. Este valor só é observado se a captura do sinal de tensão for realizada imediatamente aos bornes da fonte de soldagem e se o sistema de aquisição de dados tiver frequência adequada de captura. Para as experiências aqui conduzidas, a frequência de aquisição do sistema de medição foi de 5 kHz, a qual é ainda baixa para tal análise. Esta frequência de aquisição neste valor pode também ser a causa da ondulação em baixa frequência que aparece no oscilograma da tensão nas fases positivas.

Observando-se o oscilograma de tensão da Figura 3, referente ao sistema CCC, observa-se somente um pequeno valor negativo de tensão, da ordem de 2,5 V. A diferença em relação ao caso do STT não se deve à diferença de concepção ou de dinâmica da fonte, mas sim é consequência do local de conexão do terminal de leitura da tensão. No caso da Figura 3, a aquisição foi diretamente na tocha, eliminando-se a quase totalidade de indutância do circuito. Entretanto, para as elevadas dinâmicas de variação da corrente, uma pequena dimensão de condutor dentro da pistola até o bico de contato, é suficiente para armazenar uma tensão negativa. A taxa de variação de corrente no caso do CCC

foi de 31 A/ms no instante do curto-circuito e de 840 A/ms para o instante da reabertura do arco.

Uma outra questão importante é a implicação que as formas de onda exercem sobre os valores médios e eficazes das correntes, o que tem influência direta sobre o conteúdo calorífico das gotas e sobre a potência do arco e, conseqüentemente, sobre a energia entregue a peça. Esta última implica em erros constantes em qualificações de procedimentos de soldagem, uma vez que é frequentemente calculada considerando-se os valores médios ou eficazes da corrente e da tensão, quando o correto é o cálculo considerando os valores instantâneos das citadas variáveis [4]. Se os cálculos fossem realizados a partir dos valores médios de corrente e tensão, ter-se-ia para o caso do CCC, uma potência de 2308 Watts, uma vez que a corrente média foi de 135 A e a tensão média foi de 17,1 V. Se os cálculos fossem a partir dos valores eficazes, a potência seria de 3214 Watts, uma vez que a corrente eficaz foi de 164 A e a tensão eficaz de 19,6 V. Para o caso do STT, os valores seriam de 141 x 15,9, considerando os valores médios, o que resulta em 2242 Watts e 156 x 18,6, considerando os valores eficazes, o que resulta em 2902 Watts. Entretanto, pelo procedimento correto, considerando-se os valores instantâneos, tem-se 2718 Watts para o CCC e 2251 Watts para o STT.

4. Conclusões

O desenvolvimento de um sistema de soldagem acoplado à fonte de soldagem universal desenvolvida pelo LABSOLDA (INVERSAL) se mostrou capaz de atender aos objetivos de controlar a transferência metálica por intermédio da atuação direta na forma de onda da corrente. Tanto o controle do passe de raiz, como a diminuição da salpicagem foram metas adequadamente alcançadas, mostrando a diversidade aplicativa do equipamento.

Os ensaios comparativos com o sistema STT não tiveram, neste primeiro momento, o objetivo de uma comparação de performance com respeito à controlabilidade do passe de raiz e redução de respingos, mas tão somente mostraram as diferenças nas formas de onda e as nuances resultantes disto: frequência de destacamento de gota maior no STT do que no CCC, implicando em gotas maiores neste último para as condições ensaiadas. O CCC apresentou a menor corrente média (135 A) e a maior corrente eficaz (164 A), uma diferença de 29 A, enquanto que no STT, a diferença é de somente 15 A. Tal diferença é fundamentalmente devido ao fato de que no CCC há uma grande diferença de tempos de permanência em correntes elevadas (em torno de 260 A) em relação a tempos de permanência em correntes baixas, na fase que antecede o curto-circuito (Fase 1 da Figura 2, que corresponde a pouco menos de 40 A na Figura 3). Esta fase no sistema STT corresponde a cerca de 110 A, nos ensaios realizados.

Uma atenção especial tem que ser dada ao cálculo da potência do arco ao se estudar os efeitos sobre penetração e molhabilidade neste tipo de tecnologia. Nos casos aqui apresentados, o erro para o sistema STT, seria pequeno ao se calcular pelos valores médios de corrente e tensão (2242 W) contra 2251 Watts pela maneira correta (por intermédio dos valores instantâneos de corrente e tensão), mas, o mesmo já não acontece no caso do CCC, que se

obtem 2308 Watts por intermédio dos valores médios de corrente e tensão contra 2718 Watts da maneira correta.

Embora, o presente trabalho não seja um compêndio de dados para aplicação industrial, ele atingiu o objetivo de tornar transparente a questões básicas conceituais para o entendimento e análise dos sistemas existentes de controle da transferência metálica por curto-circuito com atuação na forma de onda da corrente. A partir deste trabalho, espera-se o desencadeamento de outros a fim de aumentar a base de conhecimento sobre o assunto. É importante que se cite que não somente existem os dois sistemas aqui apresentados, CCC e STT, mas sim é de conhecimento a existência de outros fabricantes de sistemas de grande semelhança. Por último, é interessante mencionar que o LABSOLDA dispõe de um sistema computadorizado, denominado SAC (Sistema Avançado de Controle), que permite a versatilização de ensaios em qualquer forma de onda. Informações sobre este sistema deverá ser tema de outra publicação.

5. Referências Bibliográficas

- [1] DUTRA, J. C. MIG/MAG – Transferência Metálica por Curto-Circuito – Fontes de Soldagem versus Gases do Arco. Revista Soldagem e Inspeção.
- [2] SILVA, R. H. G. – Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-Circuito Controlado Aplicada ao Passe de Raiz. 2005. 113 f. Dissertação de Mestrado- Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis.
- [3] STAVA, E. K. Technology Gets to the Root of Pipe Welding . Lincoln Electric Knowledge Articles. Cleveland. p. 3. Disponível em www.lincolnelectric.com .
- [4] NASCIMENTO, A. S., BATISTA, M. A., SCOTTI, A., NASCIMENTO, V. C - Avaliação dos Métodos de Cálculo de Potência Elétrica em Soldagem a Arco e as Conseqüências sobre as Previsões Geométricas, Térmicas e Metalúrgicas da Junta, Revista Soldagem e Inspeção, Vol. 12, nº 2, pág. 97-106, abril/junho 2007.