

Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

APORTE TÉRMICO, PENETRAÇÃO E RENDIMENTO DE DEPOSIÇÃO NA SOLDAGEM MIG/MAG EM CURTO-CIRCUITO CONTROLADO

Régis Henrique Gonçalves e Silva¹

¹ LABSOLDA / UFSC, Campus Universitário, CP 476, Florianópolis, SC,
regis@labsolda.ufsc.br

Resumo – Atualmente, o passe de raiz na construção de linhas dutoviárias petrolíferas de parede espessa é realizado com o processo Eletrodo Revestido (ER), que tem características inferiores de produtividade. O processo MIG/MAG em Curto-Circuito Controlado (CCC) consiste numa operação semi-automática e sem escória, conferindo maior produtividade e propriedades satisfatórias ao passe de raiz. Dada a significativa influência da soldagem sobre o cronograma e, então, sobre o elevado custo das obras, justifica-se o estudo, geração de conhecimento e o desenvolvimento desta tecnologia, no intuito de disponibilizá-la às empresas nacionais a baixo custo, incrementado sua competitividade num setor globalizado como é o do Petróleo. O CCC obtém as vantagens da transferência metálica por curto-circuito e evita seus inconvenientes, viabilizando seu uso no passe de raiz em dutos, através do controle da corrente, imposta em uma forma de onda otimizada, proporcionando estabilidade ao processo de soldagem e à poça de fusão, com baixo tempo de treinamento do soldador. Devido à criticidade da solda de raiz, em termos de qualidade e geometria, se fez necessária a investigação de aspectos de penetração, aporte térmico e rendimento de deposição metálica, aqui analisada qualitativamente através de imagem, no processo CCC.

Palavras-Chave: dutos; transporte de petróleo e gás; passe de raiz

Abstract – Currently, the root pass welding in the construction of thick walled oil pipelines is performed with the Coated Electrode process, which has lower productivity characteristics. The Controlled Short-Circuit MIG/MAG process (CCC) consists in a semi-automatic, slag free operation, delivering higher productivity and satisfactory properties to the root weld. Due to the significant influence of the welding over the chronogram and than over the high construction costs, the study, knowledge generation and development of this technology is justifiable, with the aim of make it available to national companies at low price, increasing their competitiveness in a globalized marketplace such as the oil industry. The CCC obtains the advantages of the short-circuiting metal transfer and avoids its drawbacks, enabling its application in the pipeline root pass welding, by means of the current control, imposed in a optimized waveform, providing process and weld pool stability, with small welder training time. Due to the weld pass criticality in term of quality and geometry, an investigation on penetration, heat input and metal deposition efficiency (qualitative image analysis) aspects was necessary for the CCC.

Keywords: pipelines, oil and gas transport, root pass

1. Introdução

O processo de soldagem CCC (Silva, 2005) (MIG/MAG em Curto-Circuito Controlado), desenvolvido no LABSOLDA/UFSC, se trata de uma variante do MIG/MAG, na qual a transferência metálica se dá por curto-circuito e a variável de controle é a corrente, imposta numa forma de onda como a da Figura 1.

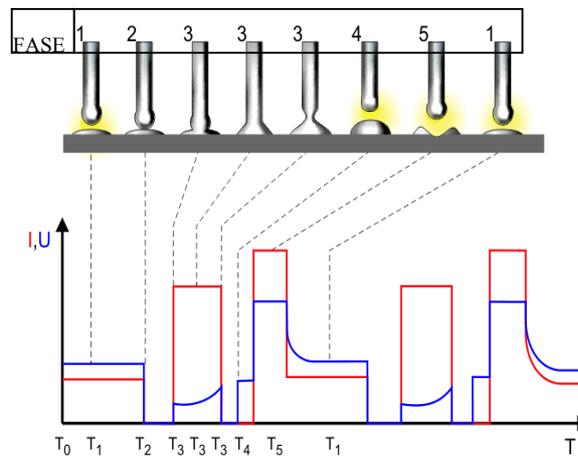


Figura 1 – Forma de onda do CCC. (I=corrente, U=tensão, T= tempo)

Pouca informação está disponível sobre os mecanismos de penetração na soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito. A maioria dos autores aborda a transferência em voo livre. Já as fontes de informação sobre sistemas MIG/MAG similares ao CCC (Silva, 2005) (chamados TMCCC, de transferência metálica por curto-circuito com controle de corrente) apresentam informações vagas e contraditórias em relação à atuação dos mecanismos de penetração presentes. No entanto, todos foram considerados, a fim de, em conjunto com os resultados dos ensaios, se levantarem hipóteses mais fundamentadas sobre a penetração no CCC. Algumas fontes de informação, por exemplo, relacionam diretamente uma redução da penetração com aumento da DBP e L (Aichele, 2002) Na realidade, o que acontece é uma redução de corrente média de soldagem, tendo os efeitos de redução na energia à peça.

Quanto ao aporte térmico AT (ou *heat input*), tradicionalmente, é descrito como a quantidade de calor imposta à peça em uma operação de soldagem e calculado pela equação:

$$AT = I_m \times U_m / V_s$$

onde se considera I_m como a corrente média e U_m a tensão média da solda, e V_s a velocidade de soldagem. Esse método é acometido de erro, no entanto, tanto quanto ao seu próprio cálculo, pois a potência média desenvolvida pelo arco numa solda é dada, corretamente, considerando-se valores instantâneos de corrente e tensão (Dutra, 2004; Correa, 1999), assim como quanto à real contribuição desta potência para a energia absorvida pela peça, além de que, em sua própria definição, esta expressão representa a potência nominal fornecida, sem considerar o rendimento do processo (Kou, 2003). Existe até a afirmação de que o aporte térmico é calculado pela área abaixo da curva de corrente por tempo (Eassa, 1983), o que ajuda a evidenciar o fato de que este é um conceito que deve ser mais bem definido e padronizado. Na visão do autor, cálculos mais efetivos do aporte térmico são dados quando a energia absorvida pela peça é medida diretamente, como, por exemplo, através de calorímetros.

Sendo uma das premissas dessa tecnologia, o CCC reduz drasticamente o nível de respingos, eliminando tempos de retrabalho e limpeza de dispositivos de fixação, ora utilizados. Aumenta-se o conforto e segurança do soldador, pois se elimina o metal em alta temperatura voando pelo ambiente. Aumenta-se o rendimento de deposição, pois menos material é perdido em forma de respingo. Melhora-se a visualização da poça, favorecendo seu controle pelo soldador, o que é acentuado pela menor geração de fumos atribuída ao CCC.

O trabalho busca, então, elucidar questões acerca do aporte térmico, penetração e geração de respingos no CCC, comparando-o com o MIG/MAG convencional e ER.

2. Objetivos e Justificativas

O presente trabalho tem como objetivo global a geração de conhecimento sobre os mecanismos de penetração atuantes na soldagem MIG/MAG CCC, assim como sobre os aspectos do real aporte térmico sobre as peças soldadas. Tais conhecimentos serão aplicados no desenvolvimento de procedimentos e na determinação de regulagens do processo CCC em soldas de elevada criticidade, como o passe de raiz em dutos de parede espessa da indústria do Petróleo e Gás.

Também será analisada a significativa redução na geração de respingos obtida durante a soldagem CCC, comparando-o com os processos ER (utilizado no passe de raiz) e MIG/MAG convencional em curto-circuito, numa tentativa de quantificar essa redução pela análise de fotografias digitais com maior tempo de aquisição de imagem.

Estes objetivos se justificam pela necessidade, em vista da expansão da malha dutoviária demandada pelo aumento da produção de petróleo e gás, de um processo mais produtivo na soldagem de dutos, o CCC. Para isso, o processo CCC deve ter suas características e vantagens bem compreendidas e consolidadas. Ganhos que podem advir da aplicação do CCC na indústria naval também justificam seu desenvolvimento.

3. Estudo sobre a penetração no CCC

Uma das vantagens e funções atribuídas aos sistemas MIG/MAG TMCCC é o controle da penetração, independentemente da velocidade de material. No MIG/MAG convencional em transferência metálica por curto-circuito, sabidamente isto não é possível, pois para maior penetração (mantendo-se os parâmetros constantes) se necessita maior corrente média, demandando mais material de adição aportado. A corrente na fase de arco é grande candidata à responsável pela determinação da penetração (Silva, 2005). No entanto, Baixo (1999) concluiu que pequenas alterações na corrente de arco acarretam em grandes alterações no volume da gota fundida, tendo com consequência direta a instabilidade da transferência, aconselhando, então, que se mantenha a corrente de arco imutável.

Assim, foi decidido que se estudaria a penetração alterando-se o tempo da fase 5 e conseqüentemente, o volume da gota metálica.

Em sua Tese de Doutorado, Baixo (1999) validou a relação

$$V_f = C \times I_f^5 \times t_{f5} \quad (1)$$

onde V_f é o volume da gota e C uma constante dependente da DBP e da velocidade de arame. Desta maneira, fazia-se uma solda estável, obtendo-se um valor para C (média de três medições), e, a partir dele, se variava o V_f , pois os outros valores permaneceram constantes.

Ao se realizarem os ensaios, no entanto, verificou-se que existia contribuição considerável das outras fases de arco aberto em V_f . Isso motivou o desenvolvimento de um programa (CALCVF) em linguagem C++, do qual se extrai a contribuição de cada fase de arco aberto para a formação do V_f , utilizando a relação acima. Assim, para o caso da forma de onda adotada, se adotou a seguinte relação:

$$V_f = C(I_f^5 \cdot t_{f5} + \sum_0^{t_{d6}} I^2 \cdot t + I_f^6 \cdot t_{f6} + \sum_0^{t_{d1}} I^2 \cdot t + I_f^1 \cdot t_{f1}) \quad (2)$$

As variáveis de tempo e corrente utilizadas são fornecidas ao programa CALCVF, assim como o V_f , determinado do ensaio de solda. Aplicando a equação acima, ele retorna o valor de C , o qual é, então, utilizado para a determinação do t_{f5} a ser utilizado para se obterem outros valores de V_f desejados. Mais testes devem ser realizados com esses programas, para sua completa validação.

Mais tarde, levantou-se uma dúvida acerca da validade da relação acima para correntes abaixo de cerca de 150 A, pois os resultados de Baixo (1999) se deram em correntes neste valor. No entanto, já se tinha verificado que a contribuição da rampa 1 e da fase 1 para V_f era muito pequena em relação às outras fases. Então, estudos mais criteriosos sobre esse assunto não foram realizados, considerando-se que, ao final da fase 6, o V_f já estava determinado. De fato, o que acontece é que o valor de C cai com o aumento do volume de gota. Baixo (1999), observou uma associação entre uma menor eficiência de transmissão de calor da interface arco/gota para a frente de fusão para maiores volumes de gota. Ou seja, o fato de se desprezar o V_f formado na fase 1 e rampa 1 pode ser, também, justificado pela redução de C conforme a gota cresce.

O volume da gota foi, então, variado para verificação de sua influência na penetração. Lembra-se que, para isso, de todos os parâmetros e variáveis, apenas o t_{f5} foi alterado. O resultado mostrado abaixo, na Figura 2 revela maiores penetrações para maiores volumes. Em face disso, se levanta a hipótese de que, para maiores volumes, onde há um maior período de arco e maior tempo em corrente alta (I_f^5), há um maior efeito do vortex, aumentando a eficiência na transferência de calor para o material de base, tanto pela gota, quanto pelo próprio arco.

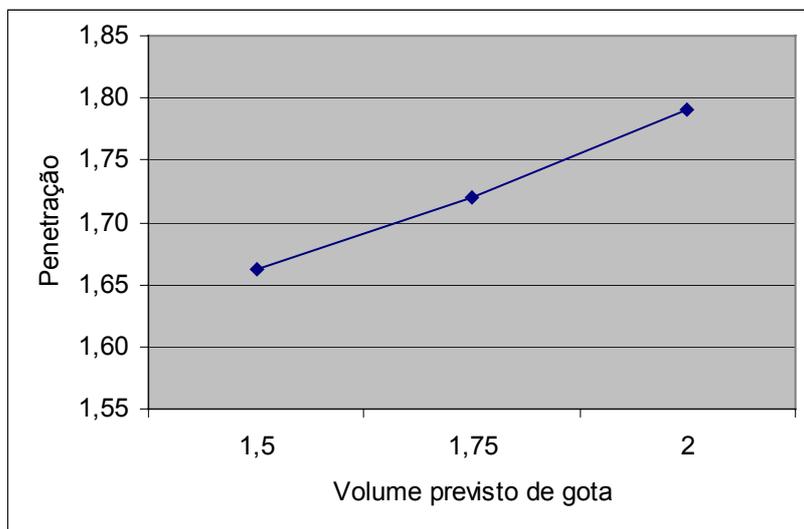


Figura 2 – Efeito do volume da gota (e maior tempo de arco) sobre a penetração.

4. Estudos sobre o aporte térmico no CCC

É bastante citado na literatura o menor aporte térmico de sistemas MIG/MAG TMCCC em relação ao processo convencional. São mencionadas grandes diferenças, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Quantificações de aporte térmico encontradas na literatura (Stava, 2000; Deruntz, 2003).

Processo	Aporte térmico	
MIG/MAG TMCCC	0,5 a 0,8 kJ/mm	0,3 kJ/mm
MIG/MAG convencional, em transferência metálica por curto-circuito	0,8 a 2,0 kJ/mm	0,98 a 1,2 kJ/mm

Não se diz, porém, como esses valores foram calculados, ou a que se devem estes menores valores quando há controle de corrente. Cogita-se que possa ter sido utilizada uma velocidade de soldagem mais alta para o MIG/MAG TMCCC, pois esta é uma vantagem freqüentemente mencionada na literatura.

Foi realizada, então, uma comparação entre as potências geradas em ambos os processos. Foi considerado adequado manter como parâmetros de comparação a velocidade de arame, e velocidade de soldagem, mantendo-se um volume médio da gota similar, em soldas estáveis. Visualiza-se na Figura 3 (potência gerada em cada processo) e na Tabela 2 (potências médias) a confirmação de que a potência é maior no processo convencional.

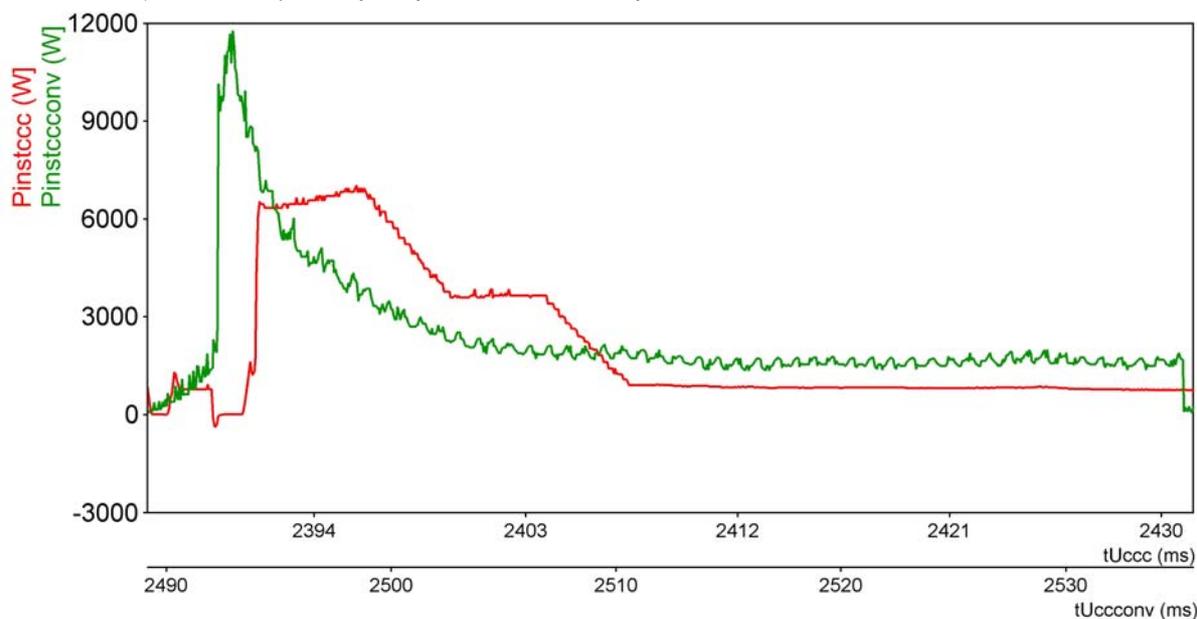


Figura 3 - Potência instantânea ao longo de um período de transferência, incluindo o curto-circuito. Pinstccc: potencia do CCC; Pinstcccconv: potencia do MIG/MAG convencional.

Tabela 2 - Potências médias nos tempos, no tempo de arco e no período de uma transferência de gota.

Processo	Potência média (W)	
MIG/MAG convencional em transferência metálica por curto-circuito	arco	2397
	período	2397
CCC	arco	2307
	período	2116

Mas, por outro lado, não é tão superior como sugere a literatura acima citada. O fato é que o processo MIG/MAG convencional apresenta menor eficiência que o MIG/MAG TMCCC. Explica-se: no primeiro, a variável controlada é a tensão, sendo a corrente no período de arco, no qual a gota se forma, dependente da mesma. Então, depois de formada a gota, a corrente continua obedecendo à tensão, se mantendo em um nível onde há sobreaquecimento da gota e vaporização metálica (50 % maior, Stava, 2000), que é diretamente proporcional à temperatura da superfície. No segundo, a corrente é controlada, ou seja, depois de formado o volume de gota, a corrente é reduzida a um nível onde há menos sobreaquecimento e conseqüente menor desperdício de energia por evaporação. Ou seja, teoricamente, também o calor levado à peça pela gota seria menor. Medições com calorímetros seriam mais adequadas para avaliar esta questão. Do exposto, conclui-se que, realmente, a expressão (1) não reflete adequadamente o aporte térmico, pois os processos têm eficiências diferentes. Dados da regulagem dos ensaios estão na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados dos ensaios acima.

MIG/MAG convencional		CCC	
Va (m/min)	3	Va (m/min)	3
Vs (cm/min)	30	Vs (cm/min)	aproximadamente 30
Uref (V)	23	Gás/vazão (l/min)	Ar + 25% CO ₂ /13
Gás/vazão (l/min)	Ar + 25% CO ₂ /13	tipo	Semi-automático
tipo	robotizado		

5. Redução na geração de respingos obtida pelo CCC

No CCC, através de um sistema realimentado (Silva, 2005), os momentos cruciais para formação de respingos em transferência metálica por curto-circuito são monitorados e variáveis de soldagem são controladas, de modo que se inibam os mecanismos de geração dos respingos. Estes momentos são o início e o fim do curto-circuito. Como se vê na Figura 4 a), no caso do MIG/MAG convencional, que não possui esse controle, os respingos são inerentes ao processo. Já no CCC com atuação somente no início do curto-circuito (letra b)), há uma redução nos respingos, mas não total. A letra c) mostra o CCC atuando completamente.

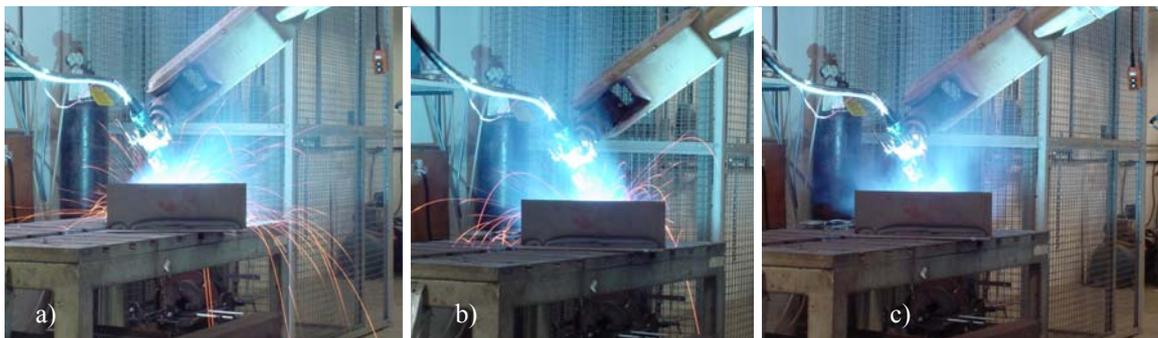


Figura 4 - Geração de respingos: a) MIG/MAG convencional por curto-circuito; b) CCC reigitação em corrente alta; c) CCC, reigitação em corrente baixa.

Foi realizada, também, uma comparação na soldagem conduzida pelo soldador, do CCC em relação ao ER. A Figura 5 mostra a grande diferença entre ambos os processos. Ressalta-se, aqui, que foi necessário um tempo consideravelmente menor de treinamento do soldador para o CCC em relação ao ER.

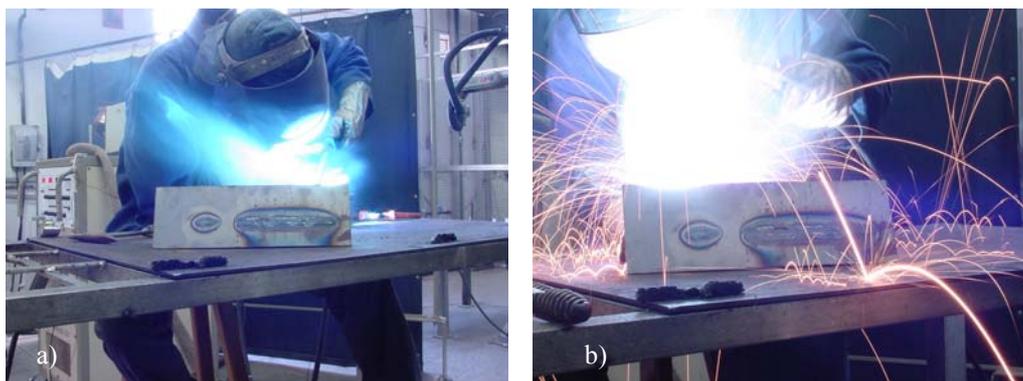


Figura 5 – Ausência de respingos em CCC (a) e respingos em ER (b)).

6. Conclusões

O cálculo do aporte térmico na soldagem não pode ser efetuado pelo método clássico, utilizando-se valores médios de tensão e corrente, devido, principalmente, aos aspectos físicos da transferência metálica e à diferença de eficiência térmica de cada processo distinto. Pôde-se observar, no entanto, que o processo CCC realmente gera menor potência que o MIG/MAG convencional, mantendo-se critérios fixos. Há menor superaquecimento da gota no caso do CCC.

A penetração é determinada, no processo CCC, pelo tempo de arco aberto, o que influencia o tamanho médio das gotas metálicas transferidas. Assim, existe a possibilidade de regulagem da penetração através da manipulação desse tempo. Ressalta-se, no entanto, que regulagens adicionais podem ser necessárias para se manter a estabilidade da operação.

É clara a redução de respingos obtida com o processo CCC em relação ao MIG/MAG convencional em curto-circuito e em relação ao ER, utilizado freqüentemente para o passe de raiz. Isto acarreta em vantagens notórias na construção de *pipelines*: maior rendimento de deposição, maior conforto e segurança para o soldador, maior facilidade de soldagem, menores tempos secundários de limpeza, menos susceptibilidade a defeitos, maior produtividade.

7. Referências

- AICHELE, G. The contact tube distance in gas shielded metal arc welding – How does It work ? *Welding & Cutting*. Duesseldorf, fev. 2002. p. 80-83.
- BAIXO, C. E. I., Estudo da soldagem Mig/Mag pela técnica hiperbárica a seco 1999.169 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – UFSC, Florianópolis.
- CORRÊA, M. A. Diretrizes de Projeto e Qualificação Metrológica de Sistemas de Medição de Grandezas Elétricas em Processos de Soldagem a Arco. 1999. 77 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – UFSC, Florianópolis.
- 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.
- DUTRA, J. C.. Procedimento computadorizado de determinação e controle das variáveis na soldagem MIG/MAG. 1989. 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – UFSC, Florianópolis.
- EASSA, H. E. A High Performance Welding Power Source and its Application. *IEEE*. p. 1241-1244. 1983.
- KOU, S. *Welding Metallurgy*. 2.ed. Hoboken: John Willey and Sons, 2003, 461p
- SILVA, R.H.G. Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito controlado aplicada ao passe de raiz. 2005, 127f. Dissertação (Mestrado em eng. Mecânica) UFSC, Florianópolis .
- STAVA, E. K. et al. Das GMAW-STT-System: Ein Fortgeschrittenes Schweißsystem für Wurzelrohrschweißen und Blechschweißen. *DVS Report*. p. 71-79 2002.