

Comparação do Processo MIG/MAG em Transferência por Curto-Circuito com Controle de Corrente (CCC) com o Processo STT na Soldagem de Passes de Raiz em Dutos

(Comparison of Controlled Short-Circuiting MIG/MAG Welding Process (CCC) with STT Process for Pipelines Root Pass Welding)

Hellinton Direne Filho¹, Régis Henrique Gonçalves e Silva¹, Jair Carlos Dutra¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Eng.Mecânica/LABSOLDA, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, hellinton@labsolda.ufsc.br.

Resumo

Foram realizadas comparações dos processos convencional, CCC e STT, para realização de passe de raiz nas posições vertical descendente e ascendente. Utilizando um sistema de aquisição de dados juntamente com filmagens em alta velocidade, foi possível aperfeiçoar o processo de soldagem CCC para que este fosse aplicado na soldagem de passe de raiz para a soldagem de dutos, com ganhos em confiabilidade e qualidade nas uniões.

Palavras-chave: CCC. STT. Dutos. Passe de Raiz.

Abstract

Were compared the standard GMAW, CCC and STT processes implementation of root pass welding in descending and ascending vertical positions. Using a data acquisition system with a high speed camera was possible improve the CCC welding process to application in root pass welding of real parts of pipelines, increasing in reliability and quality of the joints.

Key-words: CCC. STT. Pipelines. Root Pass.

1. Introdução

Com interesse no aumento da produtividade, confiabilidade e qualidade na união de dutos para indústria do petróleo, por intermédio de pesquisa, desenvolvimento e inovações tecnológicas, está sendo conduzida uma linha de pesquisa voltada a soldagem de raiz utilizando o processo MIG/MAG em Transferência por Curto-Circuito com Controle de Corrente, designado pela sigla CCC.

Atualmente o passe de raiz é realizado com o processo ER (eletrodo revestido) ou TIG alimentado. Com o uso do ER as vantagens estão ligadas a um baixo custo de produção, devido ao baixo custo dos equipamentos, e a facilidade de deslocamento destes equipamentos, podendo ser utilizados em locais de difícil acesso, já as desvantagens estão ligadas as baixas velocidades de soldagem, pela incapacidade de automatização, e às descontinuidades dos cordões de solda, causadas principalmente por inclusões de escória. Com o uso do TIG alimentado a vantagem é basicamente a qualidade do cordão de solda, por exemplo, devido a sua geometria de superfície plana, que facilita a execução dos passes de preenchimento, já as desvantagens estão ligadas a dificuldade de automatização - com o processo realizado manualmente perde-se em produtividade e a sensibilidade do processo a ambientes hostis.

Com o desenvolvimento de processos MIG/MAG com controle de corrente as vantagens estão ligadas ao menor aporte térmico e menor nível de tensões residuais, menores gasto de energia, menor custo de gás de proteção, por utilizar maiores concentrações de CO₂ ou até mesmo CO₂ puro, a soldagem fora de posição, a total confiabilidade na soldagem de passe de raiz, a uma melhor geometria do cordão de solda e ao menor nível de respingos. [3,5,6] Além de que se pode utilizar um único equipamento para a execução dos passes de raiz e dos passes de preenchimento, ganhando no transporte e tempo de troca de equipamento.[1]

No intuito de aplicar industrialmente estas vantagens à soldagem de passes de raiz vem-se aprofundando no desenvolvendo e aperfeiçoamento do processo CCC, estudando sua aplicação e automatização na soldagem de dutos.

Nos estudos realizados, foram avaliadas diferentes posições de soldagem e comparadas com os processos de soldagem STT (*Surface Tension Transfer*) e o processo MIG/MAG Convencional, objetivando uma aplicação confiável, primeiramente com soldagem e avaliações em corpos de prova e posteriormente a aplicação em peças semelhantes às peças reais.

Os processos foram monitorados com filmagens de alta velocidade e avaliações de oscilogramas de tensão, corrente e potência e velocidade de alimentação. Os resultados das uniões foram avaliados visualmente, pela observação de descontinuidades macroscópicas na superfície e na raiz do cordão de solda, e metalograficamente, pela análise das seções transversais das uniões.

2. O Processo de Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto Circuito Controlado, CCC

O processo de soldagem CCC vem sendo a tempo estudado pelo LABSOLDA, em 1999 foi citado por Baixo em sua tese de Doutorado e em 2002 na tese de Gohr, porém só teve uma aplicação prática em 2005 com a dissertação de Gonçalves e Silva.

O CCC consiste em controlar a transferência metálica por curto circuito através da imposição de uma forma de onda de corrente. A Figura 2.1 mostra as fases do processo. Este controle possibilita maior estabilidade na transferência de curto circuito, evitando a formação de respingos grosseiros e de topadas secas do arame com a peça, tornando possível realizar passe de raiz com maior confiabilidade, produtividade e qualidade.

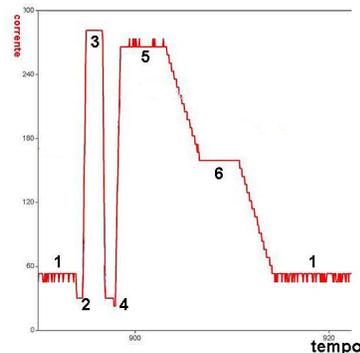


Figura 2.1. Forma de onda do Processo CCC adaptada da dissertação de Gonçalves e Silva

A corrente de base (1) corresponde a fase de arco aberto. A corrente é mantida em um valor baixo para manutenção do arco de soldagem e controle fino do aporte térmico[3].

A corrente de curto circuito (2) é a uma pequena queda imposta na corrente quando da previsão do curto circuito, ou seja, quando o valor de tensão é inferior ao valor de tensão de curto circuito regulada na fonte de soldagem. Essa queda na corrente tem a função de suavizar o assentamento da gota na poça de fusão e assim evitar respingos.[3] Quando a gota esta na iminência de tocar a peça, dependendo dos valores de corrente, forças eletromagnéticas atuam no sentido de afastar a gota da poça metálica, além de que o contato inicial entre a gota e a peça tem uma área muito pequena, aumentando a densidade de corrente na região, provocando a evaporação do metal fundido e a ocorrência de micro explosões[5].

No pico de Corrente (3) ocorre um aumento da corrente de soldagem para o destacamento da gota, que se dá pelo aumento das forças magnéticas geradas no arco de soldagem, efeito *Pinch*. O processo é constantemente monitorado pela leitura da resistência do sistema, com essa leitura é possível prever a condição geométrica da ponte metálica e assim prever a iminência do destacamento, que quando detectada leva o sistema para a fase 4 na qual a corrente é levada novamente para baixo para evitar uma explosão do material líquido no momento do destacamento e da reabertura do arco e assim evitar a formação de respingos finos (fagulhas) [6].

A corrente de pico (5) corresponde ao período no qual a corrente fica em um patamar elevado para formação de uma nova gota metálica. Essa fase também é citada como responsável pelo controle do aporte térmico, da penetração do processo e por causar uma depressão na poça de fusão e uma maior fusão do arame, distanciando a gota da poça e aumentando a altura do arco, evitando um novo curto circuito[5].

O patamar intermediário de corrente (6) é responsável por fornecer maior aporte térmico ao processo, por exemplo, para um controle da penetração do cordão de solda, também lhe é atribuído a função de amortecimento do contato entre a gota e a poça de fusão, contribuindo assim com a estabilidade do banho metálico.

Todo o controle do processo é realizado via software, alimentado pela avaliação da resistência de contato do sistema no momento do curto e pela leitura da tensão no bico de contato no momento anterior ao curto circuito, com a leitura das variáveis de soldagem realizadas nos terminais positivo e negativo da fonte de soldagem [1,5].

3. O Processo de soldagem MIG/MAG em transferência metálica por tensão superficial, STT

O STT, *Surface Tension Transfer*, em português, transferência por tensão superficial, é um sistema desenvolvido pela Lincoln Electric Company, que impõe um controle na forma de onda da corrente de soldagem com a finalidade de garantir uma transferência por curto circuito mais estável, evitando respingos e com maior confiabilidade para o passe de raiz [4]. A forma de onda do processo pode ser visualizada na Figura 3.1.

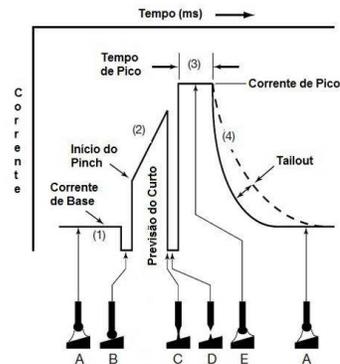


Figura 3.1. Forma de onda do processo STT. Figura adaptada do manual da fonte 455M/STT[8]

Cada fase do processo STT tem os mesmos objetivos do processo CCC. A diferenciação desses processos está na forma como a corrente passa da fase 5 para retomar a fase 1 e no modo de controle da corrente. No caso do CCC existe a fase 6, previamente explicada, no caso do processo STT existe uma queda gradativa da corrente de soldagem, denominada de *Tail out*, que nada mais é que uma regulagem da indutância do sistema [1,2] e tem a mesma finalidade da fase 6 do CCC. Quanto ao controle da forma de onda de corrente, o processo CCC utiliza um controle via software, enquanto que o processo STT faz o controle via um dispositivo eletrônico, semelhante a um desenvolvido por Gohr 2002, constituído basicamente por um IGBT e um comando GATE, que tem como objetivo reduzir a corrente de forma bastante rápida, pois, no momento do curto e da reabertura do arco, a corrente é anulada pelo fechamento do IGBT, que, no caso, atua como uma chave, anulando o sinal de corrente entre a peça e o eletrodo[5].

4. Monitoramento do Processo STT

Optou-se por monitorar o processo de soldagem STT por este já ser um produto consolidado no mercado para a devida aplicação. O processo foi monitorado utilizando um sistema de aquisição de dados desenvolvido no LABSOLDA, o SAP [9]. Estes sistemas podem nos fornecer uma leitura instantânea da corrente de soldagem, da tensão do arco de soldagem, da velocidade de alimentação de arame e da vazão do gás de proteção e apresentá-los em forma de histogramas e oscilogramas, que serão interpretados e aplicados para avaliar os processos de soldagem.

Entretanto não são apenas essas variáveis que interferem em um processo de soldagem, outras variáveis como altura do arco de soldagem, comportamento da poça de fusão, forma de transferência metálica, são fatores de igual importância para realizar uma boa união.

Devido à dinâmica das variáveis, é complicado visualizar seu comportamento a olho nu. Todavia com a utilização de filmagem de alta velocidade é possível ver como os parâmetros ajustados na fonte de soldagem agem para a formação do arco e para a fusão do metal. Para isso foi utilizado uma câmera de alta velocidade da IDT, que nos permitiu realizar filmagens com aproximadamente 4000 quadros por segundo. E com o sistema de aquisição de sinal da IDT adaptado com o TC1 da IMC foi possível realizar uma aquisição de corrente e tensão do arco junto com o vídeo, como mostra a Figura 5.1, a uma taxa de 25 kHz, permitindo verificar com precisão a alteração do arco com a alteração da curva de corrente.

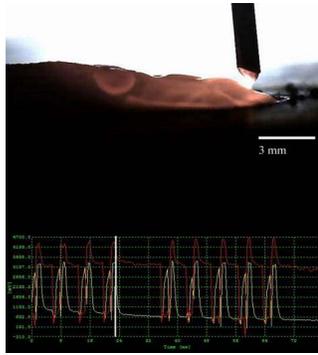


Figura 5.1. Captura do vídeo de alta velocidade do processo STT juntamente com a aquisição de sinal

Como as variáveis de um processo de soldagem são muito interdependentes, ver a sua ação permite estudá-los de uma maneira mais precisa. E conciliar estas duas ferramentas é uma maneira de realizar um estudo mais abrangente dos processos de soldagem e tornar sua aplicação mais confiável.

O que se pretende inicialmente é conseguir uma boa técnica para filmagem do processo de soldagem com transferência metálica por curto circuito.

A dificuldade na filmagem desse processo está ligada ao tipo de transferência, pois, quando o arco de soldagem está aberto, a luz é muito intensa o que acaba impedindo a visão do arame de solda, e já no tempo de curto não se tem luz alguma o que também impede a visualização da transferência.

Uma técnica utilizada foi a shadowgrafia, Figura 5.2, que consistem em iluminar a região da solda pelo lado oposto ao da filmagem, e desta maneira o que é filmado é apenas a sombra do arame e da poça de fusão.

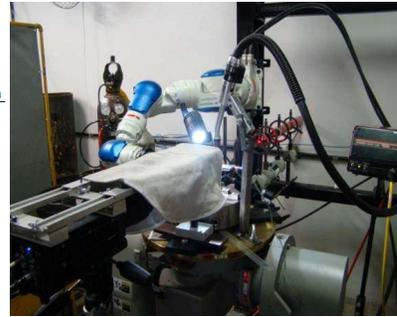
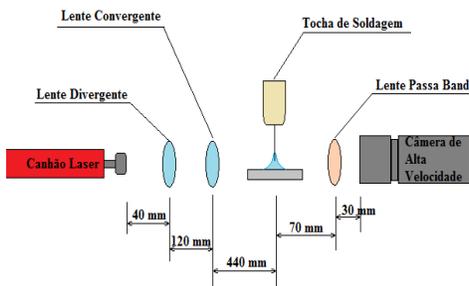


Figura 5.2. Esquema(direita) e foto da bancada(esquerda) mostrando os equipamentos utilizados para shadowgrafia

Utilizando este procedimento foi possível obter uma filmagem de boa qualidade, com uma boa visualização da poça de fusão e da transferência metálica, como pode ser visto na Figura 5.3.b e c. Porém não foi possível eliminar totalmente a luz da fase do arco, Figura 5.3.a, o que tornou a visualização da reabertura debilitada.

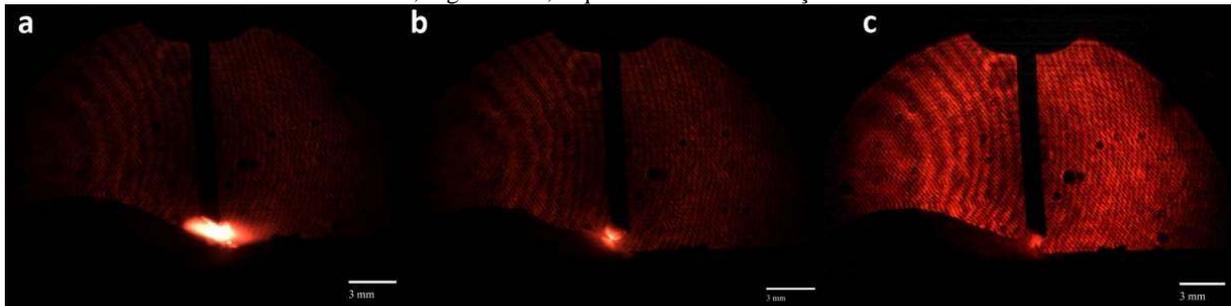


Figura 5.3. Capturas realizadas no vídeo do processo STT, evidenciando a abertura (a), a formação da gota (b) e o momento do curto circuito (c)

Outra técnica foi a utilização da filmagem EDR/XDR da IDT, que consiste em capturar duas imagens no mesmo momento, uma de baixo contraste para as regiões mais claras e outra de alto contraste para regiões mais escuras, e interpola-las para produzir uma imagem com maiores detalhes. Porém esta técnica, apesar de melhorar a visualização no momento de arco aberto, Figura 5.4.a, ainda não permite a visualização no momento do curto circuito, Figura 5.4.b. Necessitando de uma iluminação mais potente.

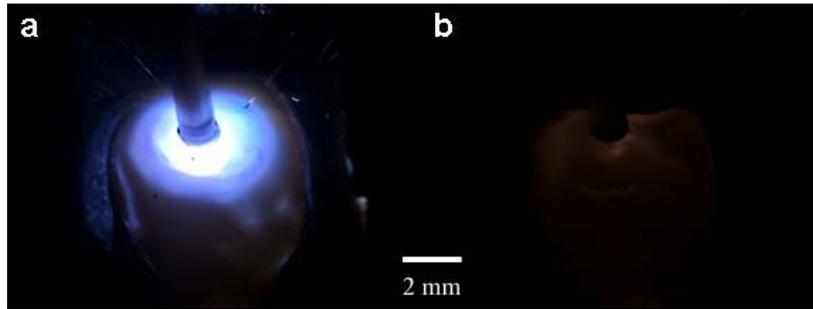


Figura 5.4. Capturas da filmagem de alta velocidade do processo CCC pela técnica EDR/XDR, a momento do arco aberto e b momento de curto-circuito

Com os parâmetros do STT em mãos foi desenhada uma nova forma de onda para o processo CCC e então os dois processos foram comparados juntamente com o processo de soldagem convencional.

5. Forma de onda modificada para o processo CCC

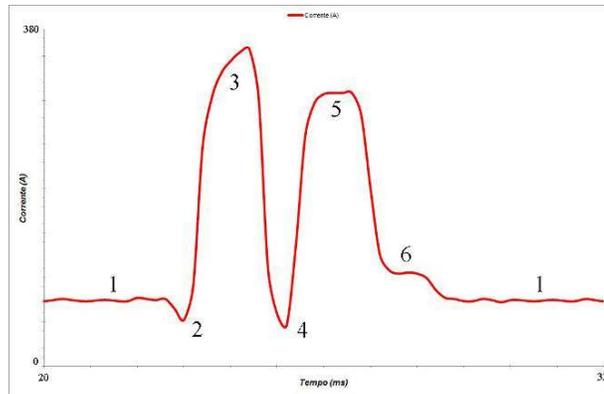


Figura 6.1. Forma de onda modificada para o processo CCC

Da forma de onda de corrente para o processo CCC apresentada na Figura 2.1, foram feitas algumas alterações. A frequência de transferência ficou mais rápida, passando de um período de 25ms para 12ms. O que acarreta num menor diâmetro de gota e, portanto, menor nível de respingos quando essa gota toca a peça [6,4,3].

Para tentar manter a mesma energia os valores de pico de corrente foram aumentados de aproximadamente 270 A para aproximadamente 370 A, o que acarreta também numa maior fusão da poça e do eletrodo.

Foi realizado um amortecimento da subida da corrente na fase 3, com a finalidade de deixar a corrente subir de maneira mais suave, semelhante a regulagem de indutância do processo convencional, evitando a agitação exagerada da poça de fusão.

A leitura das variáveis do processo agora é realizada por dois sensores de tensão adicionados no cabeçote alimentador de arame, um para leitura da parte positiva e outro para leitura da parte negativa, que através de cabos devem ser levados para a peça de trabalho e para o bico de contato, ou a região mais próxima possível destes, para que a monitoração do arco seja precisa.

6. Materiais e Métodos

Foram utilizadas duas fontes de soldagem, a Power Wave 455M/STT da empresa Lincoln Electric e a DIGIPLUS 800 A7ACPO da empresa IMC-Soldagem.

Inicialmente os ensaios foram realizados em chapas de aço carbono comum A36 de 6,4mm de espessura, cortadas nas dimensões de 50x300 mm, chanfradas em 30° e preparadas em corpos de prova com separação de 2mm e sem nariz, como mostra a Figura 4.1.

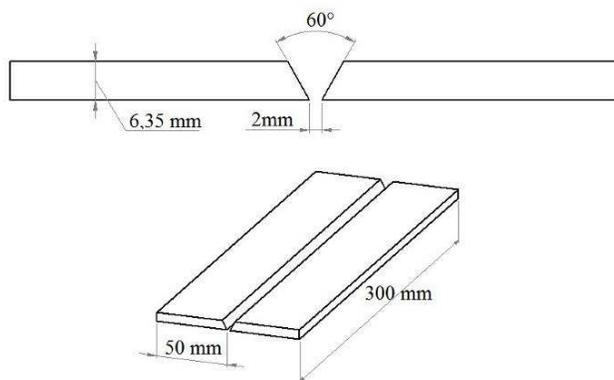


Figura 4.1. Desenho dos corpos de prova

A tocha de soldagem utilizada foi a Narrow Gap SPS, com bocal de proteção específico para soldagens em chanfro. O material de adição foi o arame ER70S-6 de 1,2 mm de espessura.

Foi utilizada uma proteção gasosa de composição 75% Ar e 25% CO₂ (C25 da White Martins).

Primeiramente as soldagens foram executas manualmente e posteriormente com a utilização de um braço robótico SIA20-D da Motoman, para filmagens de alta-velocidade e aplicação em dutos, e um sistema de deslocamento automático de tocha Tartilope V4[10] da SPS-Soluções para Soldagem, para execução dos ensaios em corpos de prova e aplicação em dutos.

Mantendo a mesma velocidade de avanço de arame, estipulada por ensaios e regulada em 3,4 m/min, comparou-se o desempenhos dos diferentes processos com controle de corrente (STT e CCC), validados por comparações com o processo MIG/MAG convencional.

7. Resultados

Os ensaios foram realizados manualmente para a regulagem dos parâmetros e posteriormente automatizados, para validar sua aplicação utilizando manipuladores robóticos de tocha.

7.1. Posição Vertical Descendente, Soldagem manual

7.1.1. Processo STT Posição Vertical Descendente, Soldagem Manual

O processo STT foi ajustado baseando-se no guia do usuário da Lincoln Electric[7], os parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 7.1. A fonte da Lincoln tem programas sinérgicos para cada tipo e bitola de arame e proteção gasosa, neste caso foi utilizado o 119, os valores de TRIM e PEAK são ajustes finos na potencia calorífica do arco.

Tabela 7.1. Parâmetros para soldagem STT manual descendente			
Gás de Proteção	C25 – vazão de 18l/min	Programa	119
Velocidade de alimentação	3,4 m/min	TRIM	1,5
Velocidade de Soldagem	~ 23 cm/mim	PEAK	5

Na Figura 7.1 segue um exemplo de um cordão obtido em soldagem manual com estes parâmetros.



Figura 7.1. Aspecto superficial (a) e de raiz (b) para união utilizando o processo STT manual descendente

7.1.2. Processo CCC Posição Vertical Descendente, Soldagem Manual

O CCC ainda não possui um programa sinérgico, e a sua forma de onda tem de ser totalmente desenhada, ou utilizando o programa SAC[10], um simulador de formas de onda, ou na própria fonte de soldagem, por marcação de pontos da forma de onda. Para estes ensaios foi utilizado este ultimo recurso, os dados utilizados seguem na Tabela 7.2 e são mostrados na Figura 7.2.

Tabela 2 - Parâmetros para soldagem CCC manual

descendente			
Gás de Proteção	C25 – vazão de 18l/min		
Velocidade de alimentação	3,4 m/min		
Arco:	Curto:		
I_{a1} – 300 A	t_{a1} - 1,4 ms	I_{c1} - 40A	t_{c1} – 0,5 ms
I_{a2} – 100 A	t_{a2} - 1 ms	I_{c2} – 40 A	t_{c2} – 0,5 ms
I_{a3} – 70 A	t_{a3} - variável	I_{c3} – 280 A	di/dt – 80A/ms
t_{r1} - 0,4 ms	t_{r2} – 0,4 ms	U_{cc} – 10 V	K_r - 1,10
Velocidade de Soldagem	~ 25 cm/min		

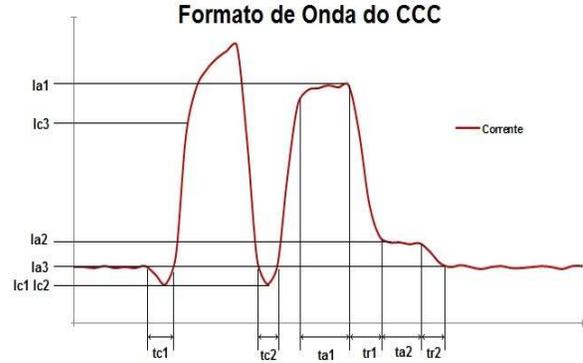


Figura 7.2. Forma de onda CCC, tempos e pontos da corrente

U_{cc} corresponde a tensão de curto circuito de referencia e K_r é uma constante adimensional da previsão de reabertura do arco no momento t_{c2} .

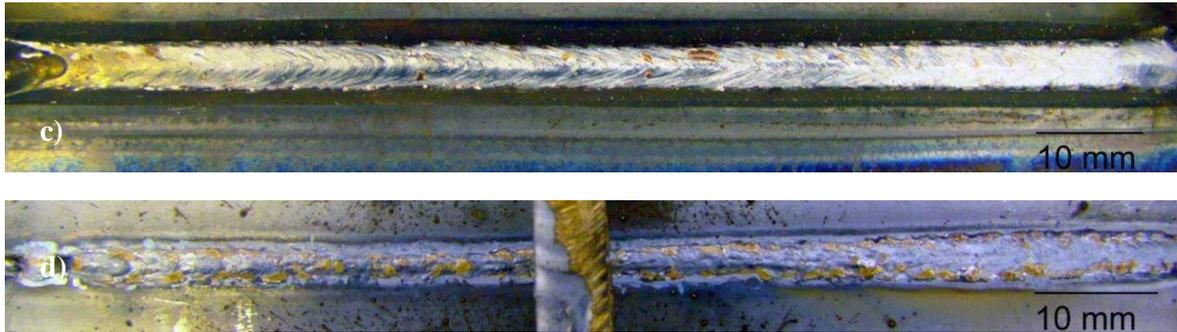


Figura 7.3. Aspecto superficial (c) e de raiz (d) para união utilizando o processo CCC manual descendente

Na Figura 7.3 um exemplo de um passe de raiz obtido com o processo CCC em soldagem manual.

7.1.3. Processo Convencional Posição Vertical Descendente, Soldagem Manual

A Tabela 7.3 apresenta os parâmetros utilizados para o processo convencional, para obter uma regulagem ideal os parâmetros utilizados basearam-se nos resultados obtidos por DUTRA[2].

Tabela 7.3. Parâmetros para soldagem Convencional manual descendente

Gás de Proteção	C25 – vazão de 18l/min		
Velocidade de alimentação	3,4 m/min		
KS - 110	KD - 240	Ur – 19V	
Velocidade de Soldagem	~ 27 cm/min		

A Figura 7.4 mostra um cordão obtido com esta regulagem na fonte de soldagem, para a qual KS é a indutância de subida da corrente, KD a indutância de descida e Ur a tensão de referência de curto-circuito.



Figura 7.4. Aspecto superficial (e) e de raiz (f) para união utilizando o processo Convencional manual descendente

Os oscilogramas apresentados na Figura 7.5 mostram a forma de onda de corrente e tensão obtidos para os três casos apresentados acima. Dos quais foram obtidos os dados apresentados na Tabela 7.4.

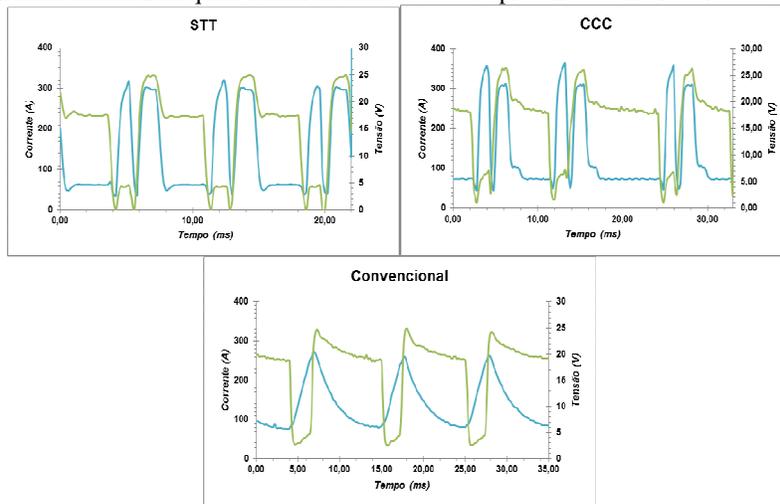


Figura 7.5. Oscilogramas de tensão(verde) e corrente(azul) para os processo STT, CCC e convencional

Tabela 7.4. Dados de Corrente e Tensão para os processos em soldagem manual

	Convencional	CCC	STT
Corrente Média	149,3 A	135,6 A	139,4 A
Tensão Média	17 V	17 V	14,5 V
Corrente Eficaz	170,3 A	168,5 A	176,9 A
Tensão Eficaz	18,3 V	18,6 V	16,3 V

Segundo o soldador, comparando os três processos o que se consegue soldar mais facilmente é com o STT, seguido pelo CCC. Relatou ainda que: Nestes processos a poça de fusão é mais estável e o arco permanece aberto mesmo com variações na posição de soldagem, isto pode ser creditado aos valores mais altos para as correntes de pico dos processos STT e CCC.

Avaliando visualmente a qualidade dos cordões os três processos tiveram bons resultados, tanto na superfície quanto na raiz da solda, não apresentando qualquer descontinuidade. Pela análise da macrografia da seção transversal dos cordões, Figura 7.6.

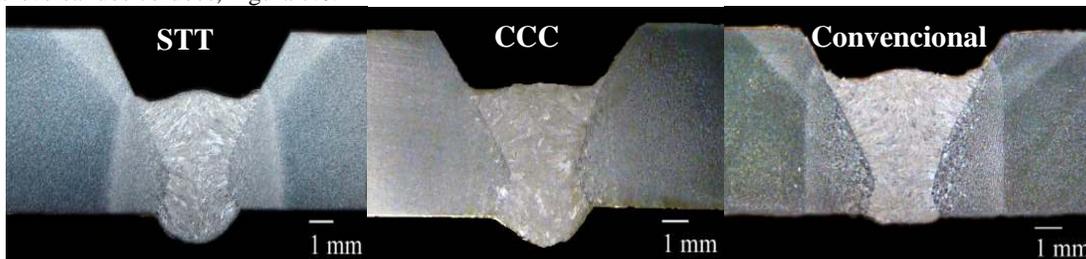


Figura 7.6. Macrografia da seção transversal dos cordões a, c e e.

O nível de respingos foi menor respectivamente para STT, CCC e Convencional, que pode ser atribuído a melhor predição do curto e do destacamento para o processo STT. Também nos processos STT e CCC a corrente de soldagem é levada a valores mais elevados, portanto, existe mais energia para a fusão do arame, que está mais fundido ao tocar a poça de fusão, gerando menor turbulência. A diferença de quantidade de respingo para do processo STT e CCC está na maior quantidade de respingos finos (fagulhas) para o processo CCC. Isto devido ao momento de reabertura do arco de soldagem, pois no processo STT a reabertura acontece na corrente de base com uma precisão muito maior que no processo CCC, principalmente devido à dinâmica de controle da fonte. [6,5]

Avaliações na relação de Potência dos respectivos processos foram realizadas com ensaios automatizados, pois na soldagem manual existe uma grande variação da DBCP, o que pode acarretar em variações de tensão e corrente e consequentemente em avaliações errôneas.

7.2. Posição Vertical Descendente, Soldagem Automatizada

7.2.1. Processo STT Posição Vertical Descendente, Soldagem Automatizada

Os parâmetros utilizados para o processo STT automatizado foram os mesmos que os utilizados para soldagem manual, apresentados na Tabela 7.1, porém fixando uma velocidade de soldagem de 25cm/min, com a tocha de soldagem posicionada em um ângulo de 12° puxando e uma DBCP (distancia do bico de contato para a peça de trabalho) de 14mm. O resultado obtido segue exemplificado na Figura 7.7.



Figura 7.7. Aspecto superficial (a) e de raiz (b) para união utilizando o processo STT Automatizado Descendente

7.2.2. Processo CCC Posição Vertical Descendente, Soldagem Automatizada

Para o processo CCC automatizado também foram mantidos os mesmo dados da soldagem manual apresentados na Tabela 7.2, com exceção da velocidade de soldagem mantida constante em 24 cm/min e com ângulo de tocha 12° puxando e DBCP 14mm. O resultado obtido é exemplificado pelo cordão da Figura 7.8.



Figura 7.8. Aspecto superficial (c) e de raiz (d) para união utilizando o processo CCC Automatizado descendente

7.2.3. Processo Convencional Posição Vertical Descendente, Soldagem Automatizada

Para o processo convencional automatizado os parâmetros foram os mesmo apresentados na Tabela 7.3, com velocidade constante de 24 cm/min, com a tocha posicionada na posição puxando em 12° e DBCP de 14mm. E o resultado é apresentado na Figura 7.9.

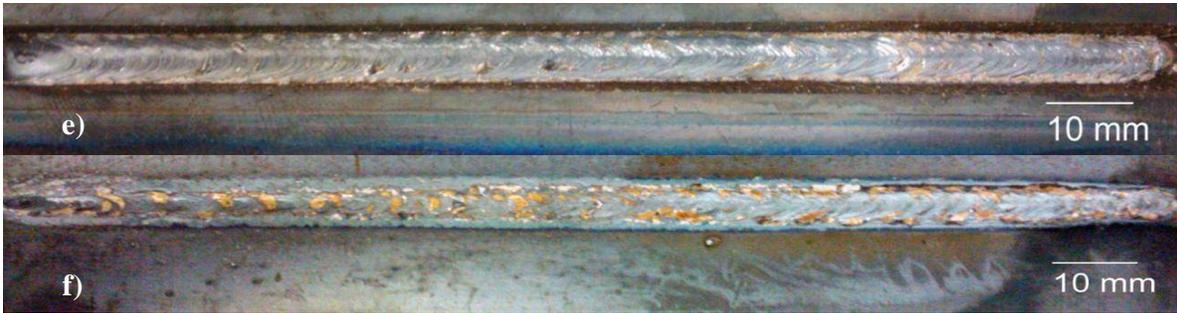


Figura 7.9. Aspecto superficial (e) e de raiz (f) para união utilizando o processo Convencional Automatizado Descendente

Dos processos descritos acima se obteve os oscilogramas de tensão e corrente que estão apresentados na Figura 7.10. Dos quais foram retirados os dados para avaliação dos processos apresentados na Tabela 7.8.

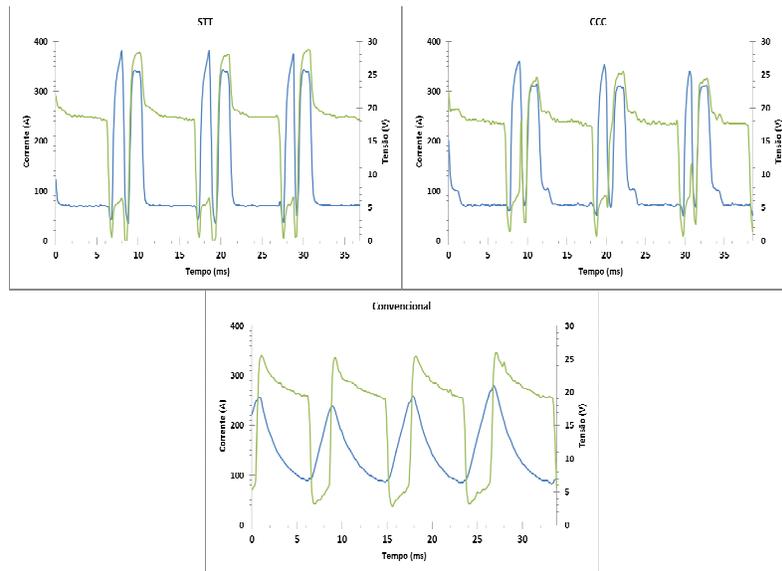


Figura 7.10. Oscilogramas de tensão(verde) e corrente(azul) para o processo STT, CCC e convencional

Tabela 7.8. – Dados para avaliação dos processo automatizados			
	Convencional	CCC	STT
Corrente Média	150,2 A	140,7 A	141,7 A
Tensão Média	16,5 V	16,9 V	15,9 V
Corrente Eficaz	160,9 A	172,8 A	182,8 A
Tensão Eficaz	18,1 V	17,9 V	17,8 V
Potência Instantânea	2420,11 W	2522,07 W	2349,37 W

As medidas de Potência da Tabela 7.8 foram obtidas pela fórmula de potência instantânea (1), para um período de 300 ms.

$$P_{inst} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n U_i * I_i \right)}{n} \quad (1)$$

Analisando as medidas é possível afirmar que os três processos não apresentam variações representativas na Potência, pois essas variações são muito pequenas, em torno de 5%.

Uma diferença mais significativa está nas medidas de corrente eficaz, maior para o STT, isto está ligado ao fato do valor de picos de corrente ser mais elevados para este processo, o que pode relacionar a maior facilidade de manter o arco aberto e de não acontecerem as topadas secas do arame com a peça, ou até mesmo que o arame atravesse a poça de fusão.

Avaliando visualmente a qualidade dos cordões os três processos apresentaram bons resultados, tanto na superfície quanto na raiz da solda, não apresentando qualquer descontinuidade. Porém ao verificar as macrografias das seções transversais dos cordões, contidas da Figura 7.11, é evidente a melhor distribuição do cordão de solda para os processos STT e CCC.

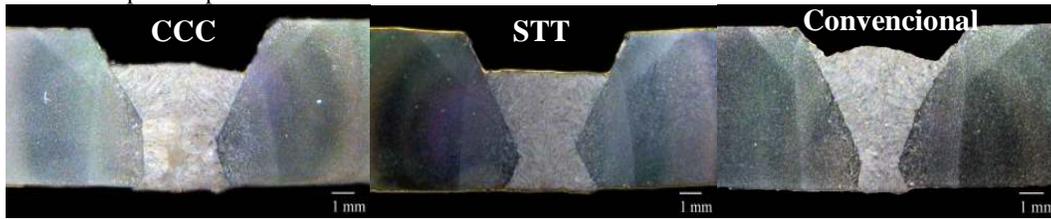


Figura 7.11. Macrografia da seção transversal do cordões a, c e e.

Para o processo convencional o chanfro está mais preenchido, isto devido a uma menor penetração nas laterais do chanfro. O formato da face do cordão é mais convexo o que é prejudicial para os passes seguintes. Como os processos CCC e STT conseguem uma maior penetração ele acabam oferecendo maior resistência ao passe de raiz, fator muito importante para esse caso, pois após realizar o passe de raiz este será o único que irá promover a sustentação da união dos tubos nas pipelines, sendo assim, muito requisitado. Como a resistência é maior elimina-se a necessidade de realização do passe quente (*hot pass*).

7.3. Posição Vertical Ascendente, Soldagem Manual

7.3.1. Processo STT Posição Vertical Ascendente, Soldagem Manual

Para a comparação da execução do processo realizado na vertical ascendente procedeu-se da mesma maneira que na vertical descendente e com os mesmos parâmetros da Tabela 7.1 para o processo STT, a velocidade média ficou em torno dos 24 cm/min. O Resultado está apresentado na Figura 7.12, na qual é possível perceber que o cordão, apesar de isento de defeitos, apresenta uma convexidade na superfície do cordão muito maior, tanto para a face quanto para a raiz da solda.



Figura 7.12. Aspecto superficial (A) e de raiz (B) para união utilizando o processo STT manual ascendente

7.3.2. Processo CCC Posição Vertical Ascendente, Soldagem Manual

Para o processo CCC os parâmetros usados foram os mesmos que o da Tabela 7.2, com uma velocidade média de 24 cm/min. O resultado da união é mostrado na Figura 7.13, que também apresentou maior convexidade que para o cordão na vertical descendente.

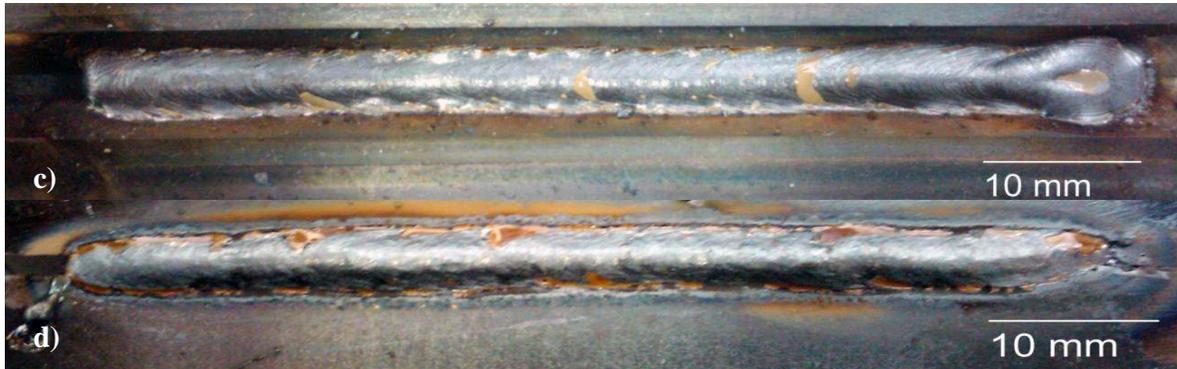


Figura 7.13. Aspecto superficial (C) e de raiz (D) para união utilizando o processo CCC manual ascendente

Para soldagem de passe de raiz na ascendente, utilizando uma velocidade de alimentação de 3,4 m/min e com esse formato de junta, não foi possível soldar manualmente pelo processo convencional na posição vertical ascendente. Segundo o soldador, para essa velocidade de alimentação a velocidade de soldagem deve ser muito alta, e assim não foi possível manter uma regularidade no posicionamento da tocha. Uma solução seria baixar a corrente média de soldagem, porém neste caso o reforço ficaria excessivo e convexo e a velocidade de soldagem seria inviável em termos de produtividade. Outra solução seria aumentar o tamanho do espaço entre as chapas e proceder com um tecimento para realizar a união.

Ainda segundo o soldador, dos dois processos o que se consegue soldar mais facilmente é com o STT, seguido pelo CCC. Relatou ainda que nestes processos a poça de fusão é mais estável e o arco permanece aberto mesmo com variações na posição de soldagem. Mesmo se o arame for posicionado fora da poça de fusão o arco não se extingue.

Avaliando visualmente a qualidade dos cordões os dois processos tiveram bons resultados, tanto na superfície quanto na raiz da solda, porém, em comparação aos cordões realizados na descendente, estes apresentaram maior reforço na raiz e um cordão mais convexo na parte superior do cordão, o que fica evidenciado ao analisar as imagens macrográficas das seções transversais desses cordões, apresentadas na Figura 7.14.

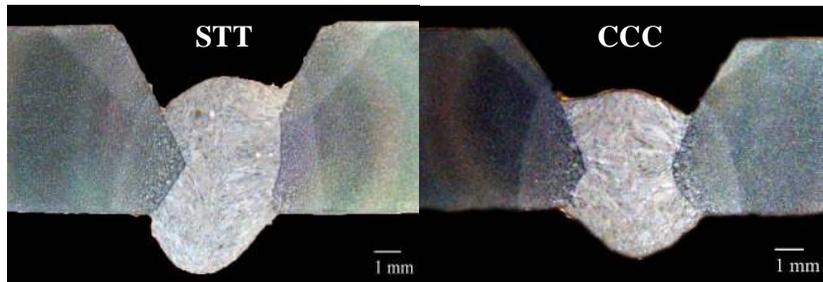


Figura 7.14. Macrografia da seção transversal dos cordões realizados manualmente na posição vertical ascendente

Ainda comparando as duas posições de soldagem, a configuração que apresentou melhores resultados foi na soldagem vertical descendente. Analisando via filmagem de alta velocidade foi possível perceber que a maior facilidade de soldar na descendente está ligada ao posicionamento do arame na poça de fusão, como pode ser visualizado nas aquisições de imagens da Figura 7.15.

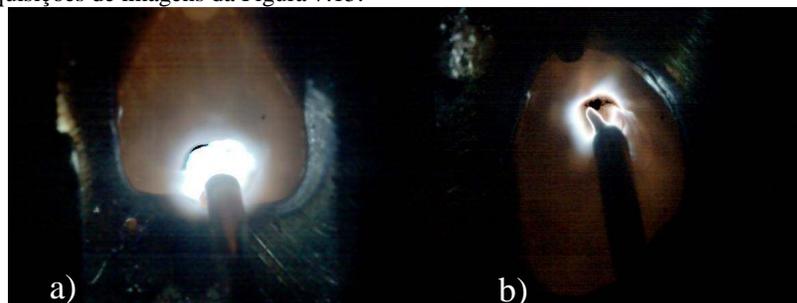


Figura 7.15. a) Posição Descendente e b) Posição Ascendente

No caso a) o arame é adicionado na base da poça de fusão o que tende a sustenta-la, já no caso b) a tendência é de jogar o material para fora da poça, o que faz com que o calor para a fusão do arame seja menor forçando uma menor velocidade de alimentação e em alguns casos fazendo com que o arame atravesse a poça. Devido a essa maior facilidade para soldar na descendente aplicou-se este procedimento para soldagem de passe de raiz.

7.4. Aplicação em Dutos, Soldagem Orbital

As aplicações em dutos foram realizadas de duas maneiras, como mostra a Figura 7.16. No caso 1 a tocha de soldagem manipulada por um braço robótica, permanecia parada enquanto o tubo girava com o auxílio de uma mesa rotativa. No caso 2 a tocha de soldagem foi deslocada por um sistema de soldagem orbital desenvolvido no LABSOLDA, contendo um cartilão v4 e um trilho rígido.

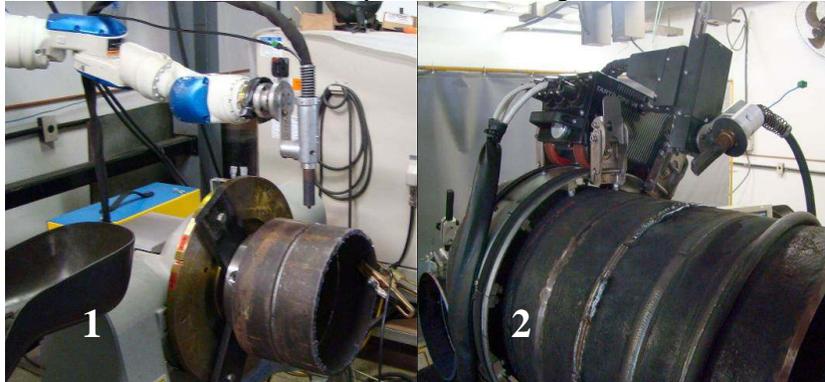


Figura 7.16. Aplicações do processo CCC em dutos, em 1 utilizando um braço robótico e em 2 utilizando um sistema de soldagem orbital

Para ambos os casos, como é mostrados nas Figuras 7.17 e 7.18, os cordões estão isentos de descontinuidades superficiais, e tem um excelente acabamento, tanto na face quanto na raiz da solda. Os ensaios foram realizados em dutos de 323,85mm (caso 1) e 406,4 mm (caso 2) de diâmetro e 12,70 mm(caso 1) e 20,64mm(caso 2) de espessura de parede, chanfrados em 30°, sem nariz.



Figura 7.17. Imagens dos cordões obtidos com o processo CCC, caso 1.



Figura 7.18. Imagens dos cordões obtidos com o processo CCC, caso 2.

Em ambos os casos foram utilizados os mesmos parâmetros apresentados para o processo CCC na posição vertical descendente automatizado. No caso 1 o cordão ficou mais convexo, tanto na face quanto na raiz, que no caso 2, isto porque para o caso 2 só foi possível obter um cordão sem defeitos com a tocha posicionada perfeitamente na vertical, fazendo com que o metal molhasse menos que com certa angulação na tocha.

8. Conclusão

- Otimizou-se a onda de corrente para o processo de soldagem CCC;
- Foi constatado que a soldagem na vertical ascendente é mais difícil que na vertical descendente;
- O processo CCC, ainda não apresenta um programa sinérgico, que será tema para trabalhos futuros. Com o qual, apenas ajustes finos, uma pessoa com pouca prática de soldagem, consegue regular a fonte de soldagem e efetuar um bom passe de raiz.
- Ambos os processos com controle de corrente tem suas vantagens sobre o processo convencional, pois apresentam cordões com morfologia mais favoráveis para execução dos passes de enchimento, e com maior penetração, economizando tempo pela eliminação de passes seguintes, como o passe quente. Além de que, mesmo muito bem ajustado, o processo convencional apresenta instabilidades que prejudicam a realização dos cordões, como extinção do arco de soldagem, topadas secas do arame com a peça, maior quantidade de respingos;
- Foi possível aplicar o processo CCC no passe de raiz para soldagem de corpos de prova semelhantes a peças reais na soldagem de *pipe lines*.

9. Referências

- [1] DUTRA, J.C., GONÇALVES e SILVA, R.H., **MIGMAG - Transferência Metálica por Curto-Circuito sob Controle da Forma de Onda da Corrente – Sistemas CCC e STT- Fundamentos**. Soldagem Insp. São Paulo, vol. 13, n°2, p.92-96, Abr/Jun 2008;
- [2] DUTRA, J.C., **MIG/MAG – TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTO CIRCUITO – FONTES DE SOLDAGEM VERSUS GASES DO ARCO**, Soldagem Insp. São Paulo, vol. 13, n°1, p.19-24, Jan/Mar 2008;
- [3] GONÇALVES E SILVA, R.H., **SOLDAGEM MIG/MAG EM TRANSFERÊNCIA METÁLICA POR CURTOCIRCUITO CONTROLADO APLICADA AO PASSE DE RAIZ**, Dissertação de Mestrado, PosMec, UFSC, 2005
- [4] STAVA, E.K., **THE SURFACE-TENSION-TRANSFER POWER SOURCE: A NEW, LOW-SPATTER ARC WELDING MACHINE**, Welding Journal, Vol. 72, n°1, p.25-29, Janeiro 1993.
- [5] GOHR Jr,R., **NOVOS MÉTODOS DE CONTROLE DA SOLDAGEM MIG/MAG**, Tese de Doutorado, PosMec, UFSC, 2002
- [6] BAIXO, C.E.I., **ESTUDO DA SOLDAGEM MIG/MAG PELA TÉCNICA HIPERBÁRICA A SECO**, Tese de Doutorado, PosMec, UFSC, 1999.
- [7] **GMAW WELDING GUIDE TO STT AND RAPID ARC** – Lincoln Electric Company.
- [8] http://www.imc-soldagem.com.br/sap_4.html
- [9] http://www.sps-soldagem.com.br/tartilope_v4.php
- [10] <http://www.imc-soldagem.com.br/sac.html>