XXXIX CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem
25 a 28 de Novembro de 2013
Curitiba, PR, Brasil

Estudo dos Processos de Soldagem MIG/MAG com Transferência Por Curto-Circuito com Controle de Corrente Utilizando a Termografia

(Thermal Imaging Study of Controlled Short-Circuit MIG/MAG Welding Processes)

[1]Hellinton Direne Filho, [1]Régis Henrique Gonçalves e Silva, [1]Jair Carlos Dutra
Universidade Federal de Santa Catarina, Labsolda, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.
hellinton.direne@posgrad.ufsc.br, regis@labsolda.ufsc.br, jdutra@labsolda.usfc.br

Resumo

Muitas afirmações são levantadas quanto à alta eficiência dos processos de soldagem MIG/MAG com transferência por curto-circuito com controle de corrente frente ao processo convencional. Nessas afirmações são expostas vantagens como, baixa quantidade de respingos, melhor molhabilidade da poça metálica, maior fusão nos chanfros, menores deformações, entre outras. Todas essas características estão associadas a melhor distribuição e controle do aporte de energia, que pretende garantir a estabilidade na transferência metálica e formação do cordão, possibilitando a execução de passes de raiz com juntas de abertura variável sem a utilização de cobre junta, creditado a uma alta "bridgeability" da poça de fusão e com menor possibilidade de falta de fusão, possibilitam, também, a realização de soldagem de chapas finas, e soldagens de revestimento e reparo sem o comprometimento das propriedades mecânicas dos produtos. Buscando avaliar o comportamento térmico com auxilio da térmografia desses processos foram estudados o processo STT ROOT e o processo CMT pela realização de avaliações das propriedades elétricas, metalográficas e térmicas de depósitos sobre chapa de aço carbono. Chegando a conclusão que a peça sofre mais aquecimento no STT e que este pode ser mais bem aplicado na realização de passes de raiz. O CMT, devido à baixa penetração, tem melhor aplicabilidade para soldagens de revestimento e reparo.

Palavras-Chave: *STT, CMT, Térmografia, Passe de Raiz, Revestimento.*

Abstract

Affirmations are made regarding the high efficiency of the processes of MIG/MAG welding with short circuit transfer with current control compared to the conventional process. These claims are exposed as benefits, low amount of spatter, better wettability of the metal pool, deeper penetration on the bevel, lower distortion, and others. All these characteristics are associated with better control of the distribution and supply of energy, which intends to ensure stability in the metal transfer and metal pool. This enables the execution of root pass with variable gap without the use of backing, credited to the high bridgeability of metal pool, and less possibility of lack of fusion. Also makes possible the accomplishment of thin sheet metal welding and coating and repair welding without compromising the mechanical properties of the products. Trying to evaluate the thermal behavior of these processes was done a study with Thermal Imaging, assessments of electrical properties and metallographic of STT ROOT and CMT done in bead on plate welding. Concluding that the STT is better to root pass because the plate is more heated and the penetration is better. The CMT, due the less penetration, is better to coating and repair welding.

Key-words: *STT,CMT, Thermal Imaging, Root Pass, Coating.*

1. Introdução

Muitas afirmações são levantadas quanto à alta eficiência dos processos de soldagem MIG/MAG com transferência por curto-circuito com controle de corrente na execução de passes de raiz. Nessas afirmações são expostas inúmeras vantagens frente ao processo convencional, como baixa quantidade ou isenção de respingos, melhor molhabilidade da poça metálica, melhor aparência da raiz, maior fusão das bordas dos chanfros, e outras[1,2,3]. Todas essas características estão associadas a melhor distribuição e controle do aporte de energia, que pretende garantir a estabilidade na transferência metálica e formação do cordão, possibilitando a execução de passes de raiz com juntas de abertura variável sem a utilização de cobre junta, creditando uma alta *bridgeability* à poça de fusão e com menor possibilidade de falta de fusão na raiz. [1,2]

Utilizando processos com transferência metálica por curto-circuito, além das aplicações de soldagem de união, também, são realizadas aplicações de soldagens de revestimento e reparo. Utilizadas, por exemplo, em usinas termoelétricas, para revestimento e reparo de tubos de parede d'água, estes que sofrem desgaste devido à erosão causada pelas cinzas provenientes da queima do carvão mineral. Nessas aplicações a intenção é ter uma soldagem com baixo aporte térmico e penetração mínima, evitando gastos desnecessários de ligas de revestimento e avarias nas propriedades mecânicas dos tubos. Um exemplo é o trabalho realizado no Labsolda [4] no qual foram comparados o aquecimento durante a soldagem de revestimento de tubos de parede d'água, com e sem refrigeração, utilizando a termografia (Figura 1), para verificar o empenamento das peças.

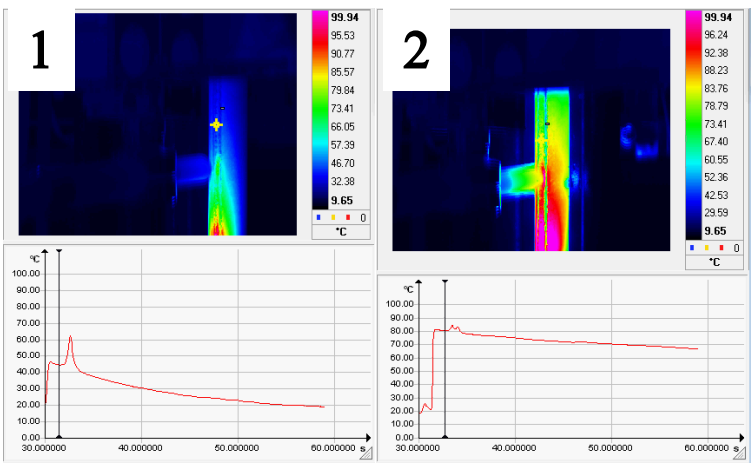

Figura 1. Comparação na soldagem de revestimento de tubos de caldeira. (1) Com refrigeração. (2) Sem Refrigeração. [4]

Buscando avaliar o aporte e a distribuição de calor foram executados ensaios com filmagem termográfica para dois processos com controle de corrente, o STT (Surface Tension Transfer - Transferência por Tensão Superficial) da empresa Lincoln e o CMT (Cold Metal Transfer - Transferência Metálica Fria) da empresa Fronius. As filmagens foram realizadas pela observação do lado oposto da chapa ao que foram depositados os cordões e comparadas qualitativamente, entre si, e com o processo MIG/MAG com transferência por curto circuito convencional. Com os cordões obtidos foram realizadas analises metalográficas de suas seções transversais para medições das áreas fundidas. Também foram realizadas avaliações nas propriedades elétricas para os casos. Objetivando avaliar as diferenças de temperatura, penetração, geometria e aplicação de cada processo.

2. Materiais e Métodos

Procedeu-se com depósitos em chapas planas de aço carbono A36, isentas sujeiras e oxidações, com 300 mm de comprimento, 64 mm de largura e 6,35 mm de espessura, utilizando o arame ER60S-3 de 1,2 mm de diâmetro como material de adição e argônio com 25% de CO2 como gás de proteção a uma vasão de 15 l/min. Para movimentação da tocha de soldagem utilizou-se um robô antropomórfico e uma mesa rotativa que podem ser observados na Figura 2. Manteve-se as mesmas condições de velocidade de soldagem, 25 cm/min, e posicionamento para todos os casos, a distância do bico de contato a peça utilizada foi de 15mm.

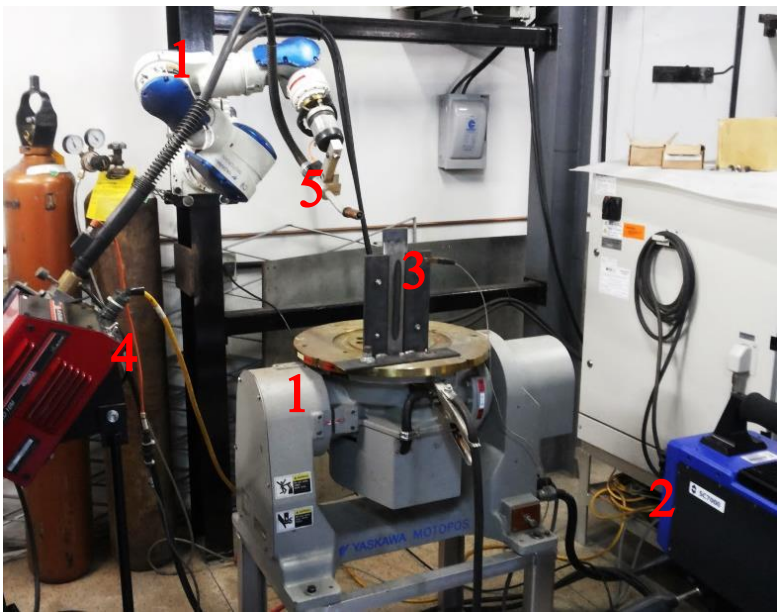

Figura 2. Bancada de Ensaios. 1-Robô e mesa rotativa. 2-Câmera Térmica. 3-Suporte de Corpo de Prova. 4-Cabeçote alimentador de arame. 5-Tocha de Soldagem.

As fontes de soldagem utilizadas foram a Digiplus 600 da empresa IMC [5] para realização do processo convencional, 455M/STT da empresa Lincoln[6] para o processo STT ROOT e fonte Transpuls Synergic 3200CMT da empresa Fronius para o processo CMT[7].

A velocidade de alimentação de arame, ajustada em 3,5 m/min, foi utilizada como padrão durante o depósito dos cordões e monitoraram-se os perfis de aquecimento das peças utilizando a câmera FLIR SC 7000 [8] posicionada pelo lado oposto dos depósitos, juntamente com o programa FLIR ALTAIR [9]. Os parâmetros radiométricos utilizados basearam-se nos resultados obtidos PALOPOSKI et al. No entanto, não foram feitas variações de emissividade com a alteração da temperatura da peça, sendo esta uma avaliação mais qualitativa que quantitativa. Foram também aquisitados os dados de corrente, tensão e velocidade de alimentação de arame utilizando o equipamento SAP 4.0[11], que é um sistema de aquisição de dados portátil fabricado pela empresa IMC.

Após as filmagens os corpos de provas foram cortados e suas seções transversais, preparados metalograficamente e analisados com auxilio de um editor de imagens para as avaliações de área fundida, área de reforço, largura de reforço e área de penetração.

3. Discussões Sobre Molhabilidade, Fusão e Penetração

No Gráfico 1 são apresentados os valores de corrente e tensão eficazes obtidos para os três processos.

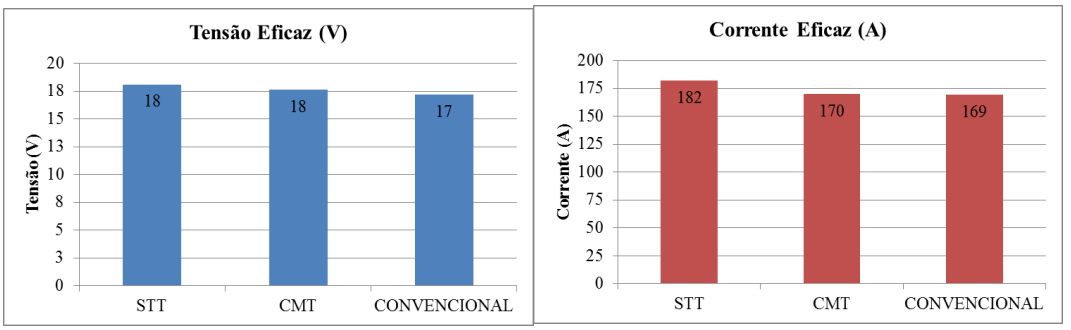

Gráfico 1 – Valores de Tensão e Corrente Eficazes para os processos de soldagem.

Segundo ESSERS e WALTER, 75% do calor transferido para peça é transmitido pelo arco elétrico, mas isso não contribui significativamente para a penetração, influencia principalmente na molhabilidade do metal e na largura do cordão. Em termos de molhabilidade é perceptível uma diferença da face do cordão entre o STT (Figura 3a) e CMT (Figura 3b) quando em soldagem de raiz, no CMT a face é mais plana, para cordões realizados na posição vertical descendente, no entanto há formação de rechupe na raiz. Para o processo convencional existe uma maior dificuldade para esta união nas condições dos ensaios e o reforço do cordão é ainda mais convexo [13].

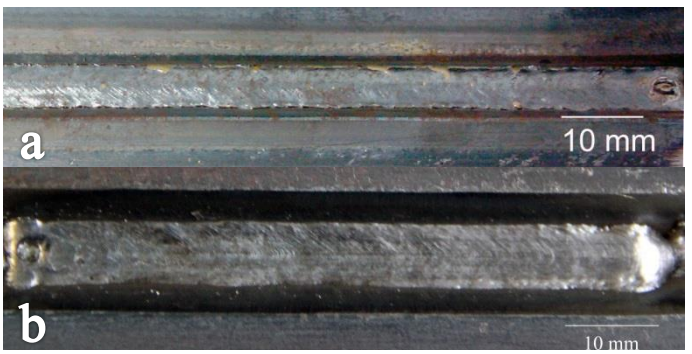

Figura 3. Aspecto superficial do cordões executados em passe de raiz na posição vertical descente. a) STT. b) CMT. Chanfro 60º. Abertura 2mm sem cobre-junta. Velocidade de alimentação média 3,5m/min. Velocidade de Soldagem 25 cm/min. Gás Ar/CO2(25%).[13]

Observando a seção transversal dos cordões de solda depositados sobre chapa na posição vertical descendente (Figura 4) e observando o Gráfico I da Figura 5 que mostra os valores para a largura dos depósitos, a diferença entre os processos STT (Figura 4a) e CMT (Figura 4b) não é significativa, no entanto para o convencional (Figura 4c) pode ser notada um diferença de quase 1mm. Justificado pela quantidade de material que restava para ser depositado e que não era desperdiçado em forma de respingos. Isto pode ser evidenciado pela quantidade total de material depositado (Gráfico II, Figura 5). No Convencional a quantidade de material é menor facilitando o papel do arco em aquecer e por consequência molhar o material do reforço.

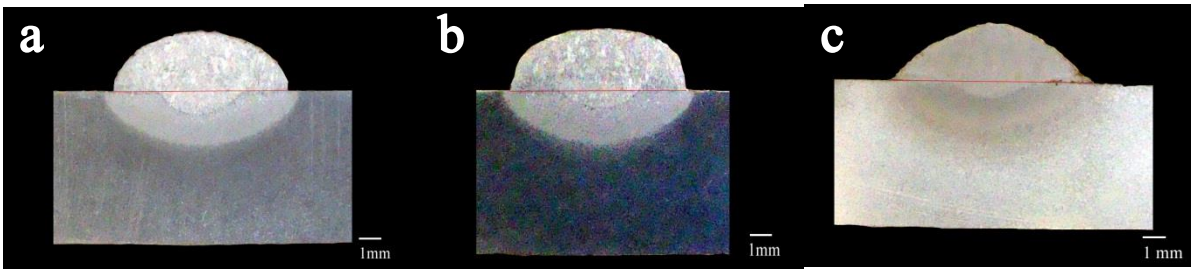

Figura 4. Macrografia da Seção Transversal dos Cordões. a) STT. b) CMT. c) Convencional. As linahs vermelhas foram adicionadas no editor de imagem para diferenciar na área fundida a área de reforço e a área de penetração. Ataque químico alcool etílico e 10% de ácido nítrico.

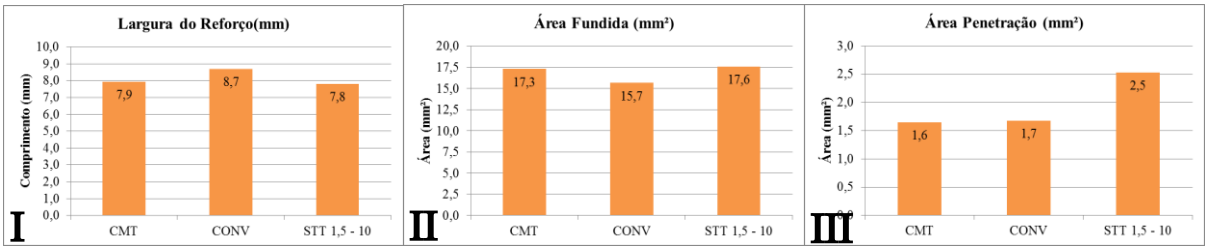

Figura 5. Gráficos dos resultados obtidos para medidas de largura do reforço (I) e área fundida (II) e área de penetração (III). Os caracteres 1,5 – 10 para as barras de STT foram adicionados para mostras que os valores de Trim e Peak ajustados na fonte Lincoln foram, respectivamente, 1,5 e 10.

ESSERS e WALTER também afirmam que o calor gerado no arame, que é transferido para a peça pelas gotas fundidas, tem energia suficiente para fundir 99% da área que penetra no metal de solda. Existem alguns autores que divergem desse fato [14, 15, 16,17] e afirmam que a corrente tem papel considerável na fusão, no entanto outros trabalhos como o de RESENDE et al. contribuem para essa teoria. Nesse trabalho os autores avaliaram a influencia do arco plasma, utilizando um processo de soldagem hibrido Plasma-MIG, no qual foram avaliados alguns aspectos de depósitos sobre chapa, sendo um deles a penetração, e como pode ser visto no gráfico da Figura 6 o arco plasma segue a tendência de diminuir a penetração.

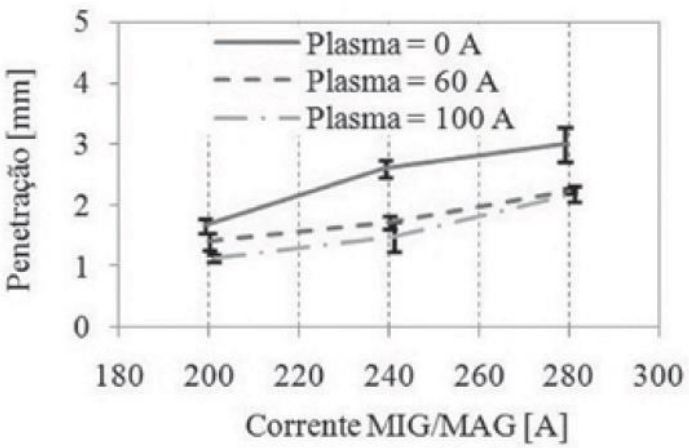

Figura 6. Gráfico da penetração do cordão de soldagem em função da corrente MIG/MAG para três níveis de corrente de plasma. [18]

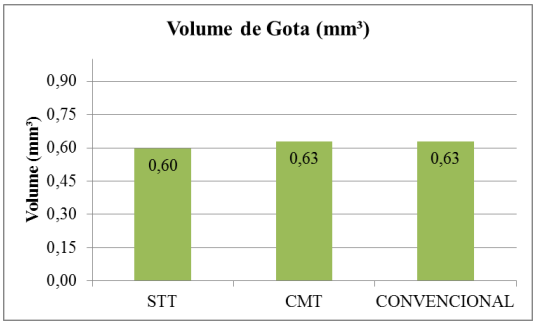

Figura 7. Volume de gota em mm³ para os três processos de soldagem. (STT: Va=3,5 m/min, T=12,2s, Dg=1,15 mm; CMT: Va=3,4 m/min, T=12,8s, Dg=1,17 mm; Convencional: Va=3,5 m/min, T=12,7s, Dg=1,17 mm)

Observando o Gráfico III da Figura 5 verificamos que a área de penetração é consideravelmente maior para o STT. Entretanto, analisando os volumes de gotas médios (Figura 7) podemos ver que são praticamente iguais para os três processos. Surgindo a indagação: Qual é a diferença entre o STT e os demais processos para justificar a maior penetração? Somado ao fato que o calor gerado pelo arco é desprezível na penetração e as gotas são as únicas contribuintes para o fato. Tentando buscar uma resposta foram realizadas filmagens térmicas para os três processos de soldagem.

4. Monitoramento dos Processos por Filmagem Térmica

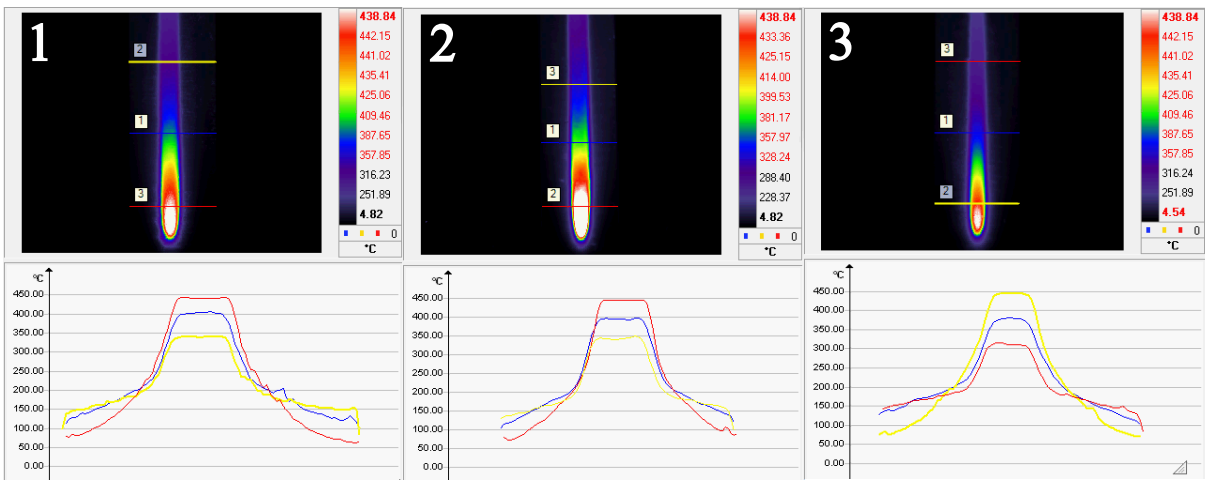

Figura 8. Distribuição de calor na parte oposta aos depósitos para STT (1) CMT (2) e Convencional (3). Distância=900±5mm, Emissividade=0,8. A montagem da figura foi realizada utilizando capturas da tela do programa Altair-Flir.

Para verificar como o aquecimento se distribuía pelo corpo de prova, foi necessária a utilização de um filtro na câmera térmica que é restrito a faixa de temperatura que vai de 5 a 300°C, e quando a temperatura ultrapassa esse valor o sensor satura e a imagem é mostrada na cor branca. Analisando a Figura 8, percebemos que a distribuição lateral de calor é maior para o processo STT, seguida do CMT e então do convencional. Isto pode justificar a maior fusão dos flancos para o processo STT se comparado ao convencional [13]. Já para o processo CMT a área saturada é a maior e a concentração do calor maior que o STT, assim seria esperado uma maior penetração para o CMT, no entanto, isto não ocorre.

Em virtude desta incoerência foi realizado mais uma filmagem térmica comparando o STT e o CMT utilizando um filtro que captura temperaturas entre 300 e 1500°C, as imagens obtidas das capturas da tela seguem na Figura 9.

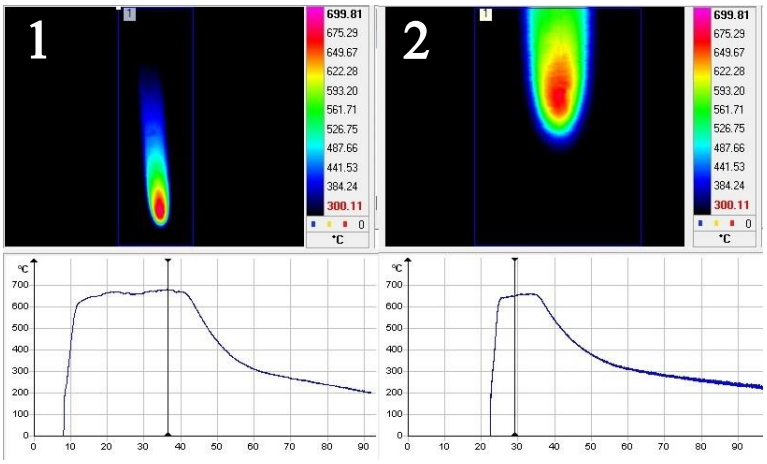

Figura 9. Distribuição de calor na parte oposta aos depósitos para faixa de temperatura de 300 a 1500°C. (1) STT. (2) CMT.

Com auxilio do programa de analise Altair-Flir foi medida a máxima temperatura alcançada pelos processos de soldagem durante os depósitos realizados sobre chapa na vertical descendente, para o processo STT a máxima temperatura foi 682,33°C enquanto que para o CMT foi de 655,42°C. O que nos leva a deduzir que a gota para o processo STT está mais aquecida, justificando a maior penetração. Este fato favorece a aplicação do processo para a soldagem de passe de raiz em posições forçadas, pois irá promover um maior reforço da raiz.

Este maior aquecimento da gota pode estar ligado ao maior tempo de arco [2,19]. Se observarmos as curvas idealizadas para tensão e corrente mostradas na Figura 10, fica evidente o maior tempo de arco e maior intensidade no pulso de corrente para o processo STT, o que promove uma maior potência de arco (Figura 11) e por consequência um maior aquecimento da gota.

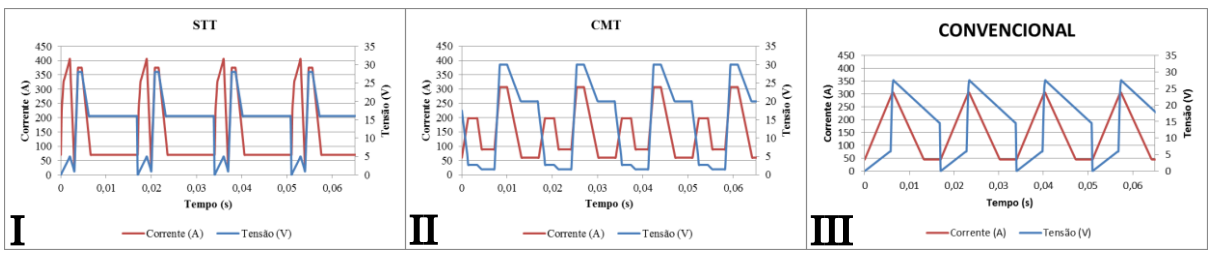

Figura 10. Oscilogramas de tensão e corrente idealizados para os processos STT (I), CMT (II) e Convencional (III). Em azul tensão (V) e em vermelho corrente (A). As curvas foram obtidas utilizando valores médios para tempos e intensidades obitidos em valores reais e plotados para se obter um mesmo periodo de transferencia.

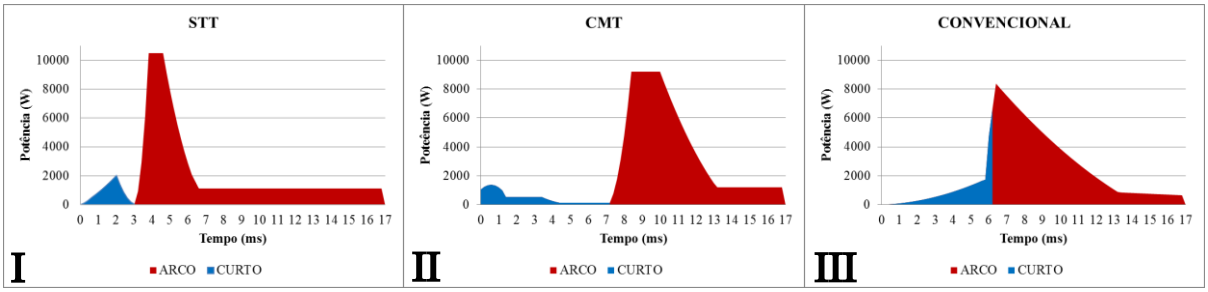

Figura 11. Oscilogramas de potência (W) retirados das curvas da Figura 10, para STT (I) CMT (II) e Convencional (III). Em vermelho o periodo de arco e em azul o perído de curto.

O pequeno tempo de curto-circuito para o STT está ligado às altas velocidades com que a corrente aumenta de valor, tornando mais intensas as forças eletromagnéticas de destacamento. Para o processo CMT é observado um maior tempo de curto-circuito como consequência da ação mecânica de retrocesso do arame/eletrodo para a reabertura de arco, mais demorada que por Efeito *Pinch*.

Em algumas posições de soldagem, na realização de passes de raiz, é muito dificultoso evitar a formação de rechupes para união de aço carbono utilizando o processo CMT, este defeito pode estar ligado à ação mecânica de retrocesso do arame/eletrodo, que acaba, também, puxando a poça fundida, fato que será tema de trabalhos futuros. Entretanto, esta característica é requerida para soldagem de revestimento e reparo, por exemplo, no revestimento de tubos de parede d'água para usina termoelétrica para o qual se requer uma penetração mínima para evitar desperdícios da liga de revestimento e integridade nas propriedades mecânicas dos tubos. Porém é preciso salientar que como pode ser visto na Figura 3 e foi comprovado por FOGLIATTO et al. existe uma tendência a falta de fusão nas margens dos cordões de solda quando depositados sobre chapa, que pode ser resolvido com aplicação de tecimento na tocha de soldagem ou ainda com alteração do gás de proteção[20].

5. Conclusão

Foi possível avaliar, ainda que qualitativamente, diferenças de temperaturas e distribuição térmica entre os processos, que resultaram em alterações na quantidade de material fundido e geometria dos cordões.

Embasado nas referências bibliográficas, verificou-se que o processo STT tem uma gota mais aquecida que os demais, isto promove uma maior penetração e, por consequência, um melhor reforço na soldagem de raiz em posições forçadas, favorecendo o processo em soldagens de união de *pipelines*, por exemplo, para os quais existe a necessidade de soldagens em posições forçadas.

Para o processo CMT na soldagem de raiz a face do cordão apresenta uma melhor geometria, entretanto, a raiz apresenta a formação de rechupe. O fato de este processo retroceder o arame/eletrodo, para reabertura do arco, acarreta em maiores tempos de curto-circuito e, portanto, menor aquecimento da gota fundida, o que promove um baixo nível de penetração, favorecendo o processo para soldagens de revestimento e reparo.

O processo convencional apresentou-se muito instável e com alto nível de respingos para a faixa de velocidade de alimentação, período de transferência e intensidades de tensão e corrente analisados, o que o torna mais complicado de ser aplicado com resultados satisfatórios para soldagem de raiz, revestimento e reparo, nestas condições.

6. Referências

[1] STAVA, E. K. **A New, Low-Spatter Arc Welding Machine**. Welding Journal. p. 25-29, Jan. 1993.

[2] SILVA, R.H. G., **Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-Circuito Controlado Aplicada ao Passe de Raiz**, Dissertação de Mestrado, PosMec, UFSC, 2005.

[3] BRUCKNER, J. **Cold Metal Transfer Has a Future Joining Steel to Aluminum**. Welding Journal, Vol.84, n. 6, Junho 2005. 38-40.

[4] DIRENE FH, H., SILVA, R.H.G. **Deformações em tubos de caldeira com e sem refrigeração.** Relatório Interno. Labsolda. UFSC. 2013.

[5] http://www.imc-soldagem.com.br/digiplus.html acesso em 26/08/2013.

[6] http://www.lincolnelectric.com/assets/en_us/Products/K2792-1/e5161.pdf acesso em 26/08/2013.

[7]http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-202ED145-21866EF/fronius_international/hs.xsl/79_6048_ ENG_HTML.htm acesso em 26/08/2013.

[8] http://www.flir.com/thermography/americas/us/content/?id=18360 acesso em 26/08/2013.

[9] http://www.flir.com/uploadedFiles/Thermography_APAC/Products/Product_Literture/ALTAIR%20Leaflet %20APAC.pdf acesso em 26/08/2013.

[10] PALOPOSKI, T., LIEDQUIST, L. **Steel emissivity at high temperatures**. Espoo 2005. VTT Tiedotteita . Research Notes 2299. 81 p.

[11] http://www.imc-soldagem.com.br/sap_4.html acesso em 02/09/2013

[12]ESSERS, W. G.; WALTER, R. **Some aspects of the penetration mechanisms in metal inert gas (MIG) welding.** In: ARC PHYSICS AND WELD POOL BEHAVIOUR INTERNATIONAL CONFERENCE, 1979, Londres, PAPERS. Londres: The Welding Institute, 1980, v. 1. p.289-295.

[13] DIRENE FH, H., SILVA, R. H. G., DUTRA, J. **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.** Anais do XXXVIII CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem, CT-59, Outubro, 2012, Ouro Preto, MG, Brasil.

[14] 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.

[15] LIN, M. L. et al. **Influence of Arc Pressure on Weld Pool Geometry**. Welding Journal, Miami, v. 64, n. 6, p. 163-169, Jun. 1985.

[16] AICHELE, G. **The contact tube distance in gas shielded metal arc welding – How does I work ?** Welding & Cutting. Duesseldorf, fev. 2002. p. 80-83.

[17] KOU, S. **Welding Metallurgy**. Hoboken: John Willey and Sons, 1987, 410p.

[18] RESENDE, A.A., FERRARESI, V.A., SCOTTI, A., DUTRA, J. **Influência das Correntes de Soldagem do Processo Plasma-MIG sobre a Geometria do Cordão de Solda e Taxa de Fusão do Arame**. Soldagem Insp. São Paulo, Vol. 14, No. 4, p.320-328, Out/Dez 2009.

[19] WASZINK, J. H. et al. **Heat Generation and Heat Flow in the Filler Metal in GMA Welding**. Welding Journal, Miami, v. 61, n. 8, p. 269-280, Aug. 1982.

[20] FOGLIATTO, A. A. B., GONZALEZ, A. R., MAZZAFERRO, J. A. E., FREITAS, D. A., MACHADO, I. G. **Análise da Influência dos Parâmetros do Processo MIG/MAG Curto-Circuito Controlado sobre a Geometria do Cordão de Solda utilizando um Projeto de Experimento Composto.** Anais do XXXVIII CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem, CT-32, Outubro, 2012, Ouro Preto, MG, Brasil.