

**Otimização de Processo MIG de Alta Penetração Utilizando Controle da Indutância
(Optimization of High Penetration MIG Process Using Inductance Control)**

Rafael Albino Bernardi¹, Kauê Correa Riffel¹, Larissa Colares Maia¹, Regis Henrique Gonçalves e Silva¹
¹Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. rafael.a.b@posgrad.ufsc.br

Resumo

O constante desenvolvimento tecnológico vem requisitando melhorias nos processos de fabricação, no que tange ao aumento da qualidade e produtividade e redução de custos. No campo da soldagem, uma das alternativas são os processos MIG destinados à alta penetração, categorizados como arco enterrado ou buried arc, permitindo o incremento da velocidade de soldagem e redução da área de chanfros. Isto torna o estudo acerca destes processos importante, principalmente investigando a possibilidade de desenvolver sistemas mais simples e eficazes. O objetivo deste trabalho é a otimização do processo MIG buried arc em comando de tensão, efetuando o controle/variação da indutância da fonte de soldagem. Testes foram realizados atingindo-se a condição de arco enterrado com a fonte IMC A7 PLUS que permite o controle da indutância por meio dos parâmetros K_s e K_d . Fotos retiradas durante os ensaios, bem como filmagens em alta velocidade permitiram a visualização dos efeitos da indutância sobre o processo quanto à manutenção do arco elétrico. Resultados apresentaram melhorias significativas na estabilidade do processo utilizando menor indutância (menor atraso) na subida da corrente e maior indutância (maior atraso) na descida em eventos de curto-circuito. Embora a transferência metálica durante o processo MIG buried arc seja por voo livre, a elevada susceptibilidade deste à ocorrência de curtos-circuitos faz da indutância um parâmetro que permite o ajuste do processo, no que tange à estabilidade e comportamento, permitindo a execução do processo sem controles adaptativos.

Palavras-chave: MIG arco enterrado; Indutância; Dinâmica da corrente.

Abstract: The constant technological development requires improvements in fabrication processes regarding quality and productivity increase and cost reduction. In the welding field, MIG variations destined to high penetration, categorized as buried arc, allows the increase of welding speed and reduction of bevel area, making them a great alternative to the productive chain's enhancement. That makes the study of such processes important, mainly investigating the possibility to develop simpler and efficient systems. This work aims the optimization of voltage commanded MIG buried arc process, based on the control/variation of welding power source's inductance. The buried arc condition was met using the IMC A7 PLUS power source, which allows the inductance control through the parameters K_s and K_d . Images taken during the procedures as well as high speed filming allowed the observation of the inductance's effects over the process regarding the arc's maintenance. Significant improvements in the process' stability were met using lower inductance (faster response) during current raise and higher inductance (slower response) during current decrease in short-circuit events. Although the MIG buried arc is based on spray transfer, its high susceptibility to the occurrence of short-circuits makes the inductance a parameter that allows the process' adjustment regarding its stability and behavior, allowing its execution without adaptive controls.

Key-words: MIG buried arc; Inductance; Current dynamic.

1. Introdução

A crescente modernização dos processos de soldagem vem permitindo ao usuário atingir melhores resultados das características mecânicas e metalúrgicas na junta soldada. Isso se deve pela disponibilidade de diferentes vertentes dos processos MIG, principalmente, pelos fabricantes de fontes de soldagem. Segundo [1], atualmente mais de 50 diferentes processos de soldagem tem utilização industrial visto que a soldagem é o mais importante método para se obter a união permanente de metais [2].

O processo MIG com comprimento do arco reduzido promove uma série de vantagens, como a redução dos respingos a partir do controle da forma de onda nos eventos de curto-circuito, a possibilidade de operar em velocidades de soldagem maiores devido à alta taxa de fusão aliada a capacidade de penetração, além de um

valor reduzido no capital de investimento em sistemas de soldagem modificados por ser possível utilizar fontes e equipamentos de soldagem convencionais [3]. Deste modo, fabricantes como EWM têm desenvolvido variantes do processo MIG/MAG que exploram as vantagens proporcionadas pelo comprimento do arco curto. Segundo [4], tais vantagens são maior penetração (devido à elevada pressão do arco), fácil controle manual com arco estável, mitigação de mordeduras e aumento da produtividade com o incremento da velocidade de soldagem.

A depressão na poça de fusão cresce juntamente com o aumento da corrente de soldagem. Neste caso, a fonte de calor encontra-se próxima à interface sólido-líquido, o que aumenta a eficiência de fusão [5]. Segundo Rokhlin [6], a depressão na poça é o mecanismo dominante na penetração, uma vez que estão estreitamente relacionados.

O objetivo deste trabalho é a otimização do processo MIG buried arc em comando de tensão, efetuando o controle/variação da indutância da fonte de soldagem.

2. Materiais e Métodos

2.1. Materiais

Os ensaios foram realizados com uma fonte de soldagem eletrônica modelo Digiplus A7 450, fabricada pela empresa IMC Soldagem, que permite a variação da indutância da subida e descida da corrente por meio dos parâmetros K_s e K_d .

Para aquisição de dados foi utilizado o Sistema de Aquisição de Dados Portátil – SAP, do fabricante SPS – Sistemas e Processos de Soldagem, que permite a aquisição de sinais de tensão, corrente e velocidade de alimentação de arame em uma frequência de 5 kHz. Os dados aquisitados são apresentados em forma de gráficos permitindo uma análise detalhada das variáveis no processo.

Para a filmagem em alta velocidade, utilizou-se uma câmera IDT MotionPro Y4-S2 que possui um módulo para aquisição de dados de tensão e corrente similar ao sistema de aquisição de dados utilizado, porém com uma taxa de 25 kHz. Para as imagens foi utilizada a câmera Canon EOS 60D com lente 18-135 mm utilizando filtro de UV e regulagem da lente em 85 mm com tempo de exposição de 1/15 e abertura do diafragma 32. Para os experimentos foram utilizadas chapas de aço carbono SAE 1020 com dimensão de 220x50x12,7 mm e arame de aço carbono AWS ER70S-6 com diâmetro de 1,2 mm. Para todos os ensaios realizados foi utilizado como gás de processo Ar-8%CO₂, que está dentro da faixa para obtenção de transferência spray com o arame utilizado [7].

2.2. Metodologia

Alguns parâmetros foram mantidos constantes para todos os procedimentos: a vazão do gás de processo igual à 15 L/min, DBCP de 15 mm, ângulo da tocha de 90°, posição de soldagem plana e velocidade de soldagem igual à 30 cm/min.

Para todos os ensaios foram tiradas fotos dos processos com a finalidade de comparar a ocorrência de respingos, além da execução de filmagens em alta velocidade para análise do comportamento da poça de fusão e transferência metálica.

Para o trabalho proposto foi definido estabilidade do processo como sendo a capacidade de realizar o processo MIG *buried arc* na condição de transferência metálica por voo livre com baixa (ou sem) ocorrência de curtos-circuitos que impliquem na momentânea extinção do arco elétrico e baixa ocorrência de respingos, além da constância dos parâmetros elétricos durante o processo.

O efeito da indutância na soldagem por curto-circuito influencia diretamente na formação de respingos e na estabilidade do arco voltaico. Na fonte Digiplus A7 450 utilizada, a indutância é controlada pelas variáveis K_s (indutância de subida da corrente) e K_d (indutância de descida da corrente) e ambas podem ser ajustadas na faixa de valores de 1 a 600. Tais valores alteram a indutância segundo a relação $L = 0,02/K$. Uma vez que a fonte possui indutância interna em torno de 60uH, espera-se que valores acima de 200 não alterem muito o processo.

Em busca de uma melhor estabilidade no processo e na tentativa de otimizar o tempo de resposta da fonte de soldagem em eventos de curtos-circuitos, foram realizados testes variando os parâmetros de efeito indutivo K_s e K_d . Para isto, variou-se o K_s com incrementos de 100, enquanto o K_d foi mantido em 100. Após encontrar o valor do K_s que proporcionasse melhor estabilidade, este foi mantido enquanto o K_d foi variado analogamente ao realizado anteriormente com o K_s .

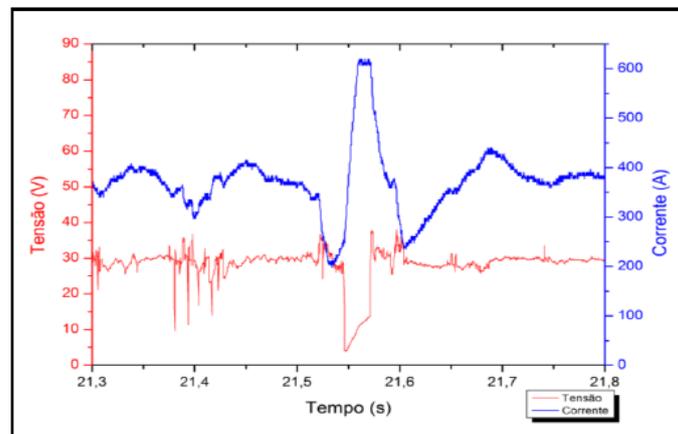
O procedimento deu-se do seguinte modo: obteve-se o modo de transferência *spray* para determinada velocidade de alimentação, na corrente de transição da transferência por curto-circuito para *spray*, e aquela foi incrementada de modo a aproximar o eletrodo da poça de fusão, pressionando o arco elétrico contra ela.

3. Resultados e Discussão

Obteve-se o modo de transferência por *spray*, na corrente de transição, para a velocidade de alimentação de arame no valor igual a 11 m/min. A partir disto, a velocidade de alimentação foi incrementada de modo a aproximar o eletrodo da poça de fusão até o limite de $V_a = 15,5$ m/min (limite este para manter as condições de estabilidade do arco aceitando eventuais curtos-circuitos). Foi observado que a abertura do arco (fase inicial do processo) poderia ser executada com 13,5 m/min de velocidade de arame, utilizando a mesma tensão, sendo isto utilizado para os demais ensaios. Esta técnica foi utilizada para atenuar possíveis instabilidades iniciais no processo.

Após a realização dos testes, verificou-se que para valores de K_s acima de 100, não há melhorias significativas, enquanto que para valores menores, a ocorrência de instabilidades é maior. Para o K_d , observou-se que para valores acima de 100, o processo tende a apresentar instabilidades, enquanto que para K_d igual ou próximo a 1, maior estabilidade é observada. Isto é evidenciado pelos resultados apresentados a seguir, para os valores K_s/K_d de 25/100, 100/100 e 100/1.

A configuração K_s 25 e K_d 100 apresentou grande instabilidade no processo, como é possível observar no oscilograma mostrado na Figura 1 gerado pela aquisição de dados, onde houveram eventos de curtos-circuitos aleatórios. Esta condição também apresentou alta taxa de geração de respingos quando comparada às outras duas condições de K_s e K_d .



Descrição	Valor
Tensão Média	29,9 V
Corrente Média	385 A
Corrente Eficaz	393 A
Velocidade Alimentação	15,5 m/min
Potência	11506 W

Figura 1. Oscilograma e dados aquisitados durante o processo. $K_s = 25$ e $K_d = 100$.

As fotos retiradas durante o processo são mostradas na Figura 2. Nota-se grande quantidade de respingos.

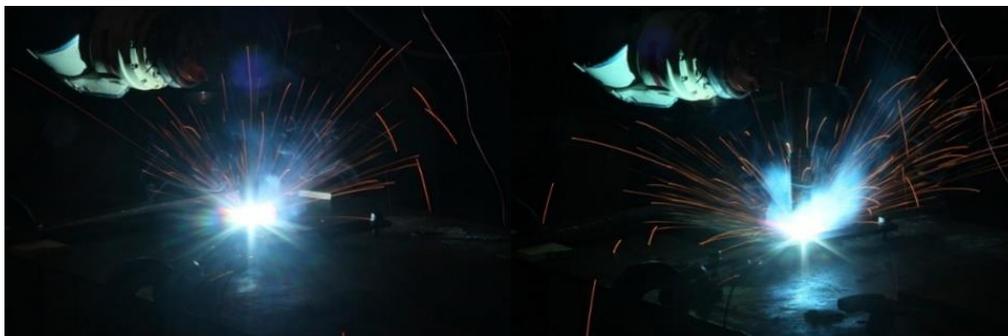
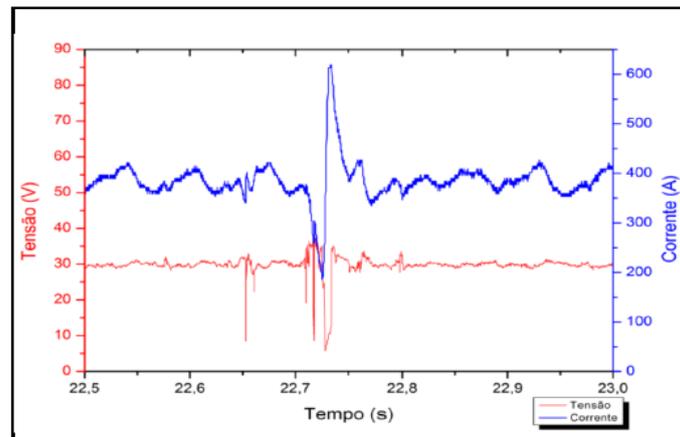


Figura 2. Ocorrência de respingos. $K_s = 25$ e $K_d = 100$.

Com o aumento do valor de K_s para 100 e mantendo K_d em 100 a resposta da subida da corrente tornou-se mais rápida em eventos de curtos-circuitos, reduzindo a taxa de respingos quando comparada à condição anterior. A rápida subida da corrente pode auxiliar no destacamento de gotas (ou do filete metálico) em curtos-

circuitos, reduzindo o tempo deste e mitigando o efeito explosivo. A Figura 3 apresenta o oscilograma obtido em um curto-circuito.



Descrição	Valor
Tensão Média	29,2 V
Corrente Média	380 A
Corrente Eficaz	390 A
Velocidade Alimentação	15,5 m/min
Potência	11048 W

Figura 3. Oscilograma e dados aquisitados durante o processo. $K_s = 100$ e $K_d = 100$.

É observável que o tempo de curto-circuito neste caso foi evidentemente menor, podendo justificar a reportada melhoria na redução dos respingos. A Figura 4 apresenta as fotos retiradas durante o procedimento.

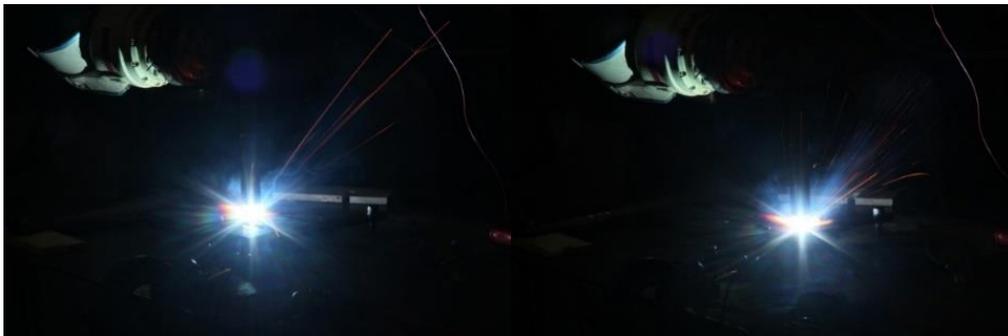
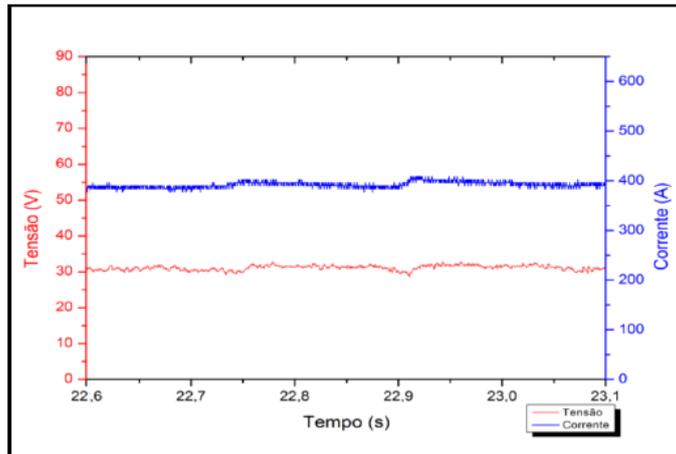


Figura 4. Ocorrência de respingos. $K_s = 100$ e $K_d = 100$.

Ao reduzir o K_d para o menor valor possível na fonte de soldagem, resultando em valores de $K_s=100$ e $K_d=1$, obteve-se a maior estabilidade do processo. A Figura 5 apresenta o oscilograma, e os parâmetros obtidos no procedimento realizado.



Descrição	Valor
Tensão Média	31 V
Corrente Média	396 A
Corrente Eficaz	396 A
Velocidade Alimentação	15,5 m/min
Potência	12147 W

Figura 5. Oscilograma e dados adquiridos durante o processo. $K_s = 100$ e $K_d = 1$.

Nota-se que a queda lenta da corrente permite manter o processo em energias mais elevadas, aumentando ligeiramente o comprimento do arco elétrico, reduzindo a susceptibilidade à ocorrência de respingos. A variação da corrente também é muito pequena, de cerca de 10A, pois a descida lenta evita as variações bruscas. Além disso, observa-se uma atenuação da oscilação da corrente durante o processo, semelhante a um efeito de amortecimento. A Figura 6 apresenta as fotos retiradas durante o procedimento $K_s 100$ e $K_d 1$.

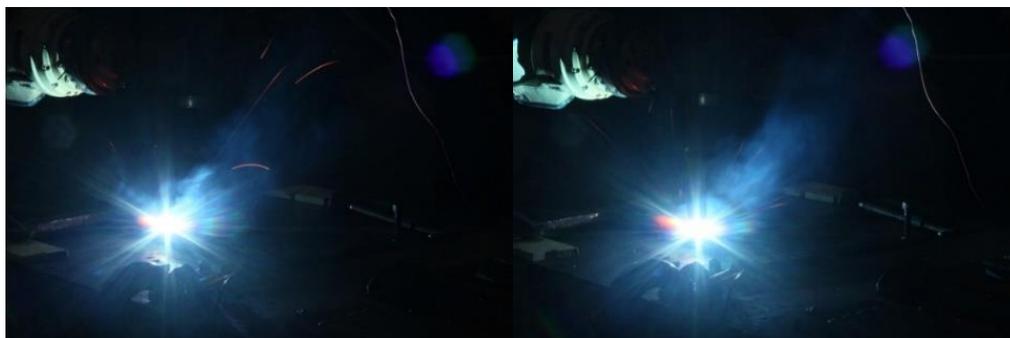


Figura 6. Ocorrência de respingos. $K_s = 100$ e $K_d = 1$.

A seguir são mostradas as imagens retiradas da filmagem em alta velocidade, onde é possível comparar as características do arco, da poça e da transferência metálica com as três condições de efeito indutivo aqui apresentada. A Figura 7 mostra o processo de soldagem com $K_s 100$ e $K_d 100$, que apesar de iniciar com o arco “enterrado” na poça, durante o procedimento desestabilizou e gerou acentuado curto-circuito.

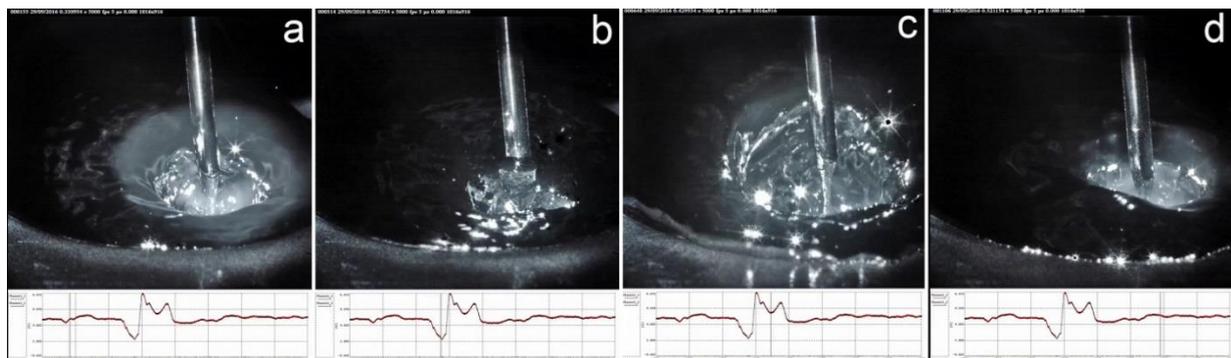


Figura 7. Comportamento da poça e do arco elétrico em $K_s = 100$ e $K_d = 100$.

Com os efeitos indutivos em Ks 25 e Kd 100, também houve a ocorrência de respingos, porém em maiores quantidades que a condição anterior. É importante citar que embora nas filmagens realizadas com este parâmetro não foram obtidas situações de elevado curto-circuito, como na anterior, é possível que situações semelhantes tenham estado presentes durante o processo. A aquisição da câmera é apresentada na Figura 8.

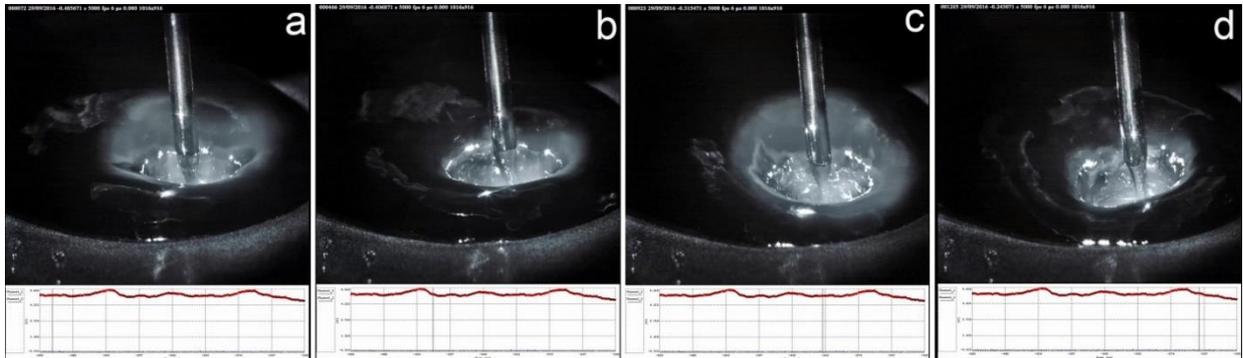


Figura 8. Comportamento da poça e do arco elétrico em Ks = 25 e Kd = 100.

Com a melhor condição obtida em Ks 100 e Kd 1, a intensidade do arco é maior, pois como dito anteriormente, devido à mudança nas características dinâmicas a corrente média no processo foi maior, incrementando a energia do arco, além de ligeiramente elevar o comprimento deste. A Figura 9 mostra o resultado da filmagem com alta velocidade na condição de Ks 100 e Kd 1.

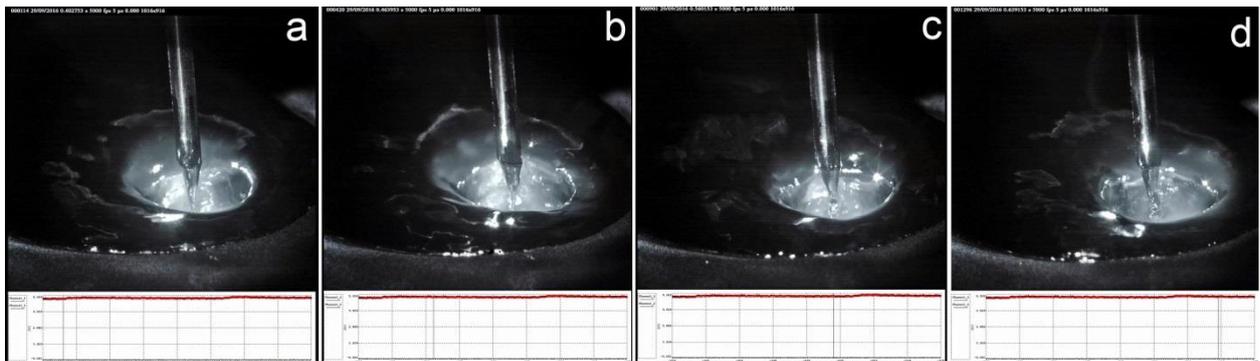


Figura 9. Comportamento da poça e do arco elétrico em Ks = 100 e Kd = 1.

Para avaliar o cordão depositado na condição de maior estabilidade foi feita uma macrografia para medição da largura do reforço e penetração. Obteve-se um valor de 10,3 mm para a penetração e 17,9 mm para largura do reforço, mostrado na Figura 10.

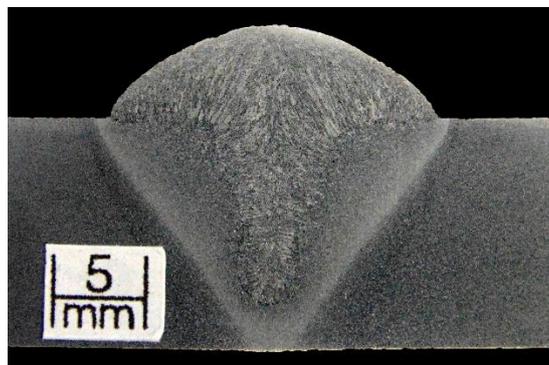


Figura 10. Macrografia da melhor condição encontrada Ks = 100 e Kd = 1.

É possível, entretanto, obter resultados melhores variando-se a velocidade soldagem. Segundo Turker [8], os maiores valores de penetração são obtidos com valores ótimos de velocidade de soldagem. O que foi obtido, entretanto, evidencia a aplicabilidade do processo quando empregado o controle da dinâmica da corrente.

4. Conclusões

Dos resultados obtidos conclui-se que é possível o desenvolvimento de um processo MIG *buried arc* em comando de tensão e controle eletrônico da indutância da fonte (sendo esta extremamente importante), excluindo a necessidade da obtenção de novas fontes de soldagem com controle adaptativo e conseqüentemente reduzindo custos. Com o controle da indutância da fonte é possível obter um processo estável, ou seja, com poucos respingos e constância nos parâmetros elétricos do arco.

Para a execução do processo MIG *buried arc* em comando de tensão é necessária a adoção de um procedimento inicial, que consta em manter a velocidade de alimentação de arame reduzida por determinado tempo, para então elevá-la ao valor desejado.

Com esses procedimentos, a soldagem ocorre de forma estável e, para os parâmetros de soldagem utilizados, proporcionou cordões com penetração de cerca de 10mm, sendo interessante para soldagem de chapas espessas e/ou com chanfros de pequena área.

5. Referências

- [1] MARQUES P. Soldagem. Fundamentos e tecnologia. Ed.3. Editora UFMG. 2002.
- [2] Simon, F. C.; Ioris, M.; Perin, T.; Alves, V. J. – Análise Prática de Penetração de Solda em Aço 1045. (2012).
- [3] STOL, I.; WILLIAMS, K. L.; GAYDOS, D. W. – Back to Basics: Using a Buried Gas Metal Arc for Seam Welds. 2006. Welding Journal.
- [4] DOMPABLO, M. New Solutions in coldArc and forceArc Welding Technology. Welding International. Vol. 27, No. 1. January 2013.
- [5] ROKHLIN, S. I.; GUU, A. C. A Study of Arc Force, Pool Depression, and Weld Penetration During Gas Tungsten Arc Welding. Welding Research Supplement. 1993.
- [6] ROKHLIN, S.I., AND GUN, A. C. 1990. Computerized radiographic sensing and control of an arc welding process. Welding Journal 69(3):83-s to 97-s.
- [7] SCOTTI, A. AND V. PONOMAREV, Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho. 2008: Artliber.
- [8] ATESBH, TURKER M. Determination of penetration with various welding parameters of electrical arc and GMA welding. Gazi Univ J 1999;12(3).