




Estudo da influência dos parâmetros da modalidade Curto Circuito Controlado (CCC) na soldagem de escapamentos automotivos

Bruno Pozzebon Oleinick ^{1*} 
Aloysio Arthur Becker Fogliatto ¹ 
Matheus Azevedo Auth ² 

Resumo

O escapamento automotivo pode ser considerado um dos componentes mais importantes no projeto de automóveis, sendo geralmente fabricado em aço galvanizado e unido por meio da soldagem GMAW. Porém, devido a instabilidades geradas pela camada de zinco presente no revestimento das peças é de suma importância o estudo aprofundado nos processos de união destes materiais, utilizando-se por exemplo modalidades avançadas de controle de corrente, como o Curto Circuito Controlado (CCC). Deste modo, neste trabalho foram analisados os parâmetros da fase de arco da curva CCC (Ia1, Ia2, Ta1 e Ta2), buscando entender as suas influências sobre a energia de soldagem, estabilidade do processo, qualidade visual e sujidade gerada. Dentre os principais resultados obtidos destaca-se - no contexto da soldagem de escapamentos automotivos fabricados em aço galvanizado - a influência de todos os fatores sobre a energia de soldagem, a comprovação da capacidade do CCC em produzir cordões com maior grau de qualidade visual, com baixo nível de respingos e sem a presença de sujidade (comparativamente a modalidades convencionais) e a influência da fase análoga ao “tail-out” no controle de estabilidade do processo, devido a sua relação com o mecanismo de formação da gota e da transferência de metal.

Palavras-chave: Curto Circuito Controlado; Escapamentos automotivos; Aço galvanizado; GMAW com controle de corrente.

Investigation of the effects of Controlled Short Circuit (CCC) welding parameters on automotive exhaust systems

Abstract

Automotive exhaust systems can be considered one of the most important components in vehicle design, generally manufactured from galvanized steel and joined using the GMAW (Gas Metal Arc Welding) process. However, due to instabilities generated by the zinc layer present in the coating of the parts, an in-depth study of the joining processes for these materials is of paramount importance utilizing, for example, advanced current control modalities such as Controlled Short Circuit (CCC). Accordingly, this study analyzed the arc phase parameters of the CCC curve (Ia1, Ia2, Ta1 e Ta2) to understand their influence on welding energy, process stability, visual quality, and dirt burned area. Among the primary results obtained in the context of welding galvanized steel automotive exhausts, the following stand out, the influence of all factors on the welding energy, the proven capability of the CCC mode to produce weld beads with higher visual quality, low spatter levels, and an absence of dirt burned area (compared to conventional modalities) and the influence of the phase analogous to ‘tail-out’ on process stability control, due to its relationship with the droplet formation mechanism and metal transfer.

Keywords: Controlled Short Circuit; Automotive exhaust; Galvanized steel; Current-Controlled GMAW.

¹Laboratório de Soldagem e Manufatura Aditiva – LASOLDAM, Instituto Federal Catarinense – IFC, Luzerna, SC, Brasil.

²Pioneiro Escapamentos, Água Doce, SC, Brasil.

*Autor correspondente: bruno.oleinick@gmail.com

E-mails: aloy시오.fogliatto@ifc.edu.br; mateus.auth@pioneiroescapamentos.com.br



1 Introdução

A indústria automobilística, em virtude da alta competitividade, está sempre buscando a melhoria contínua, proporcionando redução da variabilidade, custos e o retrabalho gerado. Neste segmento industrial um ponto crucial é a necessidade de redução da emissão de poluentes e atenuação dos ruídos provenientes dos motores à combustão interna, o que torna os escapamentos automotivos peças essenciais do projeto [1]. O silenciador traseiro é formado por diversas peças, as quais são fabricadas utilizando-se tubos e chapas de aço carbono AISI 1006 e AISI 1008 galvanizados. Os componentes dos silenciadores são unidos por meio da soldagem, mais especificamente pelo processo *GMAW* (*Gas Metal Arc Welding*).

Os aços galvanizados são comumente utilizados na indústria automobilística e sua soldabilidade é algo a ser estudado [2]. Um fator que dificulta a soldagem dos aços carbono galvanizados é a camada de zinco presente nos mesmos, a qual, durante a soldagem, provoca uma diminuição na estabilidade do arco e um aumento na quantidade de respingos, além de uma certa quantidade desta camada de zinco ser vaporizada durante a soldagem, aprisionando os gases dentro da zona fundida e, conseqüentemente, formando poros superficiais e/ou internos [3].

Como observado por pesquisadores, a aplicação de processos convencionais na soldagem de silenciadores de escapamentos automotivos gera um certo nível de retrabalho para remoção de poros e sujidade ao redor da solda [4]. Uma possível solução para este problema é a utilização de modalidades avançadas de soldagem com controle de corrente, como o Curto Circuito Controlado (CCC).

Os processos com controle de corrente atuam de forma semelhante ao processo *GMAW* convencional no modo de transferência de metal por curto circuito, porém, apresentam como diferencial a possibilidade de controlar-se a curva de corrente, ou seja, é possível variar-se os valores de corrente e os tempos de diferentes fases durante a soldagem, visando-se minimizar a instabilidade do arco, a quantidade de respingos, a temperatura do processo de soldagem, entre outros. Dentre esses processos destaca-se o curto circuito controlado (CCC), o qual tem como principal vantagem apresentar um nível mínimo de salpicos/respingos e executar a soldagem de chapas finas, menores que 1 mm de espessura, por meio do controle e monitoramento dos fenômenos físicos envolvidos na soldagem, possibilitando o controle de parâmetros da fase de arco (definidos como I_{a1} , I_{a2} e seus respectivos tempos) e da fase de curto, permitindo que eventos físicos como o toque e o desprendimento da gota ocorram em níveis mínimos de corrente, gerando maior estabilidade para o processo, além da possibilidade do controle da intensidade e dos tempos das correntes envolvidas na formação da gota durante a fase de arco [5-7].

Com a utilização de modalidades avançadas com controle de corrente, como o CCC, combinadas com a robotização/automatização do processo de soldagem, é possível

garantir maiores repetibilidade e qualidade para o produto, porém, os parâmetros de soldagem como a tensão, corrente, velocidade de soldagem, velocidade de arame, distância bico de contato-peça (DBCP) e ângulo de deslocamento da tocha, devem estar adequadamente ajustados de acordo com o material a ser soldado.

O objetivo deste estudo é, a partir de testes prévios e projetos de experimentos (*DOE - Design of Experiments*), buscar o entendimento acerca da influência dos valores de corrente (I_{a1} e I_{a2}) e seus tempos (T_{a1} e T_{a2}) sobre as seguintes saídas do processo: energia de soldagem, estabilidade do processo, geração de sujidade e qualidade visual dos cordões.

2 Metodologia

O processo de soldagem foi realizado por meio de uma fonte de potência DIGIplus A7C3C do fabricante IMC e um dispositivo automatizado de movimentação da tocha Tartilope V2F do fabricante SPS, enquanto a aquisição de dados foi efetuada com o SAP V4 Ti do fabricante IMC a uma taxa de aquisição de 5 kHz.

Visando aproximar-se da situação real de soldagem dos escapamentos automotivos foram utilizadas chapas de 0,95mm de aço baixo carbono galvanizado.

As condições iniciais do estudo foram definidas por meio de revisão de literatura e testes prévios, os quais auxiliaram na definição dos limites superior e inferior dos parâmetros controláveis estudados, assim como na definição dos valores fixados para os demais parâmetros da curva CCC.

2.1 Parâmetros controláveis de estudo

A definição dos parâmetros fixos da curva CCC foi realizada por meio de testes prévios, os quais tiveram como objetivo o entendimento da influência de cada parâmetro do CCC, adquirindo embasamento para a definição de quais seriam os parâmetros analisados neste estudo. Deste modo, os valores dos parâmetros fixos foram escolhidos a partir do manual da fonte de soldagem [8], e são mostrados na Tabela 1.

De maneira semelhante, os valores dos limites superior e inferior dos parâmetros controláveis de estudo também foram definidos a partir de testes prévios, nos quais buscou-se encontrar valores extremos que possibilitaram a soldagem de maneira satisfatória. Na Tabela 2 são mostrados os limites inferior e superior dos parâmetros controláveis.

2.2 Parâmetros fixos

Os parâmetros fixos do estudo também foram definidos por meio de testes prévios, os quais possibilitaram a elaboração de um estudo inicial. Neste estudo foi utilizado um *DOE Box-Behnken* de 3 fatores visando à definição da Velocidade de Arame (V_a), Distância do Bico de Contato para a Peça (DBCP) e Ângulo de deslocamento da tocha (θ).

Na Figura 1a estão representados o ângulo de deslocamento e a DBCP, enquanto a Figura 1b ilustra o ângulo de trabalho utilizado.

Os parâmetros fixos utilizados no estudo são indicados pela Tabela 3.

Tabela 1. Parâmetros fixos da curva CCC

Parâmetro	Ia3 [A]	Ic1 [A]	Tc1 [ms]	Ic3 [A]	dI3 [A/ms]	Tr1 [ms]	Tr2 [ms]	Kr	Ucc [V]
Valor	50	30	0,5	145	70	0,5	0,6	1,2	10

Tabela 2. Parâmetros de estudo e seus limites

Parâmetros	Limite Inferior	Ponto central	Limite Superior
Ia1 (A)	260,00	290,00	320,00
Ta1 (ms)	1,20	1,45	1,70
Ia2 (A)	70,00	115,00	160,00
Ta2 (ms)	1,00	3,50	6,00

Tabela 3. Parâmetros fixos

Parâmetro	Valor
Velocidade de arame (m/min)	5,0
DBCP (mm)	15,7
Ângulo de deslocamento da tocha [θ] (°)	30,0
Metal de base	AISI 1006 galvanizado de 0,95mm de espessura
Metal de adição	AWS ER70S-6 diâmetro 1,0mm
Gás de proteção	92% Ar 8% CO ₂
Vazão do gás (Litros/min)	13,0
Velocidade de soldagem (mm/min)	600,0

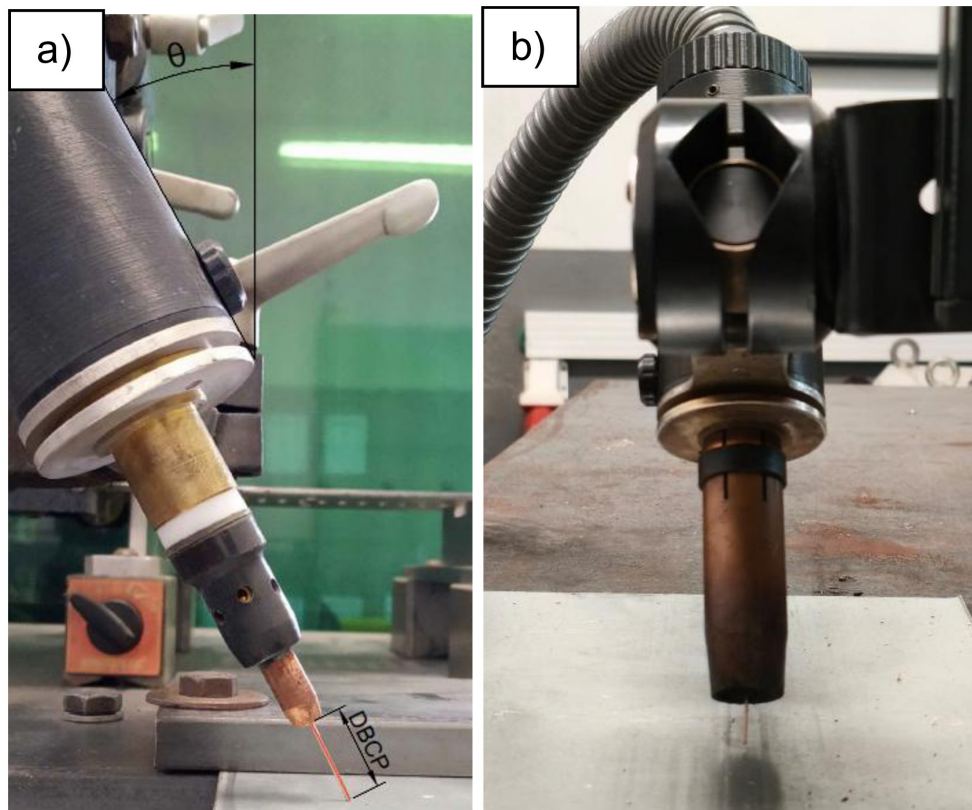


Figura 1. (a) Representação do ângulo de deslocamento da tocha e DBCP; (b) Ângulo de trabalho.

2.3 Delineamento de experimentos

Neste trabalho, utilizou-se um planejamento de experimentos *Box-Bhenken* com 4 fatores e 3 pontos centrais, totalizando 27 experimentos. Isso significa que cada fator é avaliado em três diferentes níveis, ou seja: limite superior, limite inferior e ponto médio. Foi utilizado um software para o desenvolvimento das análises estatísticas.

2.4 Saídas

Com o intuito de encontrar-se os melhores parâmetros de soldagem foram analisadas características do processo e características geométricas do cordão, mais especificamente, as saídas energia de soldagem, estabilidade do processo, sujidade e qualidade visual.

A energia de soldagem foi obtida por meio do SAP V4 Ti, o qual calcula a potência média do processo de acordo

com o que foi descrito por Nascimento et al. [9], sendo este método considerado o mais adequado para o cálculo da potência do processo. Deste modo, o valor da energia de soldagem foi encontrado por meio da divisão da potência média instantânea pela velocidade de soldagem.

Para a quantificação da estabilidade do processo, foram realizadas cinco medições em três regiões distintas do cordão, sendo elas: dois segundos após o início da soldagem, dois segundos antes do fim da soldagem e no ponto médio desta região (Figura 2).

Nestas medições buscou-se quantificar o valor médio do período do ciclo da transferência de metal e, logo em seguida, calculou-se os desvios padrão desta média. Na Figura 3 são apresentados os pontos da curva de corrente de soldagem a partir dos quais foram realizadas as medições de cinco períodos consecutivos.

A qualidade visual foi definida a partir dos critérios mostrados na Tabela 4.

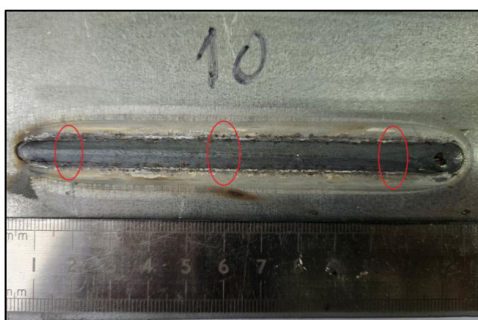


Figura 2. Regiões da medição da estabilidade.

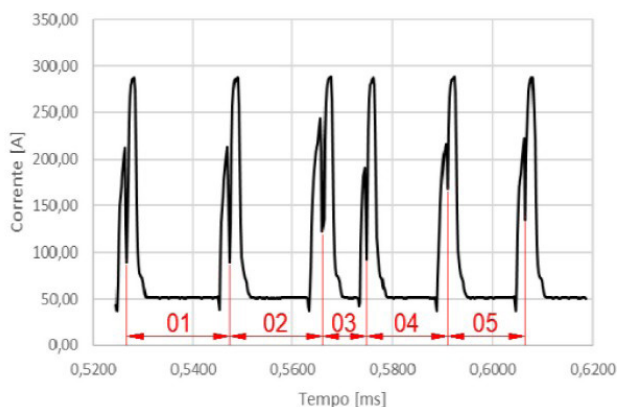


Figura 3. Medição da estabilidade.

3 Resultados e discussões

3.1 Qualidade visual

A Figura 4a mostra um cordão de solda com a maior Qualidade Visual possível, enquanto a Figura 4b apresenta um cordão com Qualidade Visual 4, de acordo com os critérios estabelecidos na Seção 2.

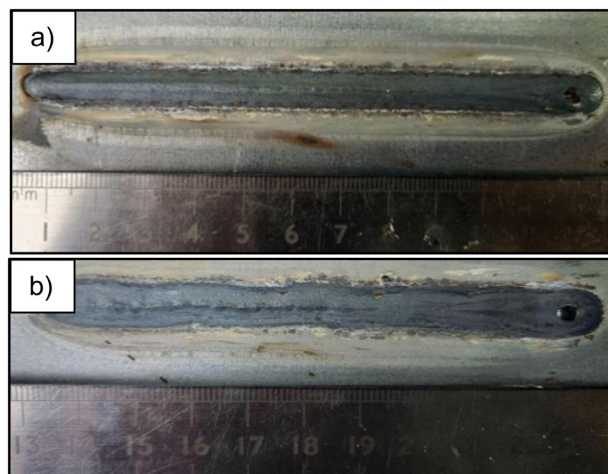


Figura 4. (a) Cordão #10 com Qualidade Visual 1 e (b) Cordão #18 com Qualidade Visual 4.

Tabela 4. Critérios de Qualidade Visual

Critério	Qualidade Visual	Descrição
1	1	Cordão sem poros, sem salpicos, aspecto superficial regular, perfil de reforço regular.
2	2	Cordão sem poros, sem salpicos, aspecto superficial regular, perfil de reforço irregular.
3	3	Cordão sem poros, sem salpicos, aspecto superficial irregular, perfil de reforço regular.
4	4	Cordão sem poros, com salpicos, aspecto superficial irregular, perfil de reforço irregular.
5	5	Cordão com poros, com salpicos, aspecto superficial irregular, perfil de reforço irregular.

Nota-se, pela análise da Figura 4a, a ausência de poros e salpicos, o aspecto superficial e o perfil de reforço regulares. Enquanto na Figura 4b pode-se observar a presença de alguns salpicos, margens e perfil de reforço irregulares. Resultado que condiz com o que foi proposto pelo grupo de pesquisadores do LABSOLDA-UFSC [5-7], os quais afirmam a capacidade do CCC de utilizar as vantagens da transferência de metal por curto-circuito sem os prejuízos desta modalidade, como o excesso de salpicos e as irregularidades na transferência de metal, o que poderia acarretar em margens e perfil de reforço irregulares. Deste modo, devido ao baixo número de cordões classificados com conceito 4 na qualidade visual, os resultados deste trabalho reafirmam a capacidade do CCC em produzir cordões uniformes com baixo índice de salpicos, na soldagem de chapas finas de aço galvanizado.

Neste trabalho considerou-se que um determinado parâmetro (ou interação entre dois parâmetros) afetou

estatisticamente uma resposta quando o valor resultante para o fator P (nível de significância) for igual ou inferior a 5%, ou seja, adotou-se um intervalo de confiança estatística de 95%. Neste sentido, de acordo com a análise de variância, constatou-se que os parâmetros Ia2 e Ta2, assim como a interação Ia1*Ta2, foram significativos para a Qualidade Visual. A Figura 5 apresenta os gráficos de efeitos principais dos parâmetros Ia2 e Ta2, enquanto a Figura 6 apresenta o gráfico de superfície de resposta da interação entre dois parâmetros Ia2*Ta2, ambos para a Qualidade Visual.

A partir dos critérios estabelecidos previamente na Tabela 3, a Figura 5 mostra que a Qualidade Visual diminui com os aumentos de Ia2 e Ta2, visto que um maior valor na escala do gráfico representa uma pior qualidade visual. Estes dois parâmetros representam a fase 6 da curva CCC que, por sua vez, é análoga à fase “tail out” da curva STT do fabricante Lincoln.

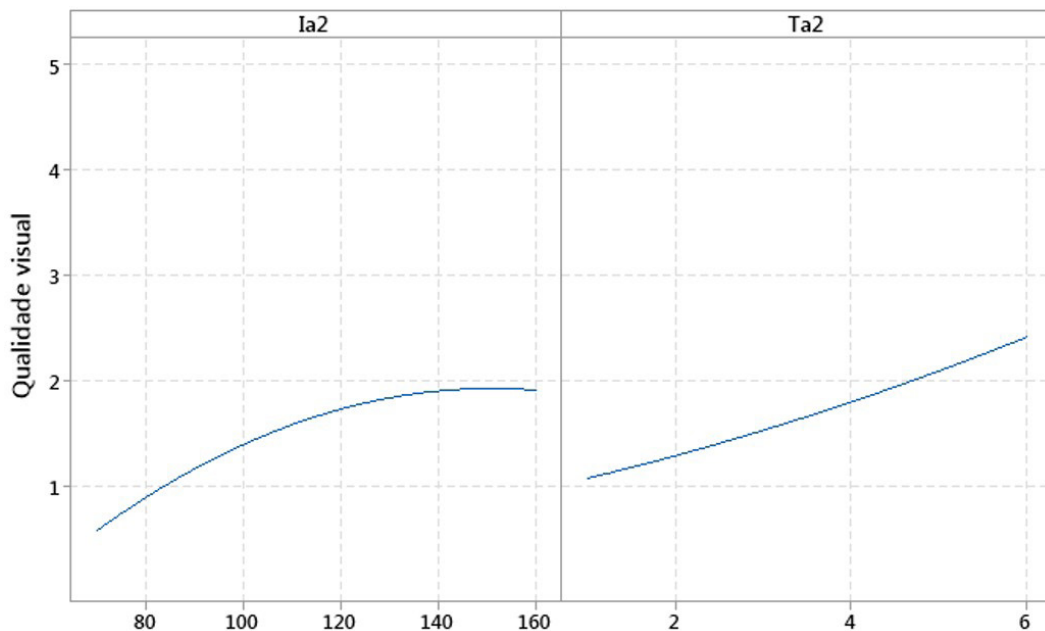


Figura 5. Gráficos de efeitos principais para Qualidade Visual.

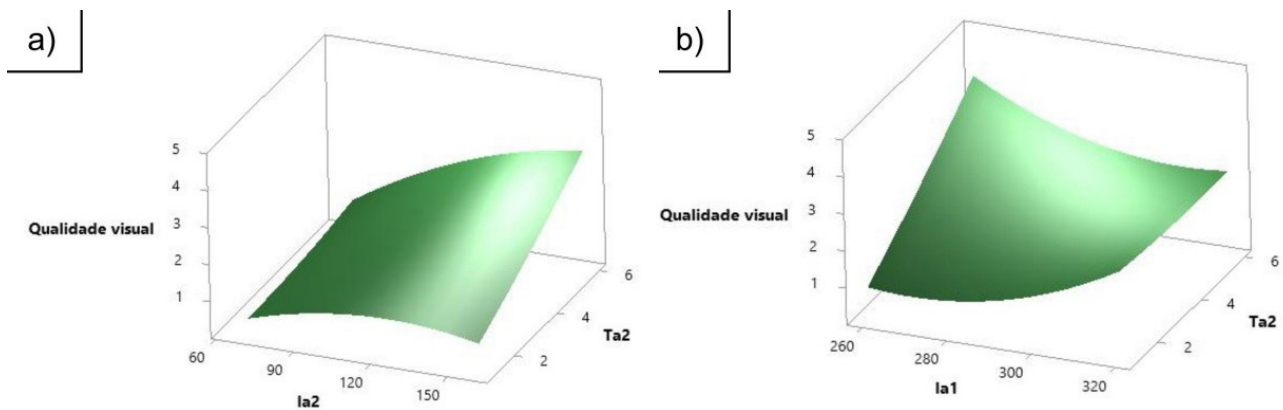


Figura 6. (a) Interação Ia2 x Ta2; (b) Interação Ia1 x Ta2.

Para ambos os fabricantes, esta fase da curva possibilita controles apurados da energia de soldagem (ou aporte térmico) e da poça de fusão [10]. Deste modo, tem-se que, quando são utilizados menores valores de energia de soldagem - a partir da regulagem de menores $Ia2$ e $Ta2$ - a Qualidade Visual é maior, o que pode ser confirmado por meio da análise da superfície de resposta da Figura 6. Os aspectos relacionados à Energia de Soldagem serão discutidos adiante neste trabalho.

Nota-se que quando $Ia1$ está em seu nível superior, $ta2$ não exerce influência porém quando $Ia1$ está em seu nível inferior, $ta2$ exerce influência, o que pode conduzir à suposição de que somente com $Ia1$ em seu nível inferior há efetiva atuação da fase tail out - de acordo com suas funções - o que pode fazer sentido para qualidade visual, ou seja: quando há controle mais apurado do aporte térmico a partir do tail out (com $Ia1$ baixo), obtém-se cordões com perfil de reforço regular, sem salpicos, com aspecto superficial regular.

3.2 Sujidade

A Figura 7 apresenta um cordão de solda, representando o comportamento que se repete em todos os casos.

Ao comparar-se os resultados obtidos neste trabalho - evidenciados na Figura 7 - com o trabalho realizado por pesquisadores do LASOLDAM do IFC Campus Luzerna [4], constata-se que a sujidade das soldas obtidas com o CCC tende a zero, ou seja, não foi possível quantificar uma área. Este resultado pode ser considerado relevante na aplicação de escapamentos automotivos, reafirmando a capacidade do CCC em atender os requisitos deste importante segmento industrial.

3.3 Energia de soldagem

A Figura 8a apresenta o cordão de solda com a maior energia de soldagem, enquanto a Figura 8b apresenta o cordão de solda com a menor energia de soldagem.

De acordo com a análise de variância, constatou-se que todos os parâmetros de corrente, assim como as interações $Ia1*Ta1$, $Ia1*Ia2$ e $Ia2*Ta2$, foram significativos para a Energia de Soldagem. A Figura 9 apresenta o gráfico de superfície de resposta da interação entre dois parâmetros $Ia2*Ta2$ para a Energia de Soldagem.

A partir da análise dos dados e da Figura 9, fica evidente que um aumento tanto dos valores de corrente de soldagem, como dos tempos, conduz ao aumento da energia de soldagem, fato que pode ser justificado pela energia de soldagem ser diretamente proporcional à potência média instantânea. Adicionalmente, percebe-se a maior influência de $Ia2$ na energia de soldagem, devido ao tempo de permanência neste patamar de corrente ser relativamente maior que no patamar $Ia1$ (1,2 a 1,7 ms para $Ta1$ e 1,0 a 6,0 ms para $Ta2$).

3.4 Estabilidade

A Figura 10a apresenta o cordão de solda com a menor estabilidade, enquanto a Figura 10b apresenta o cordão de solda com a maior estabilidade.

Por meio da análise visual dos cordões, pôde-se perceber certa variação nas margens do cordão, sendo que o cordão da Figura 10a apresenta variação relativamente alta de largura ao longo de seu comprimento.

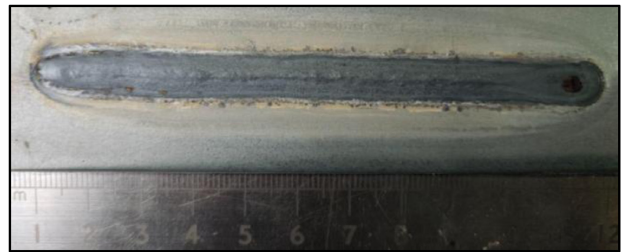


Figura 7. Cordão de solda.

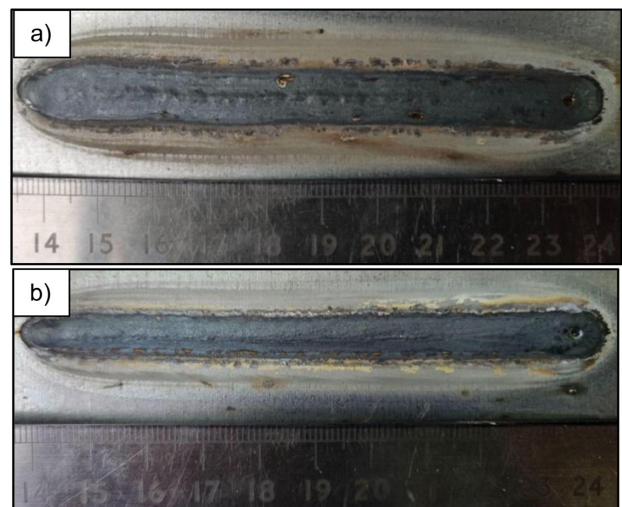


Figura 8. (a) Cordão #11 com maior energia de soldagem e (b) Cordão #13 com menor energia de soldagem.

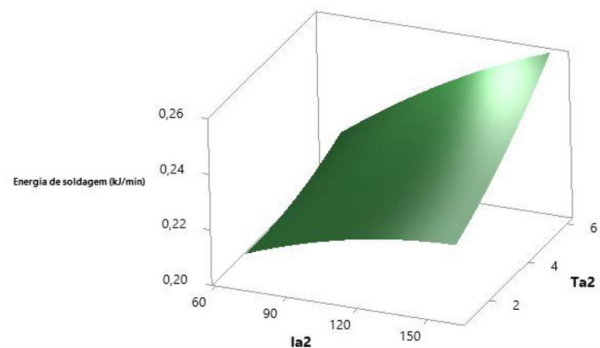


Figura 9. Gráfico de superfície de resposta para energia de soldagem $Ia2*Ta2$.

Os critérios de classificação dos cordões utilizados neste trabalho foram baseados nos estudos de pesquisadores do LABSOLDA da UFSC [5-7], os quais consideram que maiores índices de estabilidade são atingidos quando o processo é realizado com o menor nível de salpicos/respingos e quando são obtidos cordões de solda geometricamente homogêneos em toda a sua extensão.

Isto corrobora com o trabalho de Scotti e Ponomarev [11], no qual o autor afirma que a estabilidade do processo

MIG/MAG é atingida quando pode-se garantir a estabilidade do arco elétrico e da transferência de metal, sugerindo que ao conseguir-se a transferência de metal com menos perturbações é possível a obtenção de cordões com melhores acabamentos superficiais. Coincidindo com os resultados obtidos neste estudo, por meio da análise da qualidade visual, pode-se perceber que o cordão com menor estabilidade (Figura 10a) foi classificado com uma qualidade visual inferior ao de maior estabilidade (Figura 10b).

Adicionalmente, o autor cita que o período dos curtos circuitos pode ser um fator significativo para a estabilidade do processo MIG/MAG convencional, desta forma, ao realizar-se a análise do desvio padrão dos tempos de duração da fase de curto circuito e comparar-se com o valor do desvio padrão do período total da curva, percebe-se que ambos os critérios tendem a convergir entre si, conforme representado pela Figura 11.

De acordo com a análise de variância, constatou-se que os parâmetros Ia1 e Ia2, assim como a interação Ia2*Ta2, foram significativos para a Estabilidade. A Figura 12a apresenta os gráficos de efeitos principais dos parâmetros Ia1 e Ia2, enquanto a Figura 12b apresenta o gráfico de superfície de resposta da interação entre dois parâmetros Ia2*Ta2, ambos para a Estabilidade.

Os gráficos de superfície de resposta de todas as interações de 2 parâmetros (excetuando-se a interação Ia2*Ta2) indicam que, aparentemente, a variação de Ia1 nos níveis do projeto de experimentos não demonstrou-se significativa para a Estabilidade. Porém, ao analisar-se os gráficos de efeitos principais mostrados na Figura 12a tem-se que, de acordo com a análise de variância, os parâmetros Ia1 e Ia2 influenciaram significativamente na Estabilidade, sendo que somente a interação entre Ia2 e Ta2 (Figura 12b) pode ser considerada significativa para esta saída.

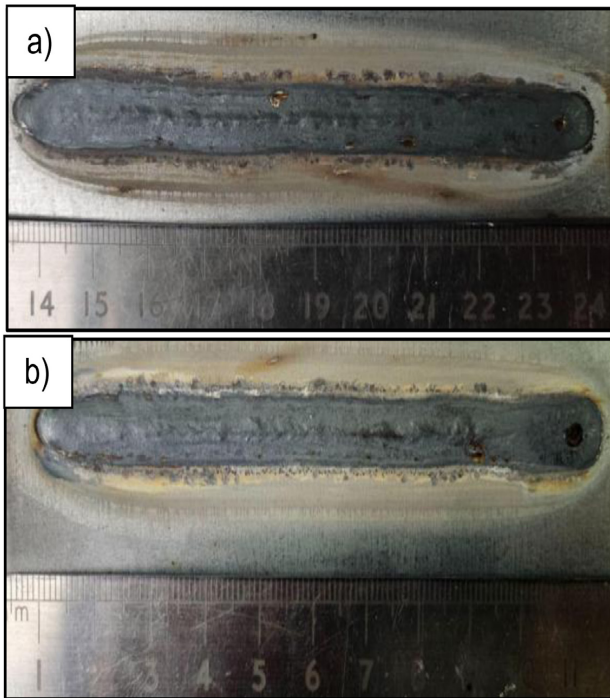


Figura 10. (a) Cordão #11 com menor estabilidade; (b) Cordão #22 com maior estabilidade.

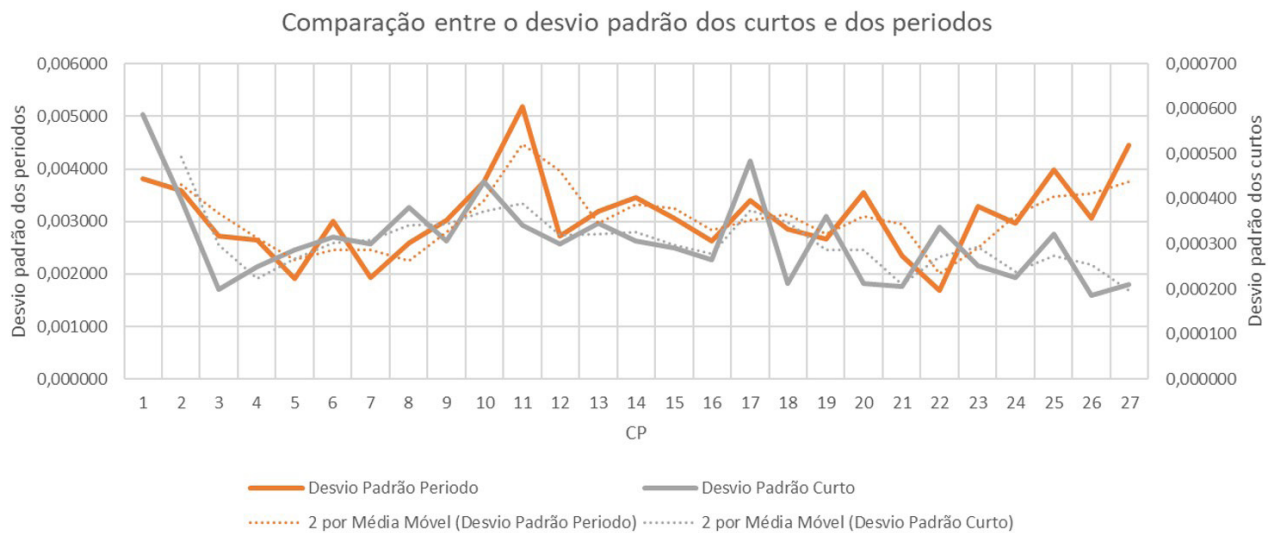


Figura 11. Comparação entre o desvio padrão dos curtos circuitos e dos períodos.

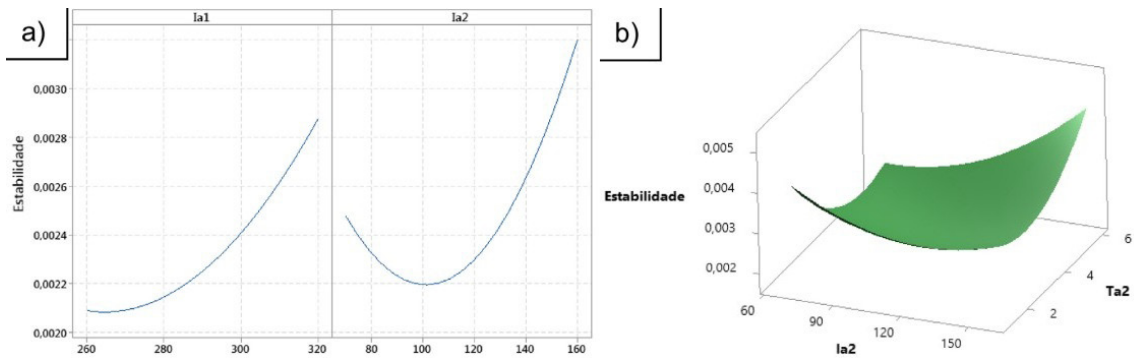


Figura 12. Gráficos de efeitos principais e superfície de resposta para estabilidade. (a) Efeitos principais; (b) Superfície de resposta.

Aqui, novamente, a influência significativa da fase 6 da curva CCC no resultado das saídas do processo vai ao encontro da literatura, i.e, de acordo com Scotti e Ponomarev [11], esta parte da curva influencia na frequência de destacamento da gota, e, por consequência, no volume e conteúdo calorífico das gotas com as respectivas ações sobre a estabilidade e geometria do cordão de solda. Ainda, de acordo com Silva e Dutra [6], este patamar da curva - referente à combinação de valores de Ia2 e Ta2 - pode proporcionar controle da penetração do cordão de solda, sendo atribuída também a função de amortecimento do contato entre a gota e a poça de fusão, contribuindo assim com a estabilidade do banho metálico.

Adicionalmente, a influência de Ia1 e Ia2 na estabilidade do processo pode ser reafirmada a partir do trabalho de Scotti e Ponomarev [11], o qual cita que durante a fase de arco (fase 6 da curva CCC) a gota formada na ponta do eletrodo assume um formato esférico, porém, caso o diâmetro dessa gota atinja um valor maior do que 1,2 vezes o diâmetro do eletrodo, as forças de tensão superficial não serão suficientes para que a mesma mantenha esse formato esférico, assumindo um formato alongado e podendo ocasionar curtos circuitos acidentais. Isto, por sua vez, pode gerar uma grande quantidade de respingos e prejudicar a estabilidade do processo.

4 Conclusão

A partir dos resultados obtidos neste estudo foi possível compreender a influência dos parâmetros da fase de arco presentes na modalidade Curto Circuito Controlado da fabricante IMC, analisando seus efeitos nos sinais elétricos adquiridos, nas características geométricas do cordão e na estabilidade do processo, dentre as principais conclusões pode-se citar:

- Devido ao baixo número de cordões com conceito 4 (além da ausência da classificação 5) na qualidade visual, pode-se comprovar a eficácia do CCC em produzir cordões com maior uniformidade das margens e do reforço, além da baixa presença de respingos. Os principais parâmetros atrelados à qualidade visual são Ia2 e Ta2, parâmetros análogos à fase do “tail-out” de processos como o STT.
- Ao comparar-se os resultados obtidos neste trabalho com os resultados de estudos realizados com a modalidade do curto circuito convencional, foi possível constatar-se que os níveis de sujidade gerados com a utilização do CCC tendem a zero, quando comparados com modalidades convencionais.
- É possível perceber a influência de todos os parâmetros da fase de arco na energia de soldagem, fato que vai de encontro com a literatura a qual afirma que a fase de arco é a principal responsável pelo controle do aporte térmico do processo.
- Os resultados obtidos para a estabilidade dos cordões também vão de encontro com a literatura, de modo que cordões com maior estabilidade receberam melhores classificações na qualidade visual, indicando que a transferência de metal aconteceu com menos perturbações.
- Pode-se constatar que parâmetros referentes a fase de “tail-out” apresentaram maior influência na estabilidade do processo, o que possivelmente atrelado ao fato de esta fase ser a responsável por determinar a frequência de destacamento da gota, além de influenciar no amortecimento do contato da gota com a poça de fusão.

Referências

- 1 Rezende MC. Análise de silenciadores de escape automotivo visando redução da emissão de ruído [Trabalho de Conclusão de Curso]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia; 2020.

- 2 Amaral FF, Almeida FA, Costa SC, Leme RC, Paiva AP. Aplicação da metodologia de superfície de resposta para otimização do processo de solda a ponto no aço galvanizado AISI 1006. *Soldagem e Inspeção*. 2018;23(2):129-142. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/si2302.02>.
- 3 Souza MHM, Quintão WP. Análise da influência dos metais de adição na soldagem de chapas de aço microligado galvanizadas soldadas pelo processo GMAW robotizado [Trabalho de Conclusão de Curso]. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2016.
- 4 Gabriel Rover Barbieri, Aloysio Arthur Becker Fogliatto, Mateus Azevedo Auth dos parâmetros do processo de soldagem no aspecto qualitativo na região de solda de escapamentos automotivos. *Semana da Ciência e Tecnologia*. 2022;1(1):1-11.
- 5 Silva RHG, Dutra JC, Gohr R Jr. Fundamentos científicos e tecnológicos para o desenvolvimento do processo MIG/MAG por curto-circuito controlado (CCC) uma revisão da literatura. Parte 1 de 3: Aspectos históricos e dos mecanismos de fusão do arame. *Soldagem e Inspeção*. 2007;12(3):237-243.
- 6 Silva RHG, Dutra JC. Fundamentos científicos e tecnológicos para o desenvolvimento do processo MIG/MAG por curto-circuito controlado (CCC) uma revisão da literatura. Parte 2 de 3: Formação da gota metálica, gases de proteção, mecanismos de penetração, aporte térmico e aspectos econômicos. *Soldagem e Inspeção*. 2007;12:326-335.
- 7 Silva RHG, Dutra JC. Fundamentos científicos e tecnológicos para o desenvolvimento do processo MIG/MAG por curto-circuito controlado (CCC) uma revisão da literatura. Parte 3 de 3: Princípios dos sistemas MIG/MAG em curto-circuito com controle de corrente. *Soldagem e Inspeção*. 2008;13(1):70-81.
- 8 IMC. Manual de instruções: DIGIplus A7, modelos DC, AC e AC3C. 8. ed. Palhoça: IMC; 2015.
- 9 Alexandre Saldanha do Nascimento, Marco Antônio Batista, Vinicius Castanheira do Nascimento, Américo Scotti dos métodos de cálculo de potência elétrica em soldagem a arco e as consequências sobre as previsões geométricas, térmicas e metalúrgicas da junta. *Soldagem e Inspeção*. 2006;12(2):97-106.
- 10 Direne H Fo, Silva RHG, 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. In: *Anais do XXXVIII CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem; 2012 Out; Ouro Preto, MG, Brasil*. São Paulo: ABS; 2012.
- 11 Scotti A, Ponomarev V. *Soldagem: MIG/MAG*. São Paulo: Artliber; 2008.

Recebido em: 07 Jan. 2026

Aceito em: 14 Abr. 2026

Editor responsável:

Paula Fernanda da Silva Farina 