

# Influência da Defasagem Entre as Correntes na Estabilidade do Processo MIG/MAG DA Pulsado com Velocidades de Alimentação Distintas

Kamilla Giló Santiago<sup>1</sup>, Igor Paulino Fernandes<sup>2</sup>, Hélio Cordeiro de Miranda<sup>2</sup>, Cleiton Carvalho Silva<sup>2</sup>, Marcelo Ferreira Motta<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE, Horizonte, CE, Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Federal do Ceará – UFC, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Fortaleza, CE, Brasil.

Recebido: 18 Jan., 2018

Aceito: 14 Nov., 2018

E-mails: kamilla\_gilo@yahoo.com.br  
(KGS), cleiton@metalmat.ufc.br (CCS),  
marcelof@ufc.br (MFM)

**Resumo:** Uma variação do processo MIG/MAG duplo arame é a soldagem com corrente constante pulsada nos dois eletrodos, empregando a defasagem entre os pulsos de corrente com o objetivo de atribuir uma maior estabilidade aos arcos voltaicos. Em alguns trabalhos disponíveis na literatura, os autores encontraram resultados que mostraram que esse efeito da defasagem não foi significativo. Outra vertente que também é largamente defendida na soldagem MIG/MAG pulsada é a condição de uma gota por pulso com diâmetro de gota próximo ao do eletrodo, porém nas soldagens MIG/MAG com configuração duplo arame utilizando eletrodos com velocidades de alimentação distintas não é possível manter simultaneamente a defasagem entre as correntes e a condição de uma gota por pulso nos dois eletrodos. Os resultados obtidos neste trabalho mostraram que, para soldagens realizadas com processo MIG/MAG na configuração duplo arame com diferentes velocidades de alimentação, a utilização de defasagem entre as correntes passou a ser determinante para estabilidade do arco e para a qualidade do cordão de solda mesmo com diâmetros de gotas distintos entre os dois arames e maiores que o diâmetro do eletrodo.

**Palavras-chave:** MIG/MAG duplo arame; Defasagem; Diâmetro de gota.

## Influence of Out-of Phase Current Pulse in the T-GMAW Pulsed Process Stability with Different Wire Feed Speeds

**Abstract:** One of the possibilities of variation of the Tandem GMAW process is the use of out-of-phase current pulse, with the aim of giving greater stability to the voltaic arcs. In some works available in the literature, the authors found results that showed that this effect of out-of-phase current pulse was not significant. Another aspect that is also widely defended in pulsed GMAW welding is the condition of a drop per pulse with droplet diameter close to the electrode, but T-GMAW configuration using electrodes with different feed speeds, it is not possible to maintain simultaneously the out-of-phase current pulse and the condition of one drop per pulse on both electrodes. The results obtained in this work showed that, for welding made with T-GMAW process with different feed speeds, the use of out-of-phase current pulse became determinant for arc stability and for the quality of the weld bead itself with distinct droplet diameters between the two wires and larger than the diameter of the electrode.

**Key-words:** Tandem GMAW; Out-of-phase current pulse; Droplet diameter.

### 1. Introdução

As ligas AWS ERNiCrMo-3, AWS ERNiCrMo-4 e AWS ERNiCrMo-14 ocupam posição de destaque dentre os inúmeros representantes da família Ni-Cr-Mo das superligas de níquel, tendo sido desenvolvidas para operações em alta temperatura, e logo tiveram sua aplicação estendida para várias outras, como em equipamentos de plataformas de petróleo quanto de refinarias devido à descoberta de sua excelente resistência à corrosão a uma grande variedade de meios corrosivos [1-3]. Tal comportamento se deve principalmente ao alto teor de Cr e Mo, além da adição de elementos como Nb, Ti e W. Seus teores de ferro e carbono são limitados a níveis baixos para manter as propriedades de resistência à corrosão e para minimizar a precipitação de carbonetos nos contornos de grão [2,4,5]. Dentre os carbonetos encontrados em ligas de níquel destacam-se os MC,  $M_6C$ ,  $M_7C_3$ ,  $M_{23}C_6$



nos quais o M é um ou mais elementos metálicos, como por exemplo Cr e Mo, a perda desses elementos na matriz pode gerar problemas de corrosão localizada, especialmente em componentes soldados [1,5].

Apesar da superioridade apresentada pela liga AWS ER NiCrMo-14, uma restrição para sua aplicação é seu custo de aquisição que é consideravelmente maior que as outras duas ligas. A mistura das ligas AWS ErNiCrMo-3 e AWS ErNiCrMo-4 é uma possibilidade de ser produzido um metal de solda economicamente viável que apresente uma performance similar a liga AWS ErNiCrMo-14 e que atenua os efeitos maléficos da microsegregação que ocorre durante a solidificação das soldas com esses materiais.

A utilização do processo MIG/MAG com configuração duplo arame com potenciais isolados expande o horizonte de flexibilidade desse processo, e permite a utilização de soldagens com deposição de materiais em proporções diferentes que podem variar conforme as necessidades das propriedades desejadas para respectivas aplicações.

A soldagem MIG/MAG com dois arames é uma variante do processo MIG/MAG convencional e caracteriza-se pela abertura de um par de arcos elétricos entre uma única poça metálica utilizando dois eletrodos consumíveis. Dentre as características principais da versão MIG/MAG com duplo arame destacam-se a possibilidade de atingir elevadas taxas de fusão absolutas, por meio da utilização de altas densidades de corrente, redução do aporte térmico sobre a peça, em virtude das soldagens com velocidades de deslocamento bem superiores que o MIG/MAG com único arame [6-8].

Algumas limitações genéricas são as maiores complexidades operacionais desse processo, como ajustes de um maior número de parâmetros em relação ao processo com um único arame, taxas de fusão ainda limitadas, devido principalmente à instabilidade de transferência metálica e a capacidade da tocha suportar altas temperaturas para correntes muito elevadas. Outro fator é a deflexão magnética dos arcos, graças à proximidade dos arcos. Por fim, destaca-se o maior custo da tocha e dos equipamentos, bem como, a menor acessibilidade e grau de liberdade das tochas, o que dificulta a realização de operações semiautomáticas [9].

O isolamento entre os sistemas elétricos dos arames confere uma flexibilidade maior ao processo MIG/MAG com configuração duplo arame, pois permite que se controle, de forma independente, os dois arcos voltaicos. Essa flexibilidade se traduz, por exemplo, na possibilidade de: i) soldar com formas de transferência metálica, ou, com níveis de energia, distintos entre os arcos; ii) empregar, como eletrodos, dois arames de materiais e/ou de diâmetros diferentes; iii) aplicar a corrente pulsada em ambos os arcos com uma defasagem de tempo entre os pulsos de corrente [10-12].

No processo MIG/MAG convencional uma condição indispensável para que haja modo de transferência goticular projetada é que a corrente de soldagem ultrapasse a corrente de transição ( $I_{tr}$ ). Esta corrente constitui na verdade em uma faixa operacional e não um valor único. Para determinadas combinações de gás de proteção, materiais e diâmetros de eletrodo, quando o valor da corrente excede essa faixa ocorre uma redução significativa e abrupta do tempo de formação da gota até o destacamento, acarretando também, em um aumento súbito da frequência de transferência metálica [9].

A transição da transferência globular para goticular acontece quando as forças de pressão exercidas pela ação do campo magnético na gota superam as forças de tensão superficial para gotas com diâmetros igual ao diâmetro do eletrodo. Os tamanhos reduzidos de gotas e a elevada frequência de pulso caracterizam o modo de transferência metálica goticular [13,14].

Neste contexto, a soldagem com corrente pulsada tem por objetivo obter uma transferência de material fundido de forma semelhante à transferência goticular projetada (spray), porém, com valores de corrente média nos níveis aplicáveis às transferências por curto-circuito e globular [6].

Para a realização de soldagens MIG/MAG com configuração duplo arame, após explorações avaliando a estabilidade do arco e acabamento superficial do cordão de solda, Santiago [15] concluiu que o modo de operação com contínua constante pulsada foi o mais indicado. Durante as soldagens realizadas com imposição de tensão, tanto com transferência metálica goticular quanto com transferência metálica por curto-circuito os cordões apresentaram defeitos, além da grande quantidade de respingos, efeito da deflexão do arco. Isto resultou em grande desperdício de material que foi fundido, porém não foi depositado na poça de fusão. A autora utilizou argônio puro como gás de proteção que resultou em cordões de solda com menores valores diluição quando

comparado com as soldagens realizadas com a mistura de Ar+30%He e a tocha com um ângulo de ataque de 15° e mesma velocidade de alimentação em ambos eletrodos.

A utilização de velocidades de alimentação distintas gera uma maior complexidade na regulagem dos parâmetros de soldagem, pois essa variante poderá implicar na utilização de diferentes intensidades de correntes e em comprimentos de arcos consideravelmente distintos, fatores esses críticos para a deflexão dos arcos.

A defasagem entre os pulsos de corrente é proposta como uma alternativa para amenizar os efeitos eletromagnéticos entre os arcos voltaicos do processo MIG/MAG duplo arame, que operam próximos um do outro. Desse modo, várias pesquisas têm sido desenvolvidas com o intuito de estudar o efeito da defasagem entre as correntes sobre o comportamento do arco, a transferência metálica, e as características geométricas do cordão de solda [6,7,15,16].

Porém, é importante destacar que, ao se utilizar correntes defasadas mantendo-se a frequência de pulso nas duas correntes, quanto maior a diferença entre as velocidades de alimentação, maior será a diferença entre a quantidade de metal fundido em cada período e é natural que ocorra diferença entre os diâmetros de gotas. Essa diferença pode interferir significativamente na condição de transferência metálica, bem como, na própria quantidade de gotas destacadas por cada pulso.

Resultados abordando a soldagem com o processo MIG/MAG com configuração duplo arame com diferentes velocidades de alimentação são escassos. Pode-se destacar o trabalho de Pessoa [16], o qual foi desenvolvido com potencial isolado, o que lhe permitiu realizar soldagens com partição de energia, metodologia na qual as energias de soldagem nos respectivos eletrodos apresentavam proporções distintas da energia total imposta na soldagem. Ao utilizar energias distintas o autor utilizou diferentes velocidades de alimentação nos eletrodos.

Os resultados deste estudo mostraram que a partição de energia foi um dos fatores de controle que influenciaram as características geométricas dos revestimentos soldados, estatisticamente significativa sobre a diluição, que foi maior para condição na qual a fonte mestra apresentava o maior nível de corrente eficaz, e estando essa ocupando a posição à frente na soldagem tandem com maior velocidade de alimentação nesse eletrodo que a do seguidor.

Caimacan et al. [17] utilizaram velocidades de alimentação distintas na investigação técnico-econômica de soldagem de enchimento avaliando os modos de operação pulsado e de curto-circuito controlado no arame seguidor. Os autores destacaram que foi observado visualmente que o arco do arame-seguidor, onde foi utilizado o curto-circuito controlado, é menor do que no caso da soldagem com modo pulsado, sugerindo em virtude dessa menor altura do arco uma estabilidade no curto circuito controlado.

A capacidade de produção com a utilização do modo pulsado no arame líder e curto circuito controlado no arame seguidor apresentou vantagens econômicas às obtidas nas soldagens com modo pulsado nos dois arames, além de melhor acabamento do cordão, menor área fundida do metal de base e ZACs menores, sem prejuízo para a faixa operacional da velocidade de soldagem [17].

Santiago [15] e Pessoa [16] utilizaram o processo MIG/MAG com configuração duplo arame para misturar as ligas níquel distintas AWS ER NiCrMo-3 e AWS ERNiCrMo-4 e observaram elevada performance de resistência à corrosão, e boa propriedade mecânica na liga que resultou dessa mistura.

Ao submeter o metal de solda dos revestimentos produzidos com o processo MIG/MAG com configuração duplo arame utilizando a mesma velocidade de alimentação nos dois eletrodos Santiago [15] destacou que as amostras referentes ao metal de solda com menor diluição resistiram ao ensaio realizado à 85 °C, limite superior da norma, sem apresentar pite. Os valores de microdureza apresentados pelo metal de solda dos revestimentos foram próximos ao apresentado pelas ligas de níquel em condição solubilizada, e pelo metal de solda dos revestimentos soldados com MIG/MAG convencional.

O estudo das configurações dos parâmetros do processo MIG/MAG duplo arame com velocidades de alimentação distintas e corrente constante pulsada realizados nesse trabalho dará suporte para a realização de soldas de boa qualidade com outras proporções de participação de metais de adição.

O trabalho investigou a configuração dos parâmetros de pulso sem e com defasagem entre as correntes. Na condição sem defasagem as frequências de pulso das correntes 1 e 2 foram distintas e tentou-se obter parâmetros cujo o cálculo dos diâmetros de gota se aproximasse do valor do diâmetro do eletrodo. Já na condição com

defasagem é necessário que as frequências de pulso das correntes 1 e 2 sejam iguais, nesse caso, cálculo do diâmetro de gota do eletrodo com maior velocidade de alimentação tende a ser bem superior que o valor do diâmetro do eletrodo.

Nesse contexto, o objetivo do presente estudo é avaliar quais benefícios na estabilidade do arco e na qualidade dos cordões de solda podem ser obtidos, quando se utiliza defasagem entre as correntes de soldagem ou quando se mantém os diâmetros de gotas teóricos dos eletrodos com valores próximos ao do diâmetro do eletrodo, considerando a realização de soldagens com o processo MIG/MAG duplo arame, utilizando diferentes velocidades de alimentação de arame nos respectivos eletrodos.

## 1.2. Fundamentação teórica

No modo corrente constante pulsado, a corrente oscila entre dois níveis, corrente de pulso ( $I_p$ ), que deve ser maior que a corrente de transição e tem como meta formar a gota e atuar no seu destacamento, enquanto que a corrente de base ( $I_b$ ), é a responsável por manter o arco aberto com pouca energia [9]. Os tempos de atuação de cada nível de corrente correspondem aos tempos de pulso ( $t_p$ ) e de base ( $t_b$ ). A corrente média é a resultante da média ponderada das correntes de pulso e de base, assumindo o formato retangular conforme a Equação 1. Ressalta-se que os pulsos de corrente por não serem perfeitamente retangulares, os valores de corrente média, calculados a partir da Equação 1, diferem dos valores reais. A utilização de sistemas de aquisição de sinais que operam em altas frequências de leitura de dados e que possibilitam o cálculo da corrente média a partir dos valores instantâneos, pode minimizar essa diferença de valores entre correntes médias calculada pela Equação 1 e pelo os valores instantâneos de corrente.

$$I_m = [(I_p \cdot t_p) + (I_b \cdot t_b)] \div (t_p + t_b) \quad (1)$$

A utilização do modo corrente constante pulsado possibilita uma transferência metálica do tipo goticular com correntes médias abaixo da corrente de transição, sendo o fator  $I_p \times t_p$  governante no destacamento da gota. Scotti e Ponomarev [9] explicam que a condição de uma gota por pulso é um dos mais estáveis modos de transferência metálica, com o diâmetro da gota próximo ao diâmetro do eletrodo.

Uma das grandes dificuldades da soldagem MIG/MAG com corrente pulsada é estabelecer o ajuste de um conjunto de parâmetros de pulso que quando adequadamente combinados, estabeleçam o equilíbrio entre o destacamento da gota metálica e a velocidade de alimentação do arame [18].

O diâmetro da gota, que pode ser calculado a partir da Equação 2, deve ser controlado para que a gota não venha ser grande suficiente para provocar uma transferência metálica globular ou mesmo em curto-circuito [19,20].

$$\theta_{gota} (mm) = \sqrt[3]{\frac{25 \cdot \theta_{elet} (mm) \cdot V_{alim} (mm/min)}{F_p (Hz)}} \quad (2)$$

onde a frequência de pulso é calculada em (Hz) pela Equação 3.

$$F_p = 1000 \div (t_b (ms) + t_p (ms)) \quad (3)$$

Além disso, os arcos voltaicos no processo MIG/MAG duplo arame, como todos os condutores de corrente elétrica têm associados a estes um campo magnético induzido, cuja a interação entre esses campos magnéticos gera, em muitos casos, a deflexão dos arcos. Este fenômeno conhecido como sopro magnético será gerado sempre que houver um arranjo assimétrico das linhas de força em torno do arco [21,22].

A densidade do fluxo magnético que o arco do eletrodo 2 exerce sobre o arco do eletrodo 1, obedece a Equação 4 [23].

$$B_{21} = \frac{(\mu_0 \cdot I_2)}{(2\pi \cdot DE)} \quad (4)$$

em que  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do meio,  $I_2$  é a corrente do eletrodo 2 e DE é a distância entre os eletrodos. A força  $F_{21}$  induzida por  $B_{21}$  é calculada pela Equação 5.

$$F_{21} = J_1 \cdot B_{21} \tag{5}$$

em que  $J_1$  é a densidade de corrente do arco do eletrodo 1, que é calculada a partir da Equação 6.

$$J_1 = \frac{I_1}{\pi r_1} \tag{6}$$

onde  $I_1$  é a corrente referente ao arco 1 e  $r_1$  o raio da coluna do arco 1.

Pela análise das equações, pode-se constatar que os desvios dos arcos, causados pelas forças  $F_{21}$  e  $F_{12'}$  são proporcionais às respectivas correntes que passam pelos arcos. Desta forma, a soldagem com níveis elevados de corrente nos dois arcos causa desvios mais acentuados destes. A proposta tecnológica para amenizar esse efeito é empregar a corrente pulsada com defasagem de pulsos.

Os primeiros trabalhos com a soldagem MIG/MAG empregando dois arames utilizavam uma única fonte de potência e foram identificados problemas ocorridos na transferência por escoamento goticular projetado (spray). De acordo com estes estudos, aumentos nos comprimentos dos arcos levaram a uma maior interação entre os arcos devido ao maior sopro magnético, reduzindo a eficiência do processo. Esses fatores teriam contribuído para a aplicação da corrente pulsada nas soldagens com o processo MIG/MAG duplo arame [24].

A utilização de defasagem entre as correntes permite sincronizar as intensidades de corrente, de forma que, o pulso de corrente da fonte 1, sempre ocorra no momento em que a corrente da fonte 2 encontra-se na base. A Figura 1 ilustra os sinais de correntes com 50% de defasagem, onde os tempos de pulso e de base são os mesmos para as duas fontes e o início do pulso de uma fonte ocorre no momento em que a outra fonte encontra-se na metade do período de pulsação. Considerando, por exemplo,  $t_{p1} = t_{p2} = 2,0$  ms e  $t_{b1} = t_{b2} = 6,0$  ms, o início do pulso da fonte 2 ocorrerá 4,0 ms após o início do pulso da fonte 1. Logo, em  $t_0$  ocorrendo o pulso da fonte 1, a fonte 2 pulsará em 4,0 ms, como a duração do tempo de pulso é de 2,0 ms, nesse momento, a fonte 1 já estará no tempo da base. Motta [6] verificou que a defasagem entre as correntes se mostrou estatisticamente significativa para a variação do ângulo de desvio da trajetória da gota que foi, significativamente menor, quando os pulsos de corrente foram defasados.

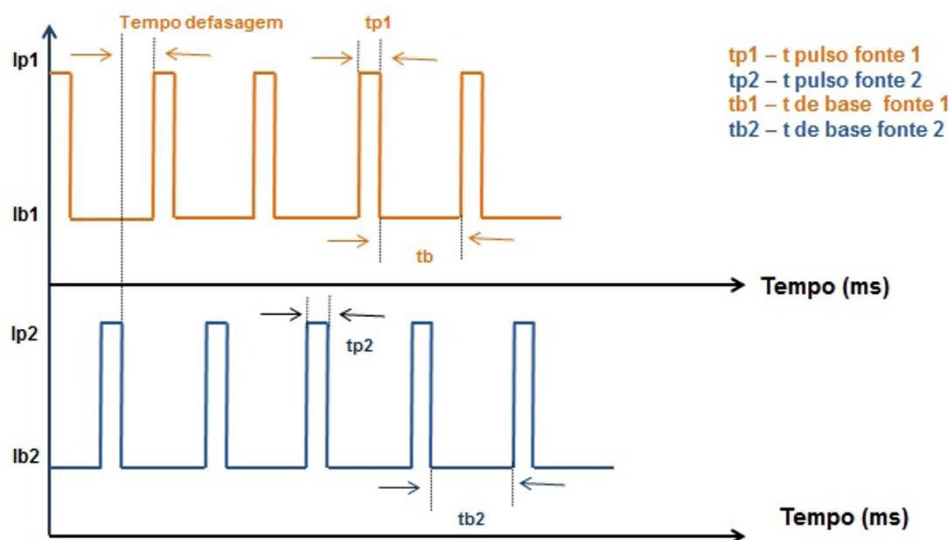


Figura 1. Desenho esquemático da defasagem entre as correntes. Fonte: Santiago [15].

## 2. Materiais e Métodos

As soldagens foram realizadas em duas principais condições, a primeira identificada como CD, corresponde aos experimentos com defasagem entre as correntes. A segunda condição, denominada SD, corresponde às soldagens realizadas sem defasagem entre as correntes, ou seja, não existiu sincronização alguma entre as correntes, mas com diâmetros de gota do diâmetro do eletrodo.

Utilizou-se como metal de adição arame-eletrodos das superligas a base de níquel AWS ERNiCrMo-4 (eletrodo 1) e AWS ERNiCrMo-3 (eletrodo 2), com 1,2 mm de diâmetro, depositadas sobre chapas de aço ASTM A516 Gr. 70, o qual é utilizado para a construção de equipamentos para a indústria do petróleo e gás.

A Figura 2 mostra a bancada utilizada para as soldagens, composta por uma mesa de deslocamento XY, tocha duplo arame com sistema de refrigeração à água, dois sistemas tracionadores de arame, sistema de aquisição de dados para aferir sinais de tensão e corrente para duas estações operando em frequência de 5000 HZ. A fonte de soldagem multiprocessado com corrente máxima de 450A foi fabricada por encomenda para o desenvolvimento de soldagens com processo MIG/MAG na configuração duplo arame com potencial isolado para que fosse possível realizar soldagens com velocidades de alimentação distintas.

Ao selecionar a opção defasagem a fonte permite inserir na configuração fonte 1 as correntes de pulso e de base, os tempos de pulso e de base e a velocidade de alimentação do eletrodo 1, enquanto que na fonte 2 são inseridos os parâmetros de correntes de pulso e de base, tempo de pulso, o tempo de defasagem da corrente 2 em relação a corrente 1 e velocidade de alimentação do eletrodo 2. Já no sistema sem defasagem, como as frequências de pulso podem ser distintas é necessário inserir na fonte 2 também o tempo de base, em relação a fonte 1 são os mesmos parâmetros ajustados na condição com defasagem.

As configurações das soldagens partiram de resultados presentes na literatura. Com base nos resultados de Santiago [15], o modo de operação ajustado na da fonte foi em corrente constante pulsado, por resultar em cordões com bom acabamento superficial, menor ocorrência de respingos, e menor imposição de calor por passe. Os eletrodos foram dispostos um atrás do outro (tandem) em relação à direção da velocidade de soldagem, o ângulo de ataque no revestimento que foi de 15° (ângulo que o arame faz com um plano paralelo ao cordão de solda), destacado na Figura 3 e a distância do bico de contato à peça (DBCP) foi ajustada em 20 mm, o gás de

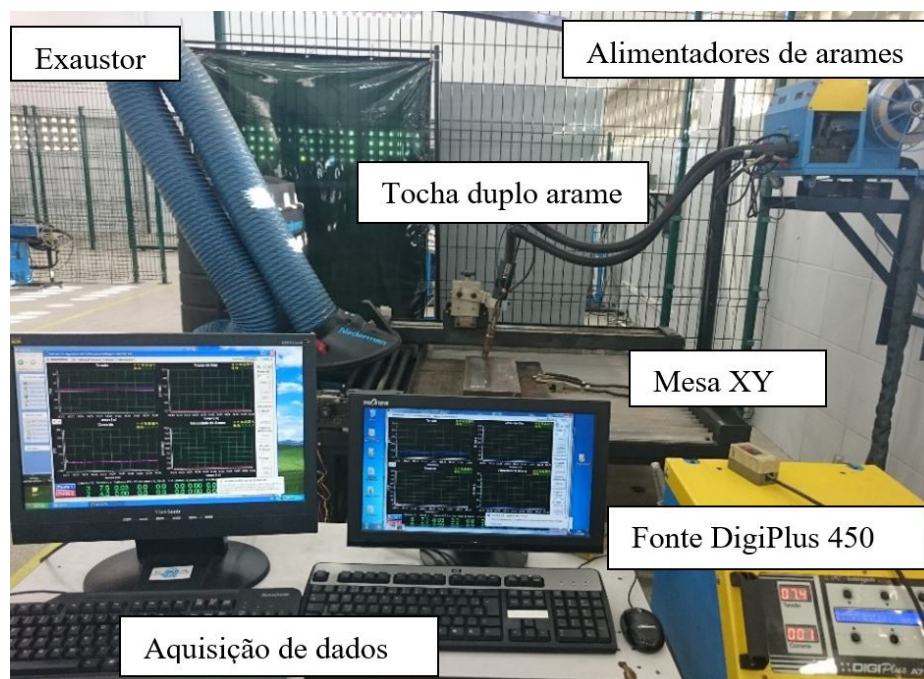
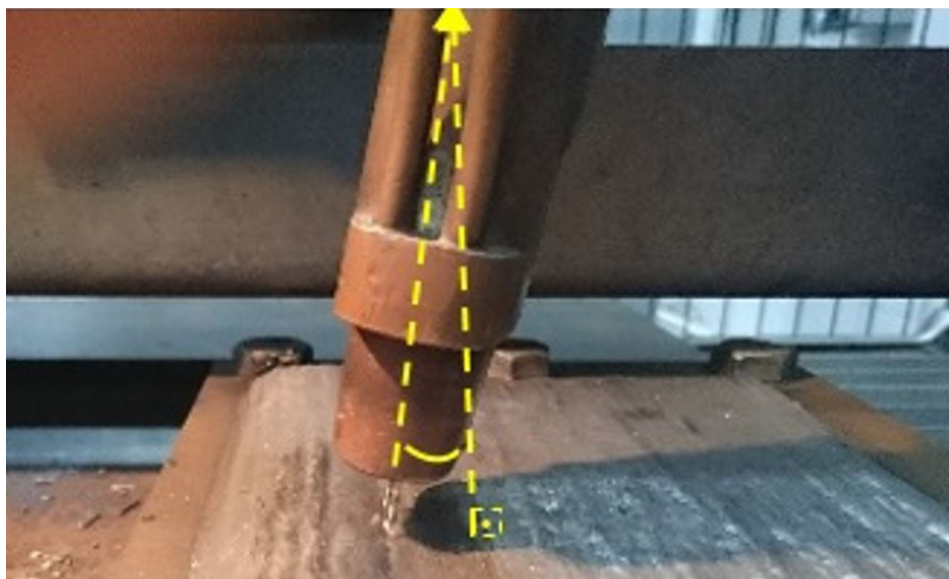


Figura 2. Bancada de soldagem.



**Figura 3.** Configuração da tocha de soldagem e posicionamento dos eletrodos.

proteção utilizado foi argônio puro com vazão de 30 L/min. Esses parâmetros resultam em soldagens com menores valores de diluição e cordões com maiores reforços, importantes características geométricas para a soldagem de revestimentos [15,25]. A tocha foi deslocada com velocidade de 1000 – 1050 mm/min, esse ajuste foi necessário devido a intenção de realizar soldagens com o mesmo volume de material depositado entre as condições estudadas, sem inclinação com a perpendicular do revestimento (ângulo reto), não utilizou a técnica puxada/empurrada.

Utilizou-se dois níveis de corrente média no eletrodo 1,  $I_{m1}$  (240 A) e  $I_{m2}$  (270 A), esses valores são maiores que a corrente de transição encontrada na literatura para essas ligas que, segundo Aguiar [26] é de 220 A. As correntes médias aplicadas foram mais altas que a corrente de transição, visto que, ao se utilizar a Equação 1 para se obter correntes médias abaixo de 220A, as combinações de valores de corrente e tempo de base resultantes eram muito baixas, provocando instabilidade, e, em alguns casos, a interrupção do arco.

No entanto, para o eletrodo 2 não foi possível encontrar uma única corrente média para realizar as soldagens tanto com defasagem, como, sem defasagem, pois as correntes de base calculadas, a partir dos parâmetros de pulso, resultaram em valores insuficientes para que o arco se mantivesse aberto. Logo, para a condição sem defasagem a corrente média selecionada para o eletrodo 2 foi 150 A, conforme apresentado na Tabela 1. Para se aplicar defasagem entre as correntes fez-se necessário manter o mesmo tempo de base para os dois eletrodos.

**Tabela 1.** Parâmetros de soldagem aplicados na soldagem MIG/MAG duplo arame.

Designação		$I_p$ (A)	$T_p$ (ms)	$I_b$ (A)	$T_b$ (ms)	$I_m$ (A)	Defas. (ms)	Valim (m/min)
$I_{m1SD}$	Fonte 1	380	3,8	100	4	240	-	11,7
	Fonte 2	350	3,8	60	8	150	-	6,5
$I_{m1CD}$	Fonte 1	380	3,8	130	5	240	4	12
	Fonte 2	350	3,8	50	5	170	4	6,7
$I_{m2SD}$	Fonte 1	420	2	200	4	270	-	12,7
	Fonte 2	420	2	50	8	124	-	7
$I_{m2CD}$	Fonte 1	420	2	220	6	270	4	12
	Fonte 2	420	2	75	6	160	4	6,7

Assim, considerando valor utilizado na condição sem defasagem, uma redução no tempo de base do eletrodo 2, de 8,0 ms para 5,0 ms, foi realizada.

Aplicando a Equação 1 com o novo tempo base de 5,0 ms e mantendo os mesmos parâmetros para a soldagem realizada sem defasagem entre as correntes, o resultado do cálculo para a corrente de base foi de 2 A, corrente essa impraticável. Logo, para garantir a manutenção do arco limitou-se o valor de corrente de base a 50 A. Com a utilização desse valor, a corrente média do eletrodo 2 na condição com defasagem elevou-se para 170 A. Os parâmetros selecionados e apresentados na Tabela 1 foram escolhidos com a intenção de se aproximar da condição de destacamento de uma gota por pulso com diâmetro de gota próximo ao diâmetro do eletrodo.

### 3. Resultados e Discussão

As velocidades de alimentação foram definidas com o maior intervalo possível entre elas, para que se obtivesse ajuste de parâmetros para a combinação de velocidades na condição mais crítica. De início, tentou-se realizar soldagens com os eletrodos 1 e 2 contribuindo respectivamente com 70% e 30% do total da velocidade de alimentação, porém essa combinação gerou aumentos abruptos do arco, formação de duas poças e ainda queima de bicos de contato.

Dessa forma, a maior diferença entre as velocidades de alimentação utilizadas foi conseguida ao utilizar os eletrodos com, respectivamente, 65% e 35% do total da velocidade de alimentação, conforme pode ser visto na Tabela 1.

As velocidades de alimentação referentes a utilização de maior corrente média ( $Im_2$ ) foram maiores que as utilizadas nas condições de menor corrente média ( $Im_1$ ). Calculou-se a área adicionada a partir da Equação 7 e pela análise dos resultados vistos na Tabela 2 observou-se a aproximação dos valores obtidos em todas as condições indicando equilíbrio no volume de material depositado por unidade de comprimento mesmo com correntes médias distintas. Esse resultado é consequência da relação fixada entre as velocidades de alimentação e de soldagem, nos experimentos realizados com velocidades de alimentação mais altas ( $Im_2$ ) aumentou-se também a velocidade de soldagem objetivando uma distribuição de calor semelhante nas soldas, mesmo com parâmetros distintos.

$$S_{ad} = \left( \frac{\pi d^2}{4} \right) \cdot \frac{V_{alim}}{V_{sold}} \quad (7)$$

**Tabela 2.** Ajustes das velocidades de soldagem.

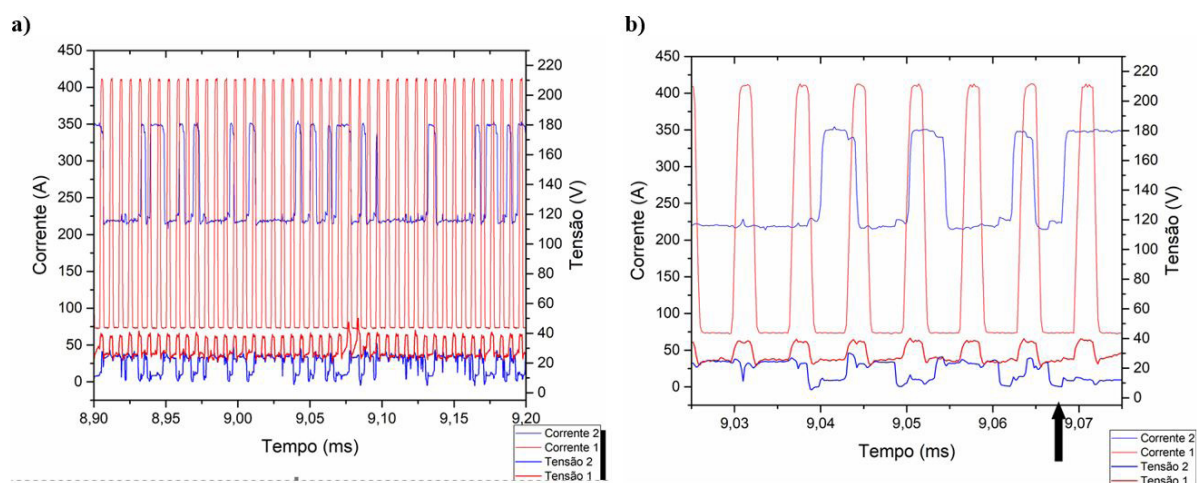
Condição	Área adicionada (mm <sup>2</sup> )	Velocidade de Soldagem (mm/min)
$Im_1,SD$	20,6	1000
$Im_1,CD$	20,6	1000
$Im_2,SD$	21,2	1050
$Im_2,CD$	20,2	1050

Alguns testes foram realizados com o intuito de determinar a ordem dos eletrodos em relação ao deslocamento da tocha e formação da poça. A primeira hipótese levantada seria a utilização do eletrodo de menor velocidade de alimentação na frente, pois em virtude da sua menor taxa de deposição, não deixaria a poça muito volumosa, fazendo com que o arco do eletrodo com maior velocidade de alimentação incidisse praticamente no metal de base.

Essa exploração foi realizada com defasagem entre as correntes, na fonte 1 com eletrodo de menor velocidade de alimentação (6,7 m/min) foram utilizados os seguintes parâmetros:  $I_p=420$  A,  $t_p=2$ ms,  $I_b=75$  A,  $t_b=6$ ms. Enquanto que na fonte 2 com eletrodo de maior velocidade de alimentação (12 m/min) os parâmetros aplicados foram:  $I_p=350$  A,  $t_p=3,8$  ms,  $I_b=220$  A,  $def=4$ ms.



A Figura 4a corresponde ao oscilograma com os sinais de tensão e corrente obtidos na soldagem realizada com o eletrodo de menor velocidade de alimentação na frente. É possível visualizar na Figura 4b que em vários momentos a tensão no segundo eletrodo ficou muito baixa, indicando a grande ocorrência de curtos circuitos, como por exemplo para o tempo de 9,05 s. Isso porque apesar do eletrodo 1 apresentar menor taxa de deposição, ainda assim, sua taxa foi suficiente para gerar uma elevação da poça de soldagem, em virtude do material depositado. Como consequência da maior velocidade de alimentação do eletrodo 2, a ocorrência de curto circuito foi bastante elevada. Nos momentos em que a tensão assumiu valores abaixo de 5,0 V, tensão regulada na fonte como tensão de curto circuito, a corrente era elevada à 350 A, corrente de curto circuito. O ajuste dessa corrente em um valor de nível alto foi utilizado em todas as explorações, na intenção de se obter novamente a altura do arco adequado para a soldagem a partir do equilíbrio da taxa de fusão e da taxa de alimentação do eletrodo.



**Figura 4.** a) Oscilograma com sinais de tensão e corrente adquiridos na soldagem com eletrodo de menor velocidade de alimentação na frente; b) Detalhe da ocorrência de curto circuito durante a soldagem.

Diante dos resultados obtidos, definiu-se que o eletrodo com maior velocidade de alimentação seria posicionado na frente ligado a fonte 1 e o eletrodo de menor velocidade de alimentação atrás ligado na fonte 2, tendo como referência o sentido da velocidade de soldagem.

A altura do arco foi o principal critério para essa decisão. Nos testes realizados, quando o eletrodo com velocidade de alimentação mais alta estava à frente, o arco se encontrava numa altura na qual ele se manteve rígido e sem ocorrência de curtos-circuitos, além disso, o arco do eletrodo com menor velocidade de alimentação não ficava tão alto, pois esse estivera aberto em cima da poça do primeiro eletrodo. Segundo Reis et al. [27] o encurtamento do comprimento do arco gera um aumento em sua resistência à deflexão magnética e a sua extinção.

Utilizando as Equações 2 e 3 os valores dos diâmetros de gota e das frequências de pulsos foram calculados, esses valores e os correspondentes as correntes médias que foram obtidos durante a soldagem pelo sistema de aquisição estão descritos na Tabela 3.

Dentre as condições avaliadas, as que foram realizadas sem defasagem entre as correntes ( $I_{m1SD}$  e  $I_{m2SD}$ ) e frequência de pulso distintas apresentaram menor diferença entre os valores calculados dos diâmetros de gota e os valores dos diâmetros dos eletrodos, com exceção do eletrodo 1 cujo cálculo do diâmetro de gota foi de 1,4. Apesar de ter utilizado frequências de pulsos distintas, não se encontrou um conjunto de parâmetro na condição  $I_{m1SD}$  para que o diâmetro de gota calculado do eletrodo 1 fosse mais próximo ao do eletrodo, pois nessa condição a velocidade de alimentação é elevada (11,7 m/min) e seria necessário aumentar ou tempo de base ou de pulso para reduzir esse valor, porém essa alteração elevaria a corrente média calculada para valores bem mais elevados que 240 A.

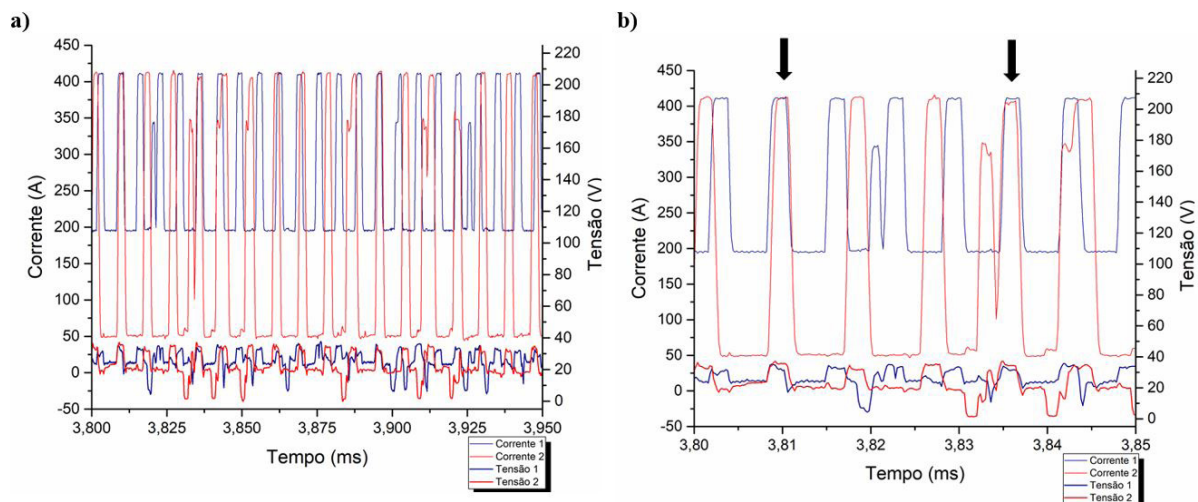
**Tabela 3.** Correntes médias adquiridas pelo sistema de aquisição e frequência de pulso e diâmetro de gota calculado.

Condição	Eletrodo	$I_m$ (A)	Freq. De Pulso (HZ)	$D_g$ (mm)	$D_g - \theta_{elet}$	$\Delta D_g$
$Im_1SD$	Eletrodo 1	194,6	128	1,40	0,2	0,10
	Eletrodo 2	154,3	102	1,30	0,1	
$Im_1CD$	Eletrodo 1	212,6	113	1,45	0,25	0,25
	Eletrodo 2	157,5	113	1,20	0	
$Im_2SD$	Eletrodo 1	261,4	167	1,30	0,1	0,10
	Eletrodo 2	120,7	100	1,20	0	
$Im_2CD$	Eletrodo 1	260,2	125	1,44	0,24	0,25
	Eletrodo 2	157,5	125	1,20	0	

Na condição  $Im_2SD$ , os diâmetros de gota apresentados foram os mais próximos do diâmetro eletrodo. A manutenção do diâmetro de gota próximo ao diâmetro do eletrodo é um fator importante para contribuir com a condição de uma gota por pulso na transferência metálica com características similares à goticular.

Durante as soldagens sem defasagem entre os pulsos das correntes foi possível observar instabilidade no processo ocasionado pela independência entre os pulsos de corrente, o que tornou a interação magnética mais intensa gerando deflexões dos arcos, principalmente nos momentos em que ambos os arcos estavam nas intensidades mais elevadas de corrente. Outro fator considerado foi a grande quantidade de ocorrência de curtos-circuitos, conforme pode ser visto na Figura 5a que ilustra uma parte dos sinais de tensão e soldagem adquiridos durante a soldagem na condição  $Im_2SD$  no qual é possível ver com detalhamento os instantes da ocorrência de curto circuito durante a soldagem.

Durante as soldagens sem defasagem o momento mais crítico foi quando os tempos de pulso dos dois eletrodos ocorreram simultaneamente, pelas maiores intensidades de correntes instantâneas atuando em ambos os arcos, nesse período as duas gotas são formadas e destacadas. É possível identificar no detalhe do oscilograma da Figura 5b que essa situação se repetiu diversas vezes na condição  $Im_2SD$ , como por exemplo, nos tempos 3,81s e 3,835s.

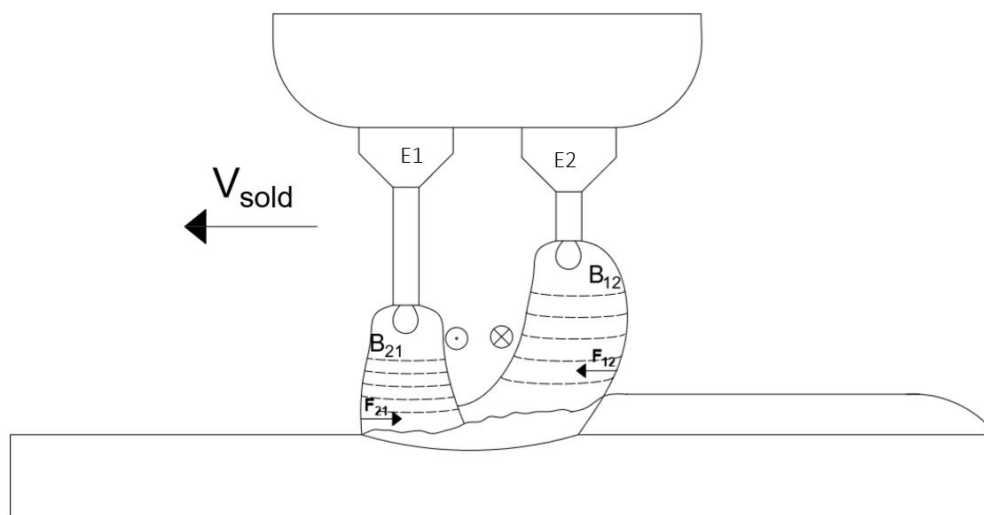


**Figura 5.** a) Oscilograma com sinais de tensão e corrente da soldagem da condição  $Im_2SD$ ; b) Ampliação do sinal indicando a ocorrência de curto circuito.

A Figura 6 mostra o efeito das correntes em fase (pulsos ocorrendo simultaneamente) observados nos arcos dos respectivos eletrodos durante as soldagens sem defasagem. Cada um dos arcos elétricos induz um campo magnético no outro arco, conforme a Equação 4. Para discutir este aspecto, foi assumido que  $B_{12}$  corresponde ao campo magnético produzido pelo arco 1 que atua no arco 2, e  $B_{21}$  o campo magnético produzido pelo arco 2 que atua no arco 1. As intensidades desses dois campos magnéticos tendem a ser a mesma, já que na condição  $I_{m2SD}$  as correntes de pulso dos dois eletrodos correspondem ao mesmo valor, bem como, os outros fatores que influenciam o campo magnético gerado:  $\mu_0$  (permeabilidade do magnética do meio) e  $D_e$  (distância entre os eletrodos).

As forças induzidas pelos campos magnéticos gerados,  $F_{21}$  e  $F_{12}$ , dependem, conforme a Equação 5, da intensidade dos campos magnéticos  $B_{21}$  e  $B_{12}$  e da densidade de corrente de cada um dos arcos,  $J_1$  e  $J_2$ . A altura do arco referente ao eletrodo 1 é consideravelmente menor que a altura do arco do eletrodo 2, em virtude das diferentes velocidades de alimentação utilizadas, que é premissa do trabalho. Como consequência o diâmetro da coluna do arco 1 é menor que o diâmetro da coluna do arco 2. Assim, quanto menor o diâmetro do arco, maior será a respectiva densidade de corrente. No caso em questão temos que  $J_1 \gg J_2$ .

Pela equação 06 podemos concluir que  $F_{12} \gg F_{21}$  em decorrência dessa assimetria de forças entre os arcos elétricos, o arco 2 tende a apresentar uma deflexão bem mais acentuada que o arco 1, conforme pode ser visto no esquema da Figura 6. Durante as soldagens foi possível observar o arco do eletrodo 2 sendo atraído em direção ao arco do eletrodo 1.



**Figura 6.** Desenho esquemático da deflexão dos arcos nas soldagens sem defasagem no momento em que os tempos de pulsos de corrente ocorrem simultaneamente. Onde:  $V_{sold}$ - velocidade de soldagem, E1: eletrodo 1, E2: eletrodo 2,  $B_{21}$ : campo magnético produzido pelo arco 2 que atua no arco 1,  $B_{12}$ : campo magnético produzido pelo arco 1 que atua no arco 2,  $F_{21}$ : força induzida pelo campo  $B_{21}$ ,  $F_{12}$ : Força induzida pelo campo  $B_{12}$ .

A literatura destaca que arcos de alturas elevadas tendem a defletirem mais, visto que são menos rígidos. Além disso, a deflexão do arco vai interferir tanto no destacamento como na trajetória das gotas. A deflexão de um arco no instante de destacamento e, conseqüentemente, a direção da trajetória seguida pela gota, estão relacionadas com as correntes instantâneas que passam pelos arcos e não com a corrente média [6].

No momento do destacamento da gota, essa sofre a influência da deflexão do arco, segundo Motta [6] enquanto a gota se encontra aderida ao eletrodo, está conduzindo corrente e, portanto, ainda sujeita a ação de uma força similar àquela que age sobre o arco voltaico, o que causa seu desvio em relação ao eixo do eletrodo. Reis et al. [28] destaca que os desvios das gotas provenientes do arco de seguidor (arco de trás) são maiores, confirmando que esse arco apresenta uma deflexão mais intensa que o arco líder (arco da frente).

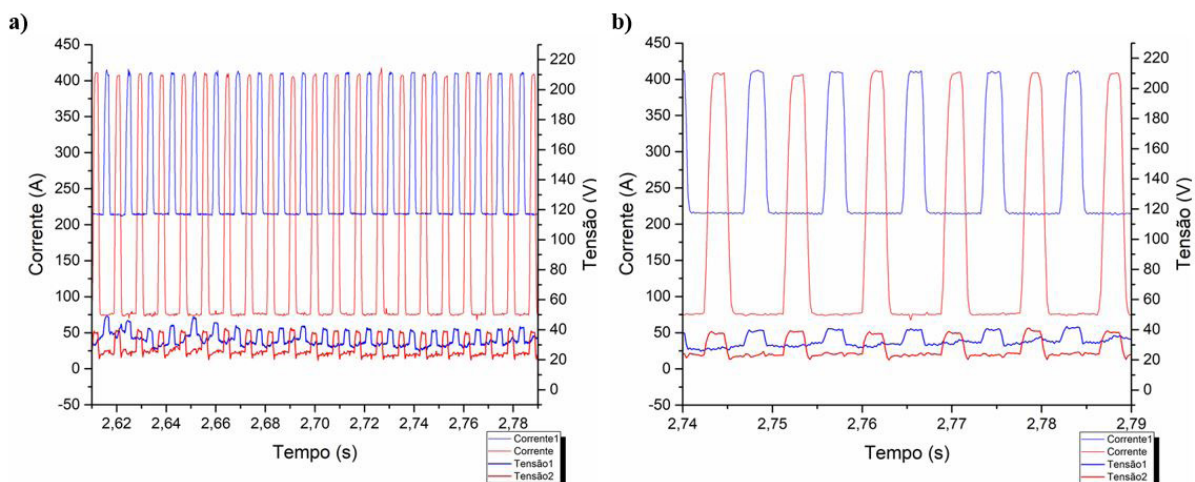
Logo, a intensa geração de respingos observada na soldagem da condição  $Im_2SD$ , conforme visto na Figura 7 deve-se ao efeito das diferentes combinações de correntes instantâneas que, por sua vez, geraram diferentes ângulos de deflexões nos momentos de destacamento das gotas, desviando suas trajetórias da poça mesmo com gotas de diâmetros próximos ao diâmetro do eletrodo, principalmente na condição  $Im_2SD$ , embora seja a configuração que mais se aproxima da condição de uma gota por pulso.



**Figura 7.** Cordões apresentando intensa geração de respingos resultado das soldagens realizadas nas condições sem defasagem entre os pulsos de correntes.

As condições com defasagem,  $Im_1CD$  e  $Im_2CD$ , apresentaram uma significativa diferença entre os diâmetros de gota, 0,25 mm. O diâmetro de gota apresentado pelo eletrodo 2 foi bem próximo ao do eletrodo favorecendo à condição de uma gota por pulso, porém essa característica não permaneceu para o eletrodo 1, em ambas as condições de corrente média, os valores foram consideravelmente maiores que o diâmetro do eletrodo o que pode alterar a condição de transferência metálica nesse eletrodo.

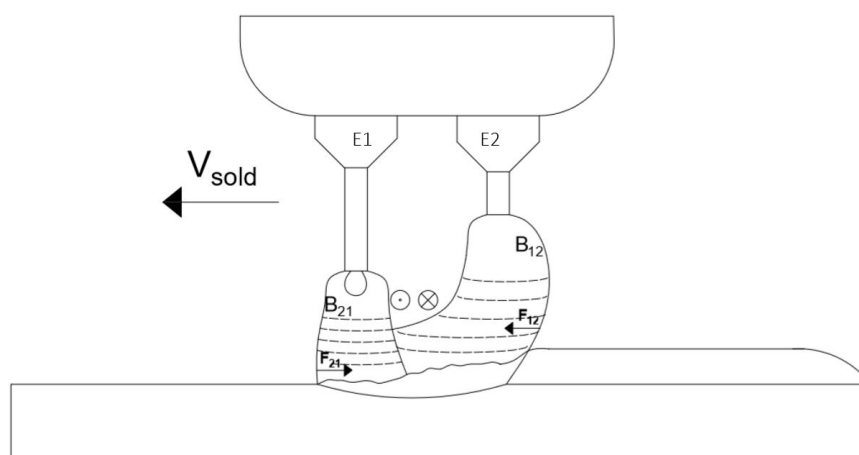
As soldagens realizadas utilizando defasagem entre as correntes mostraram-se consideravelmente mais estáveis. Configurou-se a sincronização dos pulsos de corrente de ambos eletrodos de tal forma que, os instantes de intensidade máxima de corrente do eletrodo, que está no período de pulso, coincidam com os instantes de menor intensidade de corrente do outro eletrodo, que está no período de base. Outro ponto observado foi a ausência de curtos-circuitos, como pode ser visto na Figura 8a no detalhe do oscilograma Figura 8b é claro visualizar que os pulsos dos dois eletrodos não ocorreram no mesmo instante.



**Figura 8.** a) Oscilograma com sinais de tensão e corrente da soldagem da condição  $Im_2CD$ ; b) Ampliação do sinal sem ocorrência de curto circuito.

Acredita-se que durante as soldagens da condição  $Im_2CD$  o momento mais crítico em relação a intensidade de deflexão é no tempo de pulso do eletrodo 1, pela maior diferença entre as correntes instantâneas, que são  $Ip_1$  420 A e  $Ib_2$  75 A. Já no tempo de pulso do eletrodo 2 as correntes são mais próximas  $Ip_2$  420 A e  $Ib_1$  220 A.

A Figura 9 ilustra o efeito dos arcos observado durante as soldagens no momento em que as respectivas correntes se encontram defasadas, como nas condições  $Im_1CD$  e  $Im_2CD$ . Nas soldagens realizadas nessa condição foi possível observar a intensa deflexão do arco detrás (menor velocidade de alimentação) porém, foi possível perceber que a deflexão era mais significativa enquanto no eletrodo não estava no período de destacamento de gota. Assim como na condição anterior sem defasagem, existirá o campo magnético gerado em cada um dos arcos pelo outro eletrodo,  $B_{12}$  o campo magnético que o arco 1 gera no arco 2 e  $B_{21}$  o campo magnético que o arco 2 gera no arco 1. No momento do pulso do eletrodo 1, segundo a Equação 4, a intensidade de  $B_{21} \ll B_{12}$ , já que  $I_1$  é consideravelmente maior que  $I_2$  e os outros fatores como o  $\mu_0$  (permeabilidade magnética do meio) e DE (distância entre os eletrodos), permanecem os mesmos.



**Figura 9.** Desenho esquemático da deflexão dos arcos nas soldagens com defasagem no momento de pulso da corrente do eletrodo 1.

A relação entre as densidades de corrente dos arcos continua  $J_1 \gg J_2$ . Assim como na condição avaliada anteriormente em virtude das distintas velocidades de alimentação a altura do arco referente ao eletrodo 1 é consideravelmente menor que a altura do arco do eletrodo 2, logo o diâmetro da coluna do arco 1 é menor que o diâmetro do arco da coluna do arco 2. Além disso, no momento avaliado tem-se a corrente  $I_1 \gg I_2$ .

A assimetria entre as forças na condição  $Im_2CD$  passa a ser mais intensa, pois  $F_{12} \gg F_{21}$ . O arco 1 apresenta um pequeno desvio, porém a deflexão do arco 2 é bem mais acentuada do que todas as outras condições. Motta [6] observou elevadas dispersão nos sinais de tensão do arco seguidor, arco ligado a fonte 2, eram geradas pela deflexão que esse arco sofria em decorrência do período do pulso do arco líder.

Embora durante as soldagens tenha sido observado que o arco 2 tenha apresentado maior deflexão, é possível visualizar na Figura 10 as soldas da condição  $Im_2CD$  sem defeitos e sem intensa geração de respingos, diferente do que foi identificado nas condições sem defasagem. Esse resultado pode ser justificado pelo fato da deflexão do arco ocorrer intensamente enquanto a corrente está no período da base, nessa condição a gota não está sendo destacada, logo não sofre intensos desvios na sua trajetória.

A utilização da defasagem entre as correntes torna possível alternar os momentos entre maiores deflexões do arco e o destacamento da gota. Como no momento do destacamento da gota a corrente do respectivo arco está em seu nível mais alto e o outro no nível mais baixo de corrente, o arco que estiver no pulso sofrerá menor intensidade de força tendo uma deflexão menos intensa e gerando um menor desvio na trajetória da gota destacada,



**Figura 10.** Cordões soldados com defasagem entre as correntes.

resultando em cordões mais uniformes e com bons aspectos superficiais. Em contrapartida, quando o arco estiver no momento de base sofrerá um maior efeito das forças eletromagnéticas devido o outro arco, porém o efeito dessa deflexão é menos significativo para a estabilidade do processo pelo fato de não ocorrer destacamento da gota nesse período.

Não foi possível determinar um ranking entre as condições estudadas, destacando que as soldagens realizadas sem defasagem,  $Im_1SD$  e  $Im_2SD$ , apresentaram intensa geração de respingo enquanto que os cordões de solda resultante das condições com defasagem,  $Im_1CD$  e  $Im_2CD$ , mostraram melhores aspectos superficiais.

Em virtude da grande quantidade de parâmetros a se explorar muito ainda tem de se investigar com relação as soldagens realizadas com MIG/MAG na configuração duplo arame. Apesar de se ter várias recomendações consolidadas na literatura para o processo de soldagem MIG/MAG convencional, como por exemplo a indicação de soldagem na condição goticular com gotas de diâmetro próximo ao do eletrodo para as soldagens realizadas com a configuração duplo arame com corrente pulsada utilizando diferentes velocidades de alimentação observou-se bons resultados utilizando a defasagem entre as correntes, embora o valor calculado do diâmetro de gota do eletrodo de maior velocidade de alimentação tenha sido bem maior que o diâmetro do eletrodo.

#### 4. Conclusões

Com base nos resultados experimentais obtidos para a soldagem MIG/MAG com configuração duplo arame pulsado, utilizando diferentes velocidades de alimentação nos respectivos eletrodos, foi possível concluir que:

- A utilização de defasagem entre as correntes mostrou-se mais vantajosa que as soldagens sem defasagem, com configuração duplo arame utilizando velocidades de alimentação distintas (eletrodo 1 com 65% do total da velocidade de alimentação e eletrodo 2 com 35%);
- Nas soldagens com configuração duplo arame utilizando velocidades de alimentação distinta para os eletrodos, o eletrodo de maior velocidade de alimentação deve vir a frente, o processo mostrou-se mais estável nessa condição por não gerar grande quantidade de curto-circuito no eletrodo 2, que, mesmo abrindo seu arco sobre a poça do eletrodo 1, mantém altura do arco suficiente para não gerar curtos circuitos em intensidade;
- Nas soldagens sem defasagem o arco do eletrodo de menor velocidade de alimentação apresentou elevada quantidade e intensidade de deflexão em direção ao arco maior velocidade de alimentação, em virtude dos diferentes níveis de correntes instantâneas que os arcos foram submetidos. Nessa condição, os diâmetros de gota mantiveram-se bem próximo ao diâmetro do eletrodo, porém esse fator não foi suficiente para garantir uma estabilidade no processo e transferência metálica, não sendo capaz de evitar a intensa geração de respingos nos cordões soldados;
- As soldagens com defasagem entre as correntes, embora apresentassem diâmetros de gota maior do que a faixa indicada pela literatura e também intensa deflexão do arco referente ao eletrodo de menor velocidade

de alimentação, resultou cordões com bons aspectos superficiais e pouca quantidade de respingos. Sendo alternativa mais indicada para as soldagens realizadas com velocidades de alimentação dos eletrodos distintas.

## Agradecimentos

A Universidade Federal do Ceará (UFC) e ao LPTS – Laboratório de Pesquisa e Tecnologia em Soldagem que forneceram condições para o desenvolvimento do trabalho. Aos os órgãos de fomento pelo o investimento em pesquisas e pelo apoio financeiro: CAPES, FUNCAP e CNPq.

## Referências

- [1] Sims CT, Stoloff NS, Hagel WC. *Superalloys II*. New York: John Wiley & Sons; 1987.
- [2] Cieslak MJ. The welding and solidification metallurgy of alloy 625. *Welding Journal*. 1991;70:49-56.
- [3] Hodge FG. The history of solid-solution-strengthened Ni alloys for aqueous corrosion service. *Journal of the Minerals Metals & Materials Society*. 2006;9(9):28-31. <http://dx.doi.org/10.1007/s11837-006-0078-9>.
- [4] Dupont NJ. Solidification of an Alloy 625 weld overlay. *Metallurgical and Materials Transactions A, Physical Metallurgy and Materials Science*. 1996;27(11):3612-3620. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02595452>.
- [5] Boser O. The behavior of inconel 625 in a silver environment. *Materials Science and Engineering A*. 1979;41:59-64.
- [6] Motta MF. Aplicação do processo MIG/MAG pulsado com duplo-aramé e potenciais isolados em operações de revestimento [tese de doutorado]. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina; 2002.
- [7] Groetelaars PJ, Morais CO, Scotti A. Influência do comprimento do arco sobre a transferência metálica no processo mig/mag duplo-aramé com potencial único. In: *Anais do 3º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF)*; 2005; Joinville, Santa Catarina. São Carlos: ABCM; 2005.
- [8] Ueyama T, Ohnawa T, Tanaka M, Nakata K. Effects of torch configuration and welding current on weld bead formation in high speed tandem pulsed gas metal arc welding of steel sheets. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2005;10(6):750-759. <http://dx.doi.org/10.1179/174329305X68750>.
- [9] Scotti A, Ponomarev V. Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho. 2. ed. São Paulo: Artliber; 2014.
- [10] Michie K, Blackman S, Ogunbiyi TEB. Twin wire GMAW: process characteristics and applications. *Welding Journal*. 1999;78(5):31-34.
- [11] Voropay NM, Protsenko PP. Features of weld and HAZ formation in gas shielded pulsed double-arc welding in high-strength low-alloyed steels. *The Paton Welding Journal*. 2000;(8):40-46.
- [12] Trommer G. Welding with two wire electrodes: status and prospects of the optimisation of gas-shielded metal-arc welding. *Welding and Cutting*. 2002;46:122-125.
- [13] Lowke JJ. Physical basis for the transition from globular to spray modes in gas metal arc welding. *Journal of Physics D, Applied Physics*. 2009;42(13):1-7. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/42/13/135204>.
- [14] Miranda HC. Reconhecimento e controle da transferência metálica no processo mig/mag pulsado [tese de doutorado]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia; 2002.
- [15] Santiago KG. Estudo da viabilidade econômica de revestimentos com mistura das ligas de níquel AWS ERNiCrMo-3 e ERNiCrMo-4 pelo processo MIG/MAG duplo arame [dissertação de mestrado]. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará; 2013.
- [16] Pessoa EF. Soldagem de revestimento com ligas de níquel empregando o processo MIG/MAG com duplo arame para aplicações em componentes do setor de petróleo e gás natural [tese de doutorado]. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará; 2014.
- [17] Caimacan D, Mishchenko A, Scotti A. Avaliação do uso de curto-circuito controlado em soldagens de passes de enchimento por MIG/MAG Duplo Arame. *Soldagem e Inspeção*. 2015;20(1):16-27. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI2001.03>.
- [18] Andrade AFC. Influência da corrente de pulso, tempo de pulso, e diâmetro de gota sobre a estabilidade da transferência metálica no processo MIG-P [dissertação de mestrado]. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte; 2012.
- [19] Alcan. *Manual de soldagem*. 1. ed. São Paulo: Alcan Alumínio do Brasil S/A; 1993.
- [20] Subramaniam S, White DR, Jones JE, Lyons DW. Experimental approach to selection of pulsing parameters in pulsed GMAW. *Welding Journal*. 1999;78:166-172.
- [21] Ecer MG. Magnetic deflection of the pulsed current welding arc. *Welding Journal*. 1980;(6):183-191.
- [22] Quites AM, Dutra JC. *Tecnologia da soldagem a arco*. Florianópolis: EDEME; 1979. p. 248.
- [23] Ueyama T, Ohnawa T, Tanaka M, Nakata K. Occurrence of arc interaction in tandem pulsed gas metal arc welding. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2007;12(6):523-529. <http://dx.doi.org/10.1179/174329307X173715>.
- [24] Michie K, Blackman S, Ogunbiyi TEB. Twin wire GMAW: process characteristics and applications. *Welding Journal*. 1999;(5):31-34.
- [25] Santiago KG, Motta MF. Exploração de parâmetros do processo MIG/MAG Duplo Arame para aplicação em revestimento de ligas de níquel com proposta de custeamento direto do processo. In: *Anais do 40º Congresso Nacional de Soldagem (CONSOLDA)*; 2014; São Paulo. São Paulo: ABS-Soldagem; 2014.
- [26] Aguiar WM. Revestimento por soldagem MIG/MAG empregando ligas de Níquel para aplicações em componentes do setor de petróleo e gás natural [tese de doutorado]. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará; 2011.
- [27] Reis RP, Scotti A, Norrish J, Cuiuri D. Investigation on welding arc interruptions in the presence of magnetic fields: arc length, torch angle and current pulsing frequency influence. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2013;41(1):133-139. <http://dx.doi.org/10.1109/TPS.2012.2230650>.
- [28] Reis RP, Norrish J, Cuiuri D. Preliminary evaluations on laser – tandem GMAW. *Welding in the World Peer-reviewed Section*. 2011;55(9-10):41-49. <http://dx.doi.org/10.1007/BF03321319>.