

FUNDAMENTOS E PERSPECTIVAS DE UMA TÉCNICA INOVADORA APLICADA AO PROCESSO ARCO SUBMERSO E MIG/MAG

Anna Louise Voigt, alouisevoigt@gmail.com¹

Tiago Vieira da Cunha, t.cunha@ufsc.br²

Kamila Borba Silva, kamila.borba@posgrad.ufsc.br²

Carlos Enrique Niño Bohórquez, carlos.nino@ufsc.br¹

¹ Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, SC, Brasil

² Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville, Joinville, SC, Brasil

Resumo: Os processos de soldagem a Arco Submerso e MIG/MAG são caracterizados pelos elevados índices de produtividade decorrentes das elevadas taxas de fusão do arame eletrodo. Entretanto, o controle do aporte térmico de ambos os processos encontra limitações ao passo que as variáveis como corrente de soldagem, comprimento livre do eletrodo (stickout) e velocidade de alimentação de arame estão intrinsecamente correlacionadas, não permitindo, portanto, o seu ajuste independente. Neste contexto, diversas técnicas vêm sendo desenvolvidas visando romper essas relações através do pré-aquecimento do arame eletrodo. O aquecimento através de um arco TIG auxiliar, um feixe de laser ou o aquecimento através da passagem de uma corrente utilizando uma fonte auxiliar, são algumas das técnicas empregadas nos processos de soldagem supracitados. Com a introdução deste aquecimento adicional e manutenção dos parâmetros de soldagem fixos, os estudos mostram que a corrente de soldagem diminui e, com isso, o aporte térmico, resultando em uma diminuição expressiva da diluição dos cordões de solda. Considerando uma mesma corrente de soldagem, ao aplicar o aquecimento adicional, é possível aumentar a taxa de fusão, permitindo o incremento da velocidade de alimentação de arame. Contudo, as técnicas propostas apresentam desafios tecnológicos e operacionais como aquecimento excessivo do bico de contato, necessidade de desenvolvimento de tochas de soldagem especiais, além de problemas de alimentabilidade do arame-eletrodo. Diante do potencial que se vislumbra a partir desses estudos e do potencial do aquecimento por indução eletromagnética demonstrado em trabalho anterior desenvolvido pelo grupo de pesquisa no qual os autores fazem parte, propõem-se o emprego do aquecimento por indução eletromagnética para o aquecimento adicional do arame eletrodo ao longo do stickout nos processos Arco Submerso e MIG/MAG. Num primeiro momento, pretende-se avaliar diferentes configurações de bobinas de indução e frequência de operação visando determinar o melhor conjunto de parâmetros para, então, realizar a avaliação da técnica proposta. Assim, como resultado, vislumbra-se potencial aumento da taxa de fusão do arame-eletrodo e na capacidade de ampliar a faixa operacional dos processos, além de uma redução nos problemas e limitações das técnicas já desenvolvidas.

Palavras-chave: Aquecimento indutivo, Arco Submerso, MIG/MAG.

1. INTRODUÇÃO

A alimentação contínua de arame no processo de soldagem TIG pode ser fria (com o arame sendo adicionado na temperatura ambiente, conhecida na bibliografia especializada como *cold wire*) ou com pré-aquecimento (*hot wire*). A grande vantagem da utilização do arame pré-aquecido é a menor energia do arco necessária para fundir o material de adição, permitindo o uso de maiores velocidades de alimentação, quando comparado ao arame frio, resultando, assim, em maiores índices de produtividade. A forma tradicionalmente utilizada para aquecer o arame é por efeito Joule, ao fazer passar corrente pelo arame conectado a uma fonte auxiliar. No entanto, a desvantagem dessa forma de aquecimento é a forte deflexão do arco voltaico (“sopro magnético”) que afeta a estabilidade do mesmo, devido ao campo magnético produzido pela corrente que circula no arame. Assim, como alternativa para mitigar este problema, são encontradas na literatura algumas propostas de técnicas de aquecimento.

Diante do cenário exposto, Voigt *et al.*, (2020) realizaram um estudo acerca da construção e avaliação de um sistema de aquecimento do arame por indução eletromagnética, que é uma técnica que tem sido pouco explorada no contexto da soldagem. Isto com o objetivo de eliminar completamente os problemas presentes no processo TIG *hot wire* relativos ao sopro magnético possibilitando, assim, o emprego de maiores velocidades de alimentação de arame e flexibilidade quanto aos aspectos operacionais, conferindo, portanto, maior robustez ao processo. O emprego do *induction hot wire* TIG (IHW-TIG) se mostrou uma alternativa aos processos convencionais no que tange à taxa de deposição, visto que se obteve um aumento de até 220% na velocidade de alimentação de arame nas condições estudadas (Voigt *et al.*, 2020). Este resultado

significa uma área depositada três vezes maior em comparação a técnica *cold wire* e, portanto, mostra-se uma técnica potencial.

Em processos com eletrodo consumível, a exemplo do processo *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), destacam-se técnicas como o emprego de um arame adicional visando o aumento da taxa de deposição e, por vezes, o pré-aquecimento deste para obtenção de um maior controle do aporte térmico. Em contrapartida ao aquecimento do arame adicional, diferentes técnicas têm sido desenvolvidas visando pré-aquecer o próprio arame consumível do processo GMAW. Isto, com o objetivo de desacoplar a velocidade de alimentação de arame e a corrente de soldagem. Diversos autores utilizam o efeito Joule para o pré-aquecimento do arame anterior a saída do mesmo pelo bico de contato. Contudo, esta abordagem ocasiona o aquecimento excessivo do bico de contato, visto que o arame chega ao mesmo não mais em temperatura ambiente, mas pré-aquecido, o que acarreta o seu desgaste acentuado e problemas na alimentação do material. Outra técnica empregada para o pré-aquecimento no processo GMAW é a utilização de um arco TIG anterior ao bico de contato (Ni and Gao, 2013a). Visando eliminar estas dificuldades, é proposta na literatura a aplicação de um feixe de laser posteriormente ao bico de contato, no espaço compreendido pelo comprimento livre do eletrodo - *stickout* (Ali *et al.*, 2015). Entretanto, esta técnica se torna de difícil acesso devido ao atual elevado custo do equipamento Laser. Com exceção da técnica proposta por Ali *et al.* (2015), todas as técnicas exigem um projeto de tocha especial de modo a possibilitar o pré-aquecimento anterior ao bico de contato.

No processo de soldagem Arco Submerso/*Submerged Arc Welding* (SAW), técnicas de pré-aquecimento de arame semelhantes têm sido estudadas e desenvolvidas. Contudo, devido ao fluxo utilizado, inerente ao processo, este impede o emprego, por exemplo, do aquecimento por laser. Logo, as técnicas presentes na literatura propõem tão somente o pré-aquecimento anterior ao bico de contato. Inclusive, o desenvolvimento de bicos de contato refrigerados são alvo de estudos devido ao aquecimento excessivo do mesmo e as elevadas energias de soldagem características do processo SAW.

Neste contexto e visto que o aquecimento por indução eletromagnética é eletricamente isolado e não necessita, portanto, de contato elétrico com o arame, vislumbra-se potencial para a aplicação no pré-aquecimento do arame nos processos de soldagem GMAW e SAW com vistas ao aquecimento de eletrodo consumíveis destes processos. Em ambos os processos, inclusive, esta técnica pode ser empregada anterior e posteriormente ao bico de contato. A aplicação de aquecimento posterior ao bico de contato no processo SAW é uma abordagem ainda inexplorada na literatura. Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo discorrer sobre os fundamentos e perspectivas acerca da aplicação do aquecimento por indução no aquecimento do arame nos processos GMAW e SAW. Assim, como resultado, espera-se conceber uma técnica de soldagem inovadora, com custo de implementação acessível e capaz de incrementar os índices de produtividade.

2. TECNOLOGIAS DE PRÉ-AQUECIMENTO DO ARAME

No que se refere ao pré-aquecimento de arames adicionais ao processo de soldagem, há inúmeras possibilidades de métodos de aquecimento. Nestes, busca-se evitar interferências do arco voltaico de origem, especialmente, eletromagnética. No que tange o pré-aquecimento do arame de processos de eletrodo consumível, como é o caso do GMAW e SAW, não é de interesse que a peça de trabalho esteja no circuito, uma vez que estaria se sobrepondo ao próprio processo. Nesse contexto, esta seção tem como objetivo abordar as diferentes técnicas disponíveis na literatura que visam pré-aquecer o arame anteriormente a passagem pelo bico de contato ou no espaço que compreende o comprimento livre (*stickout*) nos processos GMAW e SAW.

2.1. Processo Gas Metal Arc Welding (GMAW)

A primeira proposta de pré-aquecimento do arame-eletrodo no processo GMAW encontrada na literatura, datada de 1989, foi realizada por Stol (1989), que nomeou a técnica de *Advanced Gas Metal Arc Welding*. O autor propõe desacoplar a taxa de deposição das variáveis inerentes do processo, como corrente de soldagem e comprimento do *stickout*, ao pré-aquecer o arame anteriormente ao bico de contato. Esta característica torna possível controlar, por exemplo, a diluição dos cordões de solda visando aplicações de revestimento. Há ainda a possibilidade de aumento da velocidade de soldagem, minimizando o escorrimento do cordão de solda e dispensando o emprego do cobre-juntas. Na Fig. 1(a) é possível visualizar o esquemático da técnica proposta por Stol (1989).

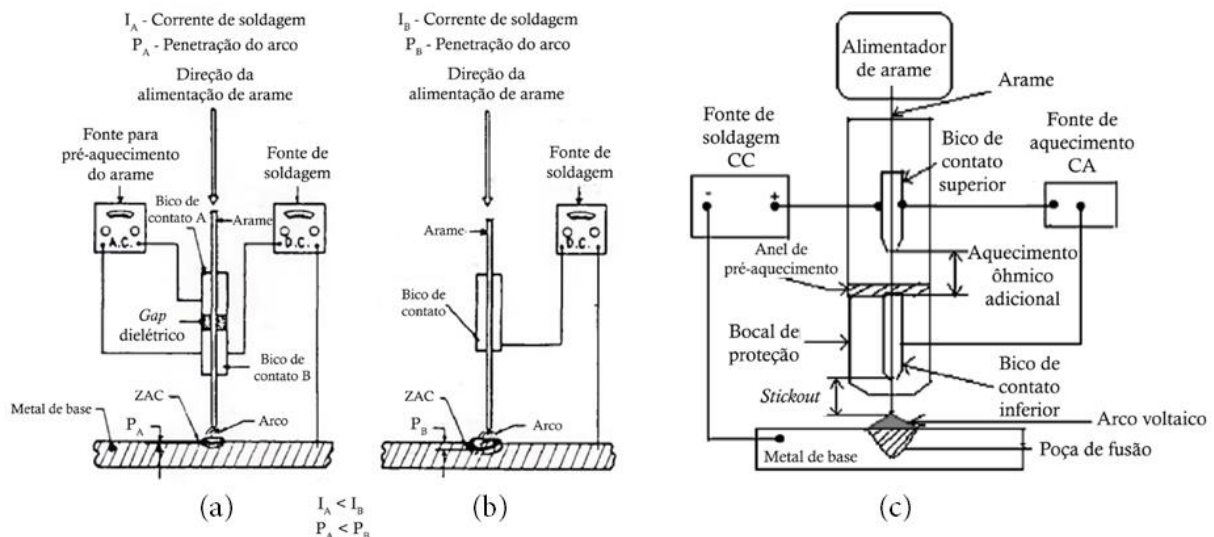


Figura 1. Esquemático da (a) técnica proposta por Stol (1989), (b) do método convencional e (c) da técnica de pré-aquecimento do arame-eletrodo no processo GMAW proposta por Shahi and Pandey (2006)

Stol (1989) realizou a deposição por soldagem de uma liga de níquel-cromo sobre chapas de aço de baixo teor de carbono de 25,4mm de espessura. Foi empregado um arame de 1,6mm de diâmetro, velocidade de alimentação de arame de 5 m/min e, durante a soldagem, realizado o tecimento transversal da tocha. Em comparação ao processo convencional, o autor obteve uma redução de 30 para 4,5% na diluição ao aplicar o pré-aquecimento do arame-eletrodo. A corrente de pré-aquecimento empregada foi alternada e de valor eficaz médio igual a 167 A. Contudo, a expressiva redução da diluição foi decorrente, também, do aumento do comprimento livre do eletrodo e aumento da velocidade de alimentação de arame para 6,6 m/min.

A técnica emprega dois contatos e uma fonte de energia secundária para pré-aquecer o arame-eletrodo antes de emergir da tocha de soldagem, contemplando, portanto, uma fonte de energia adicional e independente. Técnica semelhante é estudada por Shahi and Pandey (2006), denominada *Universal Gas Metal Arc Welding* (UGMAW). Segundo os autores, a técnica permite romper a relação fixa entre a corrente de soldagem, stickout e a taxa de deposição, que comumente limita a aplicação do processo GMAW convencional. O esquemático é semelhante ao proposto por Stol (1989), contudo, a conexão do processo convencional é realizada no primeiro bico de contato, ampliando o comprimento de *stickout* e, por consequência, a atuação da corrente de soldagem conforme apresentado na Fig. 1(c). Portanto, enquanto o aquecimento proposto por Stol (1989) é sequencial, sendo o aquecimento adicional anterior ao bico de contato principal, em contrapartida, a configuração proposta por Shahi and Pandey (2006) caracteriza-se por um aquecimento conjunto. Ao conectar a fonte de soldagem ao bico de contato superior, tem-se um comprimento de arame sendo aquecido por efeito Joule resultante da soma das correntes da fonte auxiliar e da fonte de soldagem. Quanto ao anel de pré-aquecimento, os autores não comentam o seu emprego e impacto ao longo do trabalho. Em suas publicações posteriores (Shahi *et al.* 2007; Shahi and Pandey, 2008a, 2008b) os autores apresentam o esquemático sem este anel, indicando que o mesmo não se faz necessário.

Shahi and Pandey (2006) avaliam o efeito dos diferentes parâmetros como velocidade de alimentação de arame, tensão de arco, velocidade de soldagem e o emprego do aquecimento adicional do arame-eletrodo na corrente de soldagem. Os autores empregam um arame ER70S-6 de 1,14 mm de diâmetro e uma corrente de aquecimento adicional de valor eficaz igual a 110 A. Ao observarem correlações e efeitos inerentes às características do processo GMAW, como o aumento da corrente de soldagem com o aumento da velocidade de alimentação de arame, os autores deixam de evidenciar em seu estudo o efeito da introdução do aquecimento adicional. Shahi and Pandey (2006) obtiveram para o processo convencional uma corrente média de soldagem de aproximadamente 200 A e, ao empregar o aquecimento adicional, observaram uma redução de 30 a 35 A na corrente principal de soldagem ao empregar uma velocidade de alimentação de arame de 7 m/min. Em um trabalho consequente, Shahi *et al.* (2007) avaliaram os efeitos dos parâmetros sobre a diluição ao empregar o processo convencional e a técnica UGMAW. Ao empregar a técnica UGMAW, os autores obtiveram uma diminuição de 22 para 14% na diluição. Isto porque, dada uma mesma velocidade de alimentação de arame, a corrente de soldagem diminui com a introdução do aquecimento adicional, acarretando uma redução do aporte térmico e, consequentemente, da diluição. Os autores observaram, ainda, uma mudança no perfil de penetração com o aquecimento adicional do arame-eletrodo. A penetração do cordão de solda do processo convencional era do tipo finger shape e passou a ser mais uniforme ao longo da largura do cordão de solda com a aplicação da técnica UGMAW. Estes cordões foram realizados com velocidade de alimentação de arame de 6 m/min, tensão de arco de 30 V e mesmos valores de velocidade de soldagem e *stickout* (30 mm). Ao empregar uma corrente de pré-aquecimento de 110 A, Shahi *et al.* (2007) obtiveram no ensaio uma diminuição de 36 A na corrente principal, que era de 182 A sem pré-aquecimento, atingindo 146 A com a técnica UGMAW. Os autores apontam ainda que empregando o pré-aquecimento, ao comparar cordões de solda de diluição semelhante, embora não informar a corrente de soldagem utilizada, há um aumento de 25%

na taxa de deposição. Diante dessas perspectivas, Shahi and Pandey (2008b) dão continuidade a investigação da técnica visando aplicações de revestimento, avaliando a microestrutura e propriedades quanto a corrosão.

Usualmente deseja-se revestir um material de base tipicamente de menor custo, usualmente com característica de baixa resistência a corrosão, com um material de adição de propriedades superiores. A técnica UGMAW apresenta melhores características que o processo GMAW convencional, pois proporciona menores valores de diluição e, portanto, menor mistura do material de base e do metal de adição, mantendo assim, as propriedades desejáveis ao revestimento. Apesar da sequência de estudos acerca da variante UGMAW, os autores (Shahi and Pandey, 2006, 2008a; Shahi *et al.*, 2007) não comentam as características de transferência metálica e uma possível alteração devido à diminuição da corrente principal de soldagem.

Ambas as configurações de aquecimento apresentadas compreendem dois bicos de contato. Destes, o primeiro apresenta condições operacionais semelhantes ao bico de contato do processo GMAW convencional, exceto pelo distanciamento superior em relação ao arco voltaico. Quanto ao segundo bico de contato, este está sujeito ao aquecimento devido ao arco voltaico acrescido do aquecimento resultante da passagem do arame-eletrodo pré-aquecido. Ademais, devido a esta configuração, é necessário o emprego de uma tocha de soldagem especial que contemple o resfriamento, sobretudo do segundo bico de contato, sendo este dificultado em virtude da necessidade de isolamento elétrico do bico de contato principal (superior). Dentre as variáveis que devem ser observadas no projeto de uma tocha para aplicação destas técnicas está o circuito do gás de proteção, uma vez que o arame-eletrodo em aquecimento deve ser protegido para evitar a oxidação demasiada, podendo acarretar em descontinuidades no cordão de solda. Diante dessas observações, é possível inferir que o projeto de uma tocha de soldagem que permita o emprego das técnicas propostas por Stol (1989) e Shahi and Pandey (2006) é complexa, podendo apresentar limitações operacionais.

Com o mesmo objetivo de pré-aquecer o arame-eletrodo anteriormente ao bico de contato, Ni and Gao (2013a, 2013b) propõe a utilização de um arco voltaico GTAW para promover o aquecimento do arame-eletrodo, denominada pelos autores de *hot-wire* GMAW. Na Figura 2(a) é possível observar o esquemático proposto. Nesta configuração o arame-eletrodo atua como ânodo para ambos os processos e o nível de pré-aquecimento é controlado pela corrente de soldagem do arco GTAW. A tocha de soldagem adaptada é apresentada na Figura 2(b).

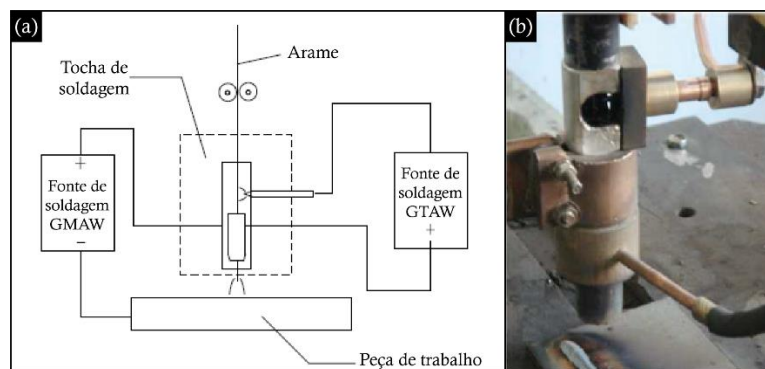


Figura 2. (a) Proposta de pré-aquecimento do arame-eletrodo empregando um arco TIG e (b) tocha de soldagem adaptada para a aplicação. Fonte: Adaptado de Ni and Gao (2013b)

Ni and Gao (2013b) realizaram cordões sobre chapas do aço baixo carbono Q235 de 6 mm de espessura. H08Mn2Si foi o arame-eletrodo empregado com 1.2 mm de diâmetro. Os autores utilizaram em todos os ensaios uma tensão de soldagem de 32 V. Ao variar a corrente de pré-aquecimento do arco GTAW, Ni and Gao (2013b) obtiveram diferentes condições de transferência metálica visto que a velocidade de alimentação de arame foi mantida constante. Além deste efeito, os autores observaram também uma redução da corrente de soldagem de 279 A para 190 A ao empregar corrente de pré-aquecimento de 80 A, o que representa uma redução de 32 %. Concomitante a diminuição da corrente de soldagem, têm-se a diminuição da força eletromagnética que contribui para o destacamento da gota, resultando em gotas de maior volume. Portanto, segundo os autores, o modo de transferência metálica se altera de *streaming spray* para *drop-spray*. A taxa de destacamento sofre uma redução de 350-360 gotas por segundo e atinge apenas 120 gotas por segundo. Ni and Gao (2013b) apontam que este modo de transferência *drop-spray* possui, no processo convencional, uma estreita faixa de operação, dificultando o seu emprego. Os autores ressaltam que este modo de transferência metálica é o mais atrativo e o emprego da técnica *hot-wire* GMAW possibilita o seu emprego de forma robusta, pois amplia sua faixa operacional.

Os métodos de pré-aquecimento utilizados pelos autores citados anteriormente consistem em pré-aquecer o arame-eletrodo anteriormente ao bico de contato. Devido à temperatura atingida pelo arame-eletrodo, o mesmo promove um maior desgaste do bico de contato. Além disso, o arame-eletrodo pode sofrer uma fusão parcial ou uma deflexão e, portanto, dificultando a sua passagem pelo orifício do bico de contato. Objetivando contornar tais dificuldades, Ali *et al.* (2015) propõe o aquecimento ao longo do comprimento do *stickout*, após o arame-eletrodo emergir do bico de contato, por meio de uma fonte laser. Com o aumento da potência do laser empregada, os autores observaram uma diminuição da corrente de soldagem, sendo essa redução de aproximadamente 17% ao empregar a potência máxima de 900W. Os autores não comentam acerca da transferência metálica “drop spray” como apontado por Ni and Gao (2013b), contudo, as imagens

que os autores apresentam a partir de filmagem de alta velocidade apontam para esse modo de transferência, como pode ser visto na Fig. 3.

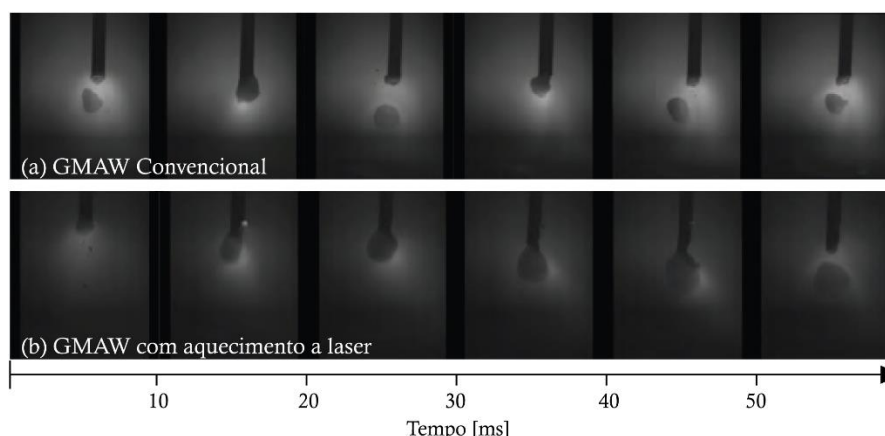


Figura 3. Imagens sequenciais da transferência metálica empregando (a) o processo GMAW convencional e (b) utilizando um laser para aquecimento do arame com potência de 700 W. Adaptado de Ali *et al.* (2015)

Os autores descrevem a transferência obtida como irregular, contudo, não discorrem sobre essas irregularidades ou seus efeitos. Quanto ao efeito do aquecimento adicional sobre a diluição, ao empregar 500 W na fonte laser, obteve-se a mínima diluição, de aproximadamente 7%, cerca da metade obtida no modo convencional, igual a 16%. Os autores não observaram alterações significativas nos parâmetros geométricos dos cordões de solda como largura, reforço e ângulo de molhamento ao introduzir o aquecimento adicional do arame-eletrodo.

As características inerentes ao arame como diâmetro relativamente pequeno e de formato cilíndrico dificultam o emprego do aquecimento por feixe de laser. Como os próprios autores comentam, devido à difração resultante do formato do arame, apenas uma pequena parcela da energia efetivamente promove o aquecimento. A relação entre o diâmetro do laser e diâmetro do arame-eletrodo exerce grande influência no aquecimento, visto que quanto menor o diâmetro do laser em relação ao diâmetro do arame-eletrodo, maior o aproveitamento da energia. Ademais, o emprego do laser necessita de uma precisão no seu posicionamento para uma maior robustez operacional. Tendo em vista essas particularidades acrescida do alto investimento em equipamentos, a técnica proposta por Ali *et al.* (2015) encontra barreiras para a sua operacionalização.

2.2. Processo Submerged Arc Welding (SAW)

Após quinze anos da proposta do emprego do pré-aquecimento do arame-eletrodo na soldagem GMAW, Pandey (2004) *apud* Shukla and Pandey (2012) propõe uma técnica semelhante aplicado ao processo SAW, denominada *Advanced Submerged Arc Welding* (ASAW). Nesta, uma fonte de energia auxiliar também é utilizada para pré-aquecer o arame-eletrodo anteriormente ao mesmo emergir do bico de contato. É possível observar na Fig. 4(a) o diagrama esquemático do processo ASAW, muito semelhante ao da técnica *Advanced Gas Metal Arc Welding* proposta por Stol (1989).

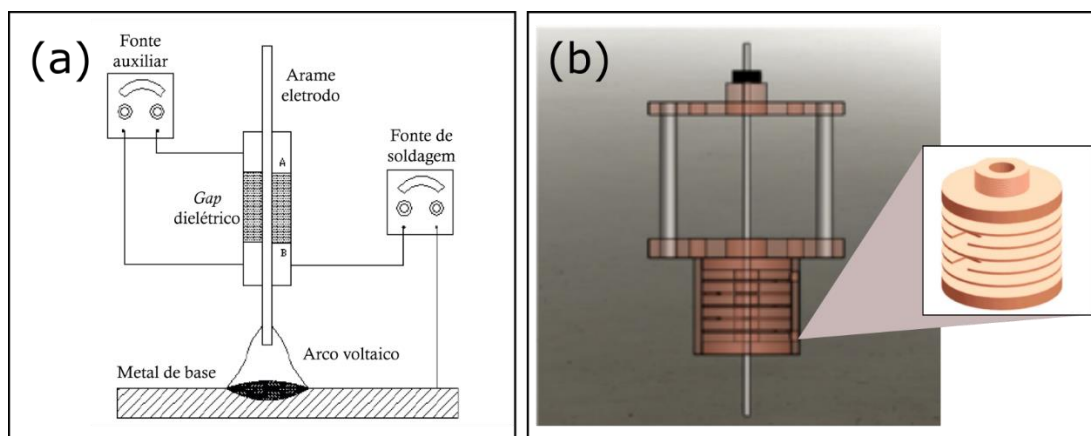


Figura 4. (a) Diagrama esquemático da técnica *Advanced Submerged Arc Welding*. Fonte: Adaptado de Shukla and Pandey (2012) e (b) projeto da tocha de soldagem SAW desenvolvido por Choudhary *et al.*, (2018b)

Shukla and Pandey (2012) empregaram um eletrodo de AISI 308L com 3,18 mm de diâmetro em chapas de aço carbono de 12 mm de espessura. Ao empregar uma metodologia de ensaios fatorial, os autores utilizaram uma corrente de pré-aquecimento de 250 A. Na condição em que o processo convencional resultou em uma diluição de 59%, o emprego do pré-aquecimento possibilitou uma redução para 37%. Dentre todas as condições analisadas, a mínima diluição obtida foi de 26%. Em um estudo posterior, Om and Pandey (2014) avaliaram mais níveis para cada variável, empregando o mesmo material de base e arame eletrodo. Os autores empregaram a metodologia de superfície de resposta buscando avaliar a influência dos parâmetros sobre a tensão de soldagem. Om and Pandey (2014) observaram que a corrente de pré-aquecimento tem efeito positivo direto na tensão de soldagem, resultado este que os autores justificam pelo fato de a resistividade do arame-eletrodo aumentar com o aumento da temperatura decorrente da maior corrente de pré-aquecimento. A metodologia empregada não possibilita avaliar com maior profundidade os efeitos do pré-aquecimento do arame-eletrodo, uma vez que está centrada dos efeitos das variáveis sobre a tensão de soldagem de maneira independente. Este tipo de abordagem no contexto da soldagem por vezes dificulta a análise devido às relações complexas e concatenadas entre as variáveis do processo.

Apesar dos resultados promissores obtidos na literatura, o pré-aquecimento deve ser controlado para evitar o aquecimento excessivo e consequente flambagem do arame-eletrodo, além de problemas de alimentabilidade. Outro obstáculo se encontra no aquecimento excessivo do bico de contato, fator esse que dificulta operações contínuas. Buscando solucionar esses problemas, Choudhary *et al.*, (2018a) propõe um bico de contato refrigerado, como pode ser observado na Fig. 4(b). O mesmo foi confeccionado em cobre, possui aletas em seu entorno favorecendo a troca de calor e água é utilizada como fluido de refrigeração.

Quanto aos efeitos do pré-aquecimento, os autores empregaram um arame-eletrodo de aço carbono de 4 mm de diâmetro, tensão de soldagem de 40 V e velocidade de alimentação de arame de aproximadamente 23 mm/s (1,38 m/min) e distância entre bico de contato e peça de 28 mm. No processo convencional, a corrente de soldagem média resultante foi de 600 A. Ao empregar uma corrente de pré-aquecimento de 240 A, os autores obtiveram 400 A de corrente de soldagem média, logo, uma redução expressiva em relação ao processo convencional. Os cordões obtidos podem ser observados na Fig. 5. Segundo os autores (Choudhary *et al.*, 2018a), em relação à área depositada, o processo ASAW apresentou um aumento de 25% em relação ao processo convencional. Visto que a velocidade de alimentação de arame é a mesma, segundo os autores, o processo ASAW se mostrou mais eficiente quanto à taxa de deposição. Contudo, ao realizar as medições das imagens da Figura 5 utilizando a espessura para calibrar a imagem, uma vez que não é apresentada escala, obtiveram-se valores de área depositada de 30 e 27 mm² para o processo convencional e ASAW respectivamente, logo, contraditória com os valores médios apresentados pelos autores, de 28 e 35 mm². De fato, ao observar as imagens, não é possível observar um aumento de 25% de área depositada como apresentado pelos autores. A medida linear do reforço, medida a parte do corpo de prova, apresentou um aumento, assim como uma aparente diminuição da largura. Este resultado é esperado visto que houve uma redução da corrente de soldagem.

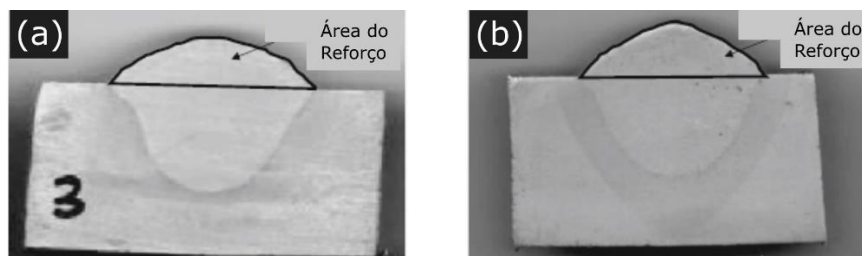


Figura 5. Macrografias de cordões de soldagem realizados (a) com o processo convencional SAW e (b) com pré-aquecimento (ASAW). Fonte: Adaptado de Choudhary *et al.*, (2018a)

Dentre os poucos trabalhos encontrados da literatura, todos empregam a mesma técnica e, portanto, realizam um pré-aquecimento do arame-eletrodo anteriormente ao bico de contato. Devido aos elevados níveis de energia característicos do processo SAW, o pré-aquecimento do arame-eletrodo promove um aquecimento significativo e resulta na necessidade de um bico de contato refrigerado para operações contínuas.

3. CONSIDERAÇÕES SOBRE A APLICAÇÃO DO AQUECIMENTO POR INDUÇÃO

As diferentes abordagens presentes na literatura podem ser divididas, para ambos os processos, quanto ao posicionamento relativo do aquecimento adicional em relação ao aquecimento intrínseco do processo de soldagem que ocorre no comprimento livre do eletrodo – *stickout*. Na Fig. 6 é possível visualizar um esquemático das duas abordagens. A configuração da Fig. 6(a) consiste em promover o pré-aquecimento do arame eletrodo na região anterior ao bico de contato principal e, logo, anterior ao *stickout*. Este conceito é empregado na maioria dos trabalhos presentes na literatura. No processo GMAW, a abordagem apresentada na Fig. 6 (a) é empregada por Stol (1989) e Ni and Gao (2013a, 2013b). Quanto ao processo SAW, todos os trabalhos utilizam esta configuração, no qual ocorre o pré-aquecimento do arame-eletrodo. A abordagem da Fig. 6 (b) se caracteriza por não pré-aquecer, e sim aquecer de forma adicional e conjunta, uma vez que promove o aquecimento na região que compreende o comprimento do *stickout*. A técnica empregada por Shahi and Pandey (2006, 2008a, 2008b) e Shahi *et al.* (2007) necessita de um contato adicional, sendo este posicionado próximo

ao arco voltaico semelhantemente a posição dos bicos de contato convencionais. Ao empregar esse contato adicional, o mesmo está sujeito ao aquecimento devido à passagem do arame quente. Na configuração da Fig. 6 (a) o bico de contato principal se encontra na condição em que o arame-eletrodo que o percorre também se encontra pré-aquecido. A proposta de aquecimento por laser de Ali *et al.* (2015) também consiste no aquecimento adicional e conjunto, entretanto, caracteriza-se por ser localizado em uma pequena região.

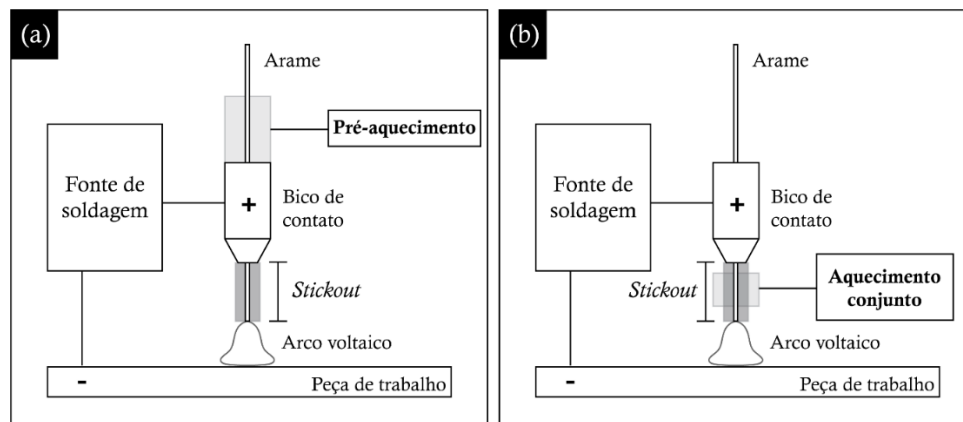


Figura 6. Configurações de aquecimento do arame-eletrodo em relação ao aquecimento junto ao *stickout*: (a) pré-aquecimento e (b) aquecimento adicional e conjunto

A técnica de aquecimento por indução eletromagnética permite o aquecimento em ambas as configurações, contudo, cada qual apresenta desafios e limitações. Ao introduzir a bobina de indução anterior ao bico de contato (configuração da Fig. 6 (a)), o arame-eletrodo estará sujeito apenas ao aquecimento indutivo. A priori, não se teria nessa configuração limitação quanto ao comprimento da bobina e, conseqüentemente, quanto ao número de espiras. Ademais, nessa configuração, a bobina de indução estaria protegida da radiação do arco e da degradação em razão desta. Contudo, ao posicionar a bobina de indução antes do bico de contato, se faz necessário uma adequação da tocha de soldagem visando inserir a bobina de indução no seu conjunto. Possivelmente, a bobina de indução poderá promover o aquecimento de partes metálicas da tocha de soldagem que estejam próximas a mesma. Visto que, ao emergir da bobina, o arame-eletrodo perde calor até o contato elétrico no bico de contato, é necessário que o aquecimento seja realizado tão próximo quanto possível. Cabe salientar que tanto a dinâmica de aquecimento, quanto a troca e conseqüente perda de calor, dependem da velocidade de alimentação de arame empregadas. Para o caso do processo GMAW, este é um fator crítico, visto que são empregadas maiores velocidades de alimentação de arame. No que tange o processo SAW, as velocidades de alimentação de arame são relativamente menores, contudo, o diâmetro do arame-eletrodo é expressivamente maior. Portanto, os desafios se apresentam de formas distintas para os processos GMAW e SAW. Para o processo GMAW se tem interesse de aquecer uma menor bitola de arame-eletrodo em um tempo reduzido resultante das maiores velocidades de alimentação de arame. Entretanto, para o processo SAW, é desejável um aquecimento de um diâmetro maior e, para tanto, se dispõe de um tempo superior.

Outro fator de destaque, na configuração em que a bobina de indução é posicionada visando o pré-aquecimento (Fig. 6 (a)), diz respeito ao aquecimento do bico de contato. Este aquecimento, se excessivo, pode ocasionar o desgaste do bico de contato, prejudicando o contato elétrico com o arame-eletrodo e, conseqüentemente, ocasionar em instabilidades no processo. Deste modo, é possível que um bico de contato refrigerado e um sistema que garanta o contato elétrico mesmo em condições de desgaste excessivo do orifício precisem ser desenvolvidos. Além de possivelmente ocasionar o aquecimento excessivo do bico de contato, podem ocorrer problemas de alimentabilidade e entupimento decorrente, por exemplo, de uma perda de rigidez devido à elevada temperatura do arame-eletrodo ou da dilatação térmica do mesmo.

Diversas são as vantagens da configuração em que a bobina de indução é posicionada na configuração apresentada na Fig. 6 (b). Destacam-se a não necessidade de alteração da tocha de soldagem e menores perdas de calor. Quanto ao bico de contato, o mesmo não sofrerá problemas de aquecimento excessivo e desgaste, pois irá operar em sua condição normal de uso. Contudo, ao introduzir a bobina de indução após o bico de contato, a mesma estará mais próxima ao arco voltaico e, portanto, sujeita a radiação. Além disso, poderá sofrer degradação não apenas devido à elevada temperatura, como também estará sujeita a respingos decorrentes do processo. Esta configuração de posicionamento da bobina também limita o seu tamanho, visto que a mesma terá apenas o comprimento do *stickout* disponível para o aquecimento. Esta limitação seria crítica, sobretudo no processo GMAW. Quanto ao processo SAW, estudos preliminares realizados no Laboratório de Tecnologia da Soldagem – UFSC (LTS) empregando um arame-eletrodo de 2,4 mm de diâmetro demonstraram a possibilidade de emprego de um comprimento de *stickout* de até 75 mm, sendo este suficiente para promover o aquecimento por indução. Contudo, é necessária atenção à alimentação de fluxo no processo SAW e o impacto da presença da bobina de indução no mesmo.

Quanto ao aquecimento resultante da indução eletromagnética, este será realizado concomitante ao aquecimento por efeito Joule devido à passagem da corrente de soldagem. Logo, a combinação dos modos de aquecimento poderá alterar a dinâmica, por exemplo, da transferência metálica. Devido ao aquecimento em razão da corrente de soldagem, a taxa de aquecimento por indução poderá ser alterada devido às mudanças nas propriedades como resistividade elétrica e

permeabilidade decorrentes da maior temperatura do arame-eletrodo. Efeitos de cancelamento da corrente induzida também poderão ser mais evidentes devido à combinação dos mecanismos de aquecimento do arame-eletrodo do próprio processo e do aquecimento por indução eletromagnética.

Devido ao pré-aquecimento do arame-eletrodo, no caso da configuração em que a bobina é posicionada anteriormente ao bico de contato, e do aquecimento conjunto, no caso da bobina posicionada ao longo do comprimento do *stickout*, a corrente de soldagem pode sofrer alterações. É esperado que a corrente de soldagem diminua ao empregar o aquecimento por indução eletromagnética, considerando uma mesma velocidade de alimentação de arame. Essa diminuição acarreta uma menor força de Lorenz, logo, uma menor força de destacamento da gota. Portanto, vislumbra-se uma alteração da corrente na região de transição globular-goticular do mapa de transferência metálica para o processo GMAW. Visto posto, o presente trabalho propõe o estudo e desenvolvimento da aplicação do aquecimento por indução posterior ao bico de contato frente a sua facilidade de aplicação e potencial de aquecimento.

4. PROPOSTA DE TRABALHO

A proposta deste estudo está estruturada em etapas, conforme Fig. 7, cada qual planejada de modo a criar subsídios para as etapas subsequentes. A primeira etapa consiste no desenvolvimento de bobinas de indução dotadas de características que as tornam adequadas para a aplicação. Isto se deve ao fato destas serem posicionadas ao longo do comprimento do *stickout*, ou seja, numa posição com pouco espaço disponível e sujeitas ao intenso calor proveniente do arco voltaico. Deste modo, o principal desafio nesta etapa do trabalho consistirá no desenvolvimento de tecnologia para obtenção de bobinas compactas, com boa capacidade de refrigeração e eletricamente isoladas. Ademais, pretende-se avaliar a eficiência de diferentes configurações de bobina de indução, disposição de espiras e frequência de operação.

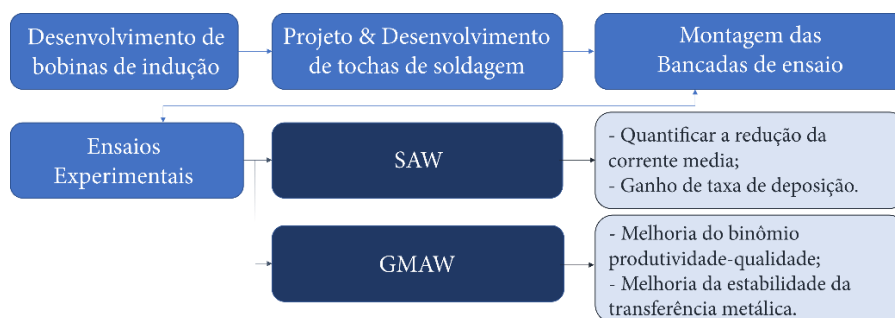


Figura 7. Etapas da proposta de trabalho

De posse das bobinas, as atenções do projeto passam para a aplicação da citada técnica. Deste modo, tem-se uma série de etapas, de cunho tecnológico, em sequência. A primeira delas consiste no desenvolvimento de tecnologias a fim de viabilizar o aquecimento do arame-eletrodo por indução eletromagnética nos processos SAW e GMAW. Neste contexto, pretende-se desenvolver protótipos funcionais de tochas de soldagem, para ambos os processos, que permitam a operacionalização dos citados processos aplicando a técnica proposta de forma adequada. Neste desenvolvimento será contemplado desde questões mais específicas, relacionadas aos materiais empregados e técnicas de fabricação, até questões mais abrangentes, como os aspectos funcionais/ergonômicos dos protótipos.

De posse destas tochas de soldagem, será realizada a montagem de bancadas de ensaios de soldagem com características específicas a fim de atender, de forma plena, às necessidades relativas à técnica em estudo. Estas bancadas serão compostas pelas tochas de soldagem desenvolvidas, fonte de soldagem, cabeçote de soldagem GMAW, cabeçote de soldagem SAW, fonte de indução eletromagnética, sistema de deslocamento de tocha com dois graus de liberdade, sistema de aquisição de dados para soldagem e sistema de aquisição de dados elétricos.

Na sequência, ter-se-á a realização dos ensaios de soldagem com o aquecimento combinado do arame-eletrodo, mediante o emprego da indução eletromagnética (bobinas desenvolvidas) somado ao aquecimento por efeito Joule, resultante da própria corrente de soldagem. Assim, serão realizados ensaios experimentais com indução eletromagnética aplicada ao processo SAW visando quantificar a redução da corrente média de soldagem mantendo a velocidade de alimentação de arame fixa. Em um segundo momento, serão realizados ensaios incrementando a velocidade de alimentação de arame até que a corrente de soldagem média alcance o patamar obtido no processo convencional. Com vistas a avaliar diferentes condições operacionais, pretende-se empregar diferentes velocidades de alimentação de arame, buscando obter diferentes condições operacionais no tocante à corrente média de soldagem. O arame-eletrodo que será empregado possui diâmetro de 2,4 mm, classificado pela AWS como EM12K, e, portanto, faixa operacional de corrente de 300-800 A (Brien, 1983). Em relação ao fluxo, pretende-se empregar o F7A6, também classificado pela norma AWS A5.17, resultando no par arame-fluxo F7A6-EM12K. As dimensões dos corpos de prova serão definidas após ensaios preliminares.

No que tange ao estudo da aplicação do aquecimento indutivo no arame-eletrodo do processo GMAW, serão abordadas duas frentes de atuação, a saber: melhoria do binômio produtividade-qualidade da solda e melhoria da estabilidade da transferência metálica. Na “melhoria do binômio produtividade-qualidade da solda” será quantificado o aumento da taxa de fusão e os efeitos sobre a corrente média de soldagem, além de avaliar o ganho de taxa de deposição

e os efeitos sobre as características morfológicas dos cordões de solda. Em “melhoria da estabilidade da transferência metálica” serão avaliados os efeitos da introdução do aquecimento por indução eletromagnética na região de transição globular-goticular e possíveis alterações da corrente de transição.

Neste contexto, propõe-se um primeiro conjunto de ensaios visando avaliar a capacidade de aumento da taxa de fusão ao introduzir o aquecimento por indução eletromagnética no processo GMAW. Pretende-se avaliar três patamares de velocidade de alimentação de arame e, consequentemente, três níveis de corrente de soldagem, buscando operar no modo de transferência metálica goticular. Isto, com vistas a avaliar o efeito de diferentes valores de velocidade de alimentação de arame e sua influência devido aos diferentes tempos de aquecimento por unidade de comprimento de arame. Neste momento, a taxa de fusão será avaliada no que tange à redução da corrente média de soldagem em função de determinado campo magnético aplicado.

Ao longo dos ensaios com aplicação de diferentes patamares de campo magnético aplicado e diferentes velocidade de alimentação de arame, pretende-se aumentar a velocidade de alimentação de arame até que a corrente média de soldagem se iguale ao valor obtido com o processo convencional. Com isso, será possível quantificar a capacidade de aumento da taxa de deposição ao empregar o aquecimento por indução eletromagnética em conjunto ao aquecimento por efeito Joule resultante da corrente de soldagem ao longo do stickout.

Na sequência, será avaliado o efeito da introdução do aquecimento indutivo sobre a região de transição globular-goticular. Iniciando com o modo de transferência metálica goticular, será habilitado o sistema de aquecimento por indução e, na sequência, a velocidade de alimentação de arame será diminuída com vistas a obter o modo de transferência metálica globular. Com base na aquisição dos sinais de tensão e corrente de soldagem, será possível analisar a região de transição bem como identificar possíveis alterações na corrente de transição e no tamanho de gota do modo de transferência metálica, resultado este que é reportado na literatura (Ni and Gao, 2013a).

Para ambos os processos de soldagem, como resultado, além de avaliar as taxas de deposição conseguidas com a técnica proposta (produtividade), será analisado os aspectos geométricos dos cordões de solda como largura, penetração, reforço e diluição.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto, são evidentes os desafios de promover o aquecimento do arame eletrodo após o bico de contato, tanto no processo GMAW quanto no SAW. Isto pode ser confirmado pelas poucas propostas de trabalho presentes na literatura, como também, no âmbito industrial. Entretanto, com a utilização da técnica de aquecimento por indução eletromagnética, vislumbra-se a viabilidade do aquecimento do arame-eletrodo após o bico de contato. Com o desenvolvimento tecnológico e validação do conceito físico, a proposta pode se transformar em uma técnica capaz de ser aplicada comercialmente. Após esse estágio de desenvolvimento tecnológico, a técnica terá capacidade de trazer ganhos à soldagem permitindo maior taxa de deposição e, especificamente no caso do processo GMAW, trazer ao processo características operacionais distintas ao que se tem hoje, no que tange a possibilidade de se alterar a condição dos diferentes modos de transferência metálica.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao POSMEC e à CAPES, pelo apoio financeiro com o fornecimento da bolsa de pós-graduação. Agradecem também ao Laboratório de Tecnologia da Soldagem (UFSC-Joinville) e à empresa IMC Soldagem pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- Ali, Y., Guenther, K., Burt, A., Bergmann, J.P., 2015. “Laser-assisted GMAW hardfacing”. *Welding Journal*, Vol. 94, No. 12, pp. 367-373.
- Brien, A.O., 1983, *Welding Handbook: Welding Processes*. American Welding Society.
- Choudhary, A., Kumar, M., Unune, D.R., 2018a. “Parametric modeling and optimization of novel water-cooled advanced submerged arc welding process”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 97, No. 1–4, pp. 927–938. doi: 10.1007/s00170-018-1944-7.
- Choudhary, A., Kumar, M., Unune, D.R., 2018b. “Investigating effects of resistance wire heating on AISI 1023 weldment characteristics during ASAW”. *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 33, No. 7, pp. 759–769. doi: 10.1080/10426914.2017.1415441.
- Ni, J., Gao, H., 2013a. “Effect of the wire temperature on the weld formation in GMAW”. *Advanced Materials Research*, Vol. 652–654, pp. 2289–2292. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.652-654.2289.
- Ni, J., Gao, H., 2013b. “Influence of preheated wire on GMAW process”. *Advanced Materials Research*, Vol. 668, pp. 538–542. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.668.538.
- Om, H., Pandey, S., 2014. “Establishing Relationship between ASAW Parameters and Welding Voltage during Surfacing”. *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 6, pp. 601–609.

- Voigt, A.L., Cunha, T.V., Niño, C.E., 2020. "Conception, implementation and evaluation of induction wire heating system applied to hot wire GTAW (IHW-GTAW)". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 281, pp. 116615. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116615
- Shahi, A.S., Pandey, S., 2006. "Welding current prediction in GMAW and UGMAW processes using response surface methodology". *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 11, No. 3, pp. 341–346. doi: 10.1179/174329306X113253.
- Shahi, A.S., Pandey, S., Gill, J.S., 2007. "Effect of auxiliary preheating of filler wire on dilution in gas metal arc stainless steel surfacing using RSM". *Surface Engineering*, Vol. 23, No. 5, pp. 384–390. doi: 10.1179/174329407X247127.
- Shahi, A.S., Pandey, S., 2008a. "Modelling of the effects of welding conditions on dilution of stainless steel claddings produced by gas metal arc welding procedures". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 196, pp. 339–344. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.05.060.
- Shahi, A.S., Pandey, S., 2008b. "Effect of auxiliary preheating of the filler wire on quality of gas metal arc stainless steel claddings". *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 17, No. 1, pp. 30–36. doi: 10.1007/s11665-007-9132-1.
- Shukla, D.K., Pandey, S., 2012. "Dilution control by advanced submerged arc welding". *Advanced Materials Research*, Vol. 488–489, pp. 1737–1741. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.488-489.1737.
- Stol, I., 1989. "Development of an advanced gas metal arc welding process". *Welding Journal*, Vol. 68, No. 8.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

FUNDAMENTALS AND PERSPECTIVES OF AN INNOVATIVE TECHNIQUE APPLIED TO THE SUBMERGED ARC AND MIG/MAG PROCESS

Anna Louise Voigt, alouisevoigt@gmail.com¹

Tiago Vieira da Cunha, t.cunha@ufsc.br²

Kamila Borba Silva, kamila.borba@posgrad.ufsc.br²

Carlos Enrique Niño Bohórquez, carlos.nino@ufsc.br¹

¹ Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville, Joinville, SC, Brasil, t.cunha@ufsc.br

² Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, SC, Brasil, alouisevoigt@gmail.com, carlos.nino@ufsc.br

Abstract. Submerged Arc and MIG/MAG welding processes are characterized by high productivity rates resulting from the high melting rates of the electrode wire. However, the control of the thermal input of both processes has limitations while the variables such as welding current, free electrode length (stickout) and wire feed speed are intrinsically correlated, thus not allowing independent adjustment. In this context, several techniques have been developed aiming to break these relationships through the pre-heating of the electrode wire. Heating through an auxiliary TIG arc, a laser beam or heating through the passage of a current using an auxiliary source, are some of the techniques employed in the above mentioned welding processes. With the introduction of this additional heating and maintenance of fixed welding parameters, studies show that the welding current decreases and, with this, the thermal input, resulting in a significant decrease in the dilution of the weld beads. Considering the same welding current, when applying additional heating, it is possible to increase the melting rate, allowing an increase in the wire feed speed. However, the proposed techniques present technological and operational challenges such as excessive heating of the contact tip, the need to develop special welding torches, as well as wire feed problems. In view of the potential that can be gleaned from these studies and the potential for electromagnetic induction heating demonstrated in a previous work developed by the research group in which the authors belong, it is proposed to use electromagnetic induction heating to further heat the electrode wire along the stickout in the Submerged Arc and MIG/MAG processes. At first, it is intended to evaluate different configurations of induction coils and operating frequency in order to determine the best set of parameters to then carry out the evaluation of the proposed technique. Thus, as a result, there is a potential to increase the wire melting rate and the ability to expand the operational range of the processes, in addition to a reduction in the problems and limitations of the techniques already developed.

Keywords: SAW. Inductive heating. GMAW.