

Processo MIG PV: efeito da proporção do eletrodo negativo na geometria do cordão de solda de alumínio

MIG PV Process: effect of ratio negative electrode on aluminium weld bead geometry

DOI: 10.46814/lajdv4n2-021

Recebimento dos originais: 04/02/2022

Aceitação para publicação: 01/03/2022

Leandro Ruben Gonzalez

Aluno de Engenharia Mecânica

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Campus do Vale

Endereço: Av. Bento Gonçalves, 9500 – Bairro Agronomia – setor 6. CEP 91501-970 – Porto Alegre – RS

E-mail: leorubengonzalez@gmail.com

Arnaldo Ruben Gonzalez

Doutor em Engenharia

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Campus do Vale

Endereço: Av. Bento Gonçalves, 9500 – Bairro Agronomia – setor 6. CEP 91501-970 – Porto Alegre – RS

E-mail: ruben@mecanica.ufrgs.br

RESUMO

O processo MIG (Metal Inert Gas) com polaridade variável é um processo relativamente novo que pode ser aplicado na indústria de processos de soldagem com altas taxas de produtividade e custo competitivo. O processo utiliza curvas compostas de pulsos nas polaridades positiva e negativa, e apresenta como principais benefícios em relação ao processo convencional, alta taxa de fusão, aliada ao baixo aporte térmico, menores deformações e um melhor controle da penetração e diluição. O objetivo deste trabalho é analisar os efeitos das proporções da polaridade negativa (%EN), da curva de corrente típica do processo, buscando relacionar com a penetração e diluição do cordão de solda resultante. Para o estudo foram usados três níveis de percentagens de %EN de 0%, 30% e 50%. Foram realizados cordões de solda na posição plana (1G), depositando alumínio ER5356 sobre a superfície livre da chapa de Al5052-F. Os parâmetros da polaridade negativa utilizados foram comparados com as diferentes formas de cálculos propostos na literatura para determinação do valor da proporção de eletrodo negativo. Sugere-se que para o cálculo da proporção de eletrodo negativo (% EN), todos os parâmetros da curva (correntes e tempos) devem ser considerados, a fim de se obter uma comparação efetiva dos níveis de % EN. Foi concluído que o aumento da proporção de eletrodo negativo causa diminuição da penetração e da diluição no cordão de solda.

Palavras-chave: mig polaridade variável, proporção de eletrodo negativo, soldagem de alumínio.

ABSTRACT

The MIG (Metal Inert Gas) process with variable polarity targets to the needs of the welding process industry with better costs and higher productivity rates. This process consists to use a curves composed of pulses with positive and negative polarities, and this presents benefits in relation to the conventional process as: high melt rate, combined with low thermal input, lower deformations and better control of penetration and dilution. The objective of this work is to analyze the effects of the proportions of

negative polarity (%EN) of the typical current curve of the process, looking for to relate it to the penetration and dilution of the resulting weld bead. For the study three levels of %EN percentages of 0%, 30% and 50% were used. Weld beads were made in the flat position (1G), depositing ER5356 aluminum on the free surface of the Al5052-F sheet. The negative polarity parameters used were compared with the different methods of calculating proposed in the literature. It is suggested that for the calculation of the negative electrode proportion (%EN), all curve parameters (currents and times) must be considered, in order to obtain an effective comparison of %EN levels. It was concluded that increasing the proportion of negative electrode causes a decrease in penetration and dilution in the weld bead.

Keywords: mig variable polarity, proportion of negative electrode, aluminum welding.

1 INTRODUÇÃO

Com o advento dos processos de fabricação, principalmente após a consolidação do processo de produção em grande escala, a necessidade de se unir materiais similares ou dissimilares tornou-se cada vez mais necessário. Nesse contexto, a soldagem surgiu como um grande aliado para a elaboração de projetos e criação de produtos que, cada vez mais, demandam pesquisa e tecnologia, principalmente na área dos metais.

Existe hoje, no setor industrial, uma predominância, quando falamos em processo de soldagem, na utilização do método de arco elétrico, sendo MIG/MAG o mais largamente empregado, tanto para revestimento quanto preenchimento. O processo MIG/MAG foi patenteado em 1930 por Hobart e Devers e chamado de GMAW (Gas Metal Arc Welding) [1], e na atualidade, este é mundialmente difundido e amplamente empregado, sendo o principal método de soldagem utilizado [2]. O processo MIG/MAG apresenta uma gama de vantagens, tais como a alta taxa de produtividade, uma considerável e indiscutível qualidade do cordão de solda aliados a um custo moderado de produção do processo.

Com o constante aumento de demanda de produtividade, surgiu a necessidade de que o processo de soldagem se tornasse mais flexível e a otimização e constante melhora do processo MIG/MAG fez com que sua variante denominada Polaridade Variável, acabasse se difundindo no processo produtivo. Este processo tem como característica principal a alta taxa de fusão de material.

Existe, em contrapartida, um porém no processo MIG/MAG PV que é justamente o ajuste dos seis parâmetros da curva de corrente, que gerem cordões de solda em condições satisfatórias, isto se dá basicamente pelo método de tentativa e erro até o ponto em que se atinge uma lacuna de valores de parâmetros que atendem as expectativas [3]. Basicamente as variáveis alteradas em cada um dos parâmetros do trabalho foram: Tempo do pulso negativo (T_n) em (ms), Corrente do pulso negativo (I_n) em (A), e Tempo de corrente de base (T_b) em (ms).

Particularmente, nesse trabalho buscaram entender como afetam os parâmetros do processo às características do cordão de solda, que são a penetração e diluição, parâmetros importantes quando se trata de revestimento de superfície por soldagem, também em passe de raiz.

Para tal, foi escolhido o processo de soldagem MIG/MAG Polaridade Variável para realizar os cordões de solda já que permite o controle acurado das características do cordão de solda. Este processo proporciona o melhor controle de penetração, menor diluição e ainda como vantagem, uma menor distorção [3].

O presente trabalho visa avaliar o efeito dos parâmetros da polaridade negativa (tempo e intensidade) através das proporções da polaridade negativa (%EN) sobre a geometria do cordão de solda (penetração, altura e largura) e a diluição.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG POLARIDADE VARIÁVEL

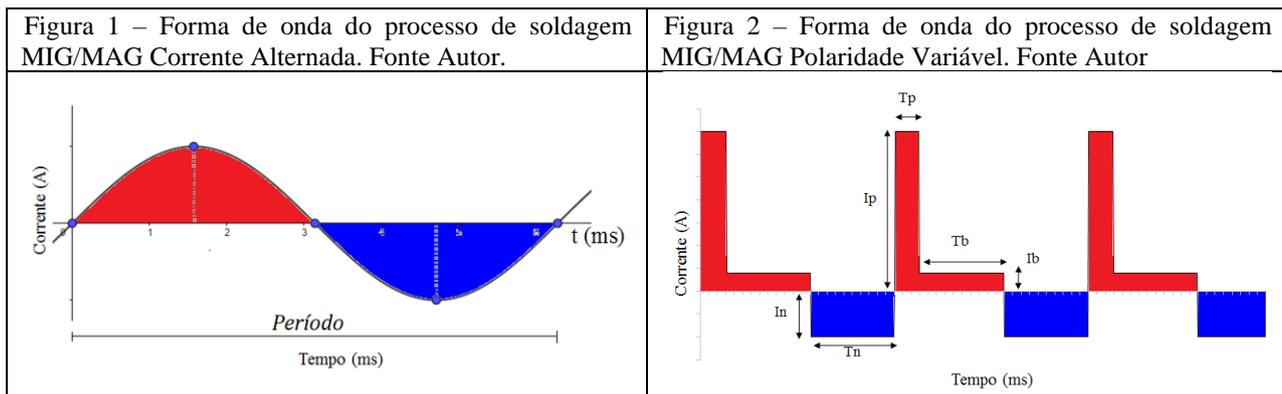
O processo MIG/MAG é um dos processos de soldagem mais utilizados atualmente para a produção de cordões de solda em grandes extensões, como no revestimento de superfícies, resistentes ao desgaste, à corrosão, ao calor, entre outros. Todavia, normalmente alguns problemas são encontrados, principalmente no revestimento realizado por soldagem, como por exemplo, elevada fusão do metal base que produz elevada diluição e distorções. O processo de soldagem MIG/MAG com a utilização de uma corrente alternada seria o ideal para resolver algumas das dificuldades listadas acima [4].

Na literatura são definidas duas nomenclaturas distintas: corrente alternada pulsada (CA) ou polaridade variável (PV). As duas formas de nomenclatura estão relacionadas com a utilização da polaridade negativa no processo de soldagem [1]. Entretanto, a corrente alternada está vinculada à forma de onda senoidal, onde a parte positiva e a parte negativa são muito próximas, de igual grandeza. Logo, a expressão polaridade variável está mais relacionada com formas de onda com variação entre as polaridades, positiva e negativa na curva de corrente de soldagem, podendo conter maior tempo e intensidade em sua parte positiva, ou do mesmo modo na negativa.

Atualmente são reconhecidas duas nomenclaturas diferentes: a forma de onda da corrente alternada (CA) pode observar-se na Figura 1 e a definição de polaridade variável (Figura 2). Ambas as nomenclaturas trazem consigo o conceito de utilizar polaridade negativa durante parte da soldagem, o que permite a soldagem de chapas finas [1].

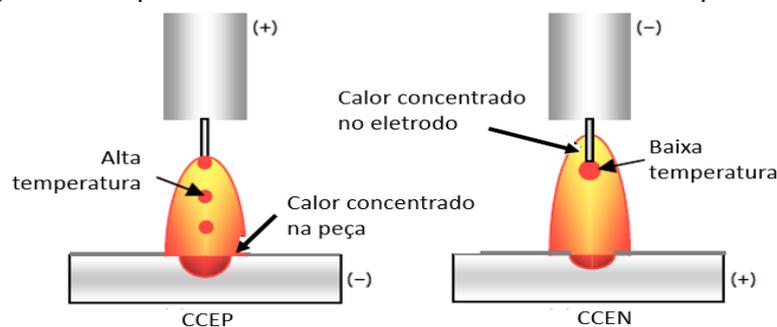
Na Figura 1 pode observar-se a forma de onda para o processo de soldagem MIG/MAG Corrente Alternada (CA) é usado para descrever uma onda senoidal. Também para descrever uma corrente que alterna entre polaridades positiva e negativa. A expressão polaridade variável está

relacionada com formas de onda com variação entre as polaridades, positiva e negativa na curva de corrente de soldagem, podendo ajustar-se o tempo e a intensidade em sua parte positiva, ou do mesmo modo na negativa. O processo de soldagem MIG/MAG Polaridade Variável (Figura 2) é usado para descrever formas de onda pulsadas (alternadas em polaridade) nas quais a razão entre as duas polaridades pode ser variada e usada como parâmetro de processo a “proporção de eletrodo negativo – %EN”.



A polaridade negativa, corrente contínua e eletrodo negativo (CCEN), altera de maneira drástica o comportamento do processo MIG/MAG, modificando a distribuição de energias entre o eletrodo e a peça. Na Figura 3, no processo polaridade positiva, corrente contínua constante e eletrodo positivo (CCEP), a maior concentração de calor acontece na peça, maior penetração, pode-se trabalhar com vários modos de transferência [5]. No entanto, em eletrodo negativo (CCEN), essa situação se inverte sendo grande parte do calor concentrado no eletrodo, e com isso ocorre aumento da taxa de fusão, aumento da tensão do arco elétrico, diminuição da temperatura na peça e redução da penetração, também afeta o modo de transferência que na maioria dos casos é globular.

Figura 3 – Comportamento do arco elétrico em CCEP e CCEN. Adaptado de [5]



A utilização corrente contínua e eletrodo negativo (CCEN) comparado com o MIG/MAG convencional apresenta menores valores de temperatura na peça [4]. Conseqüência disto, verificaram

uma redução da deformação da peça final, assim como uma menor penetração e diluição. Este benefício também foi comprovado por [6], os quais verificaram a redução na temperatura da peça soldada com o aumento da utilização do eletrodo negativo.

No processo MIG/MAG PV, é possível obter maior taxa de fusão, aliada à baixa temperatura no metal base gerando grandes instabilidades no arco elétrico e na transferência do metal desde a ponta do eletrodo à poça de fusão, na grande maioria das situações impossibilitando a utilização de CCEN no processo MIG/MAG. A instabilidade é explicada por [7] principalmente pelo modo de transferência metálica, que se limita ao modo globular para CCEN. Mas para minimizar a instabilidade do arco e assim utilizar os benefícios do eletrodo negativo, como a redução da penetração, redução da temperatura no metal base, é aplicado ao processo o eletrodo positivo, o qual traz consigo a estabilidade do arco elétrico. De acordo com [8], cada polaridade apresenta um balanço de calor, mas combinadas possibilitam controle do calor da peça e eletrodo, assim como o controle da penetração, e segundo [9], esta combinação gera baixas temperaturas aliadas a aumentos da taxa de produtividade no processo de soldagem.

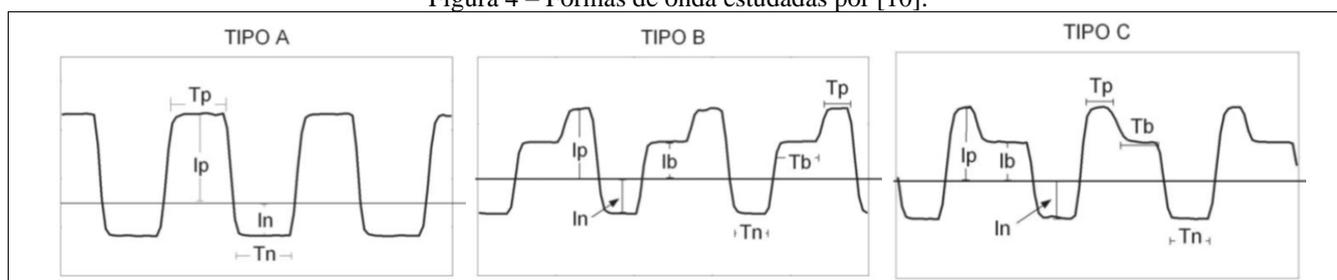
2.1.1 Formas de ondas do processo mig/mag pv

No processo de soldagem MIG/MAG Polaridade Variável a forma da onda de corrente é um tópico bastante explorado atualmente, [10] estudou três variações de forma de onda, buscando entender a relação entre a forma da curva e a geometria do cordão de solda. As ondas estudadas estão relacionadas na Figura 4.

A corrente de base é fundamental para as mudanças severas de polaridade, e evita salpicos no processo de soldagem [11].

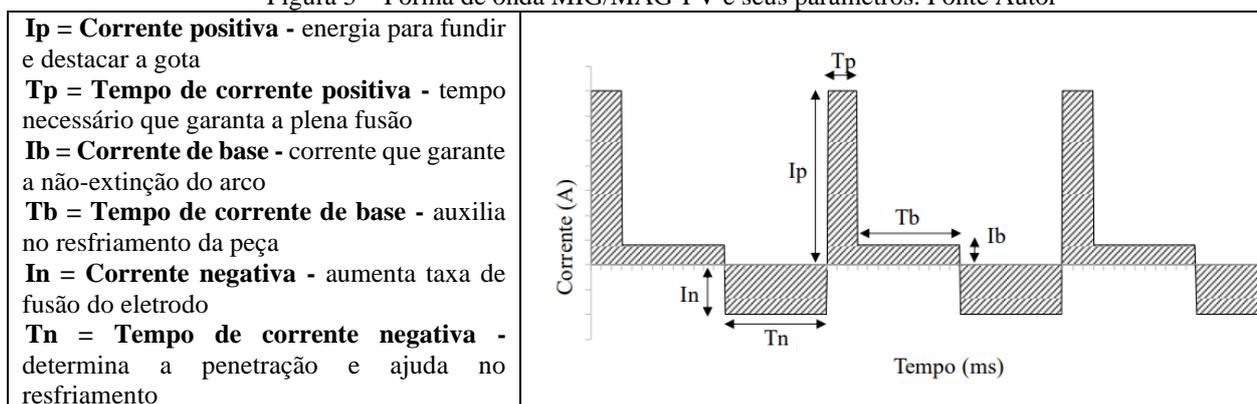
Os três tipos de ondas contemplam, a não utilização do tempo de base (tipo A), utilização do tempo de base anterior ao da corrente de pico positiva (tipo B) e a corrente de base posterior ao pico positivo (tipo C). Os resultados obtidos mostraram que a forma da onda não tem influência significativa sobre a geometria do cordão de solda, mas sim existe efeito significativo da interação da geometria do cordão de solda com os parâmetros da polaridade negativa.

Figura 4 – Formas de onda estudadas por [10].



A curva de corrente do processo de MIG/MAG Polaridade Variável apresenta três partes: pulso positivo, base positiva e pulso negativo. Conforme a Figura 5, a forma de onda do processo de soldagem MIG/MAG PV, formada pela parte positiva, o qual contém quatro parâmetros: corrente de pico (I_p), tempo de pico (T_p), corrente de base (I_b), tempo de base (T_b), e a parte negativa: corrente negativa (I_n) e tempo de corrente negativa (T_n).

Figura 5 – Forma de onda MIG/MAG-PV e seus parâmetros. Fonte Autor



Conforme [4], uma corrente de base positiva com duração aproximada de 1,5 ms antes ou após do pulso de destacamento (Corrente de pico positivo), recomendada para soldagem de alumínio, é um mecanismo que permite que a gota chegue na poça de fusão livre de forças repulsivas, dessa forma minimiza ou evita salpicos. O degrau da corrente de base, antes e/ou depois do pulso de destacamento, auxilia na amenização da rápida inversão de polaridade e na estabilização do arco elétrico [12].

2.1.2 Proporção de polaridade negativa (%en)

Junto com a utilização da equação para a proporção de polaridade negativa, os seguintes autores [4, 10, 12-14] utilizam a penetração como objeto de estudo, buscando melhorias nos processos, para assim por exemplo, aprimorar passes de raiz, fechamento de abertura entre chapas ou soldagem para revestimento, onde há necessidade de um maior controle da penetração no processo de soldagem. E o entendimento dos efeitos do eletrodo negativo através de apenas um fator (%EN), tornaria aplicável a polaridade variável em nível industrial.

A curva de corrente da Figura 5 é constituída por pulsos formado por seis diferentes parâmetros. A escolha e entendimento desses seis diferentes parâmetros tornam o processo bastante complexo a parametrização, isto é, a combinação adequada dos valores dos parâmetros para a resposta desejada. Por essa razão, muitos autores utilizam um fator que representa o percentual da polaridade negativa em relação ao total da curva de corrente, chamado de percentual de eletrodo negativo (%EN), o qual é utilizado para entender a variação da polaridade negativa em relação às variáveis do processo de

soldagem, como por exemplo a penetração, diluição, temperatura, entre outros. A proporção %EN é encontrada da literatura em duas formas diferentes de cálculo conforme as Equações (1) e (2).

A proporção calculada conforme a Equação (1), considera a composição do tempo e a intensidade da corrente negativa em relação ao total da onda de corrente no período. Em resumo, o termo %EN compara a área da curva corrente em função do tempo ($I \times T$) da corrente na parte negativa em relação ao total da área de um ciclo de pulso. Este tipo de cálculo foi utilizado por [5, 6, 10,13, 15, 16].

$$\%EN' = \frac{In \times Tn}{(In \times Tn) + (Ip \times Tp) + (Ib \times Tb)} \times 100\% \quad (1)$$

Porém, pode ser encontrada na literatura uma segunda forma de cálculo do percentual de eletrodo negativo. Esta considera apenas os tempos entre as polaridades, tendo como resposta a proporção do tempo de corrente negativa (Tn) em relação ao período total do pulso (T), sendo este a soma do tempo de corrente de base (Tb) e pico positivos (Tp) e o tempo de corrente negativa (Tn). Este método de cálculo foi utilizado por [9, 11, 12 14, 17-19].

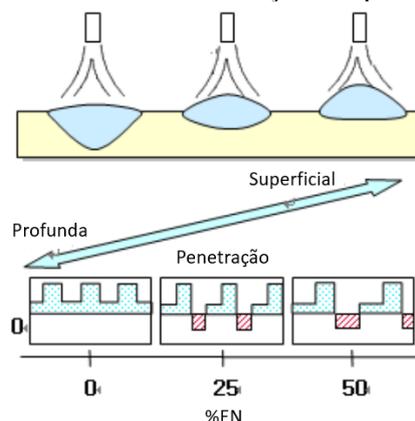
$$\%EN = \frac{Tn}{Tn + Tp + Tb} \times 100\% \quad (2)$$

Essencialmente, a diferença entre as duas formas de cálculo, mostra que na Equação (1) o %EN é calculado considerando os seis parâmetros da curva de corrente, enquanto que na Equação (2) são considerados apenas os tempos de ação de correntes e não as suas respectivas intensidades. Considerando um conjunto arbitrário de valores desses seis parâmetros, dependendo se utilizado a Equação (1) ou Equação (2), pode-se chegar a valores diferentes de %EN.

Contudo, conforme apresentado por [10,15], os quais utilizaram a Equação (1), ou como demonstrado por [12], utilizando a Equação (2), quanto maior o valor da proporção de eletrodo negativo (%EN) menores são os valores obtidos de penetração.

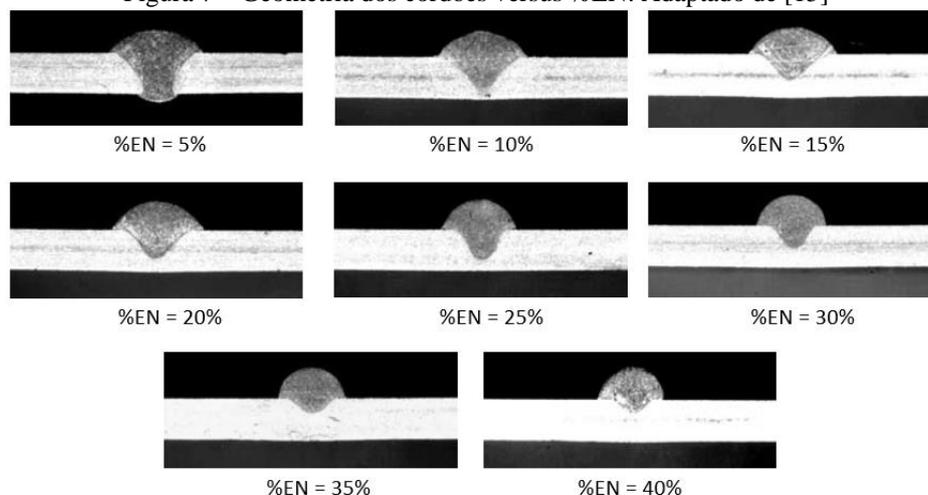
Em geral, o aumento na percentagem da polaridade negativa na curva de corrente gera uma redução da penetração na geometria do cordão de solda. Esta condição é representada por [15] na Figura 6, onde é ilustrado o aumento da percentagem da polaridade negativa, considerado pelo valor de %EN entre zero e 50%, e por sua vez os efeitos na penetração e característica do cordão de solda.

Figura 6 – %EN versus Penetração. Adaptado de [15]



Experimentos foram realizados por [15] com arames de alumínio e gás de proteção argônio puro, chapas de alumínio finas de 1 a 2 mm de espessura, variando o %EN entre 5% até 40%, com objetivo de controlar a penetração no processo de soldagem. Na Figura 7 estão ilustrados os resultados encontrados das seções transversais do cordão de solda, os quais mostram claramente uma redução da penetração e largura com o aumento do %EN, assim como o aumento da altura do cordão de solda.

Figura 7 – Geometria dos cordões versus %EN. Adaptado de [15]



3 MATERIAIS E MÉTODOS

A parte experimental foi desenvolvida no Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas do Centro de Tecnologia da UFRGS. A fonte de soldagem utilizada foi a DIGIPlus A7 450. Para a condução da tocha foi usado um robô CNC de soldagem orbital, Tartilope V4 para que garantir o avanço e controle de velocidade, assim como a manutenção da distância bico de contato-peça (DBCP), tudo foi devidamente alinhado com auxílio de um nível para que o sistema ficasse horizontal.

A aquisição de dados ficou por conta do equipamento da IMC Soldagem, o SAP4.01 que coletou os valores de corrente e tensão numa taxa de 5000 amostras por segundo. Os valores de corrente

e tensão foram adquiridos pelo SAP 4.01, equipamento da IMC Soldagem (mesmo fabricante da fonte), que coletou e armazenou os dados, além de mostrar gráficos instantâneos durante a execução do cordão de solda. A Figura 8 mostra os equipamentos utilizados no experimento.

Os cordões foram depositados sobre chapas de alumínio AA5052-F de dimensões 150x100x7,9 mm, o metal de adição utilizado foi o ER5356 de 1,2 mm de diâmetro. Os cordões de solda foram depositados sobre a superfície livre (*bead-on-plate*) na posição plana (1G). A composição química do metal base e a do metal de adição estão descritos nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Figura 8 – Equipamentos de soldagem à esquerda, Tartilope ao fundo e equipamentos de aquisição sobre a mesa branca à direita.



Tabela 1 – Composição química do metal base (%).

Liga	Zn	Mg	Cu	Al
Al5052-F	-	2,5	-	Resto

Tabela 2 – Composição química do metal de adição (%).

Material	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
ER5356	0,25	0,4	0,1	0,2	5,0	0,2	0,1	0,2	Rest.

Alguns parâmetros foram definidos previamente e mantidos constantes durante o experimento, como o ângulo de deslocamento da tocha de -5° (empurrando, a poça de fusão na frente), velocidade de avanço de 4 mm/s, velocidade de alimentação do arame de 6,0 m/min, gás de proteção argônio comercialmente puro, vazão do gás de proteção de 15 l/min e DBCP de 18 mm.

Na Tabela 3 estão listados os parâmetros usados para as três condições de proporções de eletrodo negativo (% EN), obtido a partir da equação (2), que considera os tempos de atuação de cada polaridade, usadas durante as deposições.

Tabela 3 – Parâmetros de corrente e tempos da forma de onda da Figura 5, Percentagem de Eletrodo Negativo determinado com a Eq. (2).

Parâmetro	Percentagem de Eletrodo Negativo		
	0% EN	30% EN	50% EN
I_p (A)	300	300	300
T_p (ms)	1,5	1,5	1,5
I_b (A)	60	60	25
T_b (ms)	7,3	4,6	2,9
I_n (A)	0	47	47
T_n (ms)	0	2,6	4,4

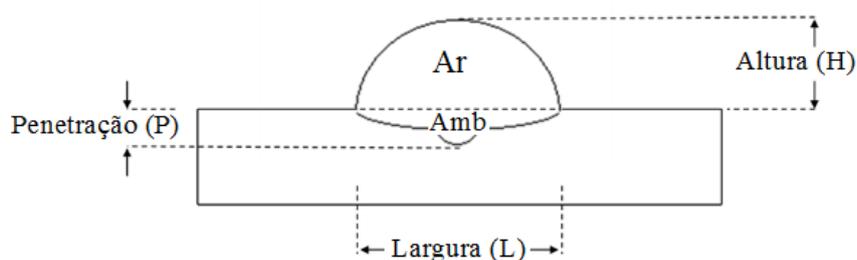
3.1 MATERIAIS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA

De cada uma das três chapas utilizadas foram retiradas quatro amostras da seção transversal, uma para cada incremento de passe, com o uso da máquina de corte *Cut-off*. Essas amostras foram embutidas com acrílico auto polimerizante, para evitar problemas durante o lixamento e para aumentar a eficiência da etapa. Na sequência do preparo das amostras elas foram lixadas nas granulometrias 120, 220, 320, 400, 500, 600 e 1000, certificando-se de começar todas as amostras no mesmo sentido e de girar a amostra 90° a cada mudança de granulometria de lixa.

As seções transversais para as macrografias foram atacadas com o Reativo Keller que, conforme a norma ASTM E340, é uma mistura de ácido fluorídrico, ácido clorídrico concentrado, ácido nítrico concentrado e água destilada. Todos os ataques foram feitos em uma capela e com equipamentos de segurança apropriados. As macrografias foram obtidas mediante o uso de um microscópio com lente de aumento 8x e analisadas usando o software livre ImageJ, com o qual foram medidas as variáveis de respostas: área do metal de adição (A_r), área fundida do metal base (A_{mb}), penetração (P), largura do cordão de solda (L) e altura do reforço (H), conforme a Figura 9.

Além das características geométricas citadas acima, os cordões também foram avaliados qualitativamente outros aspectos, como nível de salpicos, poros visíveis na seção transversal ao cordão de solda, defeitos de sobreposição.

Figura 9 – Esquema do cordão de solda livre sobre a chapa (*bead-on-plate*) e as variáveis de resposta.



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados do trabalho, obtidos através das análises realizadas sobre a geometria e outros aspectos pertinentes dos cordões em relação à percentagem da polaridade negativa (% EN).

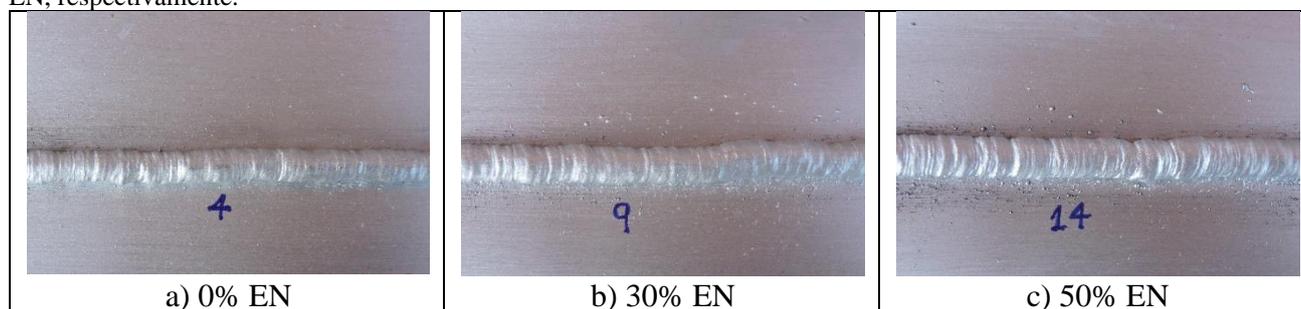
4.1 ASPECTO VISUAL DO CORDÃO DE SOLDA

O nível de salpicos foi avaliado visualmente através das imagens (fotos) tiradas após realização do cordão de solda. Salpicos representam menos material sendo depositado nos cordões de solda, também afeta a qualidade visual, e caso seja necessário limpar agrega custo ao processo de soldagem.

Maiores gastos no processo uma vez que menos material é depositado no cordão de solda e mais tempo é requerido na fabricação. Foi facilmente notado um aumento significativo na quantidade de salpicos com o aumento do %EN, conforme pode ser visto na Figura 10.

Diversos autores afirmaram e comprovaram que o eletrodo negativo gera instabilidade no arco. Isso geralmente acontece devido à suspensão da gota formada na ponta do eletrodo, criando um campo magnético assimétrico que atua sobre a gota de forma imprevisível [20].

Figura 10 – Aspecto visual do nível de salpicos para o processo MIG-Polaridade Variável com 0% EN, 30% EN e 50% EN, respectivamente.



4.2 GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA

Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros geométricos obtidos após a análise das amostras (seção transversal do cordão de solda), sendo eles respectivamente a área fundida do metal base, área do reforço, diluição, penetração, largura e altura do cordão de solda. Os cordões de solda foram feitos com os materiais e parâmetros do processo MIG PV das Tabelas 1, 2 e 3. Os resultados da Tabela 4 foram obtidos através de medições das amostras mediante o software ImageJ.

O valor de %EN' calculado com a Equação (1) considera os seis parâmetros da curva de corrente, enquanto que na Equação (2) são considerados apenas os tempos de ação de correntes e sem as suas respectivas intensidades de corrente. Na Tabela 5 apresenta-se a relação das proporções negativa calculadas pelas Equação (1) e Equação (2).

Tabela 4 – Parâmetros geométricos obtidos para os valores da porcentagem de eletrodo negativo (%EN).

Parâmetros	Símbolo	0% EN	30% EN	50% EN
		Penetração	P (mm)	0,92
Altura do Reforço	H (mm)	3,96	4,04	3,98
Largura	L (mm)	7,32	7,79	7,39
Diluição	D (%)	7,66	4,12	4,05
Área Fundida do Reforço	Ar (mm ²)	26,72	28,40	24,97
Área do Metal Base	Amb (mm ²)	2,05	1,17	1,01

Tabela 5 – Valores de porcentagem de eletrodo negativo obtido a partir das equações (1) e (2).

Equação (2)	Equação (1)
%EN	%EN'
0% EN	0% EN'
30% EN	14,4% EN'
50% EN	28,4% EN'

Nas Figuras 11A, 12A e 13A podem observar-se as macrografias dos cordões de solda obtidos para 0% EN, 30% EN e 50% EN, respectivamente. Entretanto, as Figuras 11B, 12B e 13B mostram os oscilogramas da corrente de soldagem em função do tempo obtidos para as porcentagens de eletrodo negativo 0% EN, 30% EN e 50% EN, respectivamente.

Nas três macrografias mostram a presença de sobreposição, isto é, não há fusão do metal base, também há alguns poros (não quantificado) no cordão de solda. O argônio como gás de proteção é um gás com baixa condutividade térmica, o que propicia a maior energia na região central do cordão de solda e menor energia conforme aumenta a distância no sentido radial do arco elétrico.

Figura 11A – Macrografia da seção transversal do cordão de solda obtido com MIG PV 0% EN.

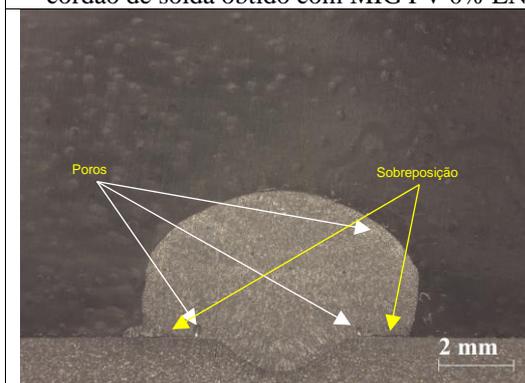


Figura 11B – Formato de onda de corrente de soldagem em função do tempo, MIG PV 0% EN.

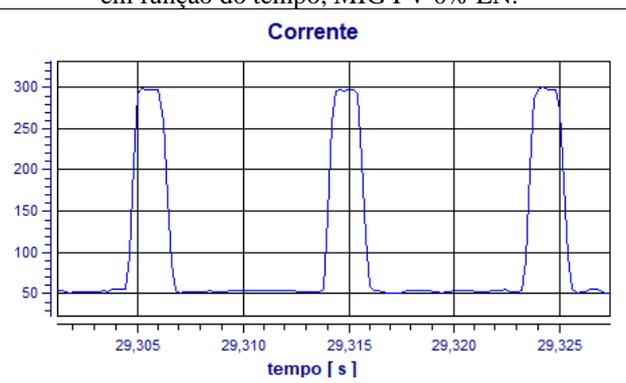


Figura 12A – Macrografia da seção transversal do cordão de solda obtido com MIG PV 30% EN.

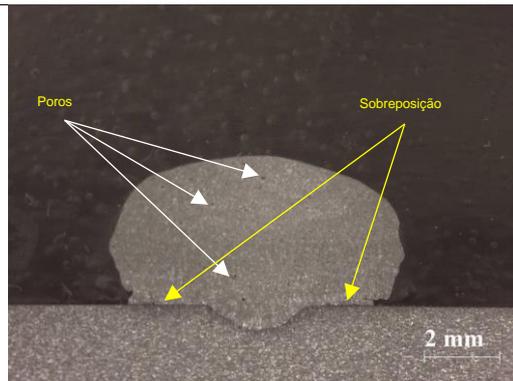


Figura 12B – Formato de onda de corrente de soldagem em função do tempo, MIG PV 30% EN.

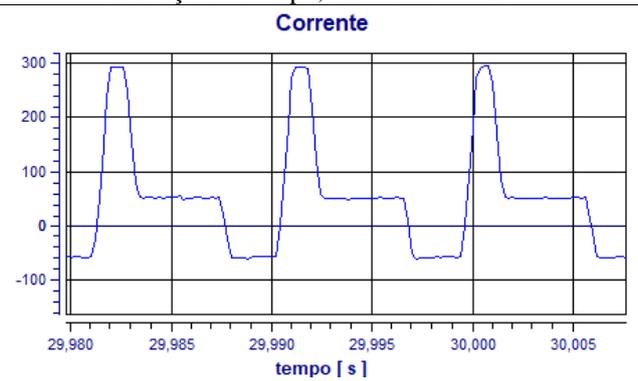


Figura 13A – Macrografia da seção transversal do cordão de solda obtido com MIG PV 50% EN.

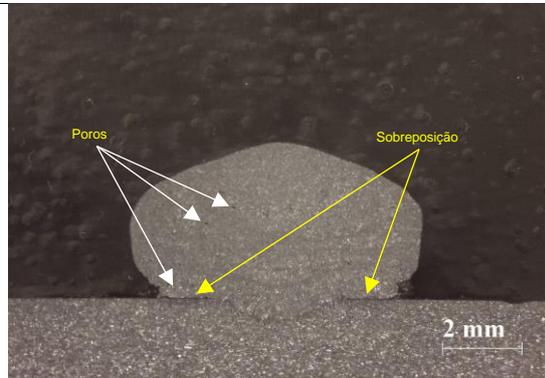
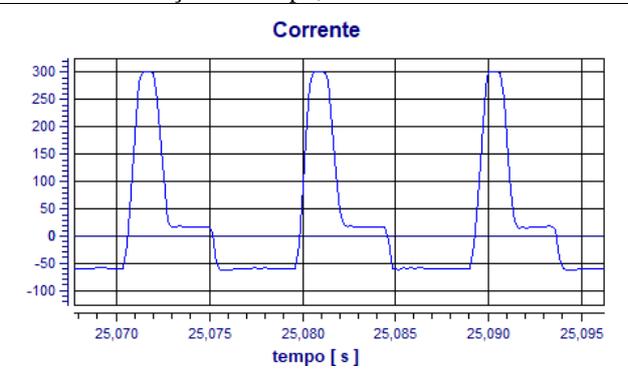


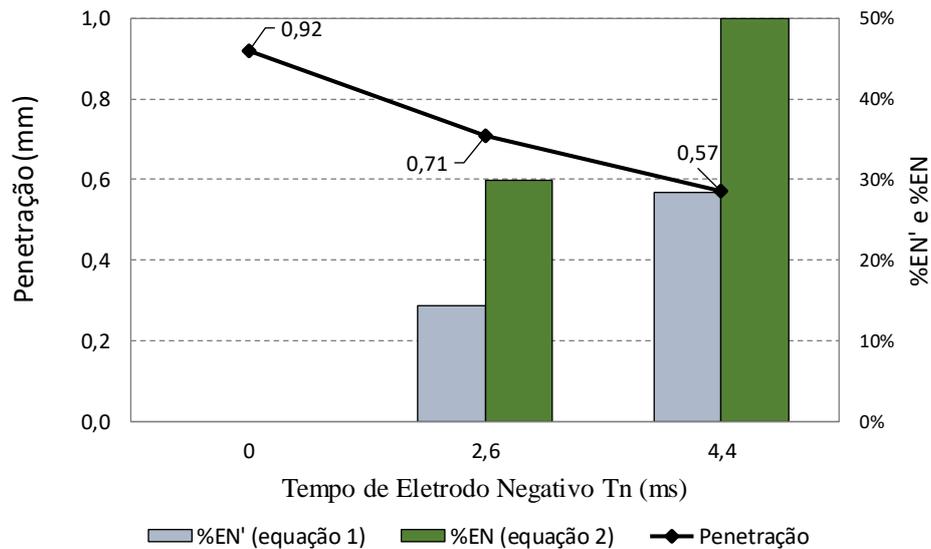
Figura 13B – Formato de onda de corrente de soldagem em função do tempo, MIG PV 50% EN.



A penetração (P – mm) foi medida considerando a distância máxima para a linha central do metal base. Foi adicionado ao gráfico as proporções de polaridade negativas, %EN, considerando as duas formas de cálculo [Equação (1) e Equação (2)], onde pode-se verificar a relação apresentada na literatura, independente da equação utilizada, ocorre uma redução da penetração com o aumento do %EN.

A Figura 14 mostra a relação entre a percentagem de eletrodo negativo (%EN) e a penetração do cordão de solda. A análise dessa variável de resposta é de suma importância para o processo MIG PV, porque segundo a literatura a maior presença da polaridade negativa no processo resulta em uma menor penetração no cordão de solda, conforme apresentado por [15], ou seja, a polaridade negativa pode ser utilizada para o controle da penetração e da taxa de fusão do processo de soldagem.

Figura 14 – Penetração em relação ao acréscimo de tempo de eletrodo negativo (T_n) e a percentagem do eletrodo negativo ($\%EN'$ e $\%EN$) calculados pelas duas equações (1) e (2) propostas na literatura.



A altura do reforço (H – mm) foi medida considerando a distância máxima para a linha central do metal base. A variação da percentagem de eletrodo negativo ($\%EN$) não apresenta efeito significativo sobre a altura. Ao manter constante a velocidade de alimentação do arame em 6,0 m/min e a velocidade de soldagem constante em 4,0 mm/s, isso significa que a quantidade de metal de adição depositado por unidade de comprimento deve ser constante. A Figura 15 mostra que a altura dos cordões de solda não apresenta diferenças significativas, dentre os valores de $\%EN$ usados na soldagem, menos de 2%.

Na Figura 16 pode observar-se que a largura dos cordões de solda não apresenta diferenças significativas, dentre os valores de $\%EN$ usados na soldagem, aproximadamente 6,0 %.

Figura 15 – Altura em relação ao acréscimo de tempo de eletrodo negativo e $\%EN$.

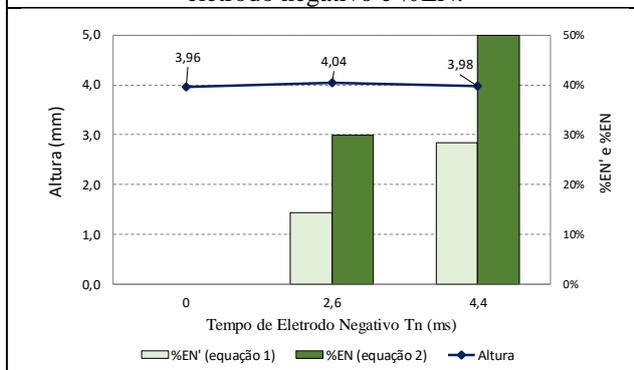
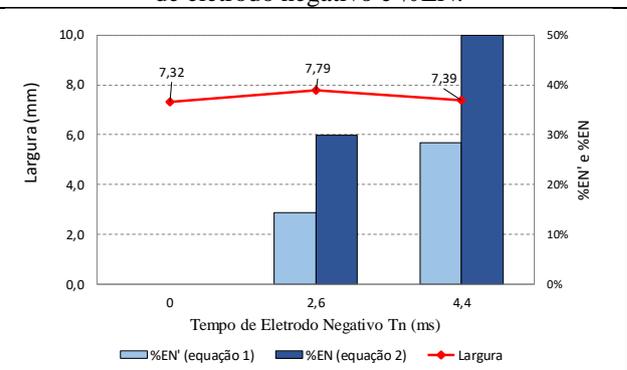


Figura 16 – Largura em relação ao acréscimo de tempo de eletrodo negativo e $\%EN$.

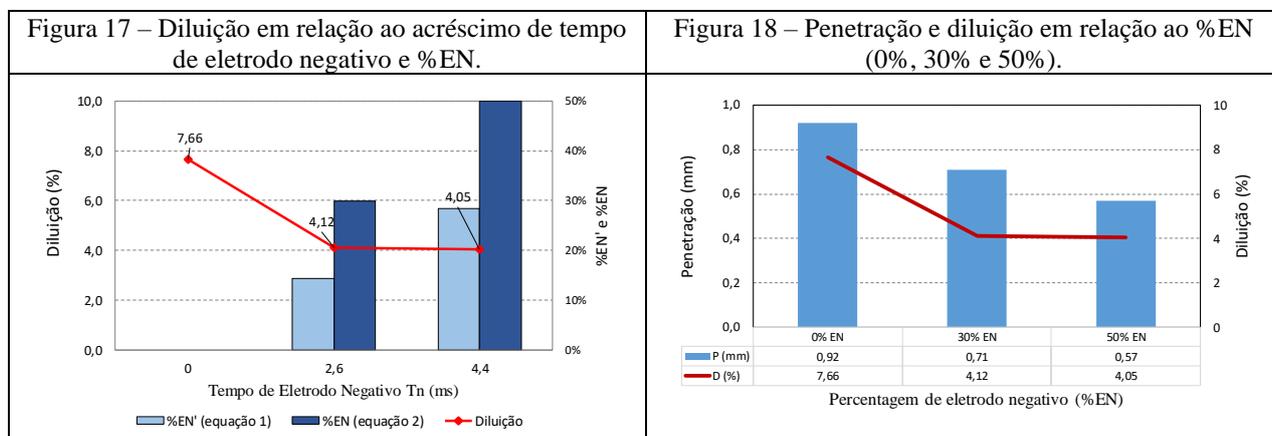


Os baixos valores de diluição (D – %), assim como a sobreposição observada no cordão de solda, podem estar relacionados com valores baixos de energia de soldagem e elevada condutividade

térmica do metal base. Pelas características do processo MIG PV (vide Tabela 4 e Figura 17) os valores de diluição dos cordões de solda encontrados foram muito baixos, inferior a 10%, para 0% EN apresentou os maiores valores, cerca de 185% em relação a segunda maior diluição, 30% EN. Segundo [21], para revestimento de superfícies obtidos pelo processo de soldagem ao arco, muito similar à soldagem *bead-on-plate* aqui empregada, valores próximos de diluição entre 10 e 15% são ideais.

Isto pode ser explicado pelo efeito da corrente negativa no processo, devido a sua maior taxa de fusão e seu menor aporte térmico, conforme apresentado por [14], gera maior área de metal de adição.

Na Figura 18 pode observar-se que a penetração e a diluição variam inversamente à percentagem de eletrodo negativo, isto é, ao aumentar %EN há diminuição da penetração e da diluição.



5 CONCLUSÃO

- Realizada a análise dos dados obtidos durante as deposições com diferentes proporções de eletrodo negativo, independente do cálculo de %EN empregado, um aumento no %EN causa diminuição na penetração e diluição.

- O número de defeitos encontrados foi grande, as porosidades precisam ser investigadas, bem como a sobreposição do metal de adição sobre o metal base. Os cordões de solda depositados apresentaram salpicos e qualitativamente houve um aumento do salpico com o aumento do %EN.

- Os resultados obtidos foram satisfatórios, mostrando potencial para que novas pesquisas sejam feitas sobre o assunto, o qual é vasto e com muitas perguntas ainda por serem respondidas.

REFERÊNCIAS

- [1] Nascimento, A. S.; Vilarinho, L. O. Uma contribuição ao estudo da soldagem MIG-CA, 16º Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2006.
- [2] Miranda, H. C.; Ferraresi, V. A. Identificação da transferência metálica na soldagem MIG/MAG pulsada de aço inoxidável a partir de um sensor óptico, 2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Uberlândia, Mai/2003.
- [3] Baumgaertner, A. J. Análise dos Parâmetros da Polaridade Negativa na Curva de Corrente de Soldagem MIG/MAG Polaridade Variável Aplicados à Soldagem para Revestimento, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 75 p, 2017.
- [4] Tong, H.; Ueyama, T.; Harada, S.; Ushio, M. Quality and productivity improvement in aluminium alloy thin sheet welding using alternating current pulsed metal inert gas welding system, Science and Technology of Welding and Joining, v. 6 (4), p.203-208, 2001.
- [5] Kim, T. J.; Lee, J. P.; Min, B. D.; Yoo, D. W.; Kim, C. U. Characteristics of Pulse MIG Arc Welding with a Wire Melting Rate Change by Current Polarity Effect, Journal of Electrical Engineering and Technology, v. 2 (3), p. 366-372, 2007.
- [6] Park, H. J.; Rhee, S.; Kang, M. J.; Kim, D. C. Joining of Steel to Aluminum Alloy by AC Pulse MIG Welding, Materials Transactions, v. 50 (9), p. 2314-2317, 2009.
- [7] TALKINGTON, J. Variable Polarity Gas Metal Arc Welding, MSc Dissertation, The Ohio State University, 1998.
- [8] Joseph, A.; Webb, C.; Haramia, M.; Yapp, D. Variable Polarity (AC) Arc Weld Brazing of Galvanized Sheet, 56th IIW International Conference, Bucharest, July/2003.
- [9] Dutra, J. C.; Gonçalves e Silva, R. H.; Savi, B. M.; Marques, C.; Alarcon, O. E. New methodology for AC-pulsed GMAW parametrization applied to aluminum shipbuilding, The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2015.
- [10] Farias, J. P., Efeito da Soldagem MIG/MAG em Corrente Alternada sobre a Geometria da Solda, Soldagem Inspeção, v.10, n.4, p.173-181, 2005.
- [11] Nascimento, A. S.; Fernandes, D. B.; Mota, C. A. M.; Vilarinho, L. O. Metodologia para Determinação de Parâmetros para Soldagem MIG com Polaridade Variável, Soldagem e Inspeção, v. 13, n. 2, p. 97-104, São Paulo, Abr/Jun 2008.
- [12] Nascimento, A. S., Fenomenologia da soldagem MIG/MAG-PV e sua aplicabilidade para juntas sobreposta e em V (Passe de raiz). Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia; [tese] 2011.
- [13] So, W. J.; Kang, M. J.; Kim, D. C. Weldability of pulse GMAW joints of 780 MPa dual-phase steel, International Scientific Journal, v. 41 (1), p. 53-60, 2010.
- [14] Monteiro, L. S.; Scotti, A. A methodology for parametrization of the MIG/MAG CA and its application in service repair of pipelines of oil and gas, 22nd International Congress of Mechanical Engineering, Ribeirão Preto, Nov/2013.

- [15] Kim, T. J.; Joe, G. J.; Kong, H. S.; Cho, S. M.; Kim, C. U. The study of variable polarity AC pulse GMA welding system, International Conference on Electrical Engineering, p. 688-691, 2002.
- [16] Kah, P.; Suoranta, R.; Martikainen, J. Advanced gas metal arc welding process, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.67, p.655-674, Jul/2013.
- [17] Vilarinho, L. O.; Nascimento, A. S.; Fernandes, D. B.; Mota, C. A. M. Methodology for Parameter Calculation of VP-GMAW, Welding Journal, v. 88, p.92-98, 2009.
- [18] Cirino, L. M., Estudo dos efeitos da polaridade na soldagem com corrente contínua e alternada pelos processos TIG e MIG/MAG [dissertação] Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina; 2009.
- [19] Santos, T. F., Soldagem MIG com corrente alternada MIG CA [tese]. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina; 2008.
- [20] Norrish, J. Advanced Welding Process, Cranfield Institute of Technology, 1992, p.147.
- [21] Murugan, N.; Parmar, R. S. Stainless Steel Cladding Deposited by Automatic Gas Metal Arc Welding, Welding Research Supplement, p. 391-400, 1997.