

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS FORMATOS DE ONDA DO PROCESSO MIG/MAG
SOBRE A GEOMETRIA DE CÔRDÕES DE ALUMÍNIO EMPILHADOS PARA
MANUFATURA ADITIVA

por

Guilherme Pacheco Nidballa

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2019

Guilherme Pacheco Nidballa

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS FORMATOS DE ONDA DO PROCESSO MIG/MAG
SOBRE A GEOMETRIA DE CÔRDÕES DE ALUMÍNIO EMPILHADOS PARA
MANUFATURA ADITIVA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mario Roland Sobczyk Sobrinho

Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Processos de Fabricação**

Orientador: Prof. José Antônio E. Mazzaferro

Coorientador: Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez

Comissão de Avaliação:

Prof./Prof^a. José Antônio E. Mazzaferro

Prof./Prof^a. Arnaldo Ruben Gonzalez

Prof./Prof^a. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, Dezembro de 2019

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Marcos e Renata pelos sacrifícios feitos para que eu e minha irmã tivéssemos condições de ter uma boa educação, pelo suporte, pelo amor incondicional e especialmente por serem exemplos de integridade ao qual me espelho.

À minha irmã, por sempre estar ao meu lado, seja para dar conselhos, risadas ou simplesmente aproveitar as pequenas coisas da vida.

Aos amigos que fiz durante o colégio, que continuam sendo leais e verdadeiros durante todos esses anos.

Aos amigos que fiz durante a graduação, impossível imaginar a jornada do vestibular à formatura sem vocês.

À Equipe Tchê por ter feito parte da minha trajetória na UFRGS, me proporcionado experiências valiosas e abrindo diversas portas.

Ao LS&TC pela infraestrutura que permitiu a realização desse trabalho e a todos que lá ajudaram de alguma forma.

NIDBALLA, G. P., **Estudo da influência dos formatos de onda do processo MIG/MAG sobre a geometria de cordões de alumínio empilhados para manufatura aditiva**. 2019. 27f. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho exploratório é analisar os processos de soldagem MIG/MAG, em especial na relação entre onda pulsada e polaridade variável sobre a geometria de cordões de solda para manufatura aditiva. Três níveis de polaridade negativa (EN %) foram avaliados: 0% de eletrodo negativo, 30% de eletrodo negativo e 50% de eletrodo negativo. Empilhamentos de até quatro cordões são analisados quanto à sua geometria e defeitos. Os principais critérios geométricos avaliados são diluição, penetração, ângulo de molhabilidade e razão de largura. É constatado que as diferenças observadas não são expressivas, dificultando, mas não impossibilitando a conclusão de que, apesar dos defeitos presentes, o formato de onda pulsado apresenta as melhores características geométricas dentre as amostras.

PALAVRAS-CHAVE: MIG/MAG-Pulsado; MIG/MAG-PV; formatos de onda; parâmetros; geometria.

NIDBALLA, G. P. **Study of the influence of waveforms from MIG/MAG process on the geometry of aluminum beads stacked for additive manufacturing.** 2019. 27p. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ABSTRACT

The principal objective of this exploratory study is to analyse the MIG/MAG welding processes, in particular the relation between pulsed wave and variable polarity in the geometry of additive manufacturing weld beads. Three levels of negative polarity (EN %) were evaluated: 0% of negative electrode, 30% of negative electrode and 50% of negative electrode. Stacks of up to four beads were analysed for its geometry and defects. The principal geometrical criteria evaluated were dilution, penetration, toe blend angle and width ratio. It's verified that the observed differences are not expressive, making it difficult, but not impossible to conclude that, despite the present defects, the pulsed waveform presents the best geometric characteristics among the other samples.

KEYWORDS: MIG/MAG-Pulsed; MIG/MAG-PV; waveform; parameters; geometry.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEORICA	2
2.1 Processo de Soldagem MIG/MAG	2
2.2 Defeitos de Soldagem.....	3
2.2.1 Porosidade	3
2.2.2 Falta de Fusão.....	3
2.3 Energia de Soldagem	4
2.4 Diluição	4
2.5 Ângulo de Molhamento	4
2.6 Processo de Soldagem MIG/MAG Pulsado	5
2.7 Processo de Soldagem MIG/MAG Polaridade Variável	6
2.8 Formas de Onda para Processo de Soldagem MIG/MAG-PV	7
3. METODOLOGIA	8
3.1 Materiais e Métodos para Soldagem	8
3.2 Materiais para Caracterização das Soldas	10
4. RESULTADOS	11
4.1 Defeitos dos Cordões.....	11
4.2 Geometria dos Cordões	13
5. CONCLUSÃO	15
6. SUGESTÃO PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
APENDICE A	18
APENDICE B	20

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da indústria, também avançou a tecnologia dos processos de produção, dentre eles a soldagem. O processo de soldagem MIG/MAG é amplamente utilizado na indústria, no Brasil e no mundo, pela simplicidade de operação e alta taxa de produtividade, o que é um atrativo muito grande quando se pensa em produção em grande escala. Existem muitas variantes do processo MIG/MAG, algumas mudam o formato de onda empregado para pulsado ou polaridade variável.

Esses avanços chegaram em um ponto onde algumas áreas da engenharia não conseguem acompanhar as demais. Isso pode ser visto quando é feita a simulação em algum software de elementos finitos para otimização de um componente complexo de alguma estrutura maior, como aviões ou até mesmo veículos aeroespaciais, por exemplo, e o componente otimizado pela simulação não pode ser fabricado por ter uma geometria inviável para qualquer processo de fabricação existente.

Em paralelo, na década de 1980 iniciou-se o desenvolvimento do processo de manufatura aditiva, até o ponto em que nos dias de hoje é considerado como um processo industrial viável. Começaram, então, as pesquisas para desenvolver um método para unir os processos de manufatura aditiva e soldagem, a fim de resolver o problema da fabricação de peças complexas, processo hoje conhecido por manufatura aditiva com alimentação por arame, ou WAAM do inglês (*Wire and Arc Additive Manufacturing*), que se trata do empilhamento de cordões de solda a fim de obter-se uma peça o mais próxima da geometria final possível.

Segundo Geng et al. (2016) WAAM é uma tecnologia nova e promissora, mas que ainda precisa de muitos estudos experimentais para o melhor entendimento de suas características geométricas, microestrutura e propriedades mecânicas. Nesse mesmo estudo foram avaliados os menores ângulos e raios de curvatura para uma determinada largura de cordão, também se chegou à conclusão de que as deposições apresentam características isotrópicas quando sofrem carregamentos paralelos aos cordões e anisotrópicas quando perpendiculares.

Em estudo feito por Alba (2012) a fim de analisar a influência da velocidade de soldagem na geometria dos cordões de solda feitos pelo processo MIG/MAG robotizado, se chegou à conclusão de que, apesar de não terem sido empilhadas, as deposições são afetadas drasticamente pela velocidade de soldagem, seja na área de reforço ou na penetração, e que a velocidade de soldagem elevada traz economia no custo do processo, pelo reduzido tempo em que o arco permanece aberto. Esses baixos valores de área de reforço e penetração também podem ser relacionados com a baixa energia de soldagem.

De acordo com Baumgaertner (2017) em um estudo sobre o efeito dos parâmetros da polaridade negativa para o processo MIG/MAG-PV na diluição, penetração, altura e largura dos cordões de solda, constatou-se que: a corrente de base no processo com polaridade variável é indispensável para estabilização do arco, os melhores resultados foram obtidos para um tempo de corrente negativa de 15 ms e corrente negativa de -150 A, mas mais importante do que isso, as formas de curva de corrente não aparentam ter influência sobre a penetração do cordão de solda.

O objetivo deste trabalho exploratório é analisar a influência de três diferentes formatos de onda sobre a geometria de empilhamentos de até quatro cordões de solda e seus defeitos para manufatura aditiva de alumínio, as seguintes formas de onda foram analisadas: 0% de eletrodo negativo, polaridade variável com 30% de eletrodo negativo e polaridade variável

com 50% de eletrodo negativo. Também é esperado encontrar um formato de onda com resultados promissores, para que futuras pesquisas possam partir de dados confiáveis.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Processo de Soldagem MIG/MAG

Os processos conhecidos como MIG (*metal inert gas*) e MAG (*metal active gas*) ou GMAW (*gas metal arc welding*) são processos que se baseiam em uma fonte de calor gerada pelo arco elétrico formado entre a extremidade nua de um eletrodo consumível, continuamente alimentado, e o metal base. Como o eletrodo não apresenta revestimento, a proteção da região da solda é feita por gases expelidos pela tocha. Esses gases impedem que o ar atmosférico interaja com a poça de fusão, o que traria uma série de defeitos à junta soldada, além de auxiliar na estabilização do arco elétrico (SCOTTI, PONOMAREV, 2008; WAINER et al. 2015).

De acordo com Machado (1996) o conceito da soldagem ao arco elétrico com eletrodo nu consumível já era conhecido antes de 1926, ano em que um artigo foi publicado sobre o assunto em um periódico da AWS (*American Welding Society*), mas só se desenvolveu quando foram utilizados gases de proteção, a partir de 1948.

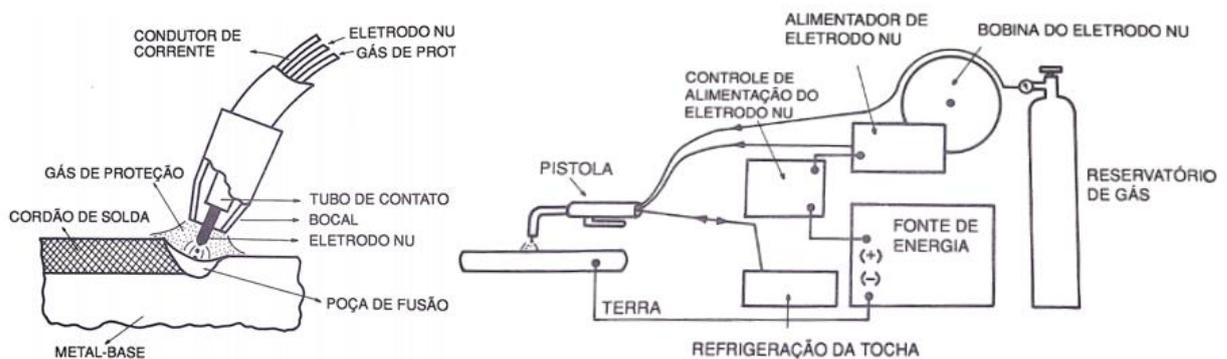
Os nomes MIG/MAG são siglas oriundas do inglês, como mostrado acima, sendo que o que difere um processo do outro é o tipo de gás utilizado. No processo MIG utilizam-se gases que não reagem quimicamente com os metais sob o arco, são chamados de inertes, sendo Ar e He os mais utilizados (SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

Já no processo MAG são utilizados gases ativos, como CO_2 ou O_2 , os quais puros, misturados entre si ou em misturas com gases inertes permitem a soldagem de metais ferrosos, devido ao seu caráter oxidante. A razão das misturas dos gases é de grande importância, pois influenciam diretamente nas características físicas e geométricas das deposições, além de impactar na ocorrência de defeitos (MACHADO, 1996).

Segundo Scotti e Ponomarev (2008) a soldagem a arco elétrico com proteção por gás e eletrodo consumível, pode ser feita de forma semiautomática ou automática, quando a tocha é manuseada por um robô.

A Figura 1 ilustra o processo de soldagem MIG/MAG convencional e o equipamento utilizado.

Figura 1 – Processo de soldagem MIG/MAG e esquema dos equipamentos utilizados, respectivamente (Adaptado de WAINER et al., 2015).



As principais vantagens do processo de soldagem MIG/MAG são a alta produtividade, devido ao alto ciclo de trabalho oriundo da alimentação contínua, a possibilidade de soldar em todas as posições, pela portabilidade e baixo peso da tocha, boa visibilidade devido à pouca produção de fumos quando comparado com processos que usam escória (e.g. eletrodo revestido) (SCOTTI, PONOMAREV, 2008; WAINER et al. 2015).

De acordo com Wainer et al. (2015) o processo MIG/MAG também apresenta diversas desvantagens, sendo elas a maior ocorrência de trincas devido à alta taxa de resfriamento, a necessidade de gás de proteção, a alta emissão de calor e radiação UV, a maior complexidade no manuseio do equipamento e a dificuldade de acesso em certos locais devido ao bocal da tocha.

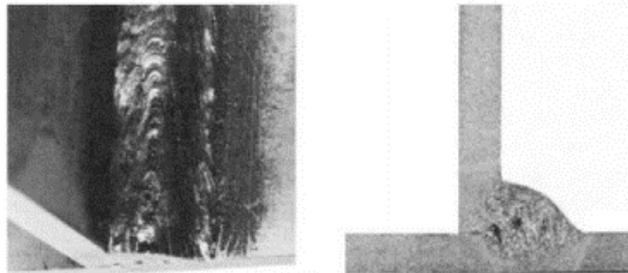
2.2 Defeitos de Soldagem

Dentre os mais diversos defeitos conhecidos e estudados na área da soldagem, apenas dois serão mencionados aqui, por questões a serem discutidas nas próximas sessões deste trabalho.

2.2.1 Porosidade

Defeito por porosidade é observado quando diversos poros de tamanhos aleatórios podem ser encontrados, seja na superfície ou na área interna do cordão de solda, sua distribuição também tende a ser randômica. Segundo ESAB (2004) os poros geralmente são causados pela interação do metal fundido com sujeira, sendo ela proveniente do ar atmosférico, da liga do eletrodo ou pela oxidação no metal base. A Figura 2 exemplifica um defeito de porosidade em juntas soldadas.

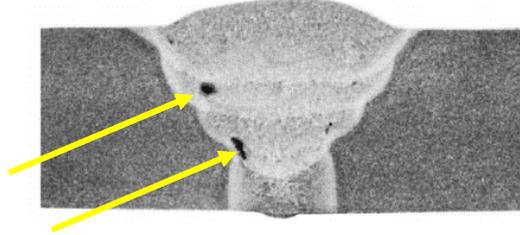
Figura 2 – Defeito de porosidade (Adaptado de ESAB, 2004)



2.2.2 Falta de Fusão

Ocorre quando não há fusão entre o metal de adição e o metal base, geralmente em pequenas seções da junta soldada. Pode ser causado pela soldagem sobre o óxido de alumínio, que é insolúvel em alumínio e apresenta ponto de fusão muito alto, por uma técnica de soldagem ruim ou por uma velocidade de soldagem muito baixa (ESAB, 2004). Na Figura 3 é ilustrado um defeito de falta de fusão.

Figura 3 – Os pontos escuros na esquerda do passe são um exemplo de falta de fusão (ESAB, 2004)



2.3 Energia de Soldagem

Uma vez que a intensidade da fonte de calor de soldagem é de difícil medição, avalia-se um parâmetro diferente, chamado de aporte térmico ou energia de soldagem (E), resultante da energia introduzida no metal base pelo comprimento do cordão depositado (MODENESI et al., 2006). A Equação 1 ilustra como é calculada a energia de soldagem E (J/mm), onde V é a tensão do arco elétrico (V), I é a corrente de soldagem (A) e v a velocidade de soldagem (mm/s).

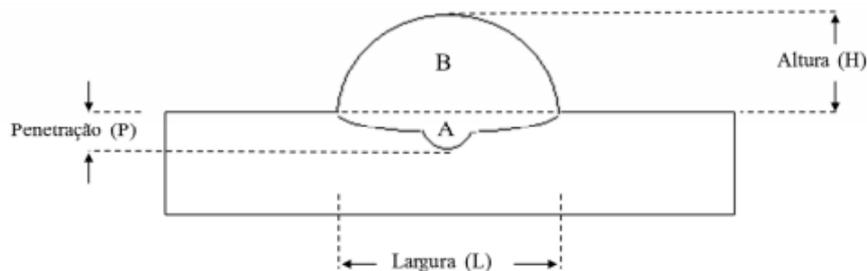
$$E = \eta \frac{UI}{v} \quad (1)$$

2.4 Diluição

Modenesi et al. (2006) define diluição como a relação entre os volumes de metal base fundido e de todo o metal de solda (metal base mais metal de adição). Variando de 100% a 0%, a diluição é influenciada pelo processo de soldagem, da configuração tanto da junta quanto dos parâmetros de soldagem e da espessura do metal base. A geometria da diluição e suas variáveis podem ser vistas na Figura 4 seguida pela Equação 2, segundo Modenesi et al., 2006, para a diluição δ (%), com A como área fundida do metal base (mm²) e B como área do reforço (mm²).

$$\delta = \frac{A}{A+B} \times 100 \quad (2)$$

Figura 4 – Representação das áreas de um cordão de solda para cálculo da diluição (Adaptado de BAUMGAERTNER, 2016).



2.5 Ângulo de Molhamento

Segundo Nunes et al. (2015) o ângulo de molhamento é aquele formado entre a superfície sólida e o plano tangencial à superfície do cordão depositado. Este ângulo ajuda na prevenção

de defeitos de soldagem multipasse, o aumento da energia de soldagem com a variação da corrente reduz o ângulo de molhamento, enquanto que a variação da velocidade de soldagem trouxe o aumento do ângulo de molhamento.

2.6 Processo de Soldagem MIG/MAG Pulsado

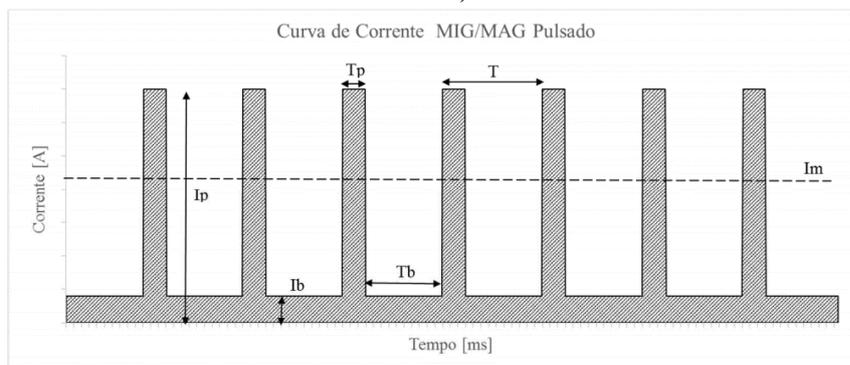
Com a intenção de reduzir a quantidade de salpicos e melhorar o acabamento do cordão de solda foi desenvolvido o processo MIG/MAG com corrente pulsada, o qual destaca uma gota por pulso de corrente. Outra vantagem é o uso de uma corrente baixa, o que possibilita a soldagem em diversas posições e a soldagem de chapas de pouca espessura (SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

Uma dificuldade desse processo é o ajuste correto de suas variáveis, de forma que a cada pulso apenas uma gota se destaque e com diâmetro próximo ao diâmetro do eletrodo, condição chamada de uma gota por pulso (UGPP), forma mais estável de transferência para MIG/MAG pulsado (ANDRADE, 2012).

Os parâmetros que precisam ser regulados a fim de atingir a condição de UGPP são: corrente de pico (I_p), tempo de pico (T_p), corrente de base (I_b), tempo de base (T_b). Na Figura 5 é possível visualizar cada um desses parâmetros na curva de corrente pulsada.

A relação entre os valores de I_p e T_p é o fator que se utiliza no controle da transferência da gota, conforme afirmam Scotti e Ponomarev (2008) com pouca influência dos demais parâmetros, como I_b ou T_b , que são regulados apenas para manter o valor de I_m inferior a corrente de transição (transição para transferência pelo tipo spray).

Figura 5 – Curva de corrente pulsada e seus parâmetros (Adaptado de BAUMGAERTNER, 2016).



De acordo com Andrade, 2012, o valor de I_m , em A, visível na Figura 5, é a média ponderada das correntes de pulso e de base, conforme a Equação 3.

$$I_m = \frac{I_p T_p + I_b T_b}{T_p + T_b} \quad (3)$$

Segundo Scotti e Ponomarev (2008) para se encontrar a corrente média desejada, os valores de I_b e T_b são selecionados a partir de I_p e T_p , os quais dependem de muitos outros parâmetros e só podem ser obtidos de forma precisa com instrumentação laboratorial complexa.

Na década de 1980 surgiram as fontes de solda com controle sinérgico, que ao informar o gás, eletrodo e V_{Alim} que serão utilizados são capazes de realizar cálculos e/ou interpolações

para encontrar os parâmetros ideais para a soldagem com corrente pulsada, uma vez que a V_{Alim} está relacionada com os parâmetros de corrente (SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

2.7 Processo de Soldagem MIG/MAG Polaridade Variável

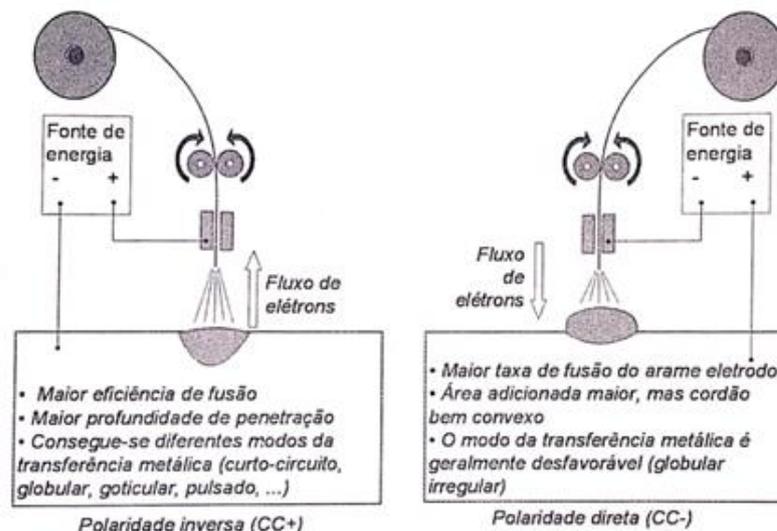
De acordo com Baumgaertner (2016) nos dias de hoje o processo MIG/MAG é um dos mais utilizados na produção de grandes cordões de solda na indústria, mas apresenta problemas quando se trabalha com alumínio, geralmente podendo apresentar excesso de fusão, não fechamento de aberturas em juntas e distorções. Uma forma de contornar essas adversidades é o uso de corrente alternada no processo MIG/MAG (TONG et al., 2001).

Atualmente são reconhecidas duas nomenclaturas diferentes: corrente alternada (CA) e polaridade variável (PV). Ambas as nomenclaturas trazem consigo o conceito de utilizar polaridade negativa durante parte da soldagem, o que permite a soldagem de chapas finas. Apesar de terem o mesmo conceito da variação entre polaridade negativa e positiva, corrente alternada e polaridade variável têm suas diferenças. A corrente alternada está atrelada a uma forma de onda senoidal, onde as grandezas são muito similares, mas com polaridades inversas. A polaridade variável, diferente da corrente alternada, não está relacionada a uma forma de onda específica, podendo ter períodos e intensidades diferentes em suas parcelas positiva e negativa (NASCIMENTO, VILARINHO, 2006).

A utilização de CCEN durante a soldagem traz consigo uma diminuição na penetração, mas menor temperatura da peça após soldagem e, por consequência, menor deformação da peça finalizada, como explicado por Tong et al. (2001). Ainda sobre CCEN, de acordo com Scotti e Ponomarev (2008) essa configuração traz um aumento de até 70% na taxa de fusão do eletrodo. Essa alta taxa de fusão aliada com o aumento da temperatura no eletrodo causa instabilidades no arco e maior geração de respingos durante a soldagem, fator pelo qual não se costuma usar CCEN durante a soldagem MIG/MAG convencional (TALKINGTON, 1998).

Segundo Mulligan (2003) o processo MIG/MAG-PV combina as melhores características da soldagem MIG/MAG tradicional (CCEP) com as vantagens do eletrodo negativo (CCEN), como a redução do aporte térmico e aumento da taxa de deposição. Na figura 6 o efeito das polaridades é resumido.

Figura 6 Características do arco em relação as diferentes polaridades (Adaptado de SCOTTI, PONOMAREV, 2008).

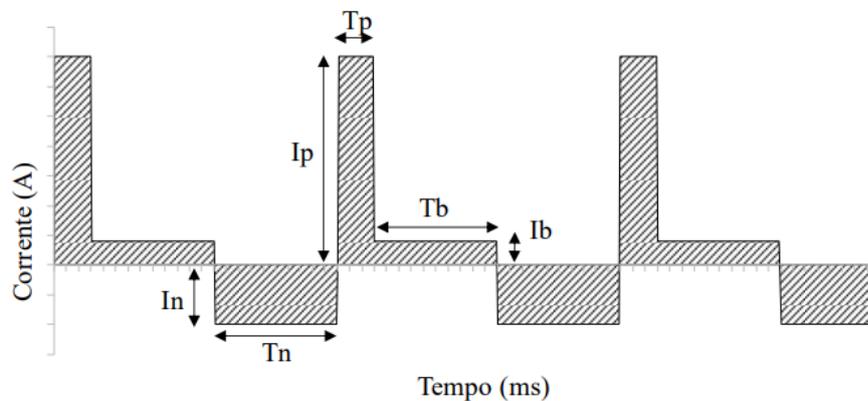


2.8 Formas de Onda para Processo de Soldagem MIG/MAG-PV

A forma de onda empregada no processo MIG/MAG-PV é similar à utilizada no processo MIG/MAG pulsado, mas com adição de uma base positiva após ou antes do pulso de destacamento e pulsos sem simetria entre a polaridade positiva e negativa (BAUMGAERTNER, 2016). A figura 7 apresenta o formato da onda e seus respectivos parâmetros.

Conforme Tong et al. (2001) uma corrente de base positiva com duração aproximada de 1,5 ms após ou antes do pulso de destacamento, recomendada para soldagem de alumínio, é um mecanismo que permite que a gota chegue na poça de fusão livre de forças repulsivas, evitando respingos. 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 (NASCIMENTO, 2011).

Figura 7 – Forma de onda MIG/MAG-PV e seus parâmetros.



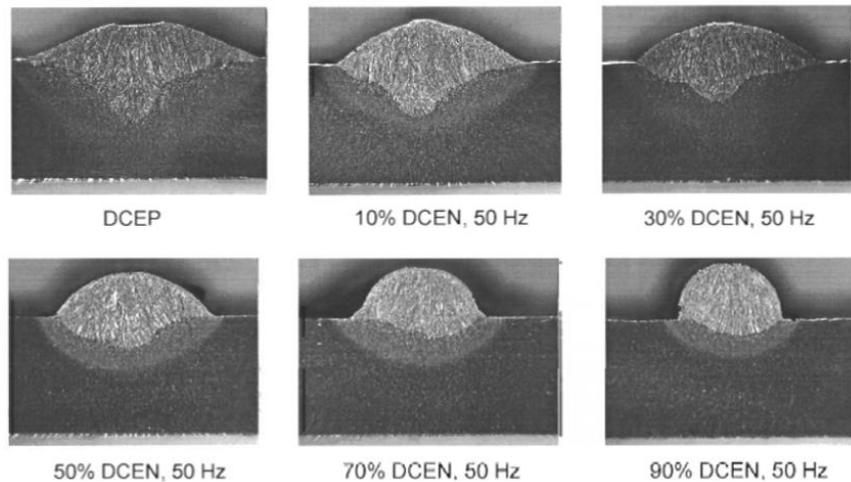
A forma de onda MIG/MAG-PV, conforme a Figura 7, possui 6 parâmetros independentes entre si, listados na própria figura. Pela complexidade envolvida na compreensão da variação de cada um dos parâmetros, é aceita a utilização de um fator que os relaciona e resulta na porcentagem de polaridade negativa em relação à corrente total em um período (resultante da soma de T_n , T_p e T_b), conhecido como percentual de eletrodo negativo (%EN), utilizado para relacionar a quantidade de polaridade negativa com características dos cordões de solda e outras variáveis do processo (BAUMGAERTNER, 2016).

Apesar de apenas uma forma de onda com polaridade variável ter sido apresentada na Figura 7, existem muitas outras que são empregadas no processo MIG/MAG-PV, mesmo sem se saber as vantagens no uso de cada uma (NASCIMENTO, 2011).

Na aplicação do processo MIG/MAG-PV em aço ao carbono, um formato de onda similar a Figura 5 pode ser utilizado desde que se desloque a corrente de base para a polaridade negativa. De acordo com Santos (2008) isso se deve à ausência da necessidade de promover a limpeza catódica do metal base, como ocorre para o alumínio.

Segundo Nascimento (2011) o aumento do %EN, sem alteração nas velocidades de alimentação e soldagem, traz uma redução na penetração do cordão, o que é condizente com o uso de correntes mais baixas, que estão diretamente relacionadas com baixa penetração. Na Figura 8 é possível observar a diminuição de penetração com o aumento do %EN, além da diminuição da largura e diluição e aumento do reforço.

Figura 8 – Variações geométricas com o %EN (Adaptado de TALKINGTON, 1998).



3. METODOLOGIA

Neste trabalho foi feita a análise da influência das formas de onda sobre a geometria de cordões de solda para manufatura aditiva de alumínio, sendo analisadas onda com 0%EN, polaridade variável com 30%EN e polaridade variável com 50%EN.

Todos os procedimentos práticos foram realizados nas instalações do laboratório de soldagem e técnicas conexas (LS&TC), localizado no centro de tecnologia do campus do vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

A análise das juntas soldadas foi feita através de macrografias e inspeções visuais das características macroscópicas. Os materiais, equipamentos e métodos utilizados durante o trabalho estão comentados nas seções abaixo.

3.1 Materiais e Métodos para Soldagem

Para a deposição e empilhamento dos cordões de solda foi utilizada a fonte DIGIPlus A7 450 em conjunto com um robô CNC de soldagem orbital, o Tartilope V4, o qual foi equipado com uma tocha de soldagem a fim de obter uma maior repetibilidade do processo, controlando o alinhamento, velocidade de avanço, ângulo e distancia da tocha em relação ao material.

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 coleta. Além desses dados, também foram registradas as temperaturas da chapa, através da instrumentação com dois termopares, fixados na chapa por descarga capacitiva. A Figura 9 ilustra os equipamentos de soldagem e aquisição de dados.

Os cordões foram depositados sobre chapas de alumínio AA5052-F de dimensões 6x4x5/16”, o metal de adição utilizado foi o ER5356 de 1,2mm de diâmetro e o gás de proteção era Ar comercialmente puro. As deposições foram feitas sobre a superfície livre na posição 1G, *bead-on-plate*. A composição química do metal base e do metal de adição estão descritos nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Figura 9 – 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 5052-F	-	2,5	-

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

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

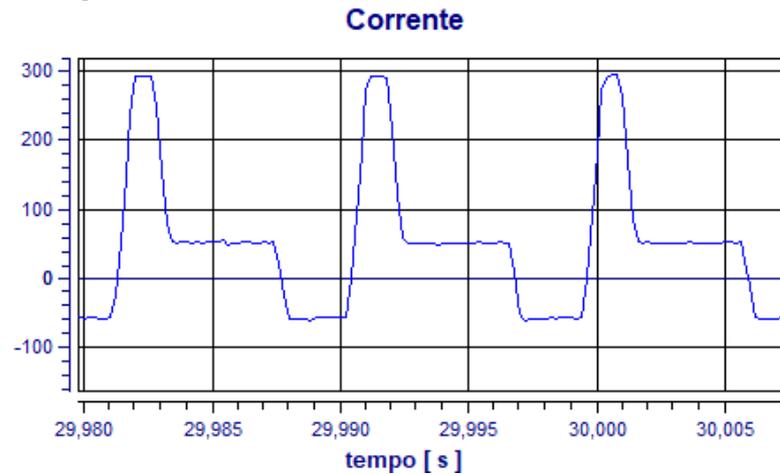
Parâmetros das formas de onda como os da Figura 7 foram definidos previamente pelo Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez, pela vasta experiência com soldagem MIG/MAG-PV. A corrente de base, entretanto, foi posicionada após a corrente de pico. Na tabela 3 estão listados os parâmetros das três % EN utilizadas durante as deposições.

Tabela 3 – Parâmetros de corrente e tempos das formas de onda estudadas.

Parâmetro	30% EN	50% EN	0% EN
I_p (A)	300	300	300
t_p (ms)	1,5	1,5	1,5
I_b (A)	60	25	60
t_b (ms)	4,6	2,9	7,3
I_n (A)	47	47	0
t_n (ms)	2,6	4,4	0
T (Hz)	110	110	110

Na Figura 10 pode ser vista a forma de onda MIG/MAG-PV 30%EN. Os gráficos das diferentes formas de onda obtidos durante as deposições podem ser vistos no Apêndice A.

Figura 10 – Formato de onda MIG/MAG-PV 30%EN.



Alguns parâmetros foram definidos previamente, como o ângulo da tocha de -5° (empurrando a poça de fusão), velocidade de avanço de 4 mm/s, velocidade de alimentação do arame de 6 m/min, vazão do gás de proteção de 15 l/min e DBCP de 18 mm. A temperatura foi monitorada, de forma que novas deposições só fossem feitas quando o metal base estivesse a no máximo 60°C .

Como dito anteriormente, foram realizadas deposições para três %EN, empilhando até quatro cordões. A fim de obter dados para deposições intermediárias, também foram feitos passes parciais, reduzindo seu comprimento em 30% a cada novo empilhamento. A Figura 11 ilustra o empilhamento principal de 4 cordões e as deposições intermediárias.

Figura 11 – Exemplo de uma das deposições feitas (MIG-PV 30% EN).



3.2 Materiais para Caracterização das Soldas

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 aos pares 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 macrografias foram feitas com 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 feitas em um microscópio com lente de aumento 8x e analisadas usando o software livre ImageJ, com o qual foi medida a área do último cordão depositado (A_1, A_2, A_3, A_4), penetração do primeiro passe no metal base (P), diluição (δ), ângulo de molhamento em ambos os lados (α_{Esq} e α_{Dir}) e a diferença entre esses ângulos ($\Delta\alpha$).

Além das características geométricas citadas acima, os cordões também foram avaliados em relação a outros aspectos, como a quantidade de respingos durante a deposição, quantidade de poros visíveis na superfície superior, defeitos de fusão ou sobreposição e razão entre a largura do primeiro e quarto passe (R_W).

4. RESULTADOS

Nesta seção serão exibidos e discutidos os resultados do trabalho, obtidos através das análises realizadas sobre a geometria e outros aspectos pertinentes dos cordões e empilhamentos em relação ao formato de onda utilizado em sua deposição, como os defeitos encontrados, suas possíveis causas e soluções (caso aplicável).

4.1 Defeitos dos Cordões

A quantidade de salpicos foi avaliada visualmente durante as deposições e por fotos tiradas após cada passe. Respingos representam menos material sendo depositado nos cordões. Para manufatura aditiva isso se traduz em mais camadas de cordões e conseqüentemente, maiores gastos no processo uma vez que menos material está sendo depositado no cordão de solda e mais tempo é requerido na fabricação. Foi facilmente notado um aumento significativo na quantidade de respingos com o aumento do %EN, conforme pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 – Amostragem visual da quantidade de salpicos para MIG 0%EN, MIG-PV 30%EN e MIG-PV 50%EN respectivamente.



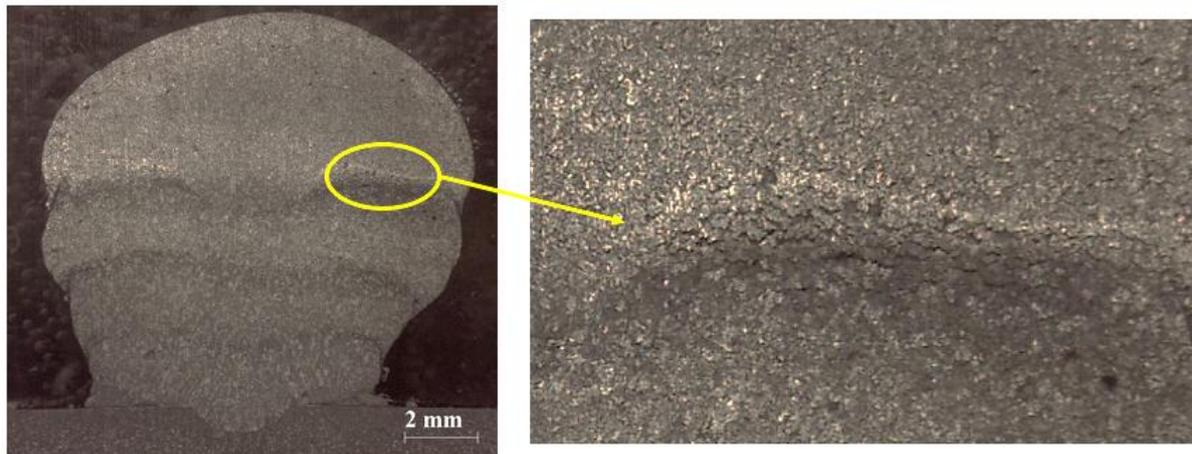
Esse resultado não foi uma surpresa. Diversos autores já afirmaram e comprovaram que o eletrodo negativo gera instabilidade no arco. Isso geralmente acontece devido à suspensão

da gota formada na ponta do eletrodo, criando um campo magnético assimétrico que atua sobre a gota de forma imprevisível (NORRISH, 1992).

A baixa fusão do metal base ficou demonstrada em todas as 12 amostras. Isso pode ser relacionado com os baixos valores de energia de soldagem. A falta de fusão não ficou restrita somente ao metal base original. Os cordões empilhados também apresentaram dificuldade em fundir o cordão inferior. Isso pode estar relacionado com o formato dos empilhamentos, que tendem a ser mais largos a cada novo cordão depositado. Não foi avaliada a criticidade desse defeito, sendo possível que a partir de um determinado número de cordões os incrementos de altura a cada novo passe fosse desprezível.

Foi constatada a presença de microtrincas nos empilhamentos feitos com formato de onda pulsado. Essas microtrincas limitam-se às regiões de interface entre as deposições, podendo ser resultantes da falta de fusão entre elas e a consequente solidificação do passe superior, contraindo o metal até então líquido e gerando as microtrincas. Na Figura 13 é possível observar um caso de microtrincas.

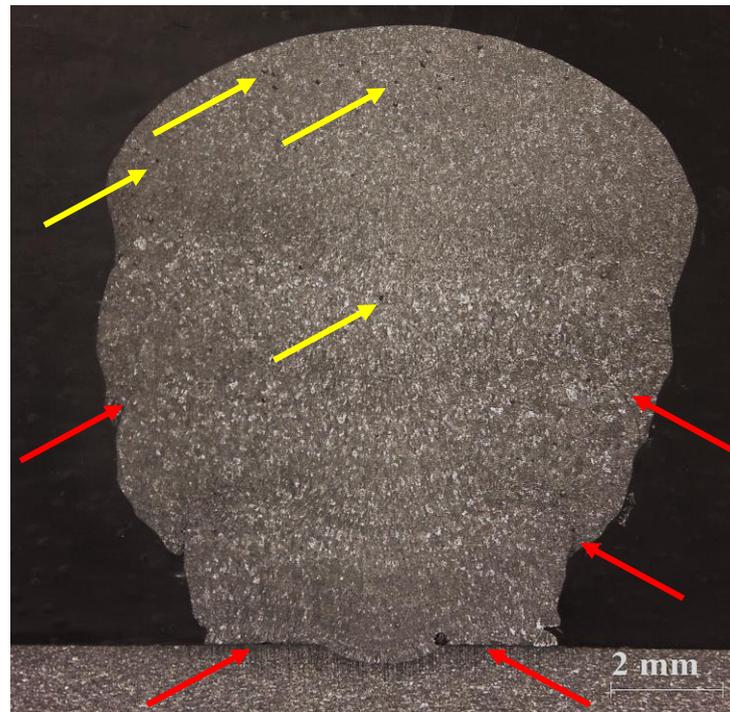
Figura 13 – Microtrincas na soldagem MIG/MAG-P.



Em casos que empilhamentos venham a ser feitos próximos e em paralelo, como na produção de uma peça, muitos problemas de descontinuidade serão encontrados, já que a baixa capacidade de fusão também afetará os cordões vizinhos, afetando a estrutura do conjunto e causando falhas sob condições previstas como seguras. Na figura 14 é possível identificar diversas descontinuidades, como porosidades e falta de fusão.

As porosidades encontradas nas deposições ficaram, geralmente, restritas à parte superior dos cordões, independente do passe. Algumas porosidades podem ser encontradas longe da superfície superior. Isso acontece pois é uma porosidade remanescente do passe anterior, que não foi fundida pela deposição seguinte. Acredita-se que as porosidades encontradas aqui são decorrentes de oxidações presentes no metal de adição, por ser tratar de uma bobina relativamente antiga. As porosidades não foram exclusividade de nenhum formato de onda, sendo encontradas em todas as amostras.

Figura 14 – Descontinuidades presentes nas amostras, porosidades em amarelo e falta de fusão em vermelho.



4.2 Geometria dos Cordões

Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros geométricos obtidos após a análise das 12 amostras e seus respectivos cordões, sendo eles respectivamente a área do cordão superior para cada passe, área do reforço medida no primeiro passe, área total, diluição, largura do primeiro passe, penetração no primeiro passe, altura no primeiro passe, altura do quarto empilhamento, ângulo de molhamento do quarto empilhamento na esquerda, ângulo de molhamento do quarto empilhamento na direita, diferença entre os ângulos de molhamento, largura superior do último empilhamento, largura inferior do último empilhamento e razão entre as larguras superior e inferior do último empilhamento. Esses cordões foram feitos com os materiais e parâmetros das Tabelas 1, 2 e 3.

Os resultados da Tabela 4 foram obtidos através de medições das amostras no ImageJ e cálculos no Excel. Cada medida foi tomada três vezes e escolhido o valor intermediário, para minimizar erros de medição. Por ser inviável medir a área da seção transversal de um cordão de forma não destrutiva com os equipamentos disponíveis, as áreas da Tabela 4 não correspondem à mesma amostra, isto é, cada medição foi feita em uma amostra diferente dos cordões, o que pode trazer variações em relação aos valores obtidos.

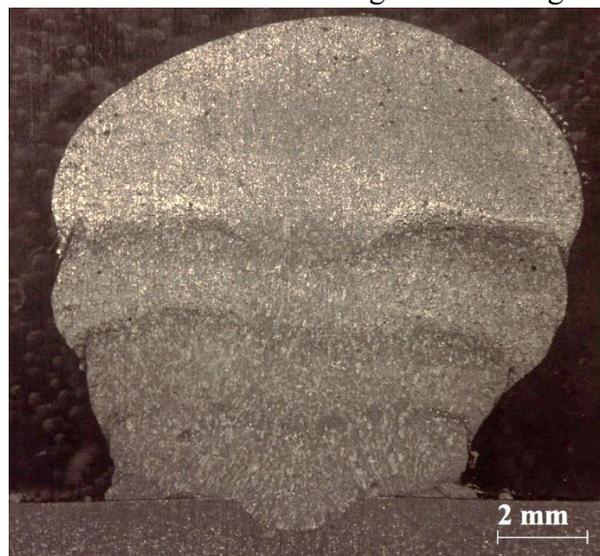
O ângulo de molhamento encontrado nas amostras está acima do esperado para soldagem convencional, mas dentro do desejado para a manufatura aditiva. A diferença entre os ângulos de molhamento da mesma amostra representa a tendência do empilhamento em crescer inclinado. Ângulo de molhabilidade também pode ser relacionado com a tendência do empilhamento em ter um formato de “V”, aspecto reforçado por R_W , que chegou a um máximo de 59,2% para MIG-PV 30% EN ou seja, o 4º cordão apresentou quase 2/3 da largura do primeiro cordão.

Tabela 4 – Parâmetros geométricos obtidos.

Parâmetro	30% EN	50% EN	0% EN
A_1 (mm^2)	28,40	24,97	26,72
A_2 (mm^2)	30,76	28,41	28,66
A_3 (mm^2)	33,73	32,33	38,57
A_4 (mm^2)	39,57	31,95	46,79
A_{p1} (mm^2)	1,17	1,01	2,05
A_{total} (mm^2)	104,56	103,71	104,56
δ (%)	4,12	4,05	7,66
W (mm)	7,79	7,39	7,32
P (mm)	0,71	0,57	0,92
h_1 (mm)	4,04	3,98	3,96
h_4 (mm)	12,12	11,98	10,88
$\alpha_{4 Esq}$ ($^\circ$)	64,30	69,20	73,80
$\alpha_{4 Dir}$ ($^\circ$)	72,70	54,70	68,00
$\Delta\alpha_4$ ($^\circ$)	8,40	14,60	5,80
W_{sup} (mm)	10,62	10,34	11,89
W_{inf} (mm)	6,67	7,11	8,02
R_W (%)	59,20	45,51	48,24

Todas as macrografias estão presentes no Apêndice B. A figura 15 mostra uma das macrografias analisadas durante o trabalho e ilustra o formato em “V” relatado anteriormente.

Figura 15 – Macrografia de quatro cordões empilhados pelo processo MIG-P, apresenta formato em “V” e aumento gradual da largura.



Os baixos valores de diluição, assim como a falta de fusão, podem estar relacionados com valores baixos de energia de soldagem. Pelas características dos processos era esperado que a diluição fosse menor que 10%, mas os valores encontrados foram muito baixos, sendo o processo MIG/MAG-Pulsado o que apresentou os maiores valores, cerca de 185% em relação a segunda maior diluição, MIG/MAG-PV 30% EN. Segundo Murugan e Parmar (1997) para

solda de revestimento, muito similar à soldagem *bead-on-plate* aqui empregada, valores próximos de diluição entre 10 e 15% são ideais.

A altura dos primeiros cordões não apresentou diferenças significativas dentre os formatos de onda, menos de 2%, já nos empilhamentos de 4 cordões apresentou resultados variados, chegando a 10% de diferença entre o processo pulsado e com polaridade variável 30% EN. Estes resultados parecem estar ligados com a falta de penetração, como mencionado anteriormente, onde o arco não tem energia suficiente para fundir o metal base e criar uma poça de fusão larga, fazendo com que o material de adição depositado escorra para os lados.

5. CONCLUSÃO

Finalizada a análise dos dados obtidos durante as deposições com diferentes percentuais de eletrodo negativo, foi constatado que todos os empilhamentos finais, independente do %EN empregado, apresentam uma geometria razoavelmente similar, com baixos valores de penetração, diluição e ângulo de molhabilidade próximo de 70°. Entretanto, é possível concluir que para os processos e parâmetros utilizados, os melhores empilhamentos foram feitos utilizando MIG/MAG com 0% EN. Essa escolha foi feita, principalmente, com base nas comparações feitas entre os valores de penetração, diluição, na quantidade de salpicos e no formato mais homogêneo do empilhamento, isto é, sem grandes desproporcionalidades e inclinações.

O número de defeitos encontrados foi grande, as porosidades precisam ser investigadas, bem como a falta de fusão e subsequente sobreposição do metal de adição sobre o metal base. Esses defeitos afetam diretamente a resistência mecânica do empilhamento, inviabilizando a manufatura de quaisquer peças. A quantidade de salpicos ficou dentro do previsto, sendo o %EN a principal influência dessa anomalia durante os testes realizados.

Como um trabalho exploratório nesta área, 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.

6. SUGESTÃO PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Para trabalhos futuros são sugeridos os seguintes itens:

- Estudo sobre a influência do ângulo da tocha nas características geométricas dos empilhamentos de cordões de solda;
- Analisar a influência da variação dos parâmetros da Tabela 3 na geometria do empilhamento de cordões de solda;
- Analisar a influência da liga do metal de adição na diluição e taxa de fusão dos cordões de solda;
- Analisar a influência de diferentes gases de proteção e valores de vazão sobre a geometria do empilhamento de cordões de solda.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBA, D. R. **Influência dos parâmetros sobre a geometria de cordões produzidos por soldagem MAG Robotizado**. 2012. 28f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

ANDRADE, A. F. C. **Influência da corrente de pulso, tempo de pulso e diâmetro da gota sobre a estabilidade da transferência metálica no processo MIG-P**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

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.

ESAB BR, **Apostila de Soldagem MIG/MAG**, 2005.

GENG, H.; LI, X.; XIONG, J.; LIN, X.; ZHANG, F. **Geometric Limitation and Tensile Properties of Wire and Arc Additive Manufacturing 5A06 Aluminum Alloy Parts**, Journal of Materials Engineering and Performance, v. 26(2), p. 621, 2016.

GOHR Jr., R. **Novos Métodos de Controle de Soldagem MIG/MAG**, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

MACHADO, I. G. **Soldagem e técnicas conexas: processos**, editado pelo autor, Porto Alegre, 1996.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

MULLIGAN, S.J. **Pulsed MIG Arc Welding Processes for Joining of Thin Sheet Aluminium**, The Welding Institute – TWI, 2003.

MURUGAN, N.; PARMAR, R. S. **Stainless Steel Cladding Deposited by Automatic Gas Metal Arc Welding**, Welding Research Supplement, p. 391-400, 1997.

NASCIMENTO, A. S. **Fenomenologia da soldagem MIG/MAG-PV e sua aplicabilidade para juntas sobreposta e em V (passe de raiz)**, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

NASCIMENTO, A. S.; VILARINHO, L. O. **Uma contribuição ao estudo da soldagem MIGCA**, 16º Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2006.

NORRISH, J. **Advanced Welding Process**, Cranfield Institute of Technology, 1992, p.147.

NUNES, E. B.; CAVALCANTE, N. E.; BARRETO, A. S.; SILVA, A. I. N.; MOTTA, M. F. **Avaliação do Efeito da Energia de Soldagem na Deposição de Aço Inoxidável Superduplex pelo Processo Plasma Pó**, Soldagem & Inspeção. 2015;20(2):205-218.

SANTOS, T. F. **Soldagem MIG com Corrente Alternada**, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG /MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**, Editora Artliber, São Paulo, 2008.

TALKINGTON, J. **Variable Polarity Gas Metal Arc Welding**, Msc Dissertation, The Ohio State University, 1998.

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.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; DE MELLO, F. D. H. **Soldagem**, ABM, 11ªed, 2015.

APENDICE A

Figura 1A – MIG/MAG-PV 30%EN para um cordão e dois cordões, respectivamente.

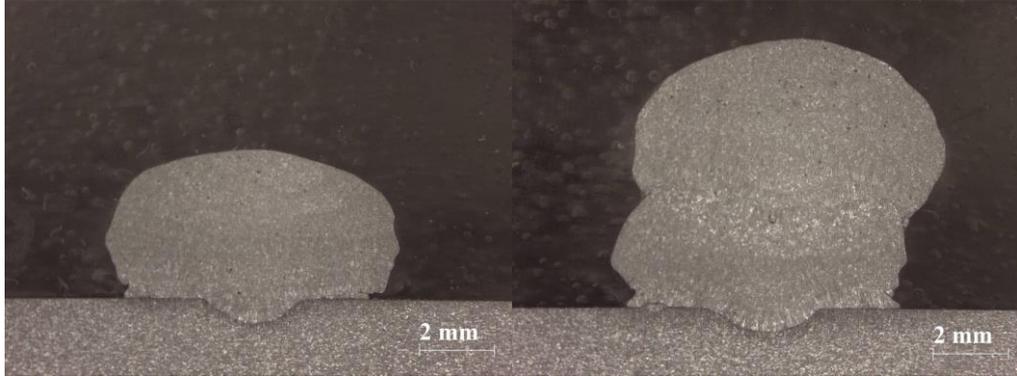


Figura 2A – MIG/MAG-PV 30%EN para três cordão e quatro cordões, respectivamente.

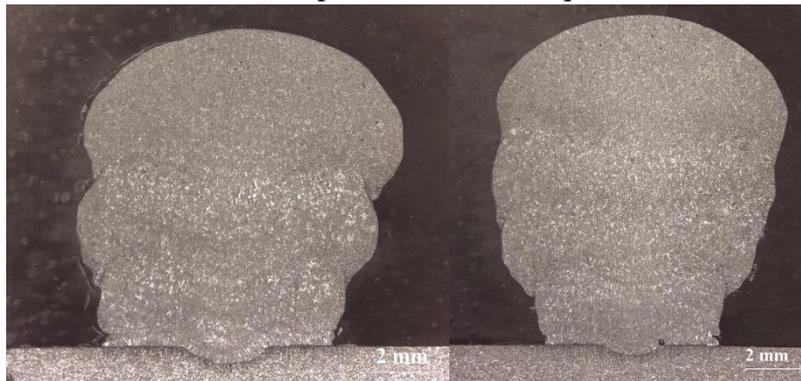


Figura 3A – MIG/MAG-PV 50%EN para um cordão e dois cordões, respectivamente.

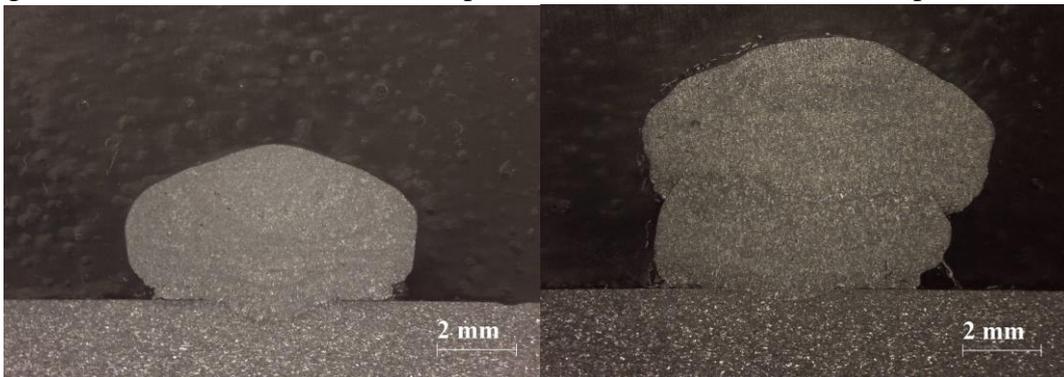


Figura 4A – MIG/MAG-PV 50%EN para três cordão e quatro cordões, respectivamente.

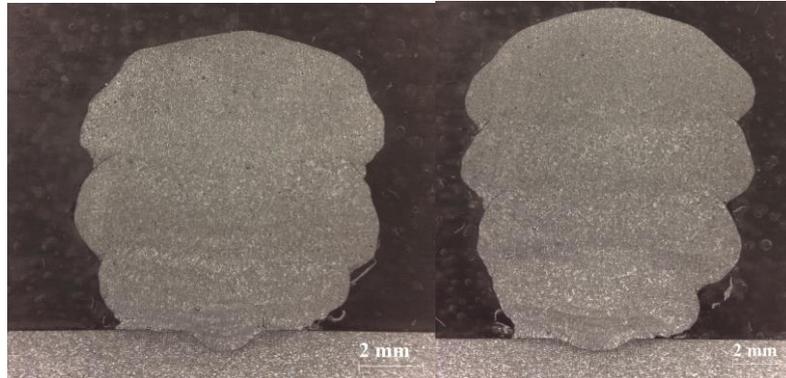


Figura 5A – MIG/MAG-Pulsado para um cordão e dois cordões, respectivamente.

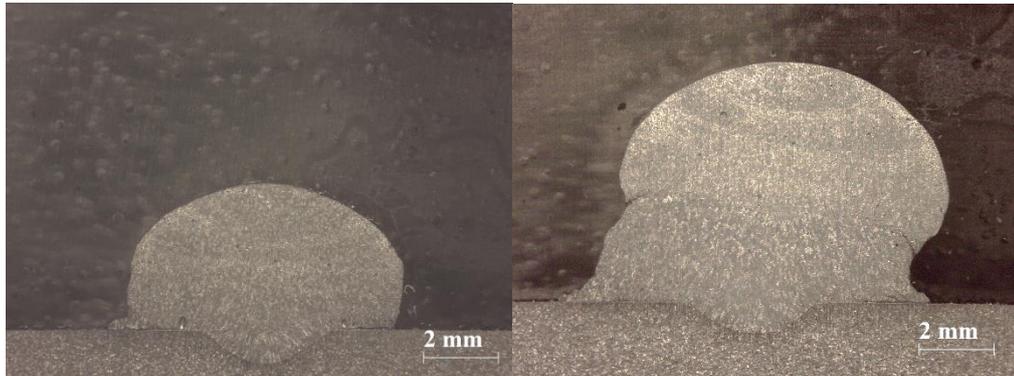
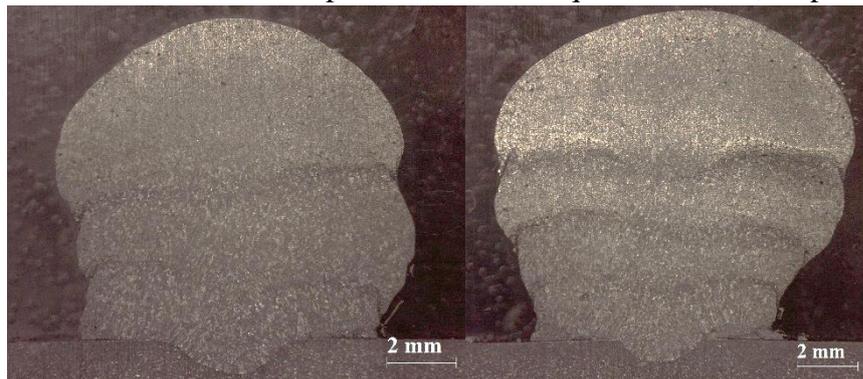


Figura 6A – MIG/MAG-Pulsado para três cordão e quatro cordões, respectivamente.



APENDICE B

Figura 1B – Formato de onda MIG/MAG-PV 30%EN.

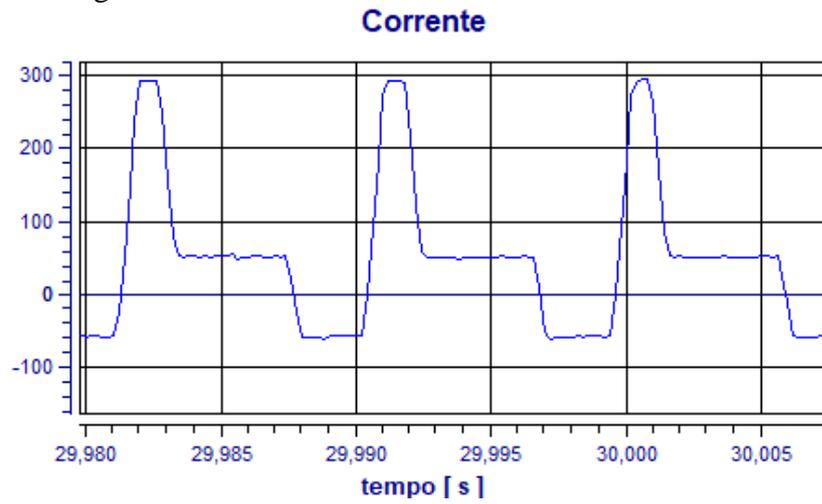


Figura 2B – Formato de onda MIG/MAG-PV 50%EN.

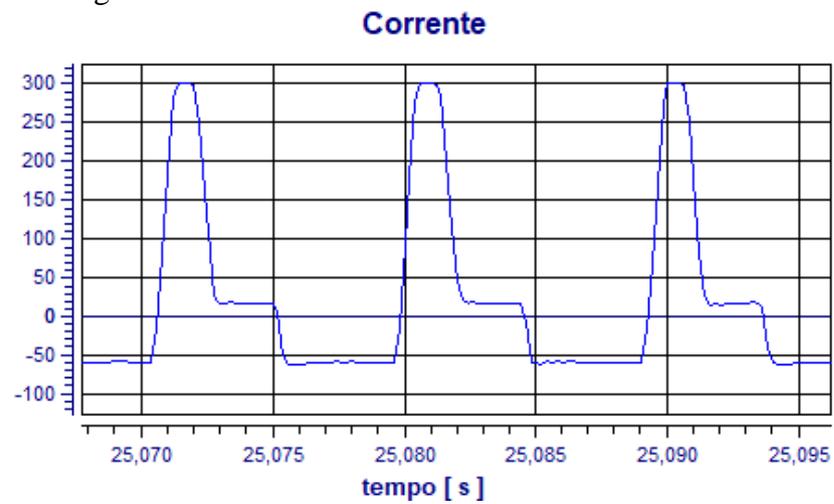


Figura 3B – Formato de onda MIG/MAG-Pulsado.

