

Influência da variação da corrente de soldagem nas características geométricas do cordão de solda em aço vergalhão CA50 através dos processos eletrodo revestido e MIG/MAG com Ementa tipo Traspasse

Influence of welding current variation on the geometric characteristics of the weld bead in CA50 rebar steel using shielded metal arc welding and MIG/MAG Processes with overlay joint

Influencia de la variación de la corriente de soldadura en las características geométricas del cordón de soldadura en acero CA50 utilizando los procesos de electrodo revestido y MIG/MAG con soldadura superpuesta

Recebido: 19/07/2024 | Revisado: 05/08/2024 | Aceitado: 06/08/2024 | Publicado: 10/08/2024

Dnilson Silva Braga

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5349-293X>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Brasil

E-mail: dnilsomb Braga@hotmail.com

Thiago Antônio Paixão de Sousa Costa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2424-8839>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Brasil

E-mail: thiago.costa@ifpa.edu.br

Hélio Antônio Lameira de Almeida

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2954-8494>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Brasil

E-mail: helio.almeida@ifpa.edu.br

Resumo

A indústria da construção civil é um importante parâmetro do desenvolvimento econômico, sendo um setor que impulsiona a busca por técnicas e produtos com melhor desempenho, nesse sentido os aços vergalhões soldáveis são amplamente utilizados no setor da construção, principalmente no concreto armado por agregar diversas propriedades mecânicas. O aço CA50 é um dos materiais mais difundidos pela sua característica de soldabilidade e isso agrega confiança na estrutura, dessa forma, este trabalho visa estudar o aporte térmico e as características geométricas de juntas soldadas pelo processo eletrodo revestido e MIG/MAG com emenda tipo traspasse com três diferentes variações de corrente de soldagem. Foram confeccionadas amostras de aproximadamente 100mm do aço vergalhão CA50 e realizado a solda com eletrodo revestido AWS E11018-M e MIG/MAG, o cordão de solda teve comprimento de 100mm com igual espaçamento conforme norma ABNT NBR 6118:2003, mediu-se o tempo de soldagem para cálculo do aporte térmico, os cortes nas amostras foram horizontais em máquina serra fita. Os procedimentos metalográficos para revelação da macrografia da zona fundida (ZF) e zona termicamente afetada (ZTA) utilizou técnicas de microscopia ótica, o ataque químico foi feito com reagente nital 3%. Conclui-se que a soldagem tipo traspasse do vergalhão CA50 com eletrodo revestido não apresentou bons aspectos geométricos como penetração e largura da solda em baixas correntes de soldagem, enquanto o processo MIG/MAG indicou boas características de soldagem nos parâmetros de corrente e, portanto, viabiliza a solda do vergalhão por emenda tipo traspasse no setor da construção civil com os parâmetros utilizados.

Palavras-chave: Aporte térmico; Soldagem tipo traspasse; Soldagem de vergalhão CA50; Soldagem eletrodo revestido e MIG/MAG.

Abstract

The construction industry is an important parameter of economic development, driving the search for techniques and products with improved performance. Weldable rebar steels are widely used in the construction sector, especially in reinforced concrete, due to their diverse mechanical properties. CA50 steel is widely known for its weldability, which instills confidence in the structure. Therefore, this study aims to investigate the heat input and geometric characteristics of welded joints using shielded metal arc welding and MIG/MAG processes with overlay joint, employing three different welding current variations. Approximately 100mm samples of CA50 rebar steel were prepared and welded using AWS E11018-M covered electrode and MIG/MAG. The weld bead had a length of 100mm with equal spacing according to ABNT NBR 6118:2003 standard. Welding time was measured to calculate

heat input, and the samples were cut horizontally using a band saw. Metallographic procedures for revealing the macrography of the fusion zone (FZ) and heat-affected zone (HAZ) utilized optical microscopy techniques. It is concluded that overlay welding of CA50 rebar steel with shielded metal arc welding did not exhibit good geometric aspects such as penetration and weld width at low welding currents, while the MIG/MAG process indicated good welding characteristics at the current parameters, thus enabling rebar welding with overlay joint in the construction sector using the parameters employed.

Keywords: Heat input; Overlay welding; CA50 rebar welding; Shielded metal arc welding and MIG/MAG welding.

Resumen

La industria de la construcción es un importante parámetro de desarrollo económico, y es un sector que impulsa la búsqueda de técnicas y productos con mejores prestaciones. En este sentido, el acero de armadura soldable es ampliamente utilizado en el sector de la construcción, especialmente en concreto armado, ya que aporta diversas propiedades mecánicas. El acero CA50 es uno de los materiales más extendidos debido a sus características de soldabilidad, lo que añade confianza a la estructura. Por ello, este trabajo tiene como objetivo estudiar la aportación térmica y las características geométricas de uniones soldadas mediante los procesos de electrodo revestido y MIG/MAG con soldadura superpuesta utilizando tres variaciones de corriente de soldadura diferentes. Muestras de aproximadamente 100mm fueron fabricadas a partir de barras de acero CA50 y soldadas con electrodo revestido AWS E11018-M y MIG/MAG, el cordón de soldadura fue de 100mm de largo con espaciado igual de acuerdo con la ABNT NBR 6118:2003, el tiempo de soldadura fue medido para calcular el aporte térmico, los cortes en las muestras fueron horizontales con una máquina de sierra de cinta. Los procedimientos metalográficos para revelar la macrografía de la zona fundida (ZF) y de la zona afectada térmicamente (ZAT) utilizaron técnicas de microscopía óptica, y el ataque químico se realizó con reactivo nital al 3%. Se puede concluir que la soldadura superpuesta de barras de refuerzo CA50 con electrodo revestido no mostró buenos aspectos geométricos como penetración y longitud de soldadura a bajas corrientes de soldadura, mientras que el proceso MIG/MAG mostró buenas características de soldadura en parámetros de corriente y por lo tanto, la soldadura transversal de barras acero es viable en el sector de la construcción con los parámetros utilizados.

Palabras clave: Aporte térmico; Soldadura superpuesta; Soldadura de barras de refuerzo CA50; Soldadura con electrodo revestido y MIG/MAG.

1. Introdução

A soldagem como conhecemos foi desenvolvida a partir do século XVIII com o desenvolvimento do acetileno e do arco elétrico, dando início ao processo de soldagem por fundição. Devido sua importância industrial houve a ampliação dos processos de solda, desde os mais manuais como arco elétrico com eletrodo revestido (SMAW), passando pelo Arco Elétrico com Atmosfera de Proteção Gasosa (MIG/MAG) até os mais sofisticados como soldagem por feixe de elétrons (EBW), hidrogênio atômico (AHW) e arco plasma (PAW). Assim a soldagem se configura como o mais importante processo industrial de fabricação de peças metálicas, devido a sua relativa simplicidade operacional (Modenesi, Marques & Santos, 2012; Kulmann Filho & Machado, 2024).

O processo de soldagem é definido pela fonte de calor, quantidade de calor trocado e tipo de proteção que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando, na junta soldada, a continuidade de propriedades físicas, químicas e metalúrgicas, sendo que a escolha do processo de soldagem utilizado considera as características do projeto (Freitas, Carvalho & Guedes, 2018; Modenesi, Marques & Santos, 2012).

Os vergalhões são produzidos pelo processo de laminação a quente e suas propriedades mecânicas variam conforme a composição química da liga metálica, além do processamento termomecânico ao qual o produto é submetido. Elementos como carbono e manganês quando adicionados a liga metálica proporcionam maior resistência mecânica, contudo diminuem a soldabilidade do produto. Para contornar essa redução da soldabilidade dos vergalhões foram criadas várias normas para realizar o controle do carbono equivalente, conferindo ao aço assim uma melhor soldabilidade (Daroit, 2012).

Segundo Freitas, Carvalho e Guedes (2018) existem diferentes processos de soldagem, sendo necessário a seleção do processo (ou processos) mais adequado para uma dada aplicação, por isso é importante o conhecimento dos fatores que influenciam diretamente nas juntas de solda e conseqüentemente nas propriedades mecânicas.

Fatores como os ciclos térmicos que consiste no aquecimento e resfriamento durante o processo de soldagem (Modenesi, Marques & Santos, 2012) são importantes na soldagem dos vergalhões, pois tem relação direta nas transformações de fases que ocorrem no resfriamento da junta de solda e podem alterar o balanceamento das fases e consequentemente as propriedades do material, devido a presença de intermetálicos indesejados (Andrade *et. al.*, 2023). Na perspectiva de Araújo *et al.* (2023) a soldabilidade dos aços depende de alguns fatores, dentre eles, a composição química do material, a energia de soldagem e a taxa de resfriamento.

Somente uma parcela da energia do arco é efetivamente transferida para a solda, pois grande parte da energia fornecida acaba servindo simplesmente para aquecer o material, ocorrendo também perdas de calor para o ambiente (Alonso, 2006), esta variável é conhecida como aporte térmico, sendo calculada através do rendimento térmico do processo de soldagem e energia de soldagem.

Segundo Fonseca, Pinheiro e Silva (2016) quando é utilizado um aporte térmico elevado a velocidade de resfriamento da junta soldada é menor. O resultado é o favorecimento da precipitação de austenita, de fases intermetálicas e o crescimento do grão. Um aporte térmico baixo resulta em uma velocidade de resfriamento elevada e, consequentemente, a precipitação de austenita é dificultada e uma fração elevada de ferrita poderá ser formada.

Phillips (2023) alerta para os elementos que passaram por processo de soldagem, pois as regiões de solda são locais comuns de concentrações de tensão e provável local de iniciação de trinca por fadiga. Dessa forma, outro fator que merece atenção nos estudos sobre soldagem é a zona termicamente afetada (ZTA), pois é um local muito favorável ao surgimento de trincas por ser uma região de transição na microestrutura entre o metal de base e a zona fundida. Para o comportamento relacionado a qualidade das juntas de solda, emprega-se ensaios mecânicos que de certa maneira determinam a presença de defeitos de soldagens (Bottesini, 2010).

Além do controle dos parâmetros supracitados para se obter resultados satisfatórios nos processos de soldagem é importante a otimização da corrente elétrica, voltagem e energia de soldagem, para assim evitar solda com defeitos estruturais. Para Barbosa *et al.* (2018) uma outra preocupação relevante na soldagem é a escolha do metal de adição e dos consumíveis a serem utilizados, é importante ressaltar que o metal de adição influencia diretamente na zona fundida (ZF) e zona termicamente afetada (ZTA) e consequentemente nas propriedades mecânicas das juntas de solda.

Dessa forma este trabalho visa estudar o aporte térmico imposto através dos processos eletrodo revestido e MIG/MAG com três diferentes parâmetros de corrente na soldagem por emenda tipo traspasse em um aço vergalhão CA50, analisando os efeitos da variação de corrente nas características geométricas do cordão de solda e a integridade do cordão de solda através de inspeção visual.

2. Referencial Teórico

Na soldagem por fusão trabalha-se com fontes de calor que aquecem a junta de solda até temperaturas elevadas que permitem a fusão do metal de base e de adição, segundo Giarollo *et al.* (2022), a qualidade de uma junta soldada é diretamente influenciada pelos parâmetros de entrada durante o processo de soldagem. Em particular os processos eletrodo revestido e MIG/MAG utilizam o arco elétrico na faixa de temperaturas de 1.000 a 20.000°C. A transferência de calor da fonte para a junta causa alterações de temperatura na solda e nas regiões adjacentes do metal base, que dependem da forma com que o calor é difundido para o restante do material que está sendo soldado (Modenesi, Marques & Santos, 2012).

Na situação real a intensidade da fonte de calor na soldagem é de difícil medição, por isso utiliza-se um parâmetro denominado energia de soldagem (H) que consiste na quantidade de energia gerada pela fonte de calor por unidade de

comprimento. Considerando os valores de tensão (V) e corrente (I) relativamente constantes nos processos de soldagem a arco elétrico, a energia de soldagem é calculada pela equação (1).

$$H = \frac{V \cdot I}{v} \quad (1)$$

Em que v é a velocidade da soldagem.

Como somente parte da energia de soldagem é transferida para a junta de solda (Resende & Scotti, 2015), a partir deste aspecto determina-se a energia imposta de soldagem ou aporte térmico (H_L), definido como o calor cedido à junta soldada por unidade de comprimento (Debroy & David, 1985; Modenesi, Marques & Santos, 2012). O Aporte térmico é dado pela equação 2.

$$H_L = \left(\frac{V \cdot I}{v}\right) \cdot \eta \quad (2)$$

Onde η é o rendimento térmico da soldagem do processo utilizado, que é determinado por métodos colorimétricos. De 1 e 2 obtemos a equação 3.

$$H_L = H \cdot \eta \quad (3)$$

O Quadro 1 apresenta o rendimento térmico de alguns processos de soldagem, onde podemos perceber uma proximidade entre os processos eletrodo revestido e MIG/MAG, existindo um melhor rendimento neste último.

Quadro 1 - Rendimento térmico dos processos de soldagem mais usuais.

PROCESSO	RENDIMENTO TÉRMICO (η)
Soldagem MIG/MAG (GMAW)	0,75-0,95
Soldagem Eletrodo Revestido (SMAW)	0,70-0,90
Soldagem Arco Submerso (SAW)	0,85-0,98
Soldagem TIG (CC-)(GTAW)	0,50-0,80

Fonte: Adaptado de Debroy & David, 1985 e Modenesi, Marques & Santos, 2016.

O aporte térmico está diretamente ligado ao controle de qualidade, pois a energia imposta de soldagem é inversamente proporcional as taxas de resfriamento na solda, pois quanto maior o aporte, menor a taxa de resfriamento (Fonseca, Pinheiro & Silva, 2016), o que implica a formação de microestruturas austeníticas ou estruturas grosseiras na zona fundida (ZF) e zona termicamente afetada (ZTA). Mudanças na estrutura dos aços afetam diretamente as propriedades mecânicas, por isso a importância do controle do aporte térmico na soldagem a arco elétrico.

Maior aporte térmico resulta em maior crescimento de grãos e menor propriedades mecânicas como a tenacidade do material. Além disso as variações na temperatura causam variações dimensionais e alterações microestruturais localizadas que resultam em efeitos indesejados como distorções, diminuição da ductilidade, tenacidades, resistência mecânica e deterioração das propriedades químicas e mecânicas (Modenesi, Marques & Santos, 2012).

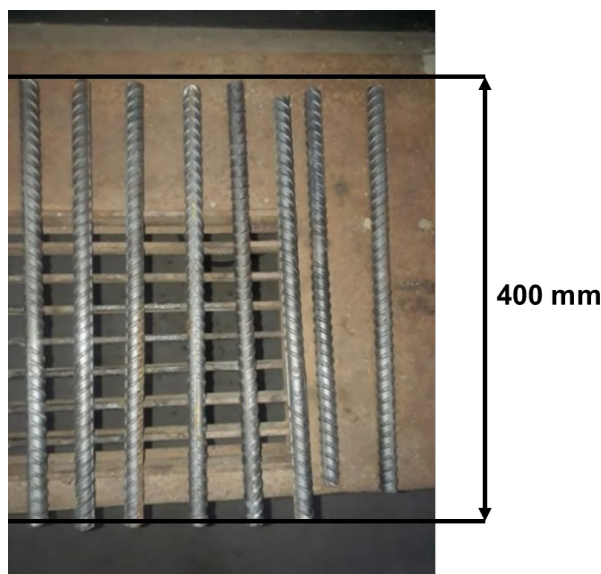
O controle do aporte térmico pode ser feito com o pré-aquecimento do metal de base para a redução da taxa de resfriamento na ZTA, principalmente em aços com alto teor de carbono, isso previne a formação de trincas pela diminuição de martensita grosseira e porosidade, reduzindo as tensões residuais no contorno entre metal de base e metal de adição na junta de solda, o que garante as propriedades mecânicas desejadas.

3. Materiais e Métodos

3.1 Procedimentos Experimentais

O metal de base utilizado foi o aço vergalhão CA50, é um aço estrutural muito empregado na construção civil e que possui como característica boa tenacidade, boa resistência a tração, compressão e flexão (Silva *et. al.*, 2021). Este aço apresenta boa soldabilidade por apresentar carbono equivalente na faixa de 0,41–0,45. As amostras foram retiradas de uma vara de 12 m de aço vergalhão CA50 com 16mm de diâmetro adquirida no mercado de serralheria. Foram cortadas com máquina esmerilhadeira 12 (doze) peças de 400 mm, conforme Figura 1.

Figura 1 – Amostras retiradas do aço vergalhão CA50.



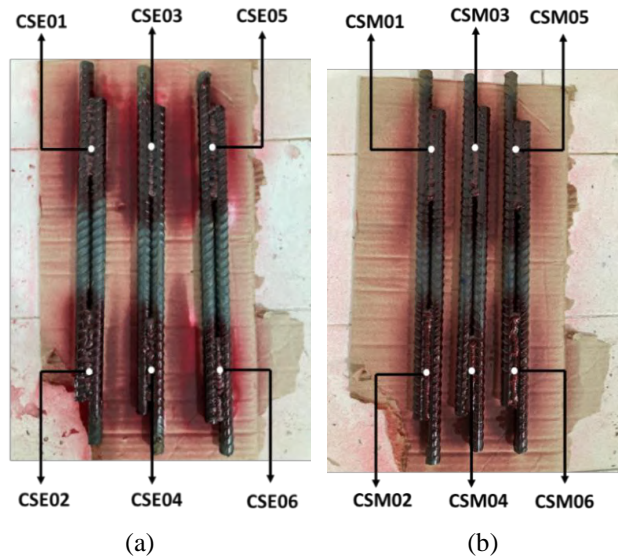
Fonte: Autores.

O cordão médio de solda foi aproximadamente 100mm, pois com a velocidade de soldagem o eletrodo se consumia rapidamente, permitindo fazer um cordão de solda de 80 mm a 120 mm. As correntes de soldagem do processo eletrodo revestido foram definidas a partir da faixa de corrente especificada pelo fabricante com a polaridade direta na corrente variada em 85A, 95A e 105A, essa faixa foi adotada em função da escolha do eletrodo AWS E11018-M de 2,5mm de espessura recomendado para utilização da soldagem de aço segundo a norma AWS A 5.1 (2012) que trata sobre especificações para eletrodo de aço carbono.

Já para a soldagem com o processo MIG/MAG a corrente mínima adotada foi de 143A em função do diâmetro do arame usado de 1,00 mm. A corrente no MIG/MAG foi variada em 143A, 170A e 200A, a partir dos valores de velocidade de alimentação do arame adotada. O valor da tensão foi ajustado de forma sinérgica com a mudança da corrente com tensões de 20,4V, 23,5V e 26V, respectivamente. Para Silvério *et. al.* (2021) independentemente da técnica utilizada, estudos têm demonstrado que a configuração da máquina de soldagem parece exercer influência no processo de soldagem.

A solda MIG/MAG foi realizada através da Máquina MEGA-ARC 250-4, com gás inerte, sendo mistura de Ar/25%CO₂ (C25) com vazão de 13 l/min, esta mistura de gás é universalmente conhecida para a soldagem MIG/MAG de aços. O tempo de cada cordão de solda produzido com comprimento médio de 100mm foi cronometrado para que fosse possível o cálculo da velocidade de soldagem empregada manualmente em cada caso. A Figura 2 apresenta as amostras soldada com os dois parâmetros de soldagem. O código CSE corresponde ao processo eletrodo revestido e CSM ao MIG/MAG.

Figura 2 – Identificação dos cordões de solda dos processos Eletrodo Revestido (a) e MIG/MAG (b).



Fonte: Autores.

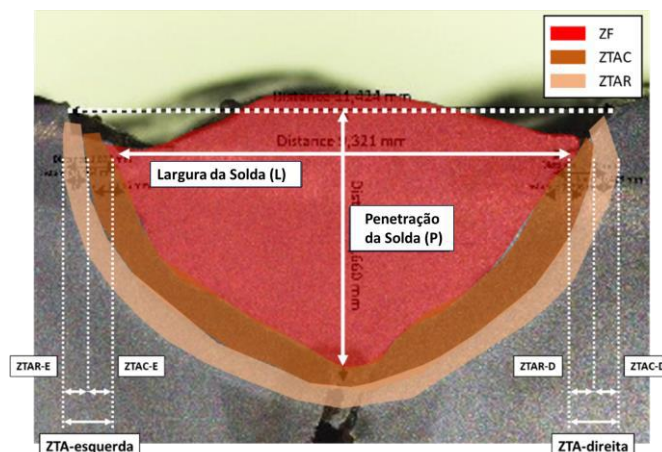
3.2 Caracterização macroestrutural

Foi realizado a metalografia em 36 amostras, sendo 18 amostras do processo eletrodo revestido com 6 amostras de cada especificação de corrente elétrica e 18 amostras do processo MIG/MAG com 6 amostras de cada especificação de corrente. As superfícies de interesse das amostras foram preparadas utilizando lixas com granulometrias 80, 120, 240, 400, 600 e 1200, nesta ordem, e polidas em politriz com solução de alumina de $0,5\mu$.

Após lixamento e polimento, foi realizado o ataque químico pelo processo de esfregaço com algodão embebido em NITAL 3% na superfície polida. Para a revelação da macroestrutura, a amostra foi mantida sob ataque químico por 20 segundos. Após realizado o ataque químico, as macrografias das amostras foram obtidas utilizando um estereoscópio Binocular marca ZEISS, modelo Stemi 508, acoplado ao *software* ZEN 2 LITE, com ampliação de 6,3X.

As medições das zonas de interesse na seção transversal do cordão de solda/substrato foram realizadas conforme ilustrado na Figura 3, em que ZF corresponde à zona fundida, ZTAC é a zona termicamente afetada de crescimento de grãos, ZTAR é a zona termicamente afetada de recristalização, L é a largura da solda e P é a penetração da solda. Os índices “D” e “E” correspondem à posição no cordão de solda, direito e esquerdo, respectivamente.

Figura 3 – Técnica empregada para as medições das zonas de interesse.



Fonte: Autores.

4. Resultados e Discussão

4.1 Velocidade de soldagem

A velocidade aproximada da soldagem foi obtida calculando a razão entre a distância percorrida durante o consumo do eletrodo/arame que originou o cordão de solda e o tempo de deslocamento, que foi medido por cronômetro digital. A Tabela 1 apresenta os dados obtidos e a velocidade de soldagem para o processo eletrodo revestido.

Tabela 1 - Cálculo da velocidade de soldagem do processo eletrodo revestido.

CP	Corrente (A)	Cumprimento (cm)	Tempo (s)	Velocidade (cm/s)	Média Velocidade de Soldagem (cm/s)
CSE01	85	9	40	0,225	0,25±0,05
CSE02	85	10	36	0,278	
CSE03	95	9,5	28	0,339	0,31±0,05
CSE04	95	9	32	0,281	
CSE05	105	10	25	0,400	0,40±0,05
CSE06	105	11	27	0,407	

Fonte: Autores.

A Tabela 2 apresenta os dados obtidos e a velocidade de soldagem para o processo MIG/MAG considerando a alimentação do arame na máquina de soldagem.

Tabela 2 - Cálculo da velocidade de soldagem do processo MIG/MAG.

CP	Alimentação do Arame (m/min)	Cumprimento (cm)	Tempo (s)	Velocidade (cm/s)	Média Velocidade de Soldagem (cm/s)
CSM01	3,5	12,5	42	0,298	0,29±0,05
CSM02	3,5	10,5	36	0,292	
CSM03	4,5	10	28	0,350	0,34±0,05
CSM04	4,5	11	32	0,344	
CSM05	5,5	10,5	25	0,420	0,41±0,05
CSM06	5,5	11	27	0,404	

Fonte: Autores.

O aumento da corrente elétrica no processo eletrodo revestido e MIG/MAG resultou no aumento da velocidade de soldagem, isto se deve principalmente à maior taxa de fusão e deposição de material na poça de fusão. Segundo Silva *et. al.* (2018) aumentos na velocidade de soldagem tem impacto negativo nos principais parâmetros geométricos do cordão.

4.2 Aporte Térmico (H_L)

A energia de soldagem foi calculada pela equação (1). O aporte térmico (H_L) é o produto da energia de soldagem pelo rendimento térmico. Considerando o rendimento térmico da soldagem com Eletrodo Revestido de 0,80 conforme média do Quadro 1, foram obtidos os seguintes resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Cálculo do aporte térmico para o processo eletrodo revestido.

CP	Corrente (I)	Tensão (V)	Velocidade (cm/s)	Aporte térmico (kJ/cm)
CSE01	85	24,4	0,225	7,374
CSE02	85	24,4	0,278	5,973
CSE03	95	24,4	0,339	5,466
CSE04	95	24,4	0,281	6,593
CSE05	105	24,4	0,400	5,124
CSE06	105	24,4	0,407	5,031

Fonte: Autores.

A Tabela 4 apresenta os valores do aporte térmico do processo MIG/MAG, considerando o rendimento térmico de 0,85 conforme média do Quadro 1.

Tabela 4 - Cálculo do aporte térmico para o processo MIG/MAG.

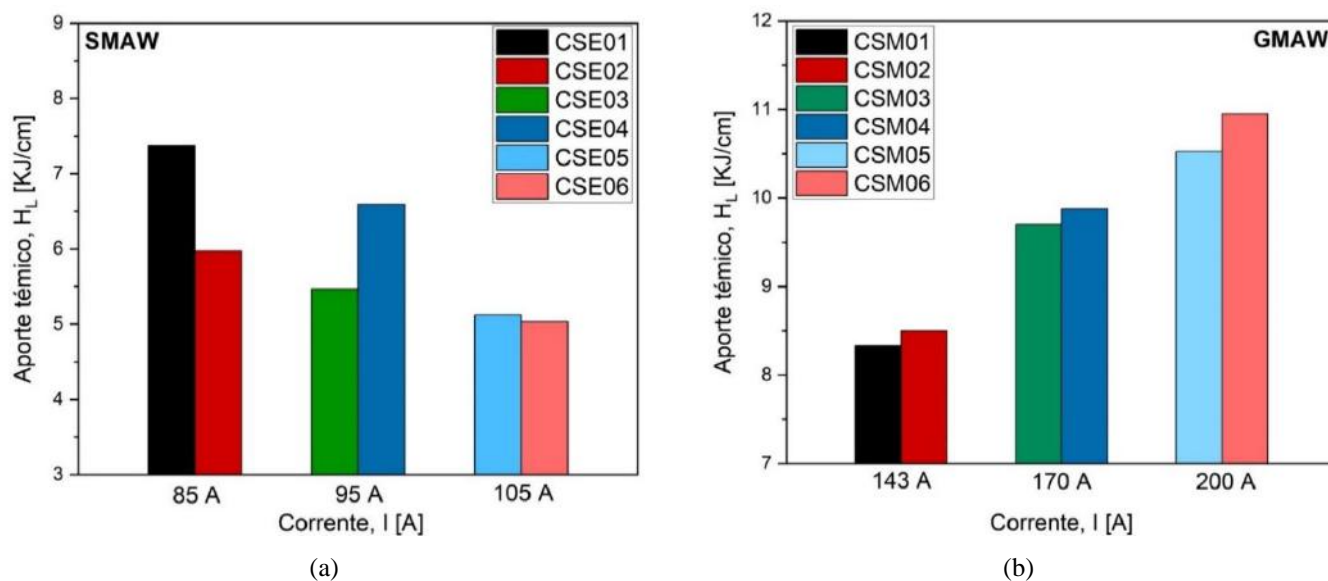
CP	Corrente (I)	Tensão (V)	Velocidade (cm/s)	Aporte térmico (kJ/cm)
CSM01	143	20,4	0,298	8,332
CSM02	143	20,4	0,292	8,502
CSM03	170	23,5	0,350	9,702
CSM04	170	23,5	0,344	9,879
CSM05	200	26	0,420	10,524
CSM06	200	26	0,404	10,949

Fonte: Autores.

Os gráficos da Figura 4 apresentam os aportes térmicos em função da corrente elétrica dos processos eletrodo revestido e MIG/MAG com os dados das tabelas 3 e 4. Apesar dos esforços para padronizar as condições de soldagem, observou-se que a velocidade de soldagem não se manteve rigorosamente constante, mesmo para conjuntos de parâmetros idênticos. Este fenômeno pode ser atribuído à natureza do procedimento manual de soldagem adotado neste trabalho, que impõe desafios significativos na manutenção de velocidades de soldagem uniformes.

A execução manual da soldagem, inerentemente sujeita a variações devido à intervenção humana, pode levar a pequenas variações nas velocidades, impactando no aporte térmico. Este aspecto sublinha a complexidade de realizar experimentos de soldagem sob condições perfeitamente controladas e destaca a importância de considerar tais variações na análise dos resultados comparativos entre os processos eletrodo revestido e MIG/MAG.

Figura 4 - Gráfico do aporte térmico em função da corrente de soldagem dos processos eletrodo revestido (a) e MIG/MAG (b).



Fonte: Autores.

A alimentação automática do metal de adição e a melhor empunhadura da tocha do equipamento MIG/MAG, em relação ao avanço manual do eletrodo e ao alicate do eletrodo revestido, possibilitam um melhor controle da velocidade de soldagem por parte do soldador, garantindo maior similaridade dos aportes térmicos para um mesmo conjunto de parâmetros de soldagem.

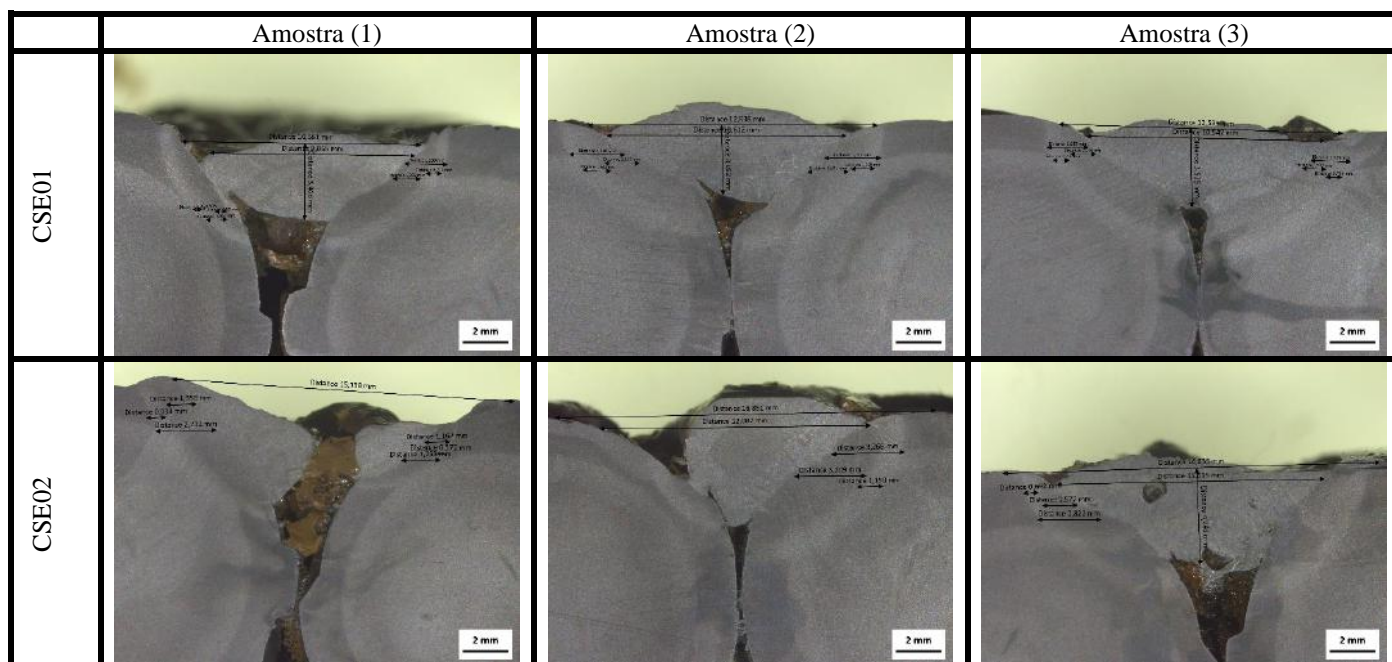
4.3 Análise Macrografia

4.3.1 Macrografia do processo eletrodo revestido

Nos Quadros 2, 3 e 4 são apresentadas as macroestruturas de seis amostras do processo eletrodo revestido nas correntes de 85A, 95A e 105A respectivamente. Ao todo foram obtidas 3 imagens de cada cordão de solda, sendo que em cada parâmetro de corrente foram confeccionados dois cordões de solda. No parâmetro de corrente 85A o cordão de solda apresentou inclusão de escória além de falta de fusão, ocasionando mordeduras e penetração de solda quase inexistente, não atendendo ao que indica a norma ABNT NBR 6118:2003 sobre a penetração de solda em um vergalhão de 16mm.

Houve a formação da zona termicamente afetada (ZTA) de forma irregular, o que impossibilitou uma medição com precisão desta região, ainda assim, nas poucas regiões da ZTA identificadas mediu-se a largura desta zona. No Quadro 2 podemos visualizar a macrografia do processo eletrodo revestido no parâmetro de soldagem 85A. Os códigos CSE01 e CSE02 indicam o cordão de solda no parâmetro de 85A e a numeração 1, 2 e 3 indica cortes transversais ao longo do cordão de solda, em que foi obtido na extremidade esquerda, 2 na região central e 3 na extremidade direita.

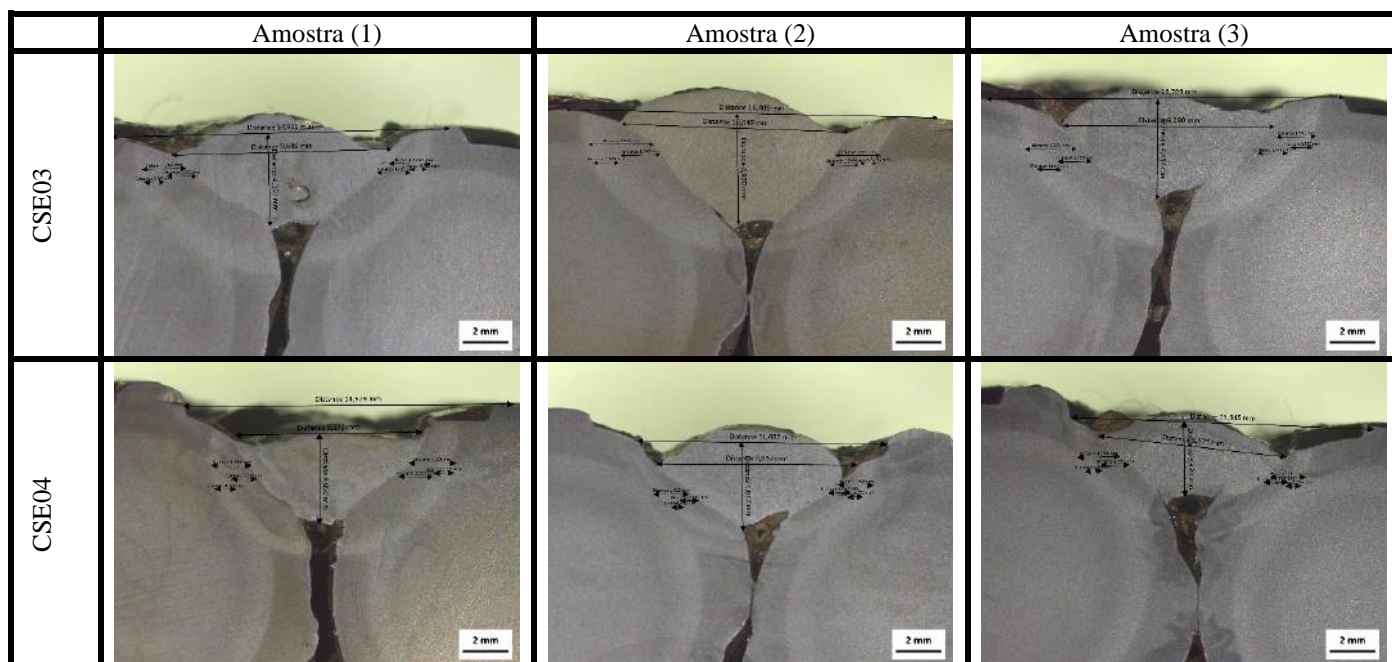
Quadro 2 - Macrografia do processo eletrodo revestido 85A: CSE01; CSE02.



Fonte: Autores.

O Quadro 3 apresenta as macrografias do cordão de solda do processo eletrodo revestido no parâmetro de corrente 95A. Nesta solda é possível observar a presença de poros que são resultados do aprisionamento mecânico, supersaturação de gases dissolvidos ou gases produzidos por reações químicas. A natureza e quantidade de poros no metal de solda dependem de processos relacionados ao tempo, que são: nucleação, crescimento, transporte e coalescência (crescimento) dos poros (Silva & Maciel, 2023). Neste parâmetro continuou a inclusão de escoria, contudo em menor quantidade comparado com o cordão produzido com o parâmetro de 85A. A penetração foi inferior àquela proposta pela norma, mas com uma pequena diferença de 12,5%. Houve a formação da ZTA mais regular e possibilitou medições com maior precisão. Os códigos CSE03 e CSE04 indicam o cordão de solda no parâmetro de 95A.

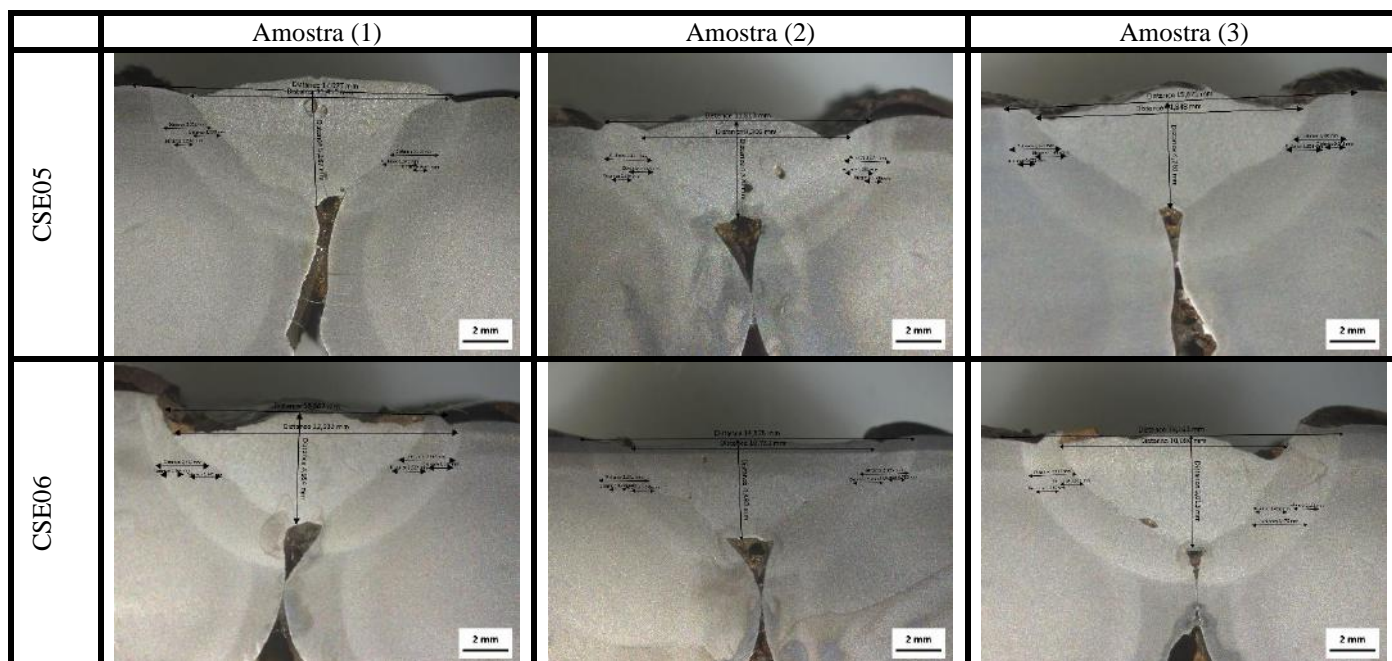
Quadro 3 - Macrografia do processo eletrodo revestido 95A: CSE03; CSE04.



Fonte: Autores.

No Quadro 4 apresenta-se a macrografia no parâmetro de 105A, este não apresentou inclusão de escória, contudo ainda se formaram poros, mas em menor proporção comparado aos outros cordões de solda do processo eletrodo revestido. Na amostra 3 do cordão CSE06 existe falta de deposição lateral na margem da solda. A penetração neste parâmetro de corrente atendeu à norma, com 4,857mm. A ZTA foi mais simétrica e de maior dimensão. Ressalta-se que a norma recomenda que a penetração seja pelo menos 30% do diâmetro do vergalhão ($0,3\Phi$), portanto maior ou igual a 4,8mm de penetração para o vergalhão de 16mm. Os códigos CSE05 e CSE06 indicam o cordão de solda no parâmetro de 105A.

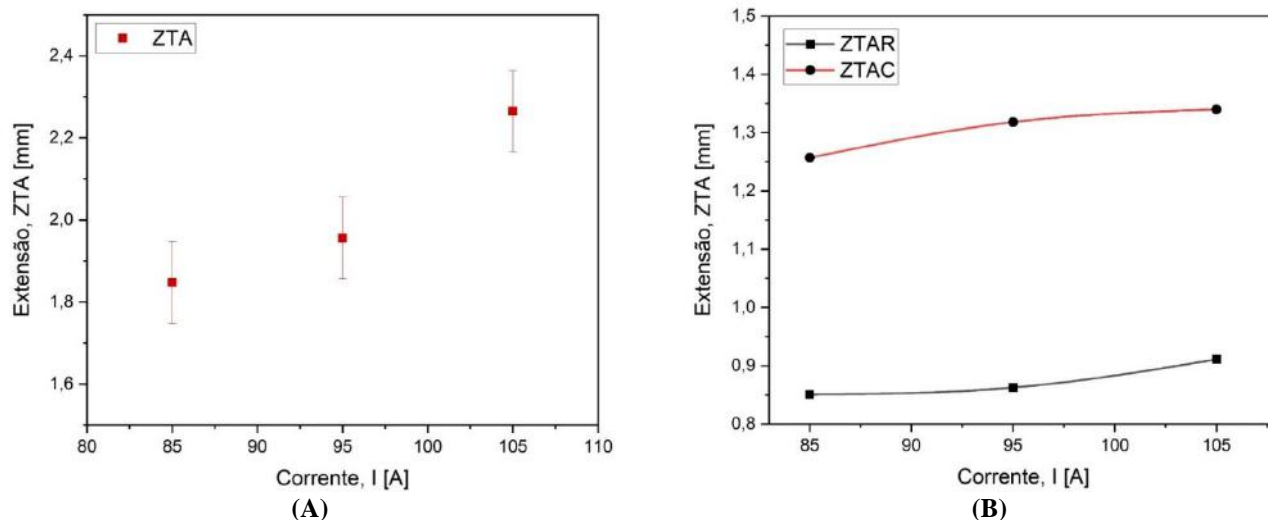
Quadro 4 - Macrografia do processo eletrodo revestido 105A: CSE05; CSE06.



Fonte: Autores.

Os gráficos seguintes apresentam a relação entre ZTA, ZTAC, ZTAR, penetração e corrente de soldagem. A Figura 5A apresenta a extensão da ZTA em função da corrente de soldagem, neste gráfico o aumento da corrente elétrica tem relação direta com o aumento da extensão da ZTA, sendo que o aumento da corrente de 85A para 95A houve uma pequena variação na extensão da ZTA e em 105A um aumento significativo.

Figura 5 – Geometria do cordão de solda: extensão da ZTA x Corrente (A); ZTAR e ZTAC x Corrente (B).

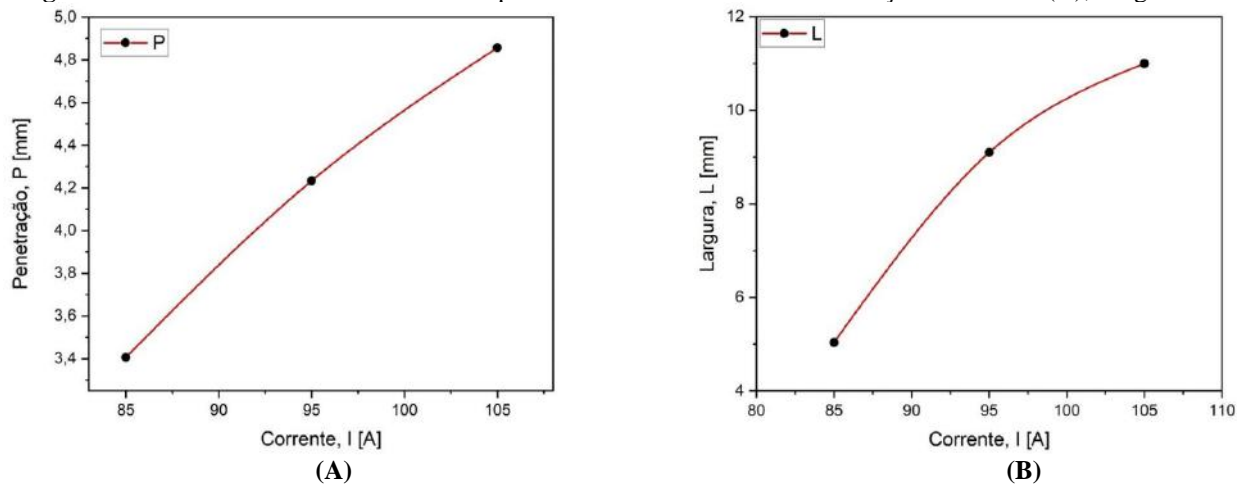


Fonte: Autores.

Na Figura 5B apresenta o gráfico da ZTAC e ZTAR em função da corrente de soldagem, onde é possível perceber uma linearidade das duas zonas com o aumento da corrente elétrica e a diferença de extensão entre as duas zonas, sendo a ZTAR de menor extensão, abaixo de 1mm. É importante ressaltar que o cordão de solda com uma ZTAR mais extensa possibilita melhores propriedades mecânicas.

O Gráfico da Figura 6A expõe a penetração da solda, onde podemos observar que o aumento da corrente de soldagem influencia diretamente no aumento da penetração. Verifica-se que não houve penetração total da solda nas correntes de 85A e 95A entre os vergalhões, como recomenda a norma para soldagem tipo traspasse. Somente para o parâmetro de corrente de 105A houve conformidade com a norma no aspecto de penetração, com a medida de 4,857mm, corroborado pelo gráfico da Figura 6A.

Figura 6 - Geometria do cordão de solda do processo eletrodo revestido: Penetração x Corrente (A); Largura x Corrente (B).



Fonte: Autores.

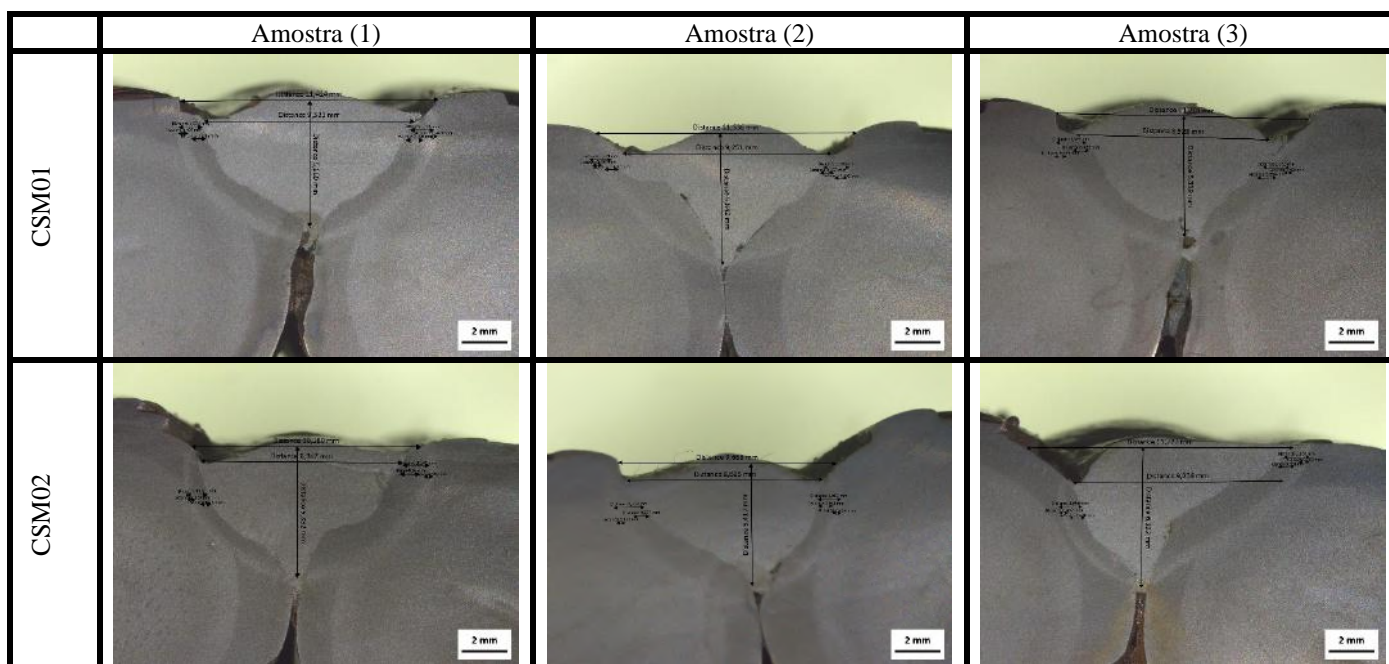
A Figura 6B apresenta-se a largura da solda em função da corrente, e da mesma forma que a penetração, existe um aumento linear da largura com o aumento da corrente. Com o aumento de 20A a partir da corrente mais baixa utilizada (85A) a largura dobrou de tamanho, apresentando a partir de 105A uma excelente largura da solda em relação aos outros parâmetros utilizados no processo eletrodo revestido.

4.3.2 Macrografia do processo MIG/MAG

Para o processo MIG/MAG, a inspeção visual não revelou falhas de fusão ou presença de salpicos e trincas nos cordões de solda, indicando uma aplicação mais uniforme e consistente da soldagem nesses parâmetros.

A macrografia do processo MIG/MAG no parâmetro 143A apresentou boa penetração, sendo melhor que o mínimo indicado de 4,8mm para o vergalhão de diâmetro 16mm. A ZTA apresentou variações de largura. Os códigos CSM01 e CSM02 indicam o cordão de solda no parâmetro corrente 143A e a numeração 1, 2 e 3 indica a amostra ao longo do cordão de solda, seguindo o mesmo padrão de identificação que o adotado para o processo eletrodo revestido. No Quadro 5 podemos visualizar a macrografia do processo MIG/MAG no parâmetro de corrente 143A.

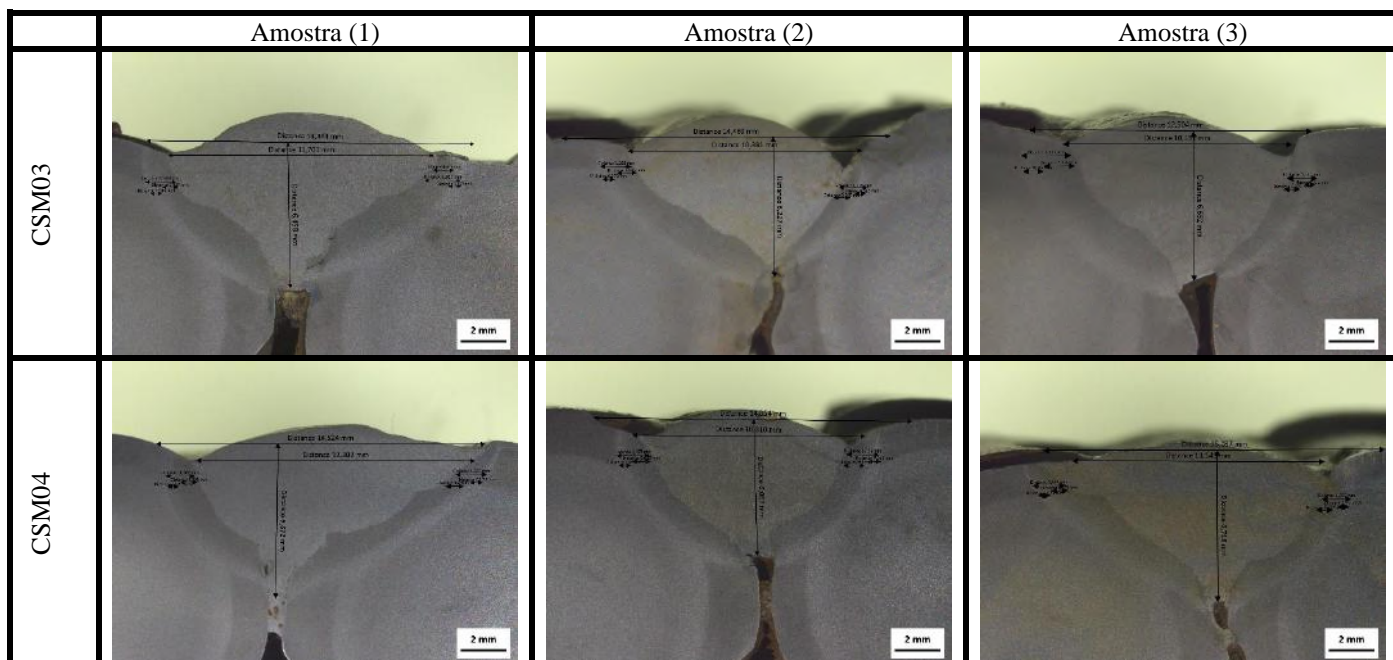
Quadro 5 - Macrografia do processo MIG/MAG com alimentação do arame de 3,5 m/min, corrente de 143A: CSM01; CSM02.



Fonte: Autores.

No parâmetro de 170A os cordões de solda apresentaram melhor aspecto visual, quando comparados aos cordões fabricados sob 143A, e atendeu ao quesito de penetração da norma. A região termicamente afetada foi simétrica e sem a presença de poros. O Quadro 6 apresenta a macrografia do processo MIG/MAG no parâmetro de alimentação do arame em 4,5 m/min, os códigos CSM03 e CSM04 indicam o cordão de solda no parâmetro corrente 170A.

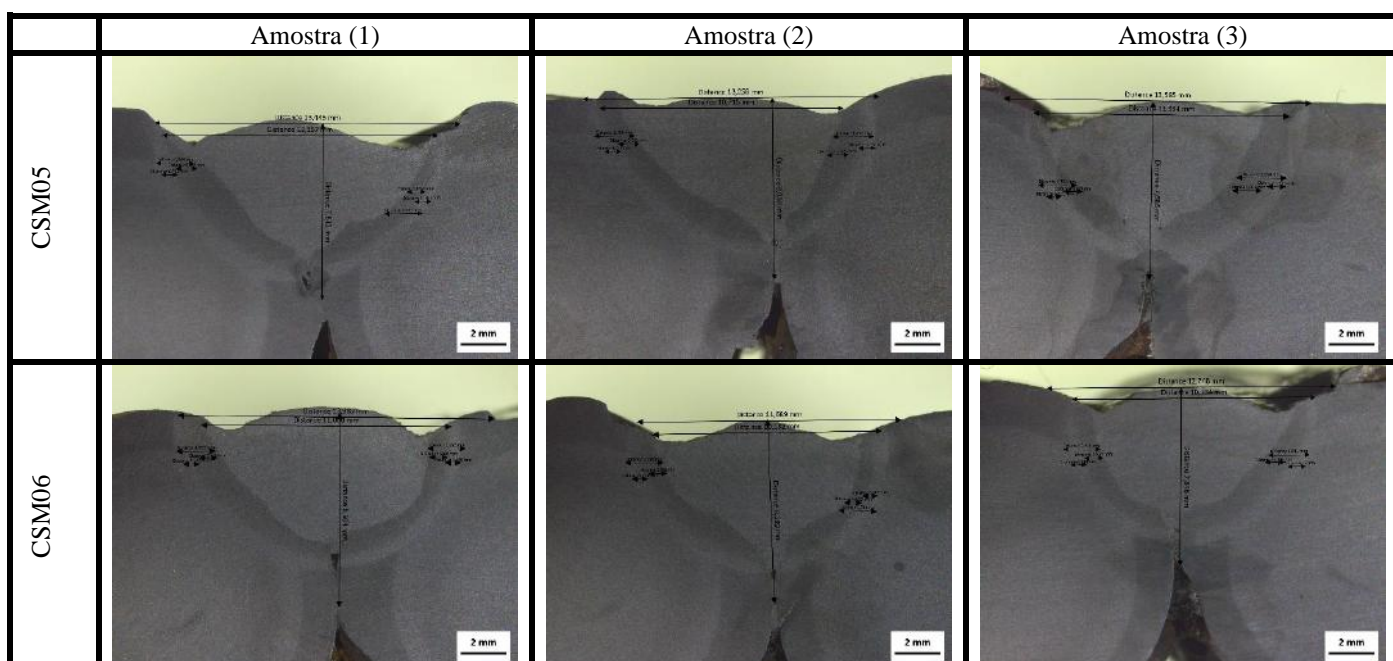
Quadro 6 - Macrografia do processo MIG/MAG no parâmetro de alimentação do arame de 4,5 m/min, corrente de 170A: CSM03; CSM04.



Fonte: Autores.

No parâmetro de 200A não houve falta de fusão interna entre o metal de base e o material depositado. A penetração foi o dobro da recomendação da norma e houve um aumento da ZTA. O Quadro 7 apresenta a macrografia do processo MIG/MAG no parâmetro de alimentação do arame em 5,5 m/min e os códigos CSM05 e CSM06 indicam o cordão de solda no parâmetro corrente 200A.

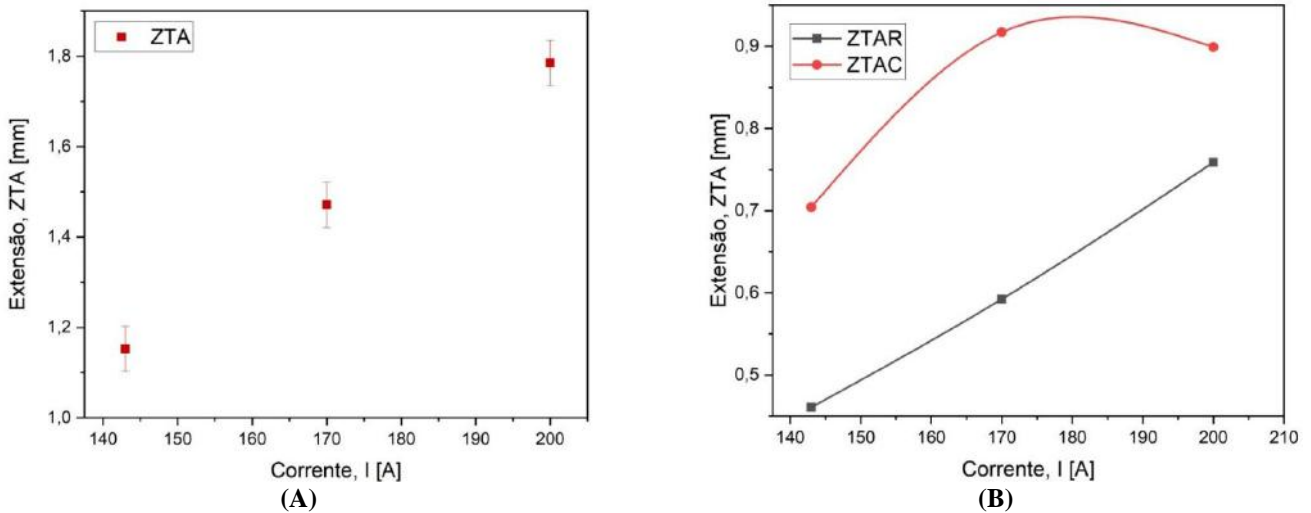
Quadro 7 - Macrografia do processo MIG/MAG no parâmetro de alimentação do arame de 5,5 m/min, corrente de 200A: CSM05; CSM06.



Fonte: Autores.

Os gráficos seguintes apresentam a relação entre corrente e ZTA, ZTAC, ZTAR, penetração e largura com o processo de soldagem MIG/MAG. No gráfico da Figura 7A percebe-se que a extensão da ZTA aumentou com a elevação da corrente de soldagem, maiores correntes indicam maior extensão da ZTA, este aumento deu-se de forma quase que linear.

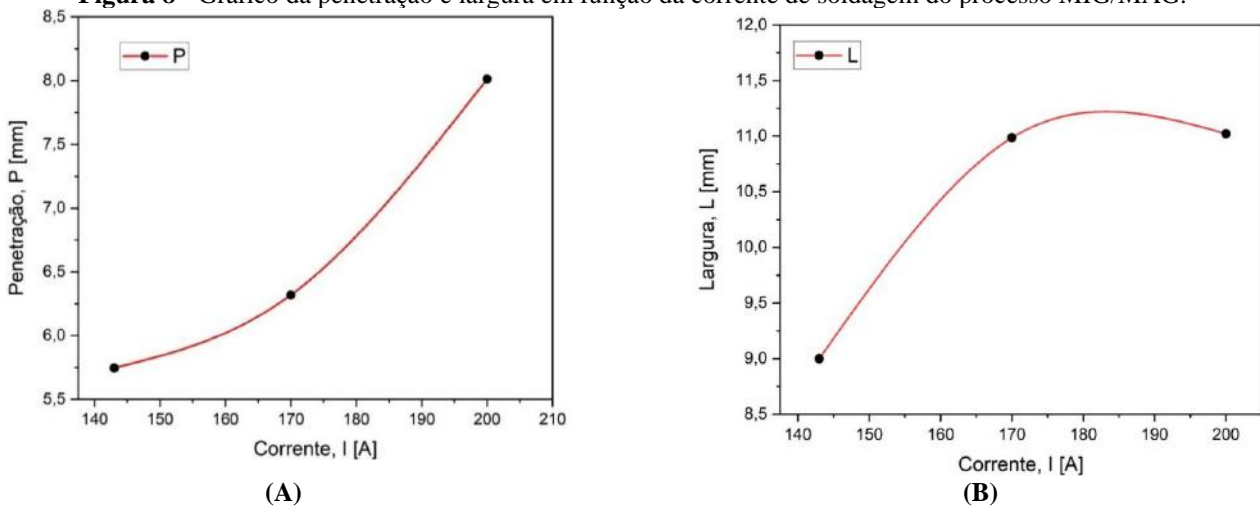
Figura 7 – Geometria do cordão de solda do processo MIG/MAG: extensão da ZTA x Corrente (A); ZTAR e ZTAC x Corrente (B).



Fonte: Autores.

As extensões da ZTAC e ZTAR apresentaram aumento com a corrente, como apresentado na Figura 7B. A zona termicamente afetada com crescimento de grãos indicou tendência de diminuição com o aumento da corrente a partir de 170A e possível constância. A soldagem MIG/MAG com corrente de 200A apresentou a menor relação ZTAC/ZTAR, isto é, uma melhor simetria entre as regiões de crescimento de grãos e de recristalização. A penetração também aumentou com a elevação da corrente elétrica, como indicado no gráfico da Figura 8A, sendo que todos os cordões de solda atenderam à norma de pelo menos 4,8mm de penetração para o vergalhão de 16mm de diâmetro. Vale ressaltar que o aumento da corrente elétrica influencia o aumento do aporte térmico, havendo incremento dos valores de penetração e largura da solda, conforme Farias (2021).

Figura 8 - Gráfico da penetração e largura em função da corrente de soldagem do processo MIG/MAG.



Fonte: Autores.

O gráfico da Figura 8B apresenta a largura da solda em função da corrente de soldagem, existindo um aumento no parâmetro de 170A e uma estabilidade na faixa de 11mm. Estes resultados corroboram com Farias (2021) uma vez que a elevação do aporte térmico exerce efeito positivo sobre a formação da penetração e largura dos cordões de solda obtidos.

5. Conclusão e Sugestão

Este estudo investigou a viabilidade e a eficácia dos processos de soldagem Eletrodo Revestido e MIG/MAG na emenda de vergalhões de aço CA50, amplamente utilizados na construção civil. Os parâmetros de corrente avaliados para o processo eletrodo revestido foram de 85A, 95A e 105A, enquanto para o MIG/MAG foram de 143A, 170A e 200A. Os resultados obtidos revelaram aspectos cruciais sobre a qualidade dos cordões de solda e a conformidade com as normas técnicas vigentes.

O aporte térmico no processo eletrodo revestido foi mais influenciado pela velocidade de soldagem devido as baixas correntes utilizadas, enquanto o processo MIG/MAG teve influencia direta do aumento da corrente, maiores correntes de soldagem indicam maior aporte térmico.

No processo eletrodo revestido, observou-se que os parâmetros de 85A e 95A não proporcionaram uma penetração adequada, conforme estipulado pela norma ABNT NBR 6118:2003, evidenciando a presença de falhas como falta de fusão e porosidade. Contrariamente, o parâmetro de 105A demonstrou ausência de defeitos superficiais significativos e atendeu ao critério de penetração, sugerindo que aumentos na corrente elétrica poderiam melhorar os resultados.

Por outro lado, o processo MIG/MAG mostrou-se promissor em todos os parâmetros de corrente testados, produzindo cordões de solda com boa aparência visual comprovadas na inspeção visual, além de penetração e largura de solda adequada, superando as expectativas da norma. Este processo também se destacou pela ausência de falhas significativas.

Considerando as condições operacionais e os resultados obtidos, o processo eletrodo revestido no parâmetro de 85A e 95A mostrou-se inadequado para aplicações devido à ocorrência de falta de fusão e porosidade. No entanto, ajustes no parâmetro de 105A podem torná-lo viável, desde que sejam adotadas medidas para evitar defeitos como falta de fusão.

Em contraste, o processo MIG/MAG apresentou excelente desempenho em todos os parâmetros testados, indicando uma alta confiabilidade para a soldagem do aço vergalhão CA50 por emenda tipo traspasse. Dessa forma, este processo é altamente recomendado para uso no setor da construção civil nos parâmetros utilizados.

Para futuras pesquisas, sugere-se a exploração de outros processos de soldagem aplicáveis à construção civil, como TIG e soldagem por arco elétrico com arame tubular, além da análise detalhada das micro e macroestruturas formadas e da avaliação de propriedades mecânicas por meio de ensaios de flexão e dobramento em vergalhões CA50 soldados por emendas tipo traspasse.

Referências

- Alonso, M. B (2006). *Caracterização de união por solda de tópo em barras CA-50 com eletrodos revestidos* (Doctoral dissertation, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.).
- Andrade, A. D. S., Medeiros, J. L. B., Biehl, L. V., Souza, J. D., Pacheco, D. D. J., & Martins, C. O. D. (2023). Análise mecânica e metalúrgica da união soldada entre um aço inoxidável duplex S32205 com metal de adição de aço inoxidável superaustenítico ER-385-904L. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 28, e20220307.
- Araújo, F. D. A., Amorim, M. O. D., Cruz, R. M. D. A., Alves, A. D. N. S., Brandi, S. D., & Soeiro, J. C. (2023). Análise da soldagem multipasse utilizando delineamento experimental na manutenção de aço ASTM A131 Grau A. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 27(2), e13210.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 6118 (2003). Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.
- Aws (2012). Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding, American Welding Society, Doral.

- Barbosa, L. H. S., Modenesi, P. J., Godefroid, L. B., & Borba, T. M. D. (2018). Microestrutura e características mecânicas da zona fundida de um aço naval soldado ao arco submerso com aporte térmico muito elevado. *Soldagem & Inspeção*, 23, 168-179.
- Bottesini, A. (2010). Ensaio de Dobramento, UFF.
- Daroit, R. S. (2012). Análise de estruturas viscoelásticas [dissertação de mestrado]. *Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul*.
- Silverio, M. G., Raposo, L. H. A., Lopes, R. T., & Júnior, P. C. S. (2021). Evaluation of X-shaped welded joints with Co-Cr alloy under different welding parameters: Analysis by micro-CT and flexural strength. *Research, Society and Development*, 10(4), e44510414308-e44510414308.
- DebRoy, T., & David, S. A. (1995). Physical processes in fusion welding. *Reviews of modern physics*, 67(1), 85.
- Farias, T. A., Silva, A. C. S. D., Figueredo, E. W. A., Pereira, M., & Silva, F. J. D. (2021). Efeito da Velocidade de Soldagem nas Características Geométricas e Microestruturais de Soldas por Arco Submerso em Tandem Arc. *Soldagem & Inspeção*, 26, e2609.
- Fonseca, C. S., Pinheiro, I. P., & Silva, S. N. D. (2016). Influência do aporte térmico sobre a morfologia da austenita e na quantidade das fases em chapas soldadas de aço inoxidável duplex SAF2205. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 21(1), 227-234.
- Freitas, R.; Carvalho, R.; Guedes. (2018). Análise metalográfica de um perfil soldado por eletrodo revestido. *Revista Científica Semana Acadêmica*. Nº. 140.
- Giarollo, D. F., Hackenhaar, W., Mazzaferro, C. C., & Mazzaferro, J. A. (2022). Bead Geometry Prediction in Pulsed GMAW Welding: A Comparative Study on the Performance of Artificial Neural Network and Regression Models. *Soldagem & Inspeção*, 27, e2722.
- Kulmann Filho, M. A. D. R., & Machado, I. G. (2024). Resistência ao Impacto Estrutural de Perfis I Soldados. *Soldagem & Inspeção*, 29, e2903.
- Marques, P. Modenesi, P. J.; & Bracarense, A. Q. (2016). Soldagem fundamentos e tecnologia. (4a ed.), Editora UFMG.
- Modenesi, P. J., Marques, P. V., & Santos, D. B. (2012). Introdução à metalurgia da soldagem. *Belo Horizonte: UFMG*.
- Phillips, D. H. (2023). *Welding engineering: an introduction*. John Wiley & Sons.
- Resende, A. A. D., & Scotti, A. (2015). Influência dos Níveis das Correntes, Ângulo de Inclinação da Tocha e Distância entre a Tocha e Peça sobre a Geometria do Cordão de Solda Usando "Plasma-MIG" com Arcos Concêntricos. *Soldagem & Inspeção*, 20(4), 501-514.
- Silva, A. C. S. D., Figueredo, E. W. A., Silva Júnior, D. C. D., Hermenegildo, T. F. D. C., & Santos, T. F. D. A. (2018). Soldagem helicoidal de tubos produzida em campo do aço ASTM A-1018 e sua correlação com características mecânicas e microestruturais das juntas soldadas. *Soldagem & Inspeção*, 23, 364-379.
- Silva, E. B. D., & Maciel, T. M. (2023). Influência da velocidade de correntes de ar sobre a porosidade em juntas soldadas pelo processo MIG/MAG. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 27, e13225.
- Silva, L. G. P., de Lima, D. M., da Silva Medeiros, I., & López-Yáñez, P. A. (2021). Solução estrutural de galpão em aço. *Research, Society and Development*, 10(8), e54810817765-e54810817765.
- Silvério, M. G., Raposo, L. H. A., Lopes, R. T., & Júnior, P. C. S. (2021). Evaluation of X-shaped welded joints with Co-Cr alloy under different welding parameters: Analysis by micro-CT and flexural strength. *Research, Society and Development*, 10(4), e44510414308-e44510414308.