

COMPARATIVO DE DESEMPENHO ENTRE A SOLDAGEM GMAW SEMIAUTOMÁTICA E ROBOTIZADA NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

Marcelo Pereira Conceição

marcelo.conceicao7@fatec.sp.gov.br

Orientador: Prof. Me. Edgar de Souza Dutra

edgar.dutra@fatec.sp.gov.br

Fatec Itaquera – SP

RESUMO: Este artigo tem como objetivo apresentar uma análise comparativa entre o modo semiautomático e robotizado de soldagem GMAW ou MIG/MAG. O baixo custo em relação a outros métodos de fabricação, utilizados para união de materiais metálicos, torna este processo um dos mais utilizados e, preferidos pela indústria automobilística para fabricação de produtos e serviços. Quanto aos objetivos específicos, buscam apresentar as principais características em relação a esse processo, identificando os aspectos relacionados a produtividade, qualidade e, custos, mediante a utilização de critérios normativos, métodos e, composição dos cálculos. Consequentemente, com os resultados das análises, observa-se que a utilização de um sistema robotizado de soldagem possui maior eficiência e estabilidade durante a execução das soldas, o que reduz o número de falhas e minimiza os erros existentes, refletindo em previsões de custos finais no consumo de gás de proteção, energia elétrica, entre outros aspectos se comparado com um processo de soldagem semiautomático.

PALAVRAS-CHAVE: Produção. Qualidade. Custos.

COMPARATIVE OF PERFORMANCE BETWEEN SEMI-AUTOMATIC AND ROBOTIZED GMAW WELDING IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

ABSTRACT: This article aims to present a comparative analysis between semiautomatic and robotic GMAW or MIG/MAG welding. The low cost compared to other manufacturing methods, used for joining metallic materials, makes this process one of the most used and preferred by the automotive industry for the

manufacture of products and services. As for the specific objectives, they seek to present the main characteristics in relation to this process, identifying aspects related to productivity, quality and costs, through the use of normative criteria, methods and composition of calculations. Consequently, with the results of the analysis, it is observed that the use of a robotic welding system has greater efficiency and stability during the execution of the welds, which reduces the number of failures and minimizes the existing errors, reflecting in final cost forecasts in the consumption of shielding gas, electricity, among other aspects compared to a semi-automatic welding process.

KEY WORDS: Production. Quality. Costs.

1 INTRODUÇÃO

Com a rapidez da difusão da soldagem no último século, a utilização do processo de soldagem GMAW passou a ser um dos mais utilizados na indústria automobilística na área de fabricação por assegurar uma boa qualidade nas juntas soldadas. (ALVES, 2009).

A utilização do processo semiautomático de soldagem GMAW (*Gás Metal Arc Welding*), possui variações e características determinantes na qualidade da solda, além de possibilitar erros durante a sua execução, por se tratar de um processo que

depende especificamente da habilidade do soldador. Esses fatores tornam o processo instável e ineficiente, gerando um número alto de falhas, conseqüentemente, refugos elevando os custos do processo produtivo (ALVES, 2009).

A utilização de robôs na automatização dos processos de soldagem se tornou uma característica fundamental para se obter melhorias no controle da produção, principalmente na qualidade, devido ao nível de repetibilidade, por possuir uma fadiga muito inferior à humana, o que possibilita maior quantidade de horas trabalhadas, sem interrupções, o que aumenta a sua produtividade.

A soldagem robotizada possui grande flexibilidade e performance durante a sua aplicação na união de produtos ou conjuntos. Sua utilização na indústria a torna mais competitiva no mercado e, a redução dos custos internos é outro fator utilizado para implementar uma célula robotizada (TREMONTI; 1999).

O presente trabalho teve como objetivo realizar uma análise técnica por meio do estudo comparativo entre os modos de soldagem semiautomática e robotizada utilizando o processo de soldagem GMAW.

A metodologia foi baseada na análise comparativa dos aspectos relacionados a produtividade, qualidade e, custos mediante a utilização de métodos, composição dos cálculos e, critérios normativos para análise das macrografias obtidas das amostras dos corpos de prova retiradas das juntas soldadas.

2 METODOLOGIA

Trata-se de um estudo de caso realizado em uma empresa caracterizada como sociedade limitada, constituída em 1974, situada na zona leste de São Paulo.

A empresa é uma referência no desenvolvimento e fabricação de peças estampadas e montagens de conjuntos metálicos para indústria automotiva.

Visando destacar as características e diferenças encontradas durante o estudo comparativo das juntas soldadas nos modos de soldagem estudados, foram coletadas informações no processo produtivo, além de informações referentes às preparações e métodos utilizados.

Para o estudo em questão, iniciou-se por obter as amostras do componente a ser soldado, a partir do processo de conformação mecânica de um aço DIN EN-10149-2 S420MC, com espessura de 2,0 mm, utilizando uma ferramenta de estampagem progressiva, disposta em uma prensa excêntrica com capacidade de 300 toneladas.

Em sequência, foram analisadas as características dos equipamentos, procedimentos e, parâmetros utilizados na execução do processo produtivo de soldagem.

O modo robotizado de soldagem, foi composto por um braço robótico, combinado com uma tocha de soldagem refrigerada a ar, uma fonte de soldagem, conectada a um alimentador de arame (Figura 1).

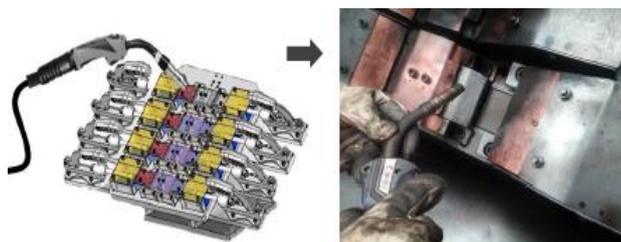
Figura 1 – Soldagem robotizada



Fonte: Elaboração própria (2022).

O modo semiautomático foi composto por um conjunto básico de soldagem, constituído por uma fonte de soldagem e um alimentador de arame, além de uma tocha MAG, conectada a um alimentador de arame (Figura 2).

Figura 2 – Soldagem semiautomática



Fonte: Elaboração própria (2022).

Foram disponibilizadas para realização dos testes, um total de seis peças, sendo três para cada tipo de modo que, ambas foram identificadas com uma codificação alfanumérica, sendo efetuada a limpeza das amostras antes da soldagem, de modo a eliminar possíveis resíduos e impurezas presentes na superfície.

Figura 3 – Amostras modo semiautomático



Fonte: Elaboração própria (2022).

Figura 4 – Amostras modo robotizado



Fonte: Elaboração própria (2022).

A classificação para seleção do material de adição arame e, o seu diâmetro se dá através da taxa de fusão e penetração, para esses valores, são utilizadas tabelas de sugestões de parâmetros de preparação em juntas para materiais de aço carbono.

Foi utilizado como material de adição, o arame maciço ER70S-6 no processo de soldagem GMAW, com o diâmetro de 0,90 mm, especificado na norma ASME II Parte C SFA 5.18 (2019).

Para obtenção dos corpos de prova durante o processo de soldagem foram utilizados inicialmente os valores de referência descritos na Tabela 1, e definidos em sinergia pelo departamento da Engenharia de Processo juntamente com a técnica operatória do soldador por realizar a soldagem de produtos similares, o que resultou na melhor condição para a execução e garantia da qualidade do cordão.

Tabela 1 – Parâmetros de soldagem

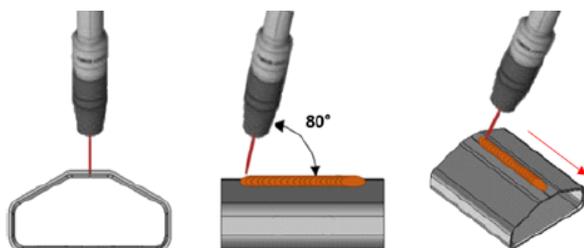
e(mm)	r(mm)	Ø do eletrodo nu (mm)	Velocidade de alimentação do eletrodo nu (m/min)	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de soldagem (cm/min)
1,6	0,8	0,8	6,6	110 - 130	19	63
	1,6	1,2	4,3	140 - 160	20	89
3,0	1,2	0,8	7,6	120 - 140	21	51
	1,6	1,2	4,3	140 - 160	21	63

Fonte: Adaptado de WAINER *et al*; (1992).

Para proteção da poça de fusão, foi utilizado a mistura gasosa controlada e, limitada a 21l/min em ambos os modos com porcentagens de 80 % de Argônio e 20 % de CO₂, pertinente à soldagem de aços com baixo teor de carbono.

Para garantir o posicionamento correto e o dimensional de ambos os modos durante a soldagem, foi definido o ângulo da tocha com 80 ° na posição plana descendente (Figura 3).

Figura 5 – Ângulo de trabalho da tocha



Fonte: Elaboração própria (2022).

A posição plana foi a utilizada para executar a soldagem das amostras desse estudo nos modos semiautomático e robotizado, onde segundo OKUMURA e TANIGUCHI (1982, p.257) a posição plana favorece a execução de juntas soldadas eficientes, em um intervalo de tempo curto.

Os parâmetros utilizados para obtenção das amostras estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de soldagem

Parâmetros	Semiautomático	Robotizado
Tensão (V)	19	16
Corrente (A)	90	115
Velocidade de Soldagem (mm/min)	135	158
Vazão de gás (l/min)	21	21
Comprimento livre de arame (mm)	15	15
Ângulo de soldagem	80°	80°
Números de passes	1	1

Fonte: Elaboração própria (2022).

Para realizar análise da qualidade dos cordões de solda, das amostras obtidas nos modos de soldagem, foi seguido o critério de classificação para peças soldadas de acordo com sua aplicação em conformidade com a norma TSH5603G (2000), para as amostras utilizadas nesse trabalho foi utilizado a Classe “B”, estabelecida no desenho do produto e apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Critérios de classificação soldadas

Critérios de Classificação	
Classes	Aplicação
Classe “A”	Peça que requer resistência particularmente alta
Classe “B”	Peça que requer alta resistência
Classe “C”	Peça não classificada como “A” e “B”

Fonte: Adaptado da norma TSH5603G (2000).

Para atender as propriedades relacionadas à resistência, as amostras devem atender aos critérios definidos para a classe “B” apresentado na Tabela 4, que define os requisitos e propriedades de acordo com a classe por qualidade utilizada.

Tabela 4 – Propriedades relacionadas à resistência

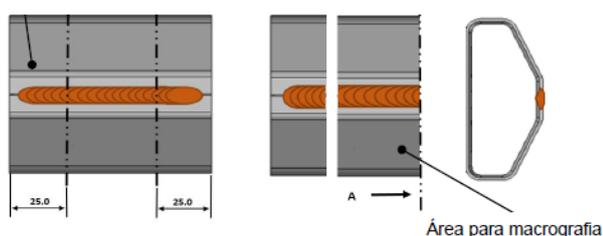
Nº	Propriedades	Faixa permitida para Classe – “B”
1	Perna	80 % min. da menor espessura da chapa
2	Garganta	70 % min. da menor espessura da chapa
3	Comprimento de Solda	≤ 0,5 mm ou 20 % da menor espessura da chapa.
4	Mordedura (Longitudinal)	≤ 0,50 mm ou 20 % da menor espessura da chapa.
5	Sobreposição	≤ 0,50 mm ou 20 % da menor espessura da chapa.
6	Porosidade	Diâmetro 1 mm máximo 5
7	Furos	Diâmetro 2 mm máximo 1
8	Mordedura (Lateral)	10% do comprimento do cordão de solda
9	Largura do Cordão	Menor que 1,5 x a espessura da menor chapa.
10	Descontinuidade no cordão	Os cordões de solda devem ser contínuos.

Fonte: Adaptado da norma TSH5603G (2000).

Foram utilizados os métodos de teste de secção e, aparência estabelecidos na norma TSH5603G (2000) para as verificações de inspeção visual e dimensional utilizando calibradores ou outros métodos de medição.

Para obtenção das secções das amostras para realização da análise macrográfica foram realizados cortes nas amostras, de acordo com as especificações descritas na norma ISO 15614-1 (2004) que estabelece o plano de corte para corpos de provas, para ensaio de solda topo e seus respectivos tipos de ensaios, apresentando os locais onde devem ser efetuados os cortes das secções e as partes destinadas para o descarte.

Figura 6 – Plano de corte das amostras



Fonte: Elaboração própria (2022).

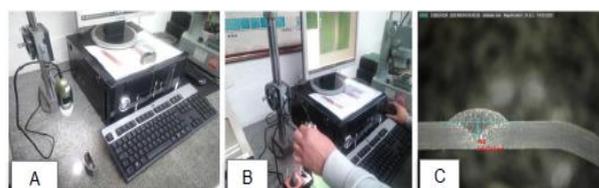
Foi efetuado o lixamento durante a preparação das amostras de forma a se obter um grau de acabamento ideal, sendo utilizadas lixas a seco com faixas de granulometria alternadas do menor valor para o maior, tendo início em 100 e finalizado em 1200, em ângulos de (90°).

Para evidenciar e destacar a macroestrutura das amostras, foi utilizado um ataque químico com a solução Nital 5 % em meio Alcoólico de 95 % o contraste obtido após o processo de oxido-redução foi possível identificar a geometria e os perfis onde ocorreram a penetração dos cordões de solda.

Para efetuar a limpeza da superfície da amostra, foi utilizado álcool isopropílico e um soprador térmico.

Para analisar as macrografias, foi utilizado um microscópio digital com ampliação de 20 x à 200 x, conectado via usb em uma CPU conforme apresentado na (Figura 7-A), as medições efetuadas nas amostras foram realizadas através do software 2.0 (Figura 7-B), que possibilitou o dimensionamento do cordão em escala real, além de possibilitar a identificação e visualização através de fotos, a (ZAC) zona afetada pelo calor (Figura 7-C).

Figura 7 – Microscópio digital Dino-Lite (A-B) e ZAC (C)



Fonte: Elaboração própria (2022).

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 DEFINIÇÃO DE SOLDAGEM

Denominada como uma arte de unir materiais metálicos, registros indicam que a soldagem já era conhecida desde a era pré-histórica, por exemplo, nos processos de brasagem, desde os anos 3.000 ou 4.000 a.C.

Mais com o passar dos anos e com a descoberta da energia elétrica, houve um impulso em que a soldagem atingiu um estágio a que se encontra atualmente (OKUMURA e TANIGUCHI; 1982).

3.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM

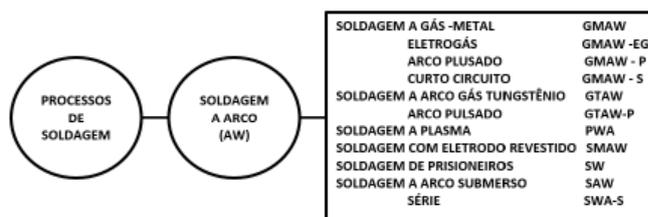
De acordo com a AWS (*American Welding Society*) os processos de soldagem podem ser classificados em dois grandes grupos:

O primeiro grupo é caracterizado por utilizar a pressão ou deformação na união de metais, o segundo grupo tem como principal característica, a fusão, que é gerada através de um arco elétrico como fonte de calor. Atualmente os processos que utilizam o arco elétrico são os mais utilizados na indústria.

Os grupos e seus subgrupos da soldagem a arco são identificados por meio de uma nomenclatura universal abreviada que pode ser modificada com base no idioma local, conforme o exemplo demonstrado na Figura 8, (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE;2011).

Figura 8 – Subgrupo da soldagem a arco (AW)

Segundo a AWS



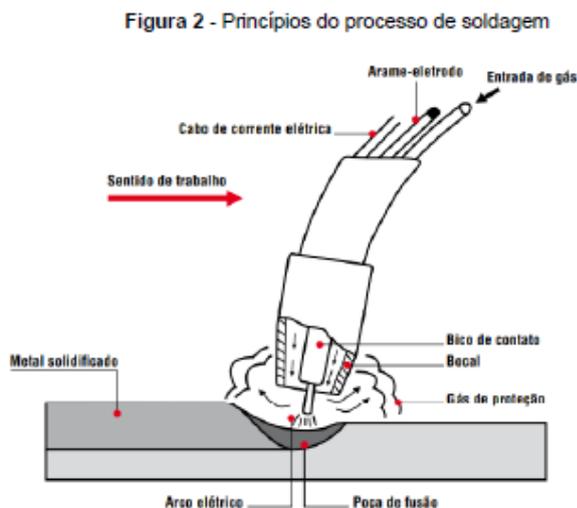
Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE (2011).

3.3 PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW

O processo de soldagem GMAW utilizado neste trabalho será explicado simplificadaamente a seguir:

Soldagem com arame sólido sob proteção gasosa ou, em inglês, *Gás Metal Arc Welding* (GMAW) é o nome dado ao processo de soldagem em que, uma fonte de calor, no caso, um arco elétrico é mantido entre um eletrodo consumível (metal de adição) alimentado continuamente e, a peça de trabalho (metal de base), com a proteção da região de soldagem feita por um fluxo de gás ativo MAG. A soldagem pode ser no modo semiautomático ou robotizado e, a Figura 9 apresenta, de forma esquematizada, este tipo de processo de soldagem (WAINER, BRANDI E MELO;1992).

Figura 9 - Princípios do processo de soldagem GMAW



Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE (2011).

A principal característica desse processo é a proteção gasosa que tem como principal objetivo formar uma atmosfera protetora beneficiando a zona soldada, protegendo-a mesma, contra a ação de outros gases que podem comprometer a integridade da soldagem (TREMONTI; 1999).

Segundo (WAINER, BRANDI E MELO; 1992), o processo GMAW possui inúmeras vantagens durante a soldagem de juntas, por se tratar de um processo de baixo custo, além de possuir vantagens durante a sua execução, permitindo uma grande variação e flexibilidade em relação a posição de soldagem, permitindo-se o trabalho em todas as posições.

O processo de soldagem GMAW apresenta algumas vantagens conforme Figura 13, porém existem limitações em relação ao seu processo, consumíveis e segurança.

Durante a execução da atividade, é gerada uma grande emissão de raios ultravioletas e infravermelhos que podem ser prejudiciais ao trabalhador quando ele não estiver devidamente protegido. Em alguns casos, podem aparecer trincas nas juntas soldadas, porém, essa falha pode estar relacionada à maior velocidade de resfriamento. (WAINER, BRANDI E MELO; 1992).

A indústria automobilista tem optado por utilizar cada vez mais por esse tipo de processo por ter baixo custo e possuir uma grande flexibilidade do processo produtivo.

Figura 10 – Vantagens do processo GMAW



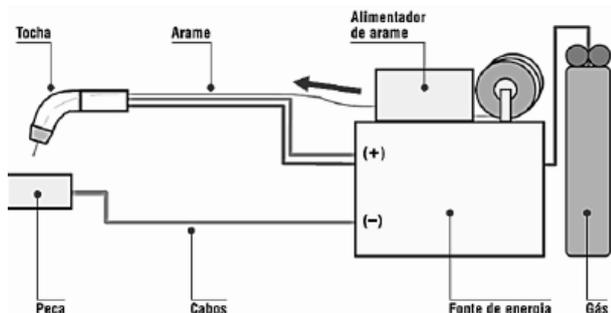
Fonte: Adaptado de FRONIUS–Aplicações (2021).

3.4 EQUIPAMENTOS

O equipamento básico de soldagem GMAW, apresentado na Figura 14, é considerado semiautomático por alimentar o metal de adição de forma automática pela máquina e por utilizar proteção gasosa durante a soldagem. São compostos por uma máquina de soldagem, fonte de energia, alimentador de arame, uma tocha de

soldagem e cilindros de gás de proteção (WAINER, BRANDI E MELO; 1992).

Figura 11 - Equipamento básicos de soldagem GMAW



Fonte: MARQUES, MODENESI E BRACARENSE; (2007)

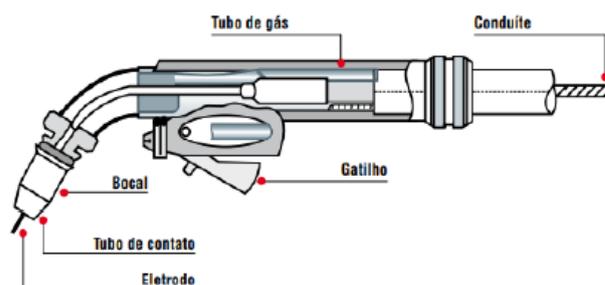
O tipo de fonte de energia utilizada possui a característica de potencial constante, o que permite a autorregulagem do comprimento do arco e este comportamento acontece de acordo com as variações da tensão (variação no comprimento do arco). Esse tipo de situação, ocorre de forma imediata na fonte que promove uma alta variação de corrente aumentando ou diminuindo, restabelecendo quase de forma imediata, o comprimento do arco a tensão original (WAINER, BRANDI E MELO; 1992).

O alimentador de arame é a parte do conjunto que permite transportar o arame da bobina à tocha, ele é composto por um sistema de alimentação contínua por meio de roldanas que realizam o tracionamento do arame para dentro do condúite.

A tocha de soldagem apresentada na Figura 12 é composta por alguns elementos básicos, sendo eles: bocal de orientação do fluxo de gás de proteção; bico de contato de cobre, responsável pela transferência da

energia para o arame do eletrodo; o acionamento do sistema, realizado por um gatilho; e, um cabo de corrente responsável por conduzir a energia elétrica da fonte de soldagem até a peça a ser soldada (WAINER, BRANDI E MELO; 2005).

Figura 12 - Tocha utilizada para soldagem GMAW



Fonte: WAINER, BRANDI E MELO; (2005)

O sistema de controle é localizado na parte frontal do equipamento, onde através dele, é possível realizar os comandos principais de funcionamento como: abrir e fechar a válvula do gás de proteção, acionar do motor elétrico do alimentador de arame, controlar a velocidade de alimentação do arame e, o controlar da válvula da água de refrigeração; caso a tocha possua essa característica de resfriamento por água, na parte frontal também está localizado o painel de regulagem dos parâmetros de soldagem (WAINER, BRANDI E MELO; 2005).

O alimentador não possui uma ligação direta com a fonte de energia, porém, ao ajustar a velocidade do arame, a corrente de soldagem fornecida pela fonte de energia também é ajustada (TREMONTI; 1999).

Durante o processo de soldagem são utilizados consumíveis que são absorvidos

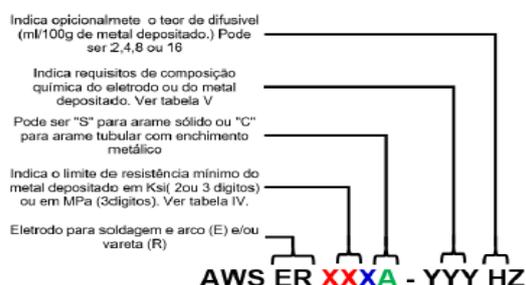
como forma de proteção ou deposição de material na peça soldada, sendo os gases e o arame-eletrodo os consumíveis utilizados no processo de soldagem GMAW (TREMONTI; 1999).

3.5 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS DE ADIÇÃO

Geralmente, os arames para a soldagem de aços, podem ter a sua seção inteiramente metálica, por isso são chamados de arame sólido, ou tubular, formado por uma camada metálica fechada e por um enchimento interno (MARQUES, MODENESI E BRACARENSE; 2011).

A classificação do tipo de arame em uma determinada soldagem, deve estar de acordo com o código AWS 5.18 A 5.28 (1995), que é definido em termos da composição química do metal base, do gás de proteção a ser utilizado e da sua composição química, além das propriedades em relação ao metal base. A Figura 13 apresenta o exemplo do código e seu formato.

Figura 13 - Classificação dos metais de adição

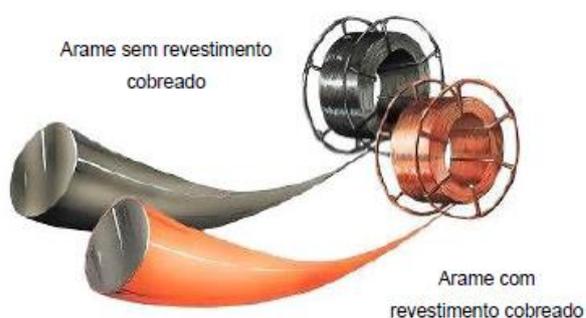


Fonte: Adaptado de, MARQUES, (2009).

Os arames contínuos e sólidos apresentados na Figura 14, e utilizados nos

processos de soldagem GMAW na variação MAG, podem conter, em alguns casos, características especiais como, por exemplo, a proteção por uma fina camada de cobre que, além de melhorar a condutividade elétrica durante a passagem pelo bico de contato, evita a oxidação, onde os mesmos são fabricados e fornecidos com os diâmetros de 0,6 mm a 1,6 mm.

Figura 14 - Arames sólidos



Fonte – Adaptado de SOUZA e JÚNIOR e DUTRA (2020).

Os arames sólidos no processo para soldagem GMAW são utilizados para unir diversos materiais, como os aços de baixo teor de carbono e suas ligas, além da soldagem de aços inoxidáveis. Estes arames possuem duas funções; de um lado, age como polo positivo do circuito e, de outro, como material de adição quando recebe a corrente e se funde.

A escolha do diâmetro do consumível depende, especificamente, da espessura da chapa.

3.6 PARÂMETROS DE SOLDAGEM EM RELAÇÃO AOS CONSUMÍVEIS

A classificação para seleção do eletrodo nu e o seu diâmetro se dá através da taxa de fusão e penetração. Para esses valores, são utilizadas tabelas de sugestões de parâmetros de preparação em juntas para materiais de aço carbono de acordo com a Tabela 5 que apresenta algumas dessas sugestões (WAINER, BRANDI E MELO, 1992).

Tabela 5 – Parâmetros de soldagem para juntas na posição plana

e(mm)	r(mm)	Ø do eletrodo nu (mm)	Velocidade de alimentação do eletrodo nu (m/min)	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de soldagem (cm/min)
1,6	0,8	0,8	6,6	110 - 130	19	63
	1,6	1,2	4,3	140 - 160	20	89
3,0	1,2	0,8	7,6	120 - 140	21	51
	1,6	1,2	4,3	140 - 160	21	63

Fonte: Adaptado de soldada (WAINER, BRANDINI E MELO; 1992).

3.7 CUSTOS EM SOLDAGEM

A previsão dos gastos para fabricação de um produto soldado no processo (GMAW) pode ser realizada através da estimativa dos custos, onde uma análise inicial se realizada de forma correta, pode garantir que as empresas não tenham perdas econômicas após a captação de um projeto ou ofertar preços muito altos, inviabilizando novos projetos e desenvolvimentos (MARQUES *et al*; 2005).

A Equação 1, demonstra a forma simplificada do cálculo de um processo de soldagem:

Custo total da soldagem (R\$) =

$$CTS = (C1) + (C2) + (C3) + (C4) \quad (1)$$

A Equação 2 (C1), compreende os custos com metal de adição e os dados, encontram-se disponíveis na Tabela 6.

$$C_e = \frac{m_s}{\varphi} C_{eU} \quad (2)$$

Tabela 6 – Dados do metal de adição

Item	Descrição
MS	Massa de metal depositado
φ	Eficiência de deposição conforme pesagem dos corpos de prova
CeU	Preço do consumível

Fonte: Adaptado de MODENESI (2001).

A Equação 3 (C2) refere-se aos custos com energia elétrica e os dados encontram-se disponíveis na Tabela 7.

$$C_{el} = \frac{P t_{ARC}}{\varphi_{el}} (C_{elU}) \quad (3)$$

Tabela 7 – Dados da energia elétrica

Item	Descrição
CeU	Preço da energia elétrica
P	Potência elétrica média desprendida durante a soldagem
tARC	Tempo de arco aberto
φel	Eficiência elétrica da fonte de soldagem (Fonte Yaskawa V-1000 = 95%)

Fonte: Adaptado de MODENESI (2001).

A Equação 4 (C3) permite quantificar os custos com a mão de obra e os custos fixos, onde os dados encontram-se disponíveis na Tabela 8.

$$Cl = \frac{t_{ARC}}{\varphi} (L + O) \quad (4)$$

Tabela 8 – Dados da mão de obra e custos

Item	Descrição
tARC	Tempo de arco aberto
φ	Fator de operação
L	Custo por unidade de tempo com mão de obra
O	Gastos fixos

Fonte: Adaptado de MODENESI (2001).

Para o cálculo do custo de gás de proteção (C_G) foi utilizada a Equação 5 e seus dados apresentam-se na Tabela 9.

$$C_g = V_G t_{ARC} C_{GU} \quad (5)$$

Tabela 9 – Dados do gás de proteção

Item	Descrição
V _G	Vazão de gás utilizada
t _{ARC}	Tempo de arco aberto
C _{GU}	Preço por volume de gás

Fonte: Adaptado de MODENESI (2001).

Segundo NASCIMENTO;(2006) a potência elétrica aplicada em um processo de soldagem pode ser determinada como a razão entre a tensão e a corrente, determinando na energia imposta do processo, o calor resultante dessa energia tem influência direta no aumento ou redução da zona termicamente afetada e na tenacidade de uma junta soldada. Na equação 6 a seguir, pode-se observar tal afirmação conforme ASME IX (2019) e as descrições dos dados, encontram-se disponíveis na Tabela 10.

$$HI = \frac{U \cdot I \cdot 60}{vs} \quad (6)$$

Tabela 10 – Dados de energia imposta

Dados	Descrição
HI	Energia Importa (J/cm)
U	Tensão (V)
I	Corrente de soldagem (A)
vs	Velocidade de soldagem (cm/min.)

Fonte: Adaptado do ASME IX (2019).

Utilizando os valores obtidos referente a massa de cada amostra, pode-se calcular o rendimento de deposição, através da Equação 7. A ocorrência de reduções da

massa em algumas amostras é resultante das variáveis da tensão e corrente utilizadas no modo de transferência por curto-circuito na soldagem, essas variáveis tendem a crescer de acordo com o comportamento de suas curvas, ou seja, quando ocorre um aumento de corrente a sempre uma redução na tensão (NASCIMENTO; 2006). A Equação 7, tem o objetivo de considerar a massa linear de metal depositado (m_s) e a massa de metal consumido (m_c) durante a execução do processo de soldagem, de modo a comparar o rendimento de deposição (R_d). A unidade de massa será o quilo (kg) e o rendimento em porcentagem (%).

$$R_d = \frac{m_s}{m_c} \quad (7)$$

A parcela de metal depositado na junta soldada tem o objetivo de representar o rendimento de deposição (%), essa variável é fundamental para realizar as análises direcionadas a capacidade produtiva de um processo. A Equação 8 representa a taxa de deposição onde têm-se o quociente da massa de metal depositado (m_s) pelo tempo de arco aberto (T_{arc}).

$$T_d = \frac{m_s}{T_{arc}} \quad (8)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da definição do método de pesquisa, que consiste em estudo de caso baseado na verificação comparativa dos resultados, que foram obtidos de acordo com

os materiais e métodos, utilizando como base de análise as referências bibliográficas, conclui-se Através da análise comparativa entre os modos de soldagem apresentados neste trabalho, pode-se comprovar, qual o modo de soldagem é o mais indicado, do ponto de vista econômico sem comprometer a qualidade de acordo com os critérios e requisitos adotados na fabricação de componentes e produtos fornecidos para a indústria automobilística.

O rendimento de deposição obtido após a soldagem das amostras conforme Equação 7, apresentou um valor 66,66 % em ambos os modos (Tabela 11).

Tabela 11 - Rendimento de deposição

Fatores	Semiautomático	Robotizado
Peso inicial de arame consumido (kg)	0,0040	0,0060
Peso de metal depositado (kg)	0,0013	0,0020
Rendimento (%)	66,66 %	66,66 %

Fonte: Elaboração própria (2022).

A pesagem dos carretéis foi efetuada após a obtenção das três amostras de cada modo, onde foi possível verificar a diferença do material depositado. Foi utilizado o mesmo método de verificação para as amostras conforme observado na Tabela 12, a pesagem das amostras antes e depois do processo de soldagem.

Tabela 12 – Peso das amostras soldada

Descrição das Informações	Semiautomático			Robotizado		
	N° amostra			N° amostra		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3
Peso inicial da amostra (Kg)	0,1327	0,1327	0,1327	0,1327	0,1327	0,1327
Peso Final da amostra (Kg)	0,1344	0,1340	0,1341	0,1350	0,1351	0,1350
Diferença (Kg)	0,0013	0,0013	0,0014	0,0020	0,0020	0,0020
Média das diferentes (Kg)	0,0013			0,0020		

Fonte: Elaboração própria (2022).

A taxa de deposição foi calculada utilizando a Equação 8 e os resultados podem ser observado na Tabela 13.

Tabela 13 – Peso médio das amostras e tempo de arco aberto

Descrição das Informações	Semiautomático	Robotizado
Diferença do peso das amostras (Média) (Kg)	0,0013	0,0020
Tempo de arco aberto (h)	0,00084	0,0006
Taxa de deposição (Kg/h)	1,5824	3,6000

Fonte: Elaboração própria (2022).

A comparação entre os resultados encontrados demonstra que as amostras soldadas no modo semiautomático apresentaram uma taxa de deposição de 1,58 Kg/h, enquanto o modo robotizado obteve como taxa de deposição o valor de 3,60 Kg/h, demonstrando maior velocidade em relação ao modo comparado, refletindo na diferença entre os resultados de 127 %.

Os parâmetros utilizados nos modos de soldagem descritos na Tabela 2, foram aplicados na Equação 6, comprovam que a energia imposta no modo robotizado foi menor que 8 % em relação ao modo comparado (Tabela 14). A velocidade de deslocamento do arco durante a soldagem no modo robotizado é superior ao modo comparado, por não existirem interferências indiretas na execução do processo.

Tabela 14- Energia imposta (J/mm)

Parâmetros	Semiautomático	Robotizado
Tensão (V)	19	16
Corrente (A)	90	115
Velocidade de Soldagem (mm/min)	135	158
Energia Imposta (J/mm)	760	698

Fonte: Elaboração própria (2022).

As análises realizadas de forma comparativa visam verificar aos custos de soldagem em relação a capacidade produtiva e eficiência econômica de cada processo, de modo a comprovar qual o modo é o mais rentável em relação aos aspectos econômicos para juntas soldadas em uma indústria de autopeças.

As variáveis que compõem a Equação 2 descrita por MODENESI (2001), permitiram a comparação entre as análises do custo do metal de adição apresentados na Tabela 15, comprovando que o modo semiautomático, apresentou rendimentos de deposição igual ao modo comparado, porém, resultou em menores quantidades de metal depositado no cordão de solda.

Tabela 15 - Custo do metal de adição depositado

Avaliações	Semiautomático	Robotizado
Massa de metal depositado (Kg)	0,0013	0,0020
Rendimento de deposição (%)	66,67 %	66,67 %
Preço do eletrodo (R\$/Kg)	25,00	25,00
Resultado C1 (R\$)	0,0500	0,0750

Fonte: Elaboração própria (2022).

Através da Equação 3, foi possível verificar conforme dados apresentados na Tabela 16, uma redução de 50 % no consumo de energia elétrica em relação do modo robotizado em relação ao modo semiautomático.

A redução no consumo está associada ao aumento da velocidade de soldagem no modo robotizado por não possuir interferências indiretas ao ser executado. No processo semiautomático, o tempo de arco foi inferior, pois a cada ciclo de soldagem realizado, o soldador interrompe o processo

para localizar o outro ponto de soldagem, o que impede que o arco permaneça fechado por um tempo maior.

Tabela 16 - Custo da energia elétrica consumida

Avaliações	Semiautomático	Robotizado
Preço da energia (R\$/kWh)	1,79	1,79
Potência elétrica média (kW)	2,66	2,30
Tempo de arco aberto (h)	0,00084	0,0006
Eficiência elétrica (%)	75 %	91 %
Resultado C2 (R\$)	0,00535	0,00251

Fonte: Elaboração própria (2022).

Os custos relacionados ao processo foram obtidos utilizando a Equação 4, para cada modo de soldagem. A análise realizada com base nos dados descritos na Tabela 17, indicam uma redução de 63% nos custos com o processo robotizado, onde o fator de operação foi considerado o elemento principal para o aumento do custo.

Tabela 17 - Custo do processo semiautomático e robotizado

Avaliações	Modo Semiautomático	Modo Robotizado
Tempo de operação (h)	0,0033	0,0025
Fator de operação (%)	30%	80 %
Custo do tempo do robô + fixos (R\$/h)	59,40	76,68
Resultado C3 (R\$)	0,66	0,24

Fonte: Elaboração própria (2022).

Os custos referentes a mistura gasosas com porcentagens de 80 % de Argônio e 20 % de CO₂ utilizado nos modos estudados foram obtidos utilizando a Equação 5, onde a análise comparativa entre os modos indicaram uma redução de 34 % no consumo do modo robotizado, resultante da variável tempo de arco (Tabela 18).

Tabela18 - Custo do gás conforme

Avaliações	Semiautomático	Robotizado
Vazão (Kg/min)	0,487	0,487
Tempo de arco (min)	0,051	0,033
Preço do gás (R\$/Kg)	8,39	8,39
Resultado C4 (R\$)	0,20	0,14

Fonte: Elaboração própria (2022).

Tendo em vista uma fabricação de um lote de 100 peças, observa-se um custo total de soldagem para o processo semiautomático de R\$ 92,19, utilizando Equação 1 conforme verificado na Figuras 15.

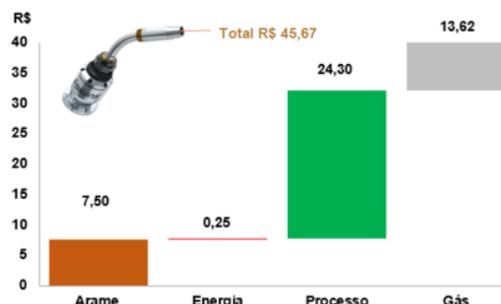
Figura 15 - Composição de custos processo semiautomático para 100 peças



Fonte: Elaboração própria (2022).

Verificando o custo total de soldagem do modo robotizado, comparado com o semiautomático, utilizando o mesmo critério para a fabricação de um lote de 100 peças, observa-se uma redução de 50 % em relação ao custo total do processo semiautomático, constatando um aumento na capacidade produtiva e econômica conforme Figura 16.

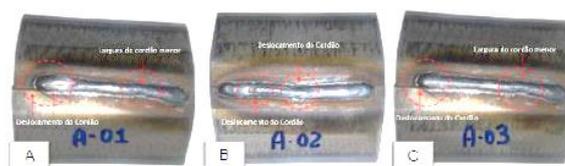
Figura 16 - Composição de custos processo robotizado para 100 peças



Fonte: Elaboração própria (2022).

As amostras soldadas no modo semiautomático, tiveram rejeições do ponto de vista do ensaio visual, apresentando reduções na largura e desalinhamentos.

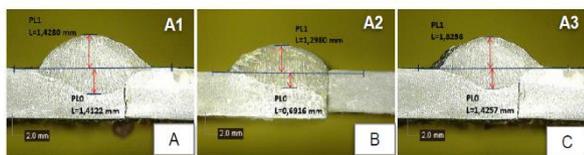
Figura 17 – Ensaio visual - Semiautomático



Fonte: Elaboração própria (2022).

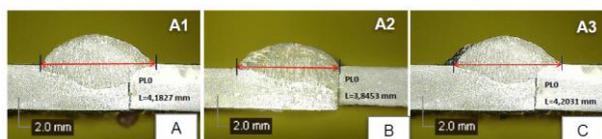
Os resultados dos ensaios macrográficos realizados nas amostras soldadas no modo semiautomático, apresentados nas Figuras 18 e 19 indicaram níveis de penetração inferiores ao especificado nas extremidades do metal de base, região onde ocorreu o desalinhamento do cordão.

Figura 18 - Análise da garganta amostras – A1, A2 e A3



Fonte: Elaboração própria (2022).

Figura 19 - Análise da largura amostras – A1, A2 e A3



Fonte: Elaboração própria (2022).

Com relação ao modo de soldagem robotizado, foi evidenciado que o mesmo atendeu todas as verificações e critérios determinados nos ensaios visuais apresentados na Figura 20 para aplicações de peças soldadas na Classe “B” descrito na norma TSH5603G (2000).

Nas secções das amostras soldadas provenientes do processo robotizado, todos os resultados foram satisfatórios de acordo com as características e especificações da norma em questão.

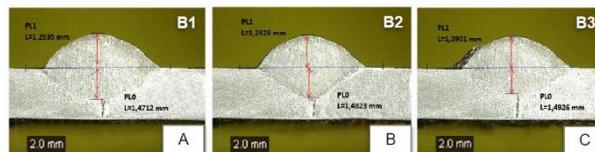
As Figuras 20 e 21-A, B, C demonstram as amostras após o processo de soldagem no modo robotizado.

Figura 20 – Ensaio visual – Robotizado



Fonte: Elaboração própria (2022).

Figura 21 - Análise da garganta amostras – B1, B2 e B3



Fonte: Elaboração própria (2022).

Figura 21 - Análise da largura amostras – B1, B2 e B3



Fonte: Elaboração própria (2022).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se desta forma, após analisar a soldagem das amostras, que o modo robotizado, utilizando como metal de base o aço DIN EN-10149-2 S420MC, destinado ao setor automotivo, utilizando a transferência por curto-circuito, sob proteção de uma mistura gasosa com porcentagens de 80 % de Argônio e 20 % de CO₂, em médias correntes, fazendo uso do consumível ER70S-6; atende a todos os critérios e requisitos de aplicação para peças soldadas na classe “B” da norma TSH5603G (2000), observando as vantagens em relação à produtividade, redução no número de defeitos e falhas, comprovando que o modo de soldagem robotizado proporciona ganhos consideráveis em relação ao modo semiautomático nos requisitos produtividade, qualidade e custos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, V. J.; “**Desenvolvimento de Envelopes Operacionais para processo MIG/MAG com diferentes gases de proteção**”, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding**. Miami, 2005 44p.

DUTRA, E, S. **Análise técnica e econômica da soldagem robotizada de vasos de pressão utilizando os arames maciço e metal cored sob atmosfera ativa**. Dissertação (Mestrado em Processos Industriais) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT-SP. São Paulo, 2020.137p.

INTERNATIONAL STANDARD. ISO 15614-1:2004. **Specification and qualification of welding procedures for metallic materials — Welding procedure test — Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys**. Switzerland, 2004-06-15.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2011.

MODENESI, P.J. **Estimativa de Custos em Soldagem**, Belo Horizonte: Editora DEMM-UFMG, 2001.

OKUMURA, T., TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. São Paulo, LTC,1982.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. II Materials: part C: **Specifications for Welding Rods, Electrodes, and Filler Metals**. New York: ASME, 2019. 499 p.

TOYOTA MOTOR CORPORATION. **TSH5603G**: Arc Welding, Japan, 2000.

TREMONTI, M. A. **Requisitos organizacionais à introdução da robótica:**

o caso do processo de soldagem ao arco elétrico sob proteção gasosa. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – São Paulo. 1999.

WAINER, E., BRANDI, S.D., MELLO, F.D.H., **Soldagem Processos e Metalurgia**. São Paulo, Editora EDGAR BLUCHER LTDA, 1992.