

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

GABRIEL SANTOS CARNEIRO DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO CRÍTICA DOS PRÓS E CONTRAS DA SUBSTITUIÇÃO DA
SOLDAGEM MANUAL COM ELETRODO REVESTIDO PELA SOLDAGEM
SEMIAUTOMÁTICA MIG/MAG**

Uberlândia

2023

GABRIEL SANTOS CARNEIRO DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO CRÍTICA DOS PRÓS E CONTRAS DA SUBSTITUIÇÃO DA SOLDAGEM
MANUAL COM ELETRODO REVESTIDO PELA SOLDAGEM SEMIAUTOMÁTICA
MIG/MAG**

Projeto de Final de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov

Uberlândia

2023

GABRIEL SANTOS CARNEIRO DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO CRÍTICA DOS PRÓS E CONTRAS DA SUBSTITUIÇÃO DA SOLDAGEM
MANUAL COM ELETRODO REVESTIDO PELA SOLDAGEM SEMIAUTOMÁTICA
MIG/MAG**

Uberlândia, 2023

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov – Orientador
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Douglas Bezerra de Araújo
Universidade Federal de Uberlândia

Dr. Vinicius Lemes Jorge
Pós-Doutorando - Universidade Federal de Uberlândia, FEMEC

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, sem Ele nada disso seria possível.

Agradeço também aos meus pais, Ulisses e Márcia, por nunca terem poupado esforços para me garantir a melhor educação possível. Ao meu irmão Thiago, pelo apoio.

Agradeço também aos amigos que fiz durante toda a minha graduação, desde a sala de aula até a empresa júnior, com certeza as horas que passamos juntos estudando as disciplinas da graduação, e buscando o nosso desenvolvimento pessoal, foram imprescindíveis para que este momento fosse possível.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov pela paciência, suporte e conhecimentos compartilhados.

RESUMO

Este trabalho tem como principal objetivo avaliar os prós e contras da substituição da soldagem manual com eletrodo revestido (SMAW) pela soldagem semiautomática MIG/MAG. Essa avaliação foi feita através da análise bibliográfica de trabalhos experimentais encontrados na literatura com a comparação dos processos de soldagem manual SMAW e a semiautomática MIG/MAG. O trabalho concluiu que se tratando da qualidade da solda, ambos os processos mostram resultados satisfatórios e parecidos, no entanto, em alguns casos é o processo MIG/MAG se mostra melhor, enquanto em outros já é o processo SMAW que apresenta melhores resultados. Em geral, é o processo de soldagem MIG/MAG que é preferido pelas indústrias, devido, principalmente, a sua produtividade e taxa de deposição mais altas, além de ser de fácil domínio pelo soldador.

Palavras-Chaves: MIG/MAG; SMAW; Produtividade; Taxa de deposição.

ABSTRACT

The main objective of this work is to evaluate the pros and cons of replacing the manual shielded metal arc welding (SMAW) by semiautomatic MIG/MAG welding. This evaluation was done through a bibliographical analysis of experimental works found in the literature that analyzed manual SMAW welding and semiautomatic MIG/MAG. The work concluded that when it comes to weld quality, both processes show satisfactory and similar results, however, in some cases MIG/MAG is better, while in others it is the SMAW process that presents better results. In general, the MIG/MAG welding process is preferred by the industries, due to, mainly, it's high productivity and deposition rate, and also because it is easier to master by the welder.

Keywords: MIG/MAG; SMAW; Productivity; Deposition rate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução de novos processos de soldagem ao longo do tempo	13
Figura 2 - Esquema de soldagem com eletrodo revestido	15
Figura 3 - Esquema de soldagem MIG/MAG	21
Figura 4 - Um exemplo do alimentador de arame	24
Figura 5 - Sistema de alimentador de arame com um par de roletes de alimentação	24
Figura 6 - Tochas de soldagem MIG/MAG	25
Figura 7 - Resultado dos ensaios de tração transversais	30
Figura 8 - Resultado dos ensaios de impacto Charpy-V realizados à – 20°C, em Joules	31
Figura 9 - Variação da energia absorvida no metal de solda das juntas soldadas pelos processos MIG/MAG e SMAW com a temperatura	31
Figura 10 - Perfil de dureza Vickers da junta soldada por eletrodo revestido realizado a 3 mm da superfície da junta	32
Figura 11 - Perfil de dureza Vickers da junta soldada por MIG/MAG realizado a 3 mm da superfície da junta	32
Figura 12 - Perfis macrográficos dos Corpos de Prova	36
Figura 13 - Solda realizada dentro do chanfro	39
Figura 14 - Solda realizada sobre a solda anterior	39
Figura 15 - Registro da temperatura da água de entrada (1) e de saída (2) do calorímetro para o teste 1	40
Figura 16 - Registro da temperatura da água de entrada (1) e de saída (2) do calorímetro para o teste 2	40
Figura 17 - Registro da temperatura da água de entrada (1) e de saída (2) do calorímetro para o teste 3	41
Figura 18 - Solda pelo processo SMAW durante a calorimetria	41
Figura 19 - Registro da temperatura da água de entrada (1) e de saída (2) do calorímetro para o teste 1 (SMAW)	42
Figura 20 - Registro da temperatura da água de entrada (1) e de saída (2) do calorímetro para o teste 2 (SMAW)	43
Figura 21 - Registro da temperatura da água de entrada (1) e de saída (2) do calorímetro para o teste 3 (SMAW)	43
Figura 22 - Registro da temperatura da água de entrada (1) e de saída (2) do calorímetro para o teste 4 (SMAW)	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Alguns dos processos de soldagem por fusão e suas principais características	14
Tabela 2 - American Welding Society: AWS A 5.1-91 para eletrodos revestidos para soldagem de aço carbono e baixa liga	18
Tabela 3 - Condições de ressecagem e conservação de eletrodos revestidos convencionais	19
Tabela 4 - Últimos dígitos (para arames de aço comum ao carbono)	26
Tabela 5 - Parâmetros de soldagem da junta realizada com o processo de eletrodo revestido	29
Tabela 6 - Parâmetros de soldagem da junta realizada com o processo MIG/MAG	29
Tabela 7 - Resultados dos ensaios de tração	30
Tabela 8 - Processos de soldagem a serem avaliados	34
Tabela 9 - Processos de soldagem avaliados com os respectivos metais de adição e parâmetros regulados e obtidos	35
Tabela 10 - Valores da Taxa de deposição (TD), Energia de soldagem (E), Taxa de fusão do metal de adição (TF) e Rendimento econômico (R)	35
Tabela 11 - Valores do reforço, largura do cordão de solda, penetração, relação de Re/Lcs e a diluição	36
Tabela 12 - Parâmetros de soldagem utilizados nos testes utilizando o processo MIG/MAG	39
Tabela 13 - Parâmetros de soldagem com processo SMAW	42
Tabela 14 - Eficiências térmicas dos processos de soldagem MIG/MAG e SMAW	44
Tabela 15 - Eficiências térmicas dos processos de soldagem MIG/MAG e SMAW	45
Tabela 16 - Vantagens dos processos de soldagem SMAW e MIG/MAG	47
Tabela 17 - Limitações dos processos de soldagem SMAW e MIG/MAG	48

SUMÁRIO

1 Introdução	10
2 Revisão bibliográfica	12
2.1 Contextualização histórica da soldagem	12
2.2 Processos de soldagem	13
2.3 Processo de soldagem com eletrodos revestidos	14
2.3.1 Equipamentos	16
2.3.2 Consumíveis	17
2.3.3 Técnica operacional	19
2.3.4 Vantagens e limitações do processo de soldagem com eletrodos revestidos ...	19
2.4 Processo de soldagem MIG/MAG	20
2.4.1 Equipamentos	22
2.4.2 Consumíveis	25
2.4.3 Técnica operacional	26
2.4.4 Vantagens e limitações do processo de soldagem MIG/MAG	27
2.5 Taxa de deposição (Produção)	27
2.6 Produtividade	28
3 Metodologia	28
4 Resultados	28
4.1 Comparação 1: Soldagem em aços de alta resistência para a indústria naval	28
4.2 Comparação 2: Fabricação de revestimento em eixos propulsores	33
4.3 Comparação 3: Comparação da eficiência térmica entre os processos de soldagem SMAW e MIG/MAG	38
4.4 Comparação do processo de aprendizado dos processos de soldagem MIG/MAG e SMAW	46
4.5 Comparação das vantagens e limitações dos processos de soldagem MIG/MAG E SMAW	46
5 Conclusão	48
6 Referências bibliográficas	50

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente competitividade no mundo todo, as indústrias buscam sempre aumentar a produção, melhorar a qualidade de seus produtos e processos, reduzir custos na produção de forma a manter e aumentar a sua participação no mercado. Neste cenário, a soldagem, se apresenta como um dos processos de fabricação mais utilizados no mundo, e que está em otimização constante.

Por alterar as propriedades mecânicas da região em torno do cordão de solda, deve-se sempre assegurar o nível de qualidade requerido para cada aplicação, evitar com que haja redução das propriedades mecânicas da junta soldada e, principalmente, evitar com que a vida humana seja colocada em risco.

O processo de soldagem com eletrodos revestidos foi inventado no início do século XX por Oscar Kjellberg. O processo se dá pela fusão dos metais através de um arco elétrico, que é formado entre a ponta do eletrodo e o metal de base. O eletrodo é então fundido e se deposita na solda, formando também uma escória que possui muitas funções: proteger o cordão de solda dos gases presentes na atmosfera, moldar a superfície do cordão, entre outras.

Devido à sua grande versatilidade, o processo de soldagem com eletrodos revestidos atualmente é um dos processos mais utilizados no mundo. No entanto, a sua produtividade quando comparada a outros processos é muito baixa, fazendo com que não seja utilizado em aplicações de produção em larga escala.

O processo de soldagem MIG (Metal Inert Gas) foi desenvolvido por H.M. Hobart e P.K. Devers em 1930, já o processo MAG (Metal Active Gas) foi desenvolvido por Lyubavskii e Novoshilov em 1953. O processo se dá pela fusão e união de peças por meio de um arco elétrico, que é formado entre um eletrodo consumível contínuo (arame) e o metal de base. A proteção do arco e da região soldada da ação nociva dos gases da atmosfera é feita através da utilização de gases de proteção que podem ser inertes ou ativos.

O processo de soldagem MIG/MAG além de ser extremamente produtivo, oferece um baixo custo por metro de solda, excelente qualidade, incluindo o acabamento, e também é de rápido treinamento para um soldador iniciante. Este processo, no entanto, apresenta limitações, como a difícil locomoção dos equipamentos e o local de execução da solda. Quando realizado em campo, as correntes de ventos podem interferir na proteção gasosa e prejudicar a qualidade da solda.

Tanto o processo de soldagem com eletrodos revestidos quanto o MIG/MAG são utilizados para soldar metais ferrosos e não-ferrosos e na grande maioria dos casos é possível substituir um desses processos pelo outro. Desta forma, este trabalho tem como objetivo avaliar os prós e contras

da substituição da soldagem manual com eletrodo revestido pela soldagem semiautomática MIG/MAG.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA DA SOLDAGEM

Segundo Aventa (2015), a história da soldagem se inicia ainda nos tempos remotos da humanidade, é na Idade do Bronze que se tem os primeiros relatos de peças produzidas através da soldagem por pressão. Já na Idade Média, houve evolução dos métodos de forjamento de metais, principalmente do martelamento, que era utilizado para forjar o ferro nas mais variadas ferramentas.

Segundo Modenesi (2012), a partir do século XIX a soldagem mudou drasticamente, principalmente após as experiências de Sir Humphrey Davy (1801-1806) com arco elétrico, a descoberta do acetileno feita por Edmund Davy e com a evolução das formas de geração de energia elétrica, que possibilitaram o surgimento de processos de soldagem por fusão. Em 1885, foi obtida a primeira patente de um processo de soldagem por Nikolas Bernados e Stanislav Olszewsky na Inglaterra, que era baseada em um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de carvão e a peça a ser soldada. E, em meados de 1890, N. G. Slavianoff, na Rússia, e Charles Coffin, nos Estados Unidos, desenvolveram a soldagem a arco com eletrodo metálico sem um revestimento para estabilizar o arco e proteger contra o ar atmosférico (MODENESI, 2012).

De acordo com Modenesi (2012), a soldagem teve pouca utilização até a 1ª Grande Guerra Mundial, onde a soldagem passou a ser utilizada mais intensamente como processo de fabricação. A partir deste período a soldagem se desenvolveu exponencialmente, e novos processos e equipamentos foram criados. O desenvolvimento da eletrotécnica, eletrônica, metalurgia, instrumentação, robótica e informática contribuíram com o avanço da soldagem através de modelos teóricos e empíricos para a compreensão dos fenômenos da soldagem, com a mecanização e automação destes processos, e também até na tomada de decisão e alteração de parâmetros, independente do operador.

Atualmente existem mais de 50 processos de soldagem com alguma aplicação na indústria. A soldagem hoje está presente nas mais variadas áreas de atividades industriais, desde a indústria serralheira (baixa tecnologia e complexidade) até a industrial aeroespacial (alta tecnologia e complexidade). Na Figura 1 é mostrado a crescente aparição de novos processos de soldagem ao longo do tempo.

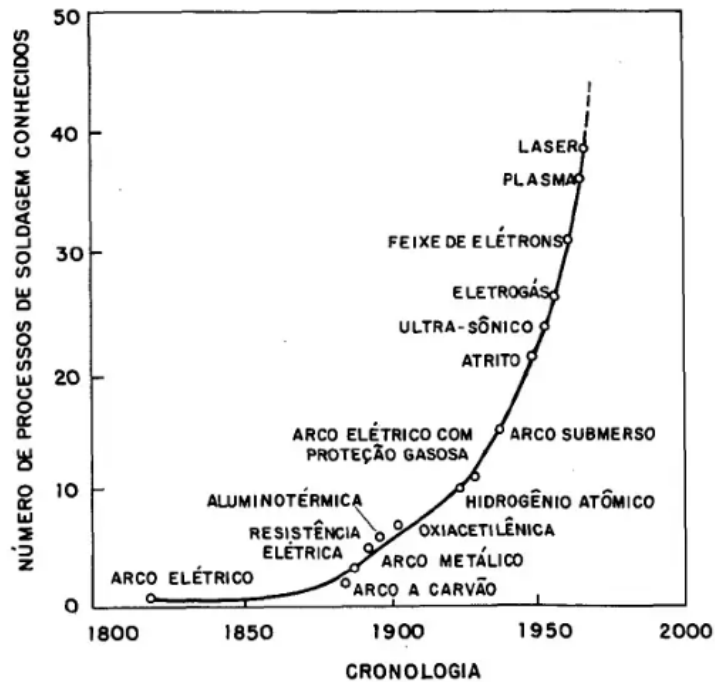


Figura 1 – Evolução de novos processos de soldagem ao longo do tempo (WAINER et al., 2004).

2.2 PROCESSOS DE SOLDAGEM

A soldagem é a coalescência localizada de metais ou não-metais, produzida pelo aquecimento dos materiais até a temperatura de soldagem, podendo ser realizada também com pressão, ou apenas com aplicação de pressão, também podendo ter metal de adição ou não (MACHADO, 1996).

Segundo Modenesi (2012), tecnologicamente falando, a soldagem é dividida em dois grandes grupos de processos, a soldagem por pressão e a soldagem por fusão.

A soldagem por pressão é baseada na aplicação de altas pressões de modo a deformar plasticamente as superfícies dos materiais desejados, obtendo assim, a aproximação atômica necessária para uní-las. Normalmente, as peças submetidas a esse processo são aquecidas de forma a facilitar a solda entre elas. Este grupo inclui, entre outros, os processos de soldagem por ultrassom, por fricção, por forjamento, resistência elétrica, difusão, explosão, resistência e, mais recentemente, o processo de soldagem por fricção com mistura (MODENESI, 2012).

A soldagem por fusão consiste na aplicação de altas temperaturas na região da união das peças para que a fusão destas e do metal de adição (quando utilizado), produza a ligação entre elas através da solidificação do metal fundido. Atualmente na indústria, a soldagem por fusão, que tem como fonte de energia o arco elétrico, é a que mais vem sendo utilizada (MODENESI, 2012).

Este tipo de soldagem, engloba um grande número de processos, estes acabam sendo divididos em subgrupos. Uma classificação bastante utilizada é a que agrupa os processos pela fonte de energia utilizada para a fundição das peças (MODENESI, 2012). A Tabela 1 mostra alguns processos de soldagem por fusão e suas principais características.

Tabela 1 – Alguns dos processos de soldagem por fusão e suas principais características. (MODENESI, 2012).

PROCESSO	FONTES DE CALOR	TIPO DE CORRENTE E POLARIDADE	AGENTE PROTETOR OU DE CORTE	OUTRAS CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÕES
Soldagem por eletro-escória	Aquecimento por resistência da escória líquida	Contínua ou alternada	Escória	Automática/Mecanizada. Junta na vertical. Arame alimentado mecanicamente na poça de fusão. Não existe arco	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, espessura ≥ 50 mm. Soldagem de peças de grande espessura, eixos, etc.
Soldagem ao Arco Submerso	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo +	Escória e gases gerados	Automática/mecaniz. ou semi-automática. O arco arde sob uma camada de fluxo granular	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga. Espessura ≥ 10 mm. Posição plana ou horizontal de peças estruturais, tanques, vasos de pressão, etc.
Soldagem com Eletrodos Revestidos	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo + ou -	Escória e gases gerados	Manual. Vareta metálica recoberta por camada de fluxo	Soldagem de quase todos os metais, exceto cobre puro, metais preciosos, reativos e de baixo ponto de fusão. Usado na soldagem em geral.
Soldagem com Arame Tubular	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo +	Escória e gases gerados ou fornecidos por fonte externa. Em geral o CO_2	O fluxo está contido dentro de um arame tubular de pequeno diâmetro. Automático ou semi-automático	Soldagem de aços carbono com espessura ≥ 1 mm. Soldagem de chapas
Soldagem MIG/MAG	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo +	Argônio ou Hélio, Argônio + O_2 , Argônio + CO_2 , CO_2	Automática/mecaniz. ou semi-automática. O arame é sólido	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, não ferrosos, com espessura ≥ 1 mm. Soldagem de tubos, chapas, etc. Qualquer posição
Soldagem a Plasma	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo -	Argônio, Hélio ou Argônio + Hidrogênio	Manual ou automática. O arame é adicionado separadamente. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arco é constricto por um bocal	Todos os metais importantes em engenharia, exceto Zn, Be e suas ligas, com espessura de até 1,5 mm. Passes de raiz
Soldagem TIG	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo -	Argônio, Hélio ou misturas destes	Manual ou automática. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arame é adicionado separadamente.	Soldagem de todos os metais, exceto Zn, Be e suas ligas, espessura entre 1 e 6 mm. Soldagem de não ferrosos e aços inox. Passe de raiz de soldas em tubulações
Soldagem por Feixe Eletrônico	Feixe eletrônico	Contínua. Alta Tensão. Peça +	Vácuo ($\approx 10^{-4}$ mm Hg)	Soldagem automática. Não há transferência de metal. Feixe de elétrons focalizado em um pequeno ponto.	Soldagem de todos os metais, exceto nos casos de evolução de gases ou vaporização excessiva, a partir de 25 mm de espessura. Indústria nuclear e aeroespacial.
Soldagem a Laser	Feixe de luz		Argônio ou Hélio	Como acima	Como acima. Corte de materiais não metálicos
Soldagem a Gás	Chama oxiacetilênica		Gás (CO , H_2 , CO_2 , H_2O)	Manual. Arame adicionado separadamente	Soldagem manual de aço carbono, Cu, Al, Zn, Pb e bronze. Soldagem de chapas finas e tubos de pequeno diâmetro

2.3 PROCESSO DE SOLDAGEM COM ELETRODOS REVESTIDOS

O processo que será demonstrado neste trabalho como inferior, em termos da produtividade, ao processo de soldagem MIG/MAG (GMAW), é o processo de soldagem com eletrodos revestidos (referenciado nesse trabalho como SMAW). Segundo Machado (1996), tal processo foi responsável pela rápida expansão da soldagem. Nos anos 20 do século XX ele foi o primeiro a ser aceito como de

alta produtividade, qualidade e flexibilidade. Neste processo, o arco elétrico vai ocorrer entre o eletrodo consumível e a peça, gerando a poça de fusão como pode ser visualizado esquematicamente na Figura 2.

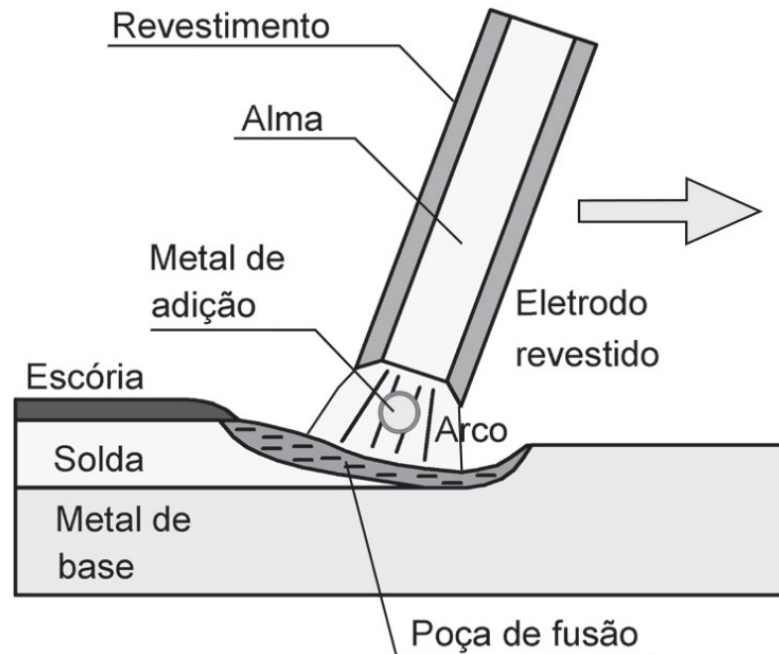


Figura 2 – Esquema de soldagem com eletrodo revestido (MARQUES, 2016).

De acordo com Marques (2016), o eletrodo revestido é uma vareta metálica revestida (também chamada de alma), que pode ser trefilada ou fundida, que faz a condução da corrente elétrica e fornecimento do metal de adição para o preenchimento da junta. A alma é revestida pelos mais variados materiais, e forma o revestimento do eletrodo. Tal revestimento possui as mais variadas funções, sendo as principais de acordo com Marques (2016):

- Estabilização do arco elétrico;
- Ajuste da composição química do cordão, através de elementos de liga e eliminação de impurezas;
- Proteção da poça de fusão e do metal de solda contra contaminação dos gases presentes na atmosfera, pela geração de gases e da camada de escória;
- Possibilitar reações para o refino metalúrgico da solda, como a desoxidação, dessulfuração, etc;
- Auxiliar na formação de camada de escória de proteção;
- Controlar a propriedades físicas e químicas da escória, além de facilitar sua remoção;
- Prover a soldagem nas mais variadas posições;
- Eliminar óxidos e possíveis contaminações na superfície da junta;
- Ajudar na redução da quantidade de respingos e fumos;

- Reduzir a velocidade de resfriamento da solda;
- Utilizar diferentes polaridades e tipos de corrente;
- Elevar a taxa de deposição.

Segundo Marques (2016), a principal característica deste processo é a inúmera quantidade de formulações para o revestimento do eletrodo, o que traz diversas características operacionais, mecânicas e metalúrgicas do metal depositado, além da grande versatilidade de soldagem em ligas soldáveis. Com um custo relativamente baixo e equipamentos simples para realização da solda, comparando a outros processos, e a versatilidade da utilização em locais abertos e de difícil acesso são mais algumas importantes características deste processo.

Algumas limitações deste tipo de soldagem são a baixa produtividade quando comparada a outros processos (MIG/MAG e arco submerso) tanto devido à baixa deposição, quanto ao fator de ocupação do soldador, normalmente abaixo de 40%. Além disso, é necessário ao operador um treinamento específico, demorado e dispendioso, ainda mais dependendo da aplicação, necessidade de cuidados especiais aos eletrodos e a alta quantidade de gases e fumos originados no processo, que particularmente em ambientes fechados podem ser prejudiciais à saúde (MARQUES, 2016).

Também conhecida por soldagem manual, a soldagem por eletrodos revestidos só possui uma variação “mecanizada”, chamada de soldagem por gravidade. A soldagem manual, pode ser utilizada em vários materiais, tais como aços-carbono, aços inoxidáveis, ferros fundidos, alumínio, cobre, níquel e ligas destes. Já metais com baixo ponto de fusão (chumbo, estanho e zinco) e metais muito reativos (titânio, zircônio, molibdênio e nióbio) não são soldáveis por este processo (MARQUES, 2016).

2.3.1 EQUIPAMENTOS

Os equipamentos utilizados na soldagem com eletrodo revestido são, de forma geral, cabos, porta-eletrodos, fonte de energia, ferramentas de uso geral (picadeira, escova de aço, etc.) e equipamentos de segurança (óculos, avental, máscara, protetor auricular, etc.) (MARQUES, 2016).

A fonte de energia utilizada neste processo é de característica de “corrente constante”, pois o comprimento do arco de soldagem neste processo é controlado manualmente pelo operador, causando variações na execução do cordão de solda. Outro ponto a ser considerado para a seleção da fonte de energia é a desnecessidade de uma fonte com ciclo de trabalho de 100%, devido ao baixo fator de ocupação do soldador, fazendo com que essa seja superdimensionada e de alto custo para a operação. Atualmente, as fontes inversoras vêm sendo muito utilizadas devido a seus controles que ajudam a

evitar problemas, como a dificuldade na abertura/reabertura do arco e a colagem do eletrodo na peça, (MARQUES, 2016).

O porta-eletrodo tem como função prender e energizar o eletrodo. O cabo do porta-eletrodos deve ser bem isolado de forma a reduzir os riscos de abertura de arco acidentais, causar curtos-circuitos e suas garras devem estar limpas e em boas condições de uso de forma a evitar problemas com o seu superaquecimento. O seu tamanho deve variar de acordo com a sua aplicação, visto que quanto mais pesado, maior o valor da corrente máxima permissível, logo, pode aumentar a fadiga do soldador caso haja um superdimensionamento deste equipamento (MARQUES, 2016).

Os cabos de soldagem possuem a função de conduzir a corrente elétrica para o porta-eletrodos, e o cabo de retorno, ou cabo terra, conduz a corrente elétrica da peça para a fonte. Tais equipamentos podem ser de cobre ou alumínio, devem ser flexíveis e recobertos por um material isolante, de forma a evitar sujeira e abrasão. Ao selecionar um cabo deve-se observar três fatores segundo, Marques (2016):

- Corrente de soldagem;
- Ciclo de trabalho;
- Comprimento total dos cabos do circuito.

O mal dimensionamento dos cabos pode resultar em sobreaquecimento, perda de energia elétrica para o meio ambiente na forma de calor, variação na qualidade da solda e ruptura das conexões e cabos (MARQUES, 2016).

2.3.2 CONSUMÍVEIS

O eletrodo revestido possui em sua formação uma vareta metálica, também chamado de alma, e é coberta por uma camada de revestimento. A composição do revestimento pode ser dos mais variados materiais, fazendo com que cada revestimento tenha uma função específica para cada aplicação. Devido a isso, há um grande número de eletrodos com diferentes características operacionais, que se aplicam a diferentes materiais e atendem a uma grande variedade de soldas (MARQUES, 2016).

Abaixo é mostrado parte da norma da American Welding Society: AWS A 5.1-91 para eletrodos revestidos para soldagem de aço carbono e baixa liga.

Eletrodos para aço carbono e baixa liga são classificados segundo a resistência mecânica do depósito, tipo de revestimento, tipo de corrente e posição de soldagem, segundo a seguinte codificação.

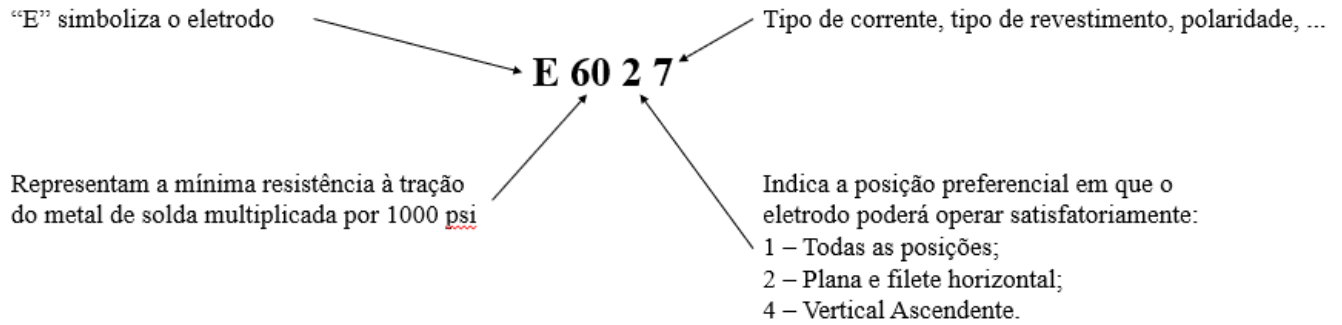


Tabela 2 – American Welding Society: AWS A 5.1-91 para eletrodos revestidos para soldagem de aço carbono e baixa liga.

O último dígito	Tipo de Revestimento	Classificação de eletrodos	Tipo e polaridade de corrente
0	Celulósico, ao sódio	6010, 7010, 8010	CCEP
1	Celulósico, ao potássio	6011	CA ou CCEP
2	Rutílico, ao sódio	6012	CA ou CCEN
3	Rutílico, ao potássio	6013	CA ou DCEP ou DCEN
4	Rutílico, pó de ferro	7014, 7024	CA ou DCEP ou DCEN
5	Básico, baixo hidrogênio, ao sódio	7015	CCEP
6	Básico, baixo hidrogênio, ao potássio	7016	CA ou CCEP
7	Básico, óxido de ferro e pó de ferro	6027, 7027	CA ou DCEP ou DCEN
8	Básico, óxido de ferro, ao sódio	7018, 7018M, 7028, 7048	CA ou CCEP

Os eletrodos podem ser facilmente danificados caso não sejam manuseados e armazenados da maneira correta. Eletrodos quebrados, com alma exposta ou com umidade excessiva podem causar instabilidade de arco, porosidades, respingos, fragilização e fissuração por hidrogênio. A Tabela 3 ilustra quais as condições de armazenagem e acondicionamento para diversos tipos de eletrodos convencionais (MARQUES, 2016).

Tabela 3 – Condições de ressecagem e conservação de eletrodos revestidos convencionais. (MARQUES, 2016).

Ressecagem		
Tipo de Eletrodo	Temperatura (°C)	Tempo (h)
Básico	300-350	1,0-2,0
Alto Rendimento	250-300	1,0-2,0
Rutílico	70-90	1,0-2,0
Ferro Fundido	70-90	1,0-2,0
Inoxidável Rutílico	250-300	1,0-2,0
Inoxidável Básico	200-250	1,0-2,0
Conservação: Temperatura (°C)		
Tipo de Eletrodo	Em estufa	Em cochichos
Básico	100-150	80-150
Alto Rendimento	100-120	80-120
Rutílico	50-70	50-70
Ferro Fundido	50-70	50-70
Inoxidável	100-120	80-120

2.3.3 TÉCNICA OPERACIONAL

Se tratando de soldagem manual com eletrodos revestidos, as variáveis operacionais são: tipo, polaridade e valor da corrente de soldagem; tensão e comprimento do arco; velocidade de soldagem; tipo e diâmetro do eletrodo; técnica de manipulação do eletrodo e sequência de deposição (MARQUES, 2016).

2.3.4 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO PROCESSO DE SOLDAGEM COM ELETRODOS REVESTIDOS

Segundo Marques (2016) o processo de soldagem com eletrodos revestidos foi o principal processo de soldagem utilizado até os anos 1960, no entanto vem perdendo importância com o desenvolvimento e evolução de outros processos de soldagem. Devido a isso, abaixo estão descritos as vantagens e limitações desse processo listadas por Ponomarov (2020):

Vantagens:

- Equipamento que possui versatilidade para o manuseio, é relativamente simples, barato, portátil e ocupa pouco espaço;
- A proteção e o metal de adição (alma) são fornecidos pelo eletrodo revestido;
- A solda pode ser feita em todas as posições;
- É viável em locais com pouco espaço;
- Devido ao efeito canhão na ponta do eletrodo é menos sensível a corrente de ar, diferente de processos que possuem proteção gasosa;

- Há uma grande variedade de eletrodos e são facilmente encontrados no mercado;
- Pode ser utilizado para a soldagem da maioria dos metais e ligas metálicas mais comuns no mercado (aço carbono, aços de baixa, média e alta liga, aço inoxidável, ferro fundido, cobre, níquel e suas ligas e algumas ligas de alumínio);
- Pode realizar a soldagem de materiais dissimilares;
- Utilizado principalmente para a soldagem de cordões curtos, trabalhos de manutenção e trabalhos em campo;
- É o processo mais utilizado na soldagem subaquática.

Limitações:

- Alimentação do processo não é contínua;
- Possui uma baixa taxa de deposição se comparado com o processo MIG/MAG;
- Não é adequado para metais reativos como zircônio ou titânio, pois mesmo com a queima do revestimento do eletrodo a proteção gerada não é adequada para evitar a contaminação da solda pelo oxigênio;
- Não é adequado para materiais com espessura abaixo de 2 mm;
- Produz escória, que deve ser retirada após a soldagem ou após cada passe;
- Processo manual e de baixa produtividade, com um fator de operação de não mais do que 25%;
- É necessário a ressecagem dos eletrodos antes de sua utilização;
- Perdas de 30-35% dos eletrodos, podendo ter como principal causa o mal uso dos eletrodos.

2.4 PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG

O processo que, neste trabalho, será sugerido para o uso no lugar da soldagem com eletrodo revestido é o processo de soldagem MIG/MAG. Também conhecido como GMAW (Gas Metal Arc Welding), é um processo que une peças metálicas através da fusão promovida pelo arco elétrico que é estabelecido entre o arame-eletrodo e a peça de trabalho (Figura 3). A proteção da região da solda é feita por uma atmosfera protetora de gás inerte, ou ativo, ou uma mistura de ambos. O processo chamado de MIG (abreviatura do inglês Metal Inert Gas) é quando a proteção gasosa utilizada for constituída de um gás inerte, que não tem nenhuma atividade física com a poça de fusão, e MAG (abreviatura do inglês Metal Active Gas) quando a proteção gasosa é feita com um gás dito ativo, ou seja, um gás que interage com a poça de fusão (MARQUES, 2016).

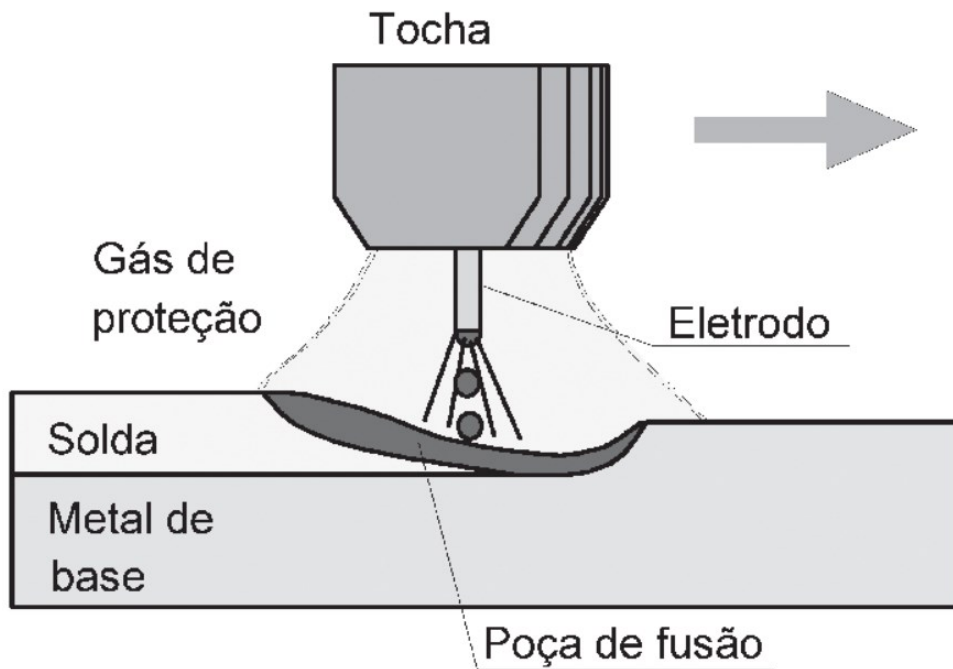


Figura 3 – Esquema de soldagem MIG/MAG (MARQUES, 2016).

Na soldagem MIG/MAG a alimentação do eletrodo é feita de forma automática, através de um alimentador motorizado e, além de se responsabilizar pela iniciação e interrupção da solda, o soldador também move a tocha ao longo da junta. O comprimento do arco é mantido de forma constante pelo sistema, independente dos movimentos do soldador, dentro de certos limites (MARQUES, 2016).

A soldagem MIG/MAG pode ser utilizada em uma grande faixa de espessura, e em metais ferrosos e não ferrosos. O processo MAG é utilizado apenas na soldagem de metais ferrosos, tendo como gás de proteção CO_2 ou misturas com alta presença deste gás, já a soldagem MIG pode ser utilizada tanto na soldagem de metais ferrosos, quanto não ferrosos, como cobre, alumínio, níquel, magnésio e suas ligas (MARQUES, 2016).

De acordo com Marques (2016), as principais vantagens deste processo em relação à soldagem com eletrodos revestidos são: a alta taxa de ocupação do operador (devido à alimentação automática), alta taxa de deposição, grande versatilidade quanto aos materiais e espessura soldáveis, não existência de fluxos de soldagem, falta de necessidade da limpeza e remoção da escória e menor nível de habilidade exigido do soldador.

A principal limitação deste processo, segundo Marques (2016), é a sua sensibilidade à variação dos parâmetros elétricos do arco, que influencia diretamente na qualidade do cordão de solda, além da exigência de um rígido ajuste nos parâmetros para conferir ao cordão determinadas

características. Devido à forte interdependência destes parâmetros e sua influência no resultado final, a determinação destes é muito dificultada. Outra limitação é o elevado custo do equipamento e de sua manutenção quando comparada ao processo de soldagem com eletrodos revestidos, além da menor quantidade de variedade de arames-eletrodo disponíveis.

A soldagem MIG/MAG é um dos processos que apresentam maior crescimento em utilização no mundo nos últimos anos. Tal crescimento ocorre principalmente da tendência de substituir processos manuais por processos mecanizados, de forma a aumentar a produção, e esse processo também vem se mostrando mais adequado entre os processos a arco, semiautomáticos e com utilização de robôs (MARQUES, 2016).

Deve-se tomar cuidado para não confundir produtividade com produção, neste caso. O alto ciclo de trabalho do processo MIG/MAG proporciona uma grande produção por unidade de tempo (que pode ser chamado de produtividade), já que o processo fica depositando material por mais tempo para fazer a união. Entretanto, a produção em si depende da taxa de fusão, que é avaliada apenas durante o arco aberto, entre outros fatores. Assim, caso, por exemplo, as soldas sejam curtas e intermitentes, o ciclo de trabalho pode ser tão baixo como para o processo Eletrodo Revestido, mas a produção vai continuar sendo mais alta (SCOTTI, A. e PONOMAROV, V., 2014).

De acordo com Marques (2016), na soldagem MIG/MAG o modo com que o metal fundido na ponta do eletrodo tem que se transferir para a poça de fusão é muito importante, pois afeta em muitas características do processo, como: estabilidade do arco, quantidade de gases (principalmente nitrogênio, hidrogênio e oxigênio) absorvidos pelo metal fundido, aplicabilidade do processo em certas posições de soldagem e quantidade de respingos. Simplificando, pode-se considerar que há quatro métodos de transferência do metal de adição para a peça, sendo elas: transferência por curto-circuito, transferência globular, transferência por spray e transferência controlada.

2.4.1 EQUIPAMENTOS

Os equipamentos utilizados na soldagem MIG/MAG são, de forma geral, alimentador de arame, tocha de soldagem, fonte de energia, fonte de gás protetor, cabos, mangueiras, equipamentos de segurança (óculos, avental, máscara, protetor auricular, etc.). Posicionadores e movimentadores de tocha podem ser utilizados na soldagem mecanizada (MARQUES, 2016).

De acordo com Marques (2016), existem duas formas para que se consiga com que a velocidade de consumo (de fusão) do eletrodo seja em média igual a velocidade de alimentação, fazendo com que o arco permaneça relativamente constante: permitir que o equipamento controle a velocidade de alimentação, fazendo com que seja igual à velocidade de fusão, ou manter a velocidade

de alimentação constante e deixar com que ocorram variações nos parâmetros de soldagem para manter o consumo constante, e em média igual à velocidade de alimentação.

Para a primeira forma, é utilizada uma fonte de corrente constante, o que vai resultar em uma velocidade de fusão aproximadamente constante, com o alimentador de arame com velocidade variável e controlada pelo equipamento, que vai manter o comprimento do arco estável. Tal controle é feito pela comparação da tensão do arco, a cada instante, com um valor de referência, e pela alteração da velocidade de alimentação para compensar diferenças entre a tensão instantânea no arco e a tensão de referência. Tal fonte foi utilizada na introdução do processo, onde só haviam fontes para o processo TIG e eletrodo revestido (MARQUES, 2016).

Para a segunda forma, é utilizada uma fonte de tensão constante e um alimentador de arame com velocidade de alimentação constante. Tal equipamento tende a manter o comprimento do arco estável, pois se o arco se tornar maior que o valor fixado a corrente de soldagem será reduzida, o que faz com que a velocidade de consumo reduza, a ponta de eletrodo começa se aproximar à poça de fusão e o comprimento do arco tende a retornar ao valor fixado. Quando o comprimento do arco diminui, momentaneamente um raciocínio parecido, mas invertido, com o descrito acima, é utilizado. Tal sistema é o utilizado atualmente, por ser mais barato, mais simples e apresentar bons resultados com arames mais finos (MARQUES, 2016).

Uma vez que o processo utiliza corrente contínua, as fontes geralmente usadas são do tipo transformador-retificador. É possível ajustar a tensão de saída em uma faixa de 18 a 50 volts e sua alimentação geralmente é trifásica (MARQUES, 2016).

Segundo Marques (2016), os alimentadores de arame (Figura 4) normalmente são acionados por motores de corrente contínua e fornecem o arame a uma velocidade constante, o que pode ser ajustada em uma ampla faixa. O alimentador e a fonte de energia não são dependentes entre si, no entanto ao ajustar a velocidade de alimentação do arame, altera-se a corrente de soldagem fornecida pela fonte, devido às características da fonte utilizada no processo. O alimentador alimenta a tocha com o arame através de dois roletes que o empurra em direção à tocha (Figura 5).



Figura 4 – Um exemplo do alimentador de arame (MARQUES, 2016).

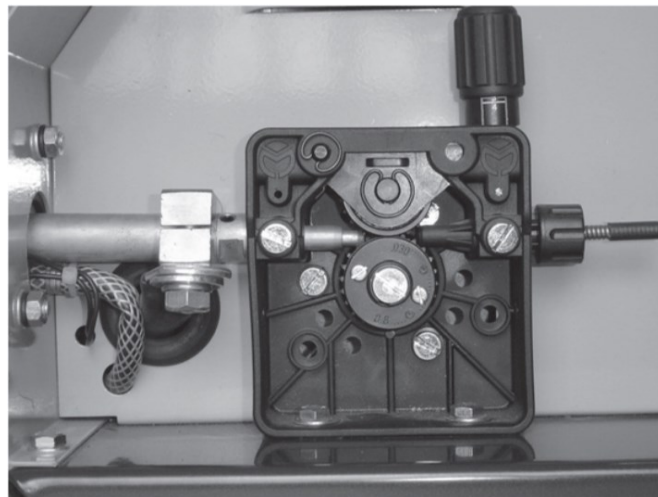


Figura 5 – Sistema de alimentador de arame com um par de roletes de alimentação (MARQUES, 2016).

Diferentes tipos de comandos eletrônicos foram introduzidos nos alimentadores de arame na década de 1990. Tais comandos vêm permitindo um controle mais consistente e preciso da velocidade de alimentação do arame e podem atuar de forma a eliminar ou minimizar a influência dos problemas relacionados a variações na tensão da rede. Estes comandos hoje em dia são utilizados como forma de comunicação do alimentador de arame com a fonte de energia, podendo assim utilizar diferentes estratégias de controle em soldagem (MARQUES, 2016).

A tocha utilizada neste processo consiste no punho ou suporte, que apoia um bico de contato, que faz a energização do eletrodo, um bocal que faz a orientação do fluxo do gás de proteção e um gatilho que aciona o sistema (Figura 6). O bico de contato tem na maior parte da sua composição o cobre e seu diâmetro é um pouco maior do que o diâmetro do arame, servindo como contato elétrico deslizante. O bocal pode ser feito de material cerâmico ou cobre, deve ter seu diâmetro compatível

com a corrente de soldagem e o fluxo de gás que serão utilizados. O gatilho aciona o contactor que liga a máquina de solda e libera o fluxo de gás de proteção, além de acionar o alimentador de arame. A tocha pode ser refrigerada por água ou pelo gás de proteção, dependendo da capacidade e fator de trabalho (MARQUES, 2016).



Figura 6 – Tochas de soldagem MIG/MAG. Acima: Tocha Convencional. Abaixo: Tocha com aspiração de fumo no próprio corpo (MARQUES, 2016).

2.4.2 CONSUMÍVEIS

Os consumíveis que são utilizados na soldagem MIG/MAG são o arame-eletrodo, gás de proteção e um líquido de proteção da tocha e regiões adjacentes à solda contra adesão de respingos (MARQUES, 2016).

Segundo Marques (2016), os arames utilizados são constituídos de metais e ligas metálicas e possuem características muito bem controladas, tais como: composição química, dureza, condições superficiais e dimensões. Arames confeccionados com defeito em alguma das propriedades citadas anteriormente podem causar instabilidade no arco, falha na alimentação e descontinuidade do cordão de solda. Os arames ainda possuem um revestimento de cobre para protegê-los da corrosão e melhorar o contato elétrico entre o arame e o bico de contato na soldagem.

De acordo com Marques (2016), a seleção do arame deve levar em consideração diversos fatores, tais como: composição química do gás de proteção, do metal de base e propriedades mecânicas desejadas na solda. Abaixo é mostrado parte da norma da American Welding Society: AWS A 5.18 para arames-eletrodo para soldagem de aço carbono e baixa liga.

ER XXY – ZZ, onde

E – Eletrodos para Soldagem a arco;

R – Varetas;

XX - Resistência mínima à tração do metal depositado de acordo com a norma (2 ou 3 dígitos) em kpsi;

Y – Pode representar arame maciço (letra S, de “solid”) ou tubular (letra T);

ZZ- Indica a composição química do arame (número, aços comuns, ou letra, aço baixa liga).

Tabela 4 – Últimos dígitos (para arames de aço comum ao carbono).

Classificação	C	Mn	Si	P	S
ER 70S - 2	0,07	0,90 a 1,40	0,40 a 0,70	0,025	0,035
ER 70S - 3	0,06 a 0,15	0,90 a 1,40	0,45 a 0,70	0,025	0,035
ER 70S - 4	0,07 a 0,15	1,00 a 1,50	0,65 a 0,85	0,025	0,035
ER 70S - 5	0,07 a 0,19	0,90 a 1,40	0,30 a 0,60	0,025	0,035
ER 70S - 6	0,07 a 0,15	1,40 a 1,85	0,80 a 1,15	0,025	0,035
ER 70S - 7	0,07 a 0,15	1,50 a 2,00	0,50 a 0,80	0,025	0,035

De acordo com Marques (2016), os arames para a soldagem de aço podem ser sólidos, com seção totalmente metálica, ou formados por uma fina camada metálica fechada, tendo um preenchimento interno, sendo chamados de tubulares.

Na soldagem MIG/MAG os gases utilizados podem ser inertes ou ativos, ou até mesmo mistura destes. O tipo de gás tem uma grande influência sobre o processo, uma vez que influencia as características do arco e a transferência de metal, a penetração, a largura e o formato do cordão de solda, a velocidade máxima de soldagem, a tendência ao aparecimento de mordeduras e o custo da operação (MARQUES, 2016).

2.4.3 TÉCNICA OPERACIONAL

Se tratando da soldagem MIG/MAG, a habilidade manual requerida do soldador é menor do que a com eletrodos revestidos, uma vez que a alimentação é mecanizada, o que dispensa o movimento de mergulho do eletrodo em direção à peça. No entanto, devido à maior quantidade de parâmetros a serem observados e à sua interdependência há uma maior dificuldade na otimização destes, (MARQUES, 2016).

De acordo com Marques (2016), as principais variáveis no processo de soldagem MIG/MAG são: tensão, corrente e polaridade do arco de soldagem, velocidade de deslocamento, vazão de gás protetor, diâmetro e comprimento do eletrodo percorrido pela corrente elétrica (stickout).

2.4.4 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG

O processo de soldagem MIG/MAG hoje é utilizado em pequenas e grandes indústrias, onde há uma demanda de alta produção e qualidade. Segue abaixo vantagens e limitações deste processo listadas por Ponomarov (2020):

Vantagens:

- Operado na forma semiautomática e automática;
- Diferentes combinações de gases de proteção, parâmetros de soldagem e características da fonte produzem soldas com características bem distintas;
- Aplicado em praticamente todos os metais;
- Requer pouca limpeza do cordão após soldado;
- Pode-se variar o aporte térmico em grande faixa.

Limitações:

- Ação metalúrgica limitada;
- O equipamento é mais complexo, caro e menos portátil do que o para eletrodo revestido;
- Mais difícil de usar em locais de difícil acesso;
- Demanda maior rigor na limpeza e preparação da junta;
- Altos níveis de calor e iluminação irradiados: resistência do operador;
- O arco necessita ser protegido contra a corrente de ar.

2.5 TAXA DE DEPOSIÇÃO (PRODUÇÃO)

A taxa de deposição (produção) é a quantidade total de massa do metal de adição depositada por unidade de tempo do arco aberto. Segundo Modenesi (2001), tal taxa depende de muitos fatores, como: o processo de soldagem, tipo e o diâmetro e o comprimento do eletrodo e o tipo, a polaridade e o nível da corrente.

A taxa de deposição é dada pela seguinte equação:

$$T_d = \frac{M_f - M_i}{t_{ARC}} \quad (1)$$

Onde:

T_d - Taxa de deposição (g/min);

M_i - Massa inicial (g);

M_f - Massa final (g);

t_{ARC} - Tempo de arco aberto (min).

2.6 PRODUTIVIDADE

A produtividade, diferente do cálculo de produção, é utilizado o tempo total da operação

$$P = \frac{M_f - M_i}{t_{OP}} \quad (2)$$

Onde:

P - Produtividade (g/min);

M_i – Massa inicial (g);

M_f - Massa final (g);

t_{OP} – Tempo total de operação (min).

O tempo total de operação inclui a preparação da junta, troca de eletrodos, remoção de escória (no caso do processo SMAW) e limpeza após a realização da solda. Logo, o tempo total de operação varia de acordo com o processo escolhido e sua aplicação particular. É óbvio, que o processo que necessita de maior tempo total é caracterizado pela produtividade mais baixa.

3 METODOLOGIA

A metodologia proposta neste trabalho teve como objetivo avaliar os prós e contras da soldagem SMAW e soldagem MIG/MAG para situações envolvendo diferentes aplicações, buscando por justificativas da preferência geral do processo MIG/MAG. Para a realização da pesquisa foram utilizados como fonte artigos com experimentos realizados comparando os dois processos de soldagem em questão.

4 RESULTADOS (encontrados nos trabalhos de comparação dos processos de soldagem SMAW e MIG/MAG)

4.1 Comparação 1: Soldagem em aços de alta resistência para indústria naval

Segundo Junior (2014) a soldagem de aços de alta resistência representa um grande desafio, em razão da grande variedade de ligas disponíveis e a necessidade de assegurar tanto elevada resistência mecânica e boa tenacidade da junta soldada. Devido a esse fato, a Marinha Brasileira

utiliza amplamente os aços da classe HY-80, que preferencialmente ainda são soldados pelo processo SMAW.

O objetivo deste trabalho era avaliar a possibilidade de uma melhoria de produtividade na soldagem do aço HY-80, apresentando uma análise comparativa entre a produtividade e as propriedades mecânicas de juntas soldadas deste aço realizadas pelos processos SMAW e MIG/MAG.

De acordo com Junior (2014), foi utilizada uma chapa com 30,0 mm de espessura, eletrodos revestidos da classe AWS E-10018M de 3,25 e 4,00 mm de diâmetro e o arame da classe AWS ER 120S-G de 1,2 mm de diâmetro. Utilizou-se como gás de proteção uma mistura do tipo 25% de CO₂ e 75% de Ar e com vazão de 18 L/min. A distância bico de contato até a peça foi de 20 mm. As juntas foram preparadas com chanfro em meio V-45° e com abertura na raiz de 4,0 mm. Estas foram preaquecidas à temperatura de 90 °C, pela chama oxiacetilênica. A soldagem multipasse foi realizada na posição plana, com uma temperatura máxima entre passes de 150 °C, utilizando ambos os processos SMAW e MIG/MAG. Para o controle do preaquecimento e da temperatura entre passes foi usado um pirômetro de contato, devidamente calibrado.

As Tabelas 5 e 6 mostram os parâmetros de soldagem utilizados em cada um dos processos utilizados neste experimento.

Tabela 5 – Parâmetros de soldagem da junta realizada com o processo de eletrodo revestido, JUNIOR (2014).

Passo	Passo de:	Diâmetro do eletrodo (mm)	Corrente (A)	Tensão (V)	Tempo (s)	Vs (mm/s)	Energia de soldagem (kJ/mm)
1-6	Raíz	3,25	135-140	26-28	1652	3,09	1,2
7-30	Enchimento	4,00	160-165	28-30	6848	2,98	1,6
31-45	Acabamento	3,25	135-140	26-28	3057	4,17	0,9
FINAL					11557	3,39	1,29

Tabela 6 – Parâmetros de soldagem da junta realizada com o processo MIG/MAG (diâmetro do eletrodo 1,2 mm, corrente de 212-232 A, e tensão de 29-31 V), JUNIOR (2014).

Passo	Passo de:	Tempo (s)	Vs(mm/s)	Energia de soldagem (kJ/mm)
1-6	Raíz	629	2,7	2,46
7-30	Enchimento	3027	4,8	1,39
31-45	Acabamento	1045	5,7	1,17
FINAL		4701	4,9	1,36

Ao se analisar as Tabelas 5 e 6, verifica-se um ganho de produtividade da ordem de 2,5 vezes, visto que para a realização dos 45 passes o processo SMAW gastou 11557 segundos, enquanto para o processo MIG/MAG foram necessários apenas 4701 segundos.

A Tabela 7 e a Figura 7 mostram os resultados obtidos através dos ensaios de tração realizados tanto logo após a solda quanto após o tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT).

Tabela 7 – Resultados dos ensaios de tração, JUNIOR (2014).

Processo	Condição	LE (MPa)	LR (MPa)	Al (%)	RA (%)
MIG/MAG	Como Soldado	599	755	11,4	71,4
	TTAT	637	770	13,3	75,4
SMAW	Como Soldado	624	775	16,1	75,5
	TTAT	663	736	18,0	77,3
Metal Base	Como Recebido	586	703	21,8	79,1
Requisito HY-80		552-668	Ne	20,0	50,0

LE – Limite de escoamento; LR – Limite de resistência; Al – Alongamento percentual; RA - Redução percentual de área; Ne – Não especificado

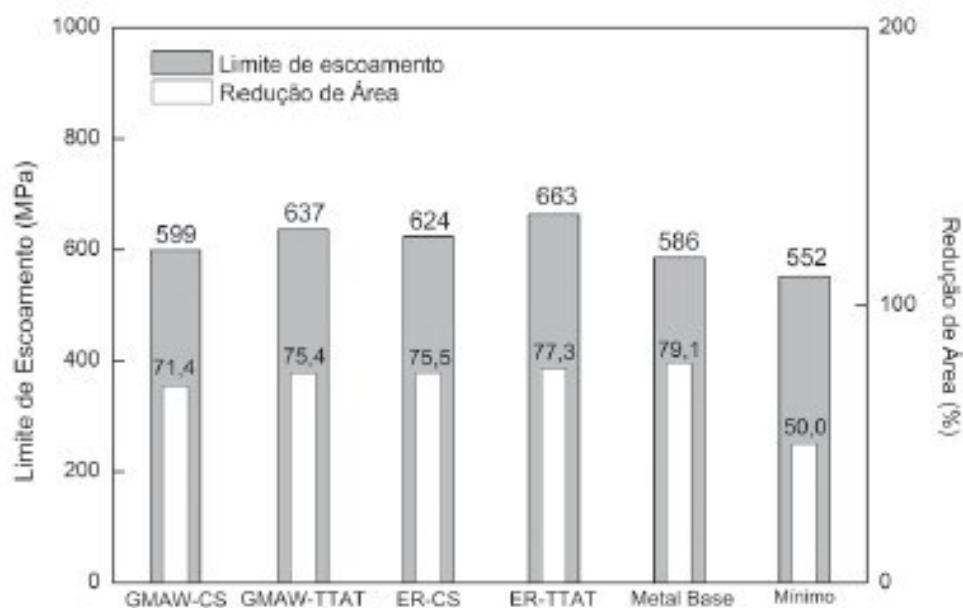


Figura 7 – Resultado dos ensaios de tração transversais (JUNIOR, 2014).

Ao se analisar os resultados dos ensaios de tração, foi verificado que todos os corpos de prova romperam no metal base, somente os valores de alongamento foram inferiores aos mínimos exigidos, e que o tratamento térmico de alívio de tensões não proporcionou mudanças significativas nos valores de resistência e limite de escoamento para as juntas soldadas com o processo com SMAW e processo MIG/MAG.

As Figuras 8 e 9 mostram os resultados obtidos através dos ensaios Charpy-V realizados tanto logo após a solda quanto após o tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT).

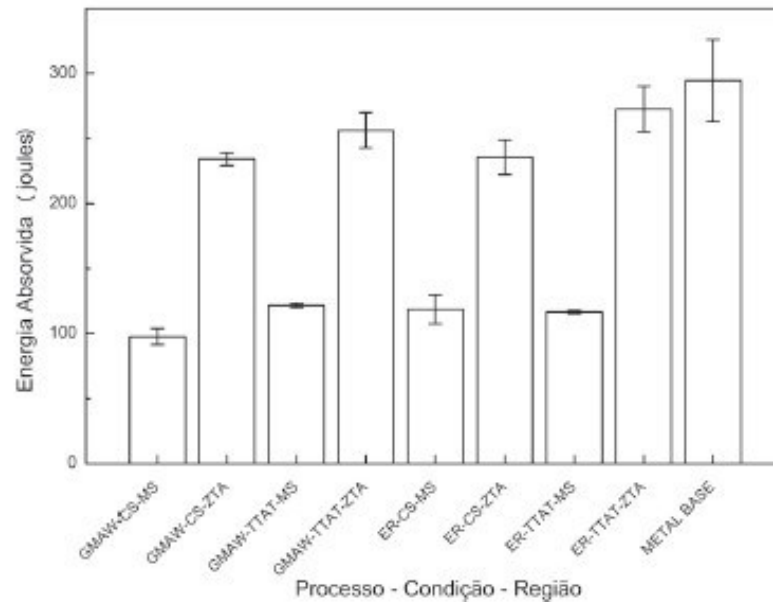


Figura 8 – Resultado dos ensaios de impacto Charpy-V realizados à -20°C , em Joules (JUNIOR, 2014).

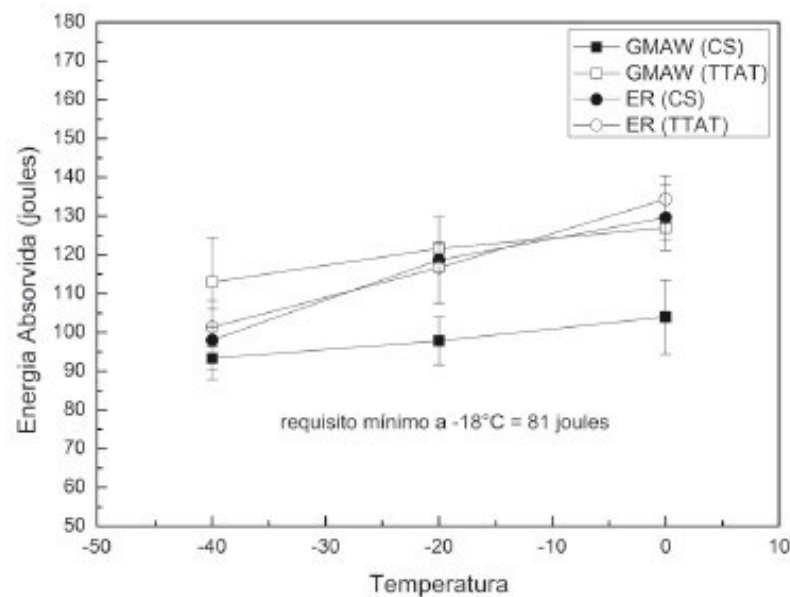


Figura 9 – Variação da energia absorvida no metal de solda das juntas soldadas pelos processos MIG/MAG e SMAW com a temperatura (JUNIOR, 2014).

Através das Figuras 8 e 9 é possível verificar que de acordo com a norma MIL-STD – 1688 todos os resultados estão superiores aos níveis mínimos exigidos por esta. Os melhores valores de energia absorvida foram para o metal base, já os menores foram obtidos pelo metal de solda. O tratamento térmico melhorou a tenacidade ao impacto tanto para o metal base, quanto para a Zona Termicamente Afetada (ZTA) nos dois processos de soldagem utilizados. A energia absorvida do

metal do cordão soldado pelo processo SMAW foi superior à do processo MIG/MAG, mas apenas sem o tratamento térmico.

As Figuras 10 e 11 ilustram os perfis de dureza das juntas soldadas por eletrodo revestido e MIG/MAG.

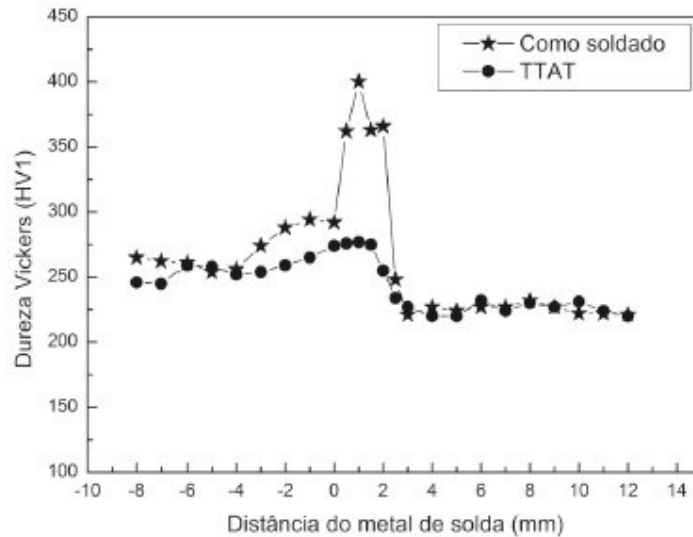


Figura 10 – Perfil de dureza Vickers da junta soldada por eletrodo revestido realizado a 3 mm da superfície da junta (JUNIOR, 2014).

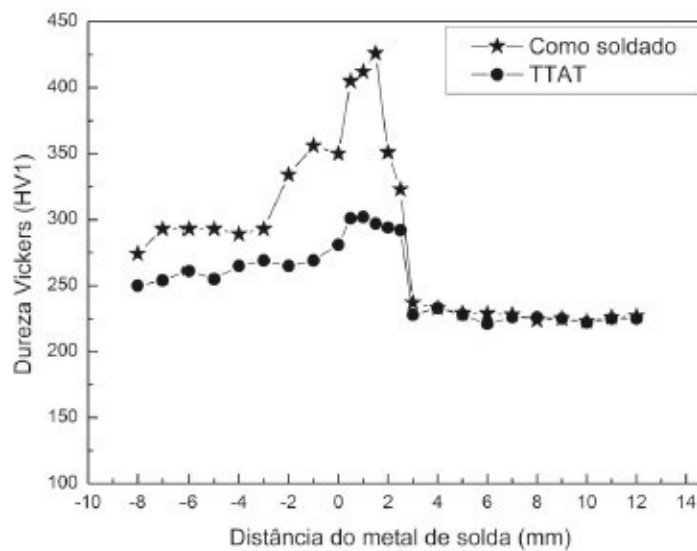


Figura 11 – Perfil de dureza Vickers da junta soldada por MIG/MAG realizado a 3 mm da superfície da junta (JUNIOR, 2014).

Por meio das Figuras 10 e 11 é possível verificar que as durezas das condições do estado de “como soldado” apresentaram valores superiores em ambos os casos e os valores de dureza da junta MIG/MAG foram superiores aos da junta SMAW. Em todas as condições analisadas as durezas

reduziram, conforme a distância do cordão notadamente no estado “como soldado”. O tratamento térmico promoveu uma redução na dureza da ZTA para ambos os processos de soldagem.

Segundo Junior (2014), os resultados das propriedades mecânicas obtidos para ambos os processos foram muito próximos. Os valores de escoamento e dureza não sofreram variações significativas entre os processos de soldagem, a tenacidade se mostrou bem acima dos valores mínimos exigidos para o metal base e para a ZTA, e os corpos-de-prova utilizados no ensaio de tração romperam no metal de base.

De acordo com Junior (2014), o experimento concluiu que a soldagem pelo processo MIG/MAG não provoca efeitos nocivos ao aço HY-80, o que torna este processo uma alternativa interessante para a soldagem de estruturas navais, por aliar propriedades mecânicas satisfatórias com melhor produtividade. Ao observar os parâmetros mostrados nas Tabelas 5 e 6, é evidenciado a possibilidade de um ganho de produtividade da ordem de 2,5 vezes, pois não se precisa perder o tempo para remover a escória e trocar de eletrodo.

Assim, a pesquisa desenvolvida por Junior, Costa, Souza e Jorge (2014) “Propriedades mecânicas e microestruturais de juntas soldadas do aço HY-80 pelos processos eletrodo revestido e MIG/MAG” mostrou que tanto a soldagem com o processo SMAW, quanto o MIG/MAG foram capazes de atingir as propriedades mecânicas desejadas, no entanto, caso se deseje uma maior produtividade, o processo a ser escolhido deve ser o MIG/MAG.

4.2 Comparação 2: Fabricação de revestimento em eixos propulsores

Segundo Belém (2017), devido à grande importância do transporte fluvial para a região Norte, se faz necessário grande cuidado sobre o principal meio de transporte utilizado, que são embarcações de pequeno, médio e grande porte. Tais embarcações contam com complexos sistemas de máquinas que são responsáveis pelo seu funcionamento e trabalham em regimes de alta força e pressão, além de estarem sujeitos à esforços cíclicos. Para manter a segurança e eficiência deste sistema, se faz necessário um plano de manutenção preventiva para garantir que a embarcação sempre esteja em boas condições de navegação, reduzindo assim paradas para manutenção corretiva, que acarretam em um maior custo.

O objetivo deste trabalho, era avaliar os processos de retificação de eixo propulsor naval, elemento responsável pela transmissão de força e potência a hélices de navios. De acordo com o autor, para avaliar qual processo atingiria os melhores resultados, foi utilizado o Método Multicritérios de Tomada de Decisão (MCDM), onde a prioridade das propriedades foi listada por um engenheiro mecânico com mais de 10 anos de experiência profissional.

De acordo com Silva (2006), máquinas novas, quando bem projetadas, atendem aos seguintes requisitos: baixos níveis de dissipação de calor, de ruído e vibração. No entanto, com desgastes, acomodação de fundações, má utilização, falta de manutenção ou inadequação desta, faz com que as máquinas tenham as condições de funcionamento alteradas para pior. A partir disto, há desalinhamento de eixos propulsores, desgaste de peças, desbalanceamento de rotores, alteração de folgas, etc. Tais fatores refletem na diminuição de rendimento do maquinário e aumento de vibração e ruído.

O procedimento experimental avaliado por Belém (2017) utilizou a mesma fonte para os dois processos (SMAW e MIG/MAG), que foi a Digiplus A7 e alimentador de arame, STA-20D da empresa IMC. É uma fonte do tipo multiprocesso, com a tensão máxima em vazio de 85 V e corrente máxima de 400 A. O metal de base utilizado (material do eixo propulsor) foi o aço inoxidável 316L. O processo de soldagem MIG/MAG foi usado na versão automática e semiautomática. Para o processo MIG/MAG automático, o diâmetro de arame foi de 1,2 mm e a velocidade de alimentação de arame de 10 m/min e tensão do arco de 31 V, já para a soldagem semiautomática, a velocidade de alimentação do arame foi de 6,0 m/min e a tensão de 26 V. A Tabela 8 abaixo demonstra os processos de soldagem avaliados e os respectivos metais de adição utilizados.

Tabela 8 – Processos de soldagem a serem avaliados, BELÉM (2017).

Processo de soldagem	Código
SMAW (AWS E 309 L do diâmetro de 3,25 mm)	SMAW
MIG/MAG automatizado (AWS AR 307)	GMAW 1
MIG/MAG semiautomático (AWS AR 307)	GMAW 2
MIG/MAG semiautomático (AWS AR 309 L)	GMAW 3
MIG/MAG automatizado (AWS AR 309 L)	GMAW 4

O ensaio não destrutivo por Líquido Penetrante realizado seguiu as etapas conforme as recomendações da Norma ABNT NM 327. O método utilizado para medir as durezas das regiões que compõem a junta soldada Metal de Base, Zona Termicamente Afetada e Zona Fundida (MB, ZTA, ZF) seguiram os termos da Norma ASTM E384-16.

De acordo com Belém (2017), o ensaio por Líquido Penetrante mostrou que não houve descontinuidades, trincas, fissuras ou dobras na superfície do material, qualificando a soldagem para os padrões técnicos aceitáveis. As Tabelas 9 e 10 mostram os parâmetros regulados e obtidos de soldagem juntamente com os processos utilizados.

Tabela 9 – Processos de soldagem avaliados com os respectivos metais de adição e parâmetros regulados e obtidos, BELÉM (2017).

Teste	Processo	Ts (s)	I (A)	V (V)	Lcs (mm)	Vs (cm/min)
1	SMAW (AWS E 309 L)	17	160	36,5	12,88	31,4
2	MIG/MAG automatizado (AWS AR 307)	9	290	31,0	11,73	50,0
3	MIG/MAG semiautomático (AWS AR 307)	24	228	26,3	13,36	25,0
4	MIG/MAG semiautomático (AWS AR 309 L)	18	223	26,0	12,03	32,0
5	MIG/MAG automatizado (AWS AR 309 L)	10	284	31,0	11,47	50,0

Ts – Tempo de soldagem; I – Corrente; V – Tensão; Lcs – Largura do cordão de solda e Vs – Velocidade de soldagem

Tabela 10 – Valores da Taxa de deposição (TD), Energia de soldagem (E), Taxa de fusão do metal de adição (Tf) e Rendimento econômico (R), BELÉM (2017).

Teste	Processo	TD (g/s)	E (J/mm)	Tf (g/s)	R (%)
1	SMAW (AWS E 309 L)	0,4706	167,388535	0,4647	101,2658
2	MIG/MAG automatizado (AWS AR 307)	1,8444	170,81	1,4500	127,2031
3	MIG/MAG semiautomático (AWS AR 307)	0,8667	227,8632	0,8700	99,6169
4	MIG/MAG semiautomático (AWS AR 309 L)	0,8667	172,1281	0,8700	99,6169
5	MIG/MAG automatizado (AWS AR 309 L)	1,6500	167,276	1,4167	116,4706

O autor deste experimento, apresentou um valor duvidoso para a tensão utilizada no processo de soldagem com eletrodos revestidos, de 36,5 V, que é considerada alta visto que o ideal seria entre 24,0-26,5 V. Também não foram fornecidos dados suficientes para refazer o cálculo da Taxa de Deposição (TD) e da Taxa de Fusão (Tf). Logo não foi possível refazer o cálculo do Rendimento Econômico (R), que traz valores duvidosos para a soldagem MIG/MAG (acima de 100%).

Houve uma variação nas taxas de deposição calculadas entre os processos semiautomático e automatizado, os cordões de solda dos Testes 1, 3 e 4 tiveram valores muito abaixo dos Testes 2 e 5 devido à corrente de soldagem mais baixa.

De acordo com Belém (2017), a energia de soldagem se mostrou dependente, principalmente, da velocidade de soldagem, sendo a maior para a Vs mais baixa (Teste 3).

O rendimento econômico foi alto para todos os processos. É destacado o processo SMAW, que é o mesmo utilizado por algumas empresas de manutenção na Região Norte, que obteve um rendimento aproximado de 101% devido à utilização de eletrodos rutilicos com pó de ferro no revestimento. Isto acontece também, pois no cálculo de rendimento a taxa de fusão não incorpora a contribuição do revestimento para a formação da solda (MODENESI, 2000).

A Figura 12 apresenta os perfis macrográficos dos Corpos de Prova dos testes 1 - 5, onde foi notado baixa penetração no CP1 (Corpo de Prova 1) em relação aos demais. O autor acha que foram

os gases utilizados no processo MIG/MAG que contribuíram para uma melhor penetração. A ZTA se manteve muito estreita para todos os processos o que garante uma junta soldada mais forte, e com menores riscos de fragilidade na região.

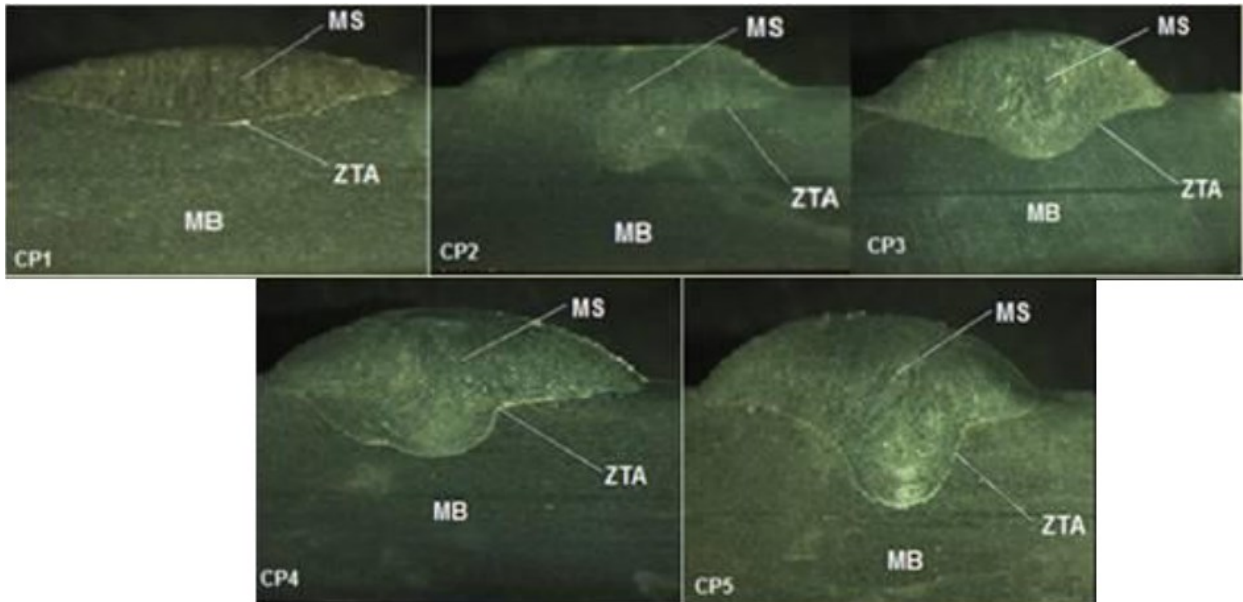


Figura 12 – Perfis macrográficos dos Corpos de Prova (BELÉM, 2017).

A Tabela 11 mostra que a relação de Re/Lcs (Reforço/Largura) em função dos parâmetros e processos de soldagem é a menor no cordão de solda aplicado com o processo SMAW, que é o utilizado pela empresa de recuperação do eixo. Tal relação está relacionada com a quantidade de massa depositada comprovada pela menor taxa de deposição, como exposto na Tabela 10, resultante neste processo. Outro fator para menor Re/Lcs foi a oscilação aplicada no eletrodo durante a soldagem, que espalha a poça de fusão, resultando em um cordão mais baixo. Para o trabalho de recuperação da superfície, quanto menor Re/Lcs é melhor (ou seja, quanto maior largura de cordão, melhor).

Tabela 11 - Valores do reforço, largura do cordão de solda, penetração, relação de Re/Lcs e a diluição, BELÉM (2017).

Teste	Re (mm)	Lcs (mm)	Pe (mm)	Relação Re/Lcs	δ
1	1,87	12,88	2,17	0,1452	68,3930
2	2,80	11,73	4,46	0,1901	64,8744
3	3,68	13,36	3,16	0,2754	62,1556
4	2,86	12,03	3,38	0,2377	64,5237
5	2,83	11,47	4,20	0,2467	64,9214

Re – Reforço; Lcs – Largura do cordão de solda; Pe – Penetração; δ - Diluição.

É mostrado, também na Tabela 11, que a relação Re/Lcs do Corpo de Prova 2 é 41,6% maior do que a do Corpo de Prova 1, o que confirma que o processo de soldagem MIG/MAG deposita o metal de maneira mais concentrada do que o SMAW. O menor reforço no caso do CP1 mostra que o processo SMAW tem uma vantagem em comparação com o processo MIG/MAG. A relação Re/Lcs do CP5 ficou bem próxima do CP2, o que era esperado, uma vez que a única diferença entre as condições de soldagem era os teores dos elementos de liga do metal de adição. Apesar dos resultados mostrados na Tabela 11, nota-se que na Figura 12 o Corpo de Prova 4 aparenta ser mais largo do que o Corpo de Prova 3, isso se dá devido a um erro de escala do autor ao criar a figura.

A maior relação Re/Lcs foi observada no corpo de prova do Teste 3, de 48,14% maior do que a obtida pelo processo SMAW (Teste 1). Isto aconteceu devido a um arco mais curto, com apenas 26,3 V de tensão, e à mais baixa velocidade de soldagem (apenas 25 cm/min), ou seja, com uma deposição do metal muito concentrada e em abundância. Apesar do alto valor, o cordão ainda está dentro do limite recomendado para a relação Re/Lcs, que é de no máximo 0,30 (CABRAL, 2008).

A noção de diluição é importante quando se tem o intuito de controlar a participação do metal base na formação da solda, como na soldagem de metais dissimilares, processos de recobrimento por soldagem e na soldagem de um metal base que possua a composição desconhecida ou possua elevados níveis de impurezas ou elementos que prejudiquem à solda (BELÉM, 2017).

O cordão depositado pelo processo SMAW (CP1) apresentou a maior diluição quando comparado aos cordões depositados pelo processo MIG/MAG, o que pode ser considerado como uma desvantagem do processo SMAW em aplicações de revestimento.

De acordo com Bélem (2017), o processo MIG/MAG se mostrou com uma melhor performance do que o processo SMAW, visto que sua taxa de deposição é quase o dobro utilizando uma energia de soldagem muito próxima à da utilizada no processo SMAW, satisfazendo assim as exigências da indústria naval.

Segundo Belém (2017), foi observado na macrografia que a geometria de todos os cordões depositados foi satisfatória e que os cordões produzidos pelo processo MIG/MAG apresentaram maior penetração e menor diluição, o que favorece o revestimento. Avaliando a micrografia, todos os Corpos de Prova apresentaram microestruturas muito parecidas.

Ao avaliar a microdureza, e os valores de dureza tanto do processo MIG/MAG quanto do processo SMAW atingiram valores próximos.

Assim, a pesquisa desenvolvida por Belém, Corrêa, Assunção, Corrêa, Leão, Peixoto e Ferreira (2017) “Avaliação entre o processo de soldagem SMAW e MIG/MAG para fabricação de

revestimento em eixos propulsores” mostrou que o processo MIG/MAG foi o que obteve os resultados mais satisfatórios para a recuperação de eixos propulsores de barcos.

4.3 Comparação 3: Comparação da eficiência térmica entre os processos de soldagem SMAW e MIG/MAG

Galvão (2017) e Carraro (2017) compararam a eficiência térmica dos processos de soldagem SMAW e MIG/MAG, aplicando o método de calorimetria. Além de comparar os valores da eficiência térmica entre esses dois processos de soldagem, o objetivo dos experimentos foi também de comparar os resultados experimentais da eficiência térmica com os relatados na literatura. Tais dados podem ajudar na escolha do processo com maiores vantagens para pequenas e grandes indústrias do setor metal mecânico.

De acordo com Galvão (2017), foi utilizada na soldagem MIG/MAG a fonte do tipo multiprocesso MTE Digitec 600, a tocha utilizada foi do fabricante TBi da marca 511 de 450 A resfriada a gás, o gás de proteção utilizado foi o STARGOLDTUB da empresa White Martins com a composição Argônio 93,6% - Dióxido de Carbono 6,4%. O arame utilizado foi do tipo ER-70S-6 cobreado com diâmetro de 1,0 mm da empresa Belgo Bekaert. O calorímetro utilizado foi um à água com fluxo contínuo. Para soldagem com eletrodos revestidos foi utilizada a fonte de energia Larry TE 160 da fabricante IMC (fonte do tipo inversora que fornece a corrente contínua em faixa de 20 a 160 A), eletrodos do tipo E6013 (rutílicos) com diâmetro de 2 mm e também eletrodos básicos do tipo E7018 de 3,25 mm de diâmetro (CARRARO, 2017). O calorímetro utilizado foi o mesmo utilizado no processo de soldagem MIG/MAG.

Foram realizados 3 testes para cada um dos processos de soldagem, em todos eles foram recolhidos dados de temperatura durante 5 minutos a partir do início da soldagem, que teve duração de 20 segundos. Para melhor visualização da variação das temperaturas, foram construídos gráficos com dados recebidos dos termopares.

De acordo com Galvão (2017), os testes realizados utilizando o processo MIG/MAG foram feitos de duas maneiras diferentes: os cordões dos testes 1 e 2 foram depositados dentro do chanfro da junta soldada (Figura 13), e o cordão do teste 3 foi realizado sobre o cordão anterior (Figura 14).

A Tabela 12 ilustra os parâmetros de soldagem utilizados em cada um dos testes realizados usando o processo de soldagem MIG/MAG.

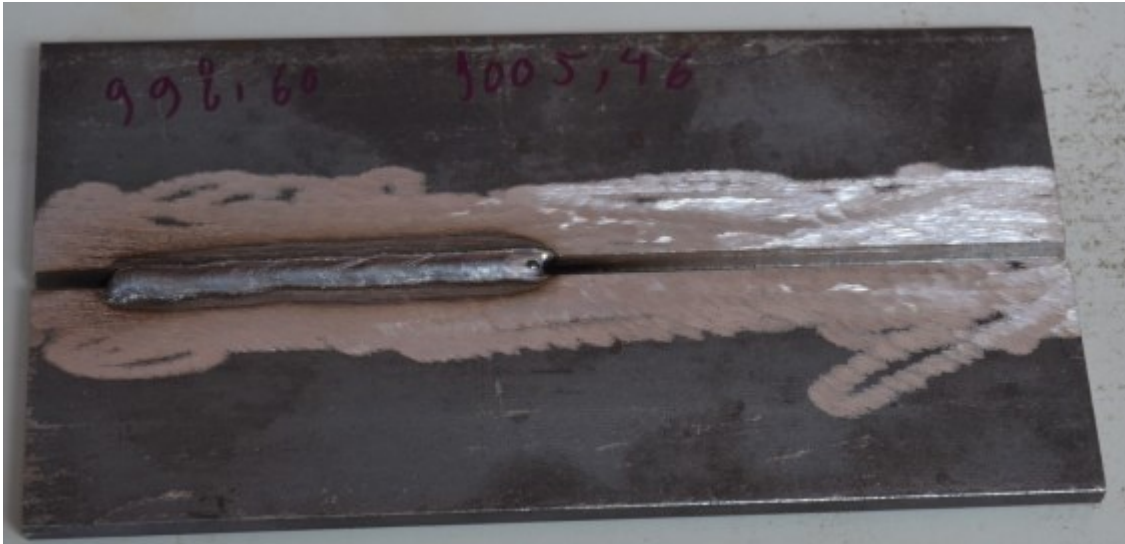


Figura 13 – Solda realizada dentro do chanfro (GALVÃO, 2017)



Figura 14 – Solda realizada sobre a solda anterior (GALVÃO, 2017)

Tabela 12 – Parâmetros de soldagem utilizados nos testes utilizando o processo MIG/MAG, GALVÃO (2017).

Número do Teste	1	2	3
Local	Chanfro	Chanfro	Sobre a solda
Tensão (V)	18	19	19
Velocidade do arame (m/min)	4,7	4,7	4,7
Corrente (A)	125	116	130
Vazão de gás (L/min)	13,0	15,0	15,0
Massa de chapa inicial (g)	1000,76	998,60	1005,46
Massa de chapa após a solda (g)	1008,54	1005,46	1013,09
Total de massa depositada (g)	7,78	6,86	7,63

As Figuras 15, 16 e 17 mostram a temperatura da água de entrada (1) e de saída (2) do calorímetro para cada um dos testes.

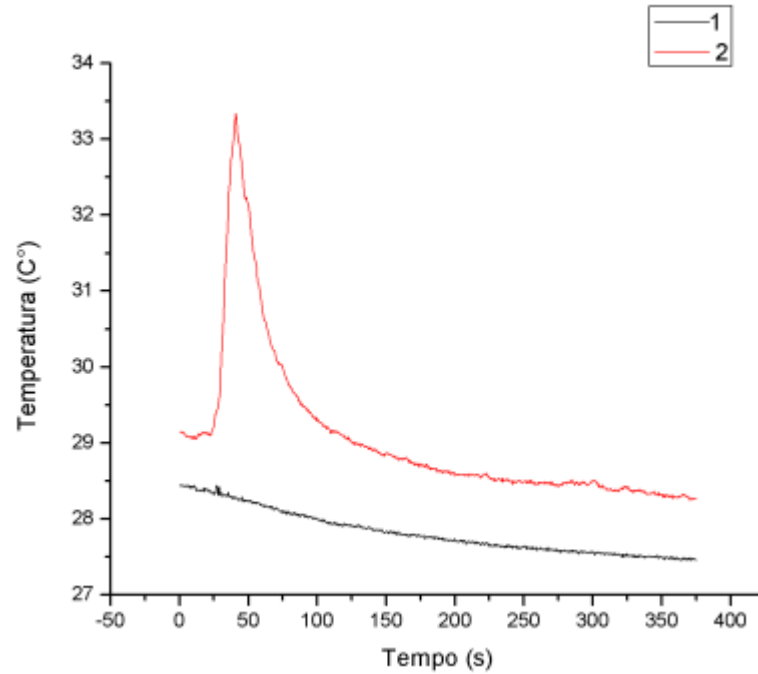


Figura 15 – Registro da temperatura da água de entrada (1) e de saída (2) do calorímetro para o teste 1 (GALVÃO, 2017)

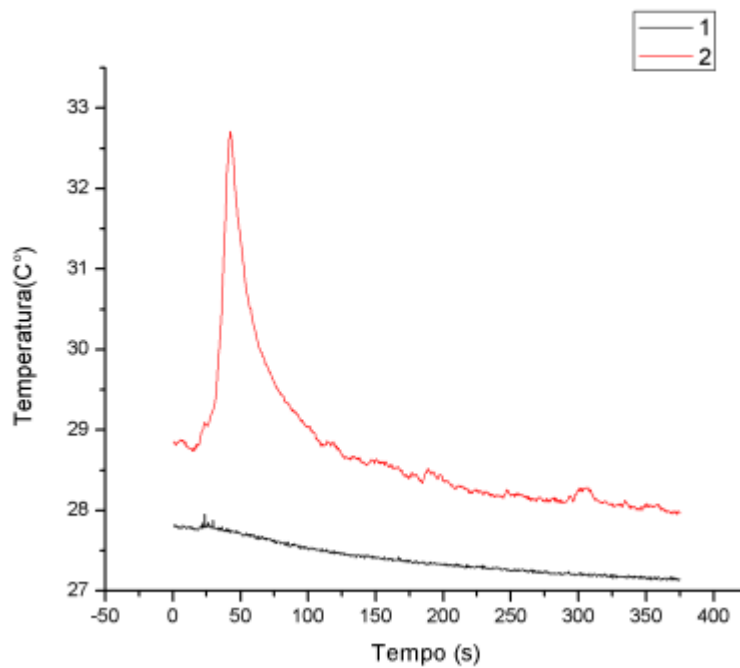


Figura 16 – Registro da temperatura da água de entrada (1) e de saída (2) do calorímetro para o teste 2 (GALVÃO, 2017)

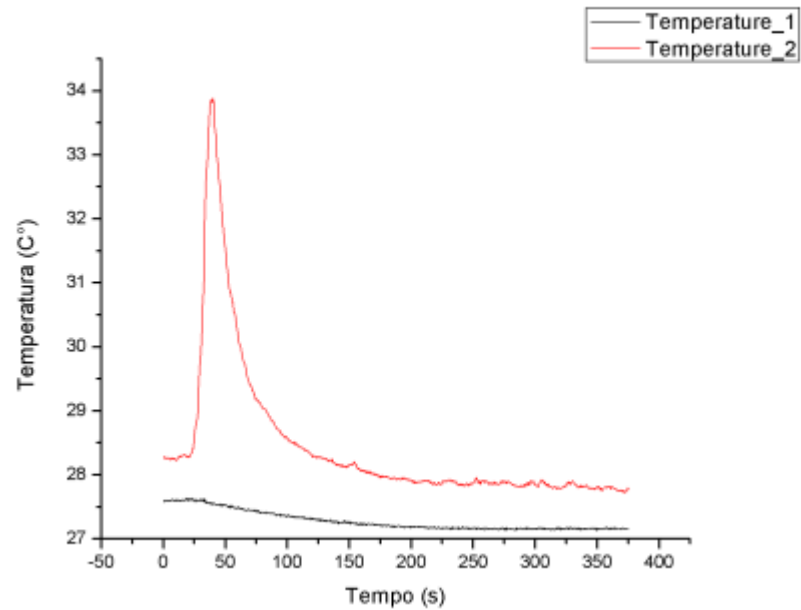


Figura 17 – Registro da temperatura da água de entrada (1) e de saída (2) do calorímetro para o teste 3 (GALVÃO, 2017)

De acordo com Carraro (2017), os testes realizados utilizando o processo SMAW foram feitos também de duas maneiras diferentes (Figura 18): os cordões dos testes 1 e 2 foram depositados dentro do chanfro da junta soldada, e os cordões dos testes 3 e 4 foram realizados sobre os cordões anteriores.



Figura 18 – Solda pelo processo SMAW durante a calorimetria (CARRARO, 2017)

A Tabela 13 ilustra os parâmetros de soldagem utilizados em cada um dos testes realizados usando o processo de soldagem por eletrodos revestidos.

Tabela 13 – Parâmetros de soldagem com processo SMAW, CARRARO (2017).

Número do Teste	1	2	3	3
Local	Chanfro	Chanfro	Sobre a solda	Sobre a solda
Tensão (V)	20	20	20	20
Corrente (A)	131	132	132	132
Massa de chapa inicial (g)	998,05	996,89	1004,65	996,74
Massa de chapa após a solda (g)	1002,57	1002,44	1008,72	1001,95
Total de Massa Depositada (g)	4,52	5,55	4,07	5,21

As Figuras 19, 20, 21 e 22 mostram a temperatura da água de entrada (1) e de saída (2) do calorímetro para cada um dos testes.

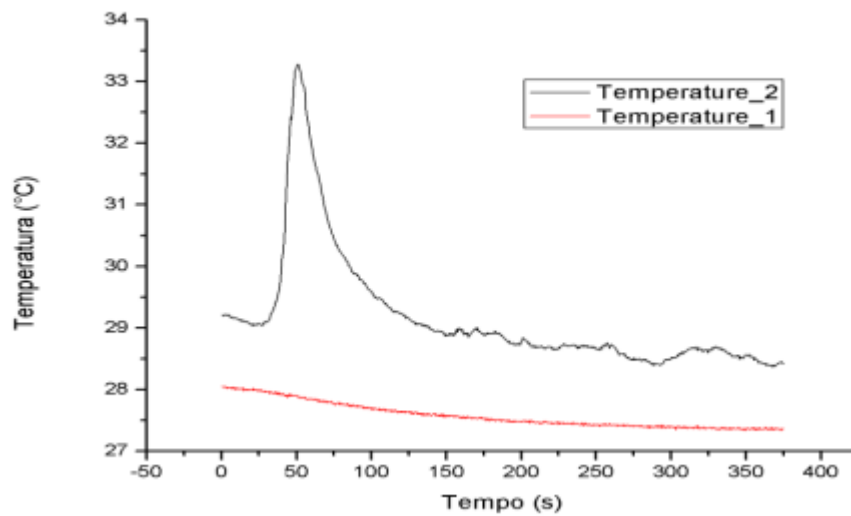


Figura 19 – Registro da temperatura da água de entrada (1) e de saída (2) do calorímetro para o teste 1 (SMAW) (CARRARO, 2017)

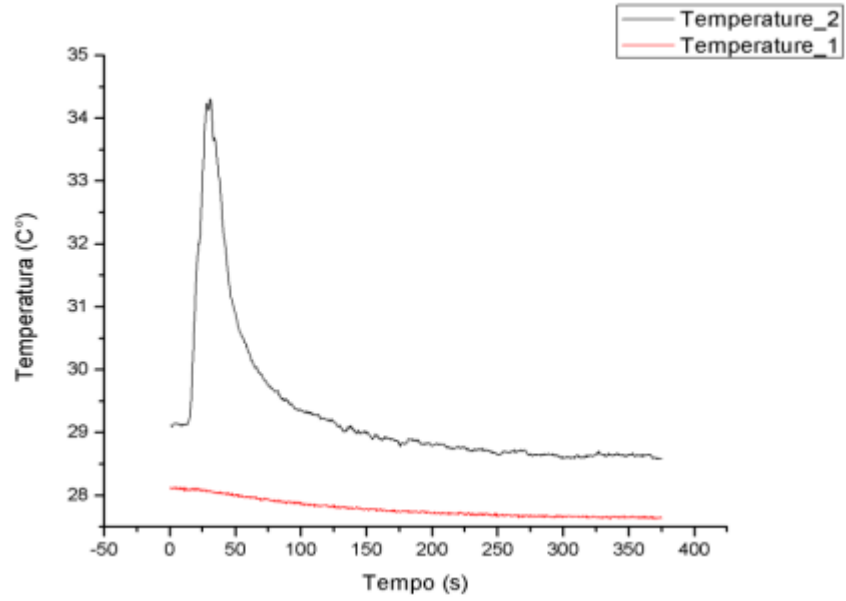


Figura 20 – Registro da temperatura da água de entrada (1) e de saída (2) do calorímetro para o teste 2 (SMAW) (CARRARO, 2017)

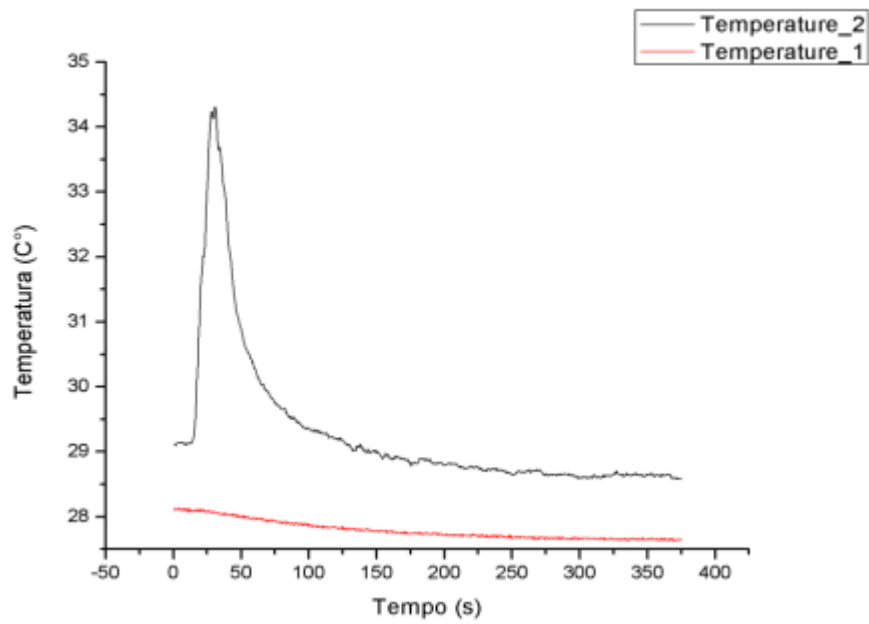


Figura 21 – Registro da temperatura da água de entrada (1) e de saída (2) do calorímetro para o teste 3 (SMAW) (CARRARO, 2017)

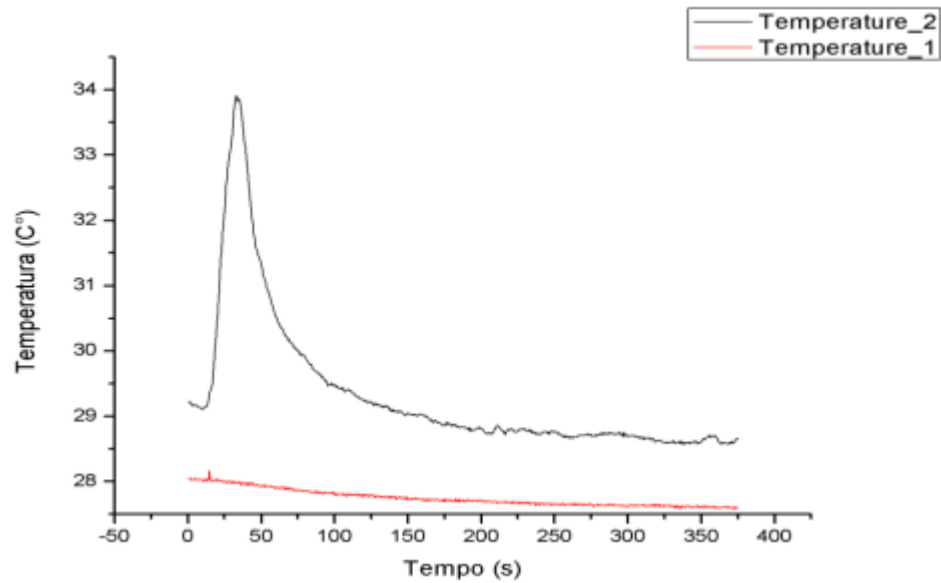


Figura 22 – Registro da temperatura da água de entrada (1) e de saída (2) do calorímetro para o teste 4 (SMAW)
(CARRARO, 2017)

De acordo com Carraro (2017), atualmente na literatura técnica, há algumas divergências no que diz respeito aos valores da eficiência térmica dos processos de soldagem. Por isso, normalmente, na literatura se encontram faixas de valores ao invés de um valor exato. A Tabela 14 ilustra os valores declarados por alguns autores.

Tabela 14 – Eficiências térmicas dos processos de soldagem MIG/MAG e SMAW, adaptado de CARRARO (2017).

Eficiência Térmica (η) dos Processos de Soldagem MIG/MAG e SMAW		
SMAW	MIG/MAG	Fonte
70-80%	70-85%	PUC - Rio - Certificação Digital
90%	70-80%	Eficiência térmica - Infosolda Portal Brasileiro da Soldagem
75%	85%	Aulas de soldagem do Prof. Scotti

A Tabela 15 mostra os resultados da determinação dos valores da eficiência térmica apresentados por Galvão (2017) e Carraro (2017) ao realizarem os testes de calorimetria usando os processos de soldagem MIG/MAG e SMAW.

Tabela 15 – Eficiências térmicas dos processos de soldagem MIG/MAG e SMAW, adaptado de CARRARO (2017).

Processo de Soldagem	MIG/MAG			SMAW			
	1	2	3	1	2	3	4
Número do teste	1	2	3	1	2	3	4
Local da solda	Chanfro	Chanfro	Sobre a Solda	Chanfro	Chanfro	Sobre a Solda	Sobre a Solda
Corrente (A)	125	116	130	131	132	132	132
Tensão (V)	18	19	19	20	20	20	20
Eficiência térmica	81%	78%	75%	76%	72%	83%	78%

Os resultados obtidos através dos experimentos se mostraram condizentes com a literatura e os valores atingidos pelo processo MIG/MAG e SMAW foram muito próximos, como já se era esperado.

Segundo Galvão (2017), os experimentos realizados com o processo de soldagem MIG/MAG mostraram um bom rendimento térmico, juntamente com uma alta taxa de deposição do metal de adição e maior facilidade de treinamento do soldador quando comparado ao processo SMAW. Com base nestes resultados é possível afirmar que tal processo é uma excelente opção tanto para pequenas quanto grandes indústrias do setor metalmeccânico.

De acordo com Carraro (2017), os experimentos realizados com o processo SMAW também mostraram um bom rendimento térmico. O fato de os rendimentos térmicos das soldas realizadas dentro do chanfro e sobre a solda terem ficado próximos pode ser devido ao diâmetro do eletrodo, que é muito grande para a largura do chanfro. Devido a isso, as gotas do metal são depositadas tanto no fundo quanto na lateral e até por fora do chanfro. Logo, não há diferenças significativas entre as duas posições.

Assim, as pesquisas desenvolvidas por Galvão (2017) “Avaliação da eficiência térmica do processo de soldagem MIG/MAG” e Carraro (2017) “Avaliação da eficiência térmica do processo de soldagem por eletrodos revestidos” mostraram que ambos os processos obtiveram boas eficiências térmicas e com valores muito próximos entre si. No entanto, devido à uma maior taxa de deposição, maior facilidade de treinamento do operador e maior produtividade, o processo MIG/MAG é a melhor opção para pequenas e grandes indústrias do setor metalmeccânico. O processo SMAW se sobressai quando se trata de locais com difícil acessibilidade, ambientes abertos e quando se faz necessário realizar soldas ocasionais (soldas de reparo, ponteamto, etc.).

4.4 Comparação do processo de aprendizado dos processos de soldagem MIG/MAG e SMAW

Um fator de grande importância para uma empresa ao optar por um processo de soldagem, além da velocidade de produção, qualidade da solda, compatibilidade dos materiais soldados com o processo utilizado, entre outros é a velocidade de aprendizagem do processo. Processos mais simples de aprender e com menor carga de treinamento necessária são muito atrativos para o mercado como um todo, visto à demanda de rápida aprendizagem para execução dos serviços necessários.

De acordo com Harper (2022), para treinamentos básicos de soldagem pode-se levar de 6 meses a 1 ano para que alguém aprenda a trabalhar com todas as habilidades necessárias de um soldador, tais como conhecimento dos fundamentos dos processos de soldagem, dos símbolos, da inspeção visual e o domínio da prática. No entanto, se tratando do processo de soldagem MIG/MAG o soldador pode aprendê-lo em menos de 6 meses. Segundo Norton (2022), no processo SMAW por exemplo, o eletrodo deve ser mantido no ângulo e distância corretos enquanto o soldador realiza a solda, tal habilidade demanda muito tempo e prática de um soldador iniciante.

4.5 Comparação das vantagens e limitações dos processos de soldagem MIG/MAG e SMAW

As Tabelas 16 e 17 mostram as vantagens e limitações de cada um dos processos que foram analisados durante esse trabalho.

Tabela 16 – Vantagens dos processos de soldagem SMAW e MIG/MAG, Autoria Própria (2022).
(Obs.: Não são mostradas as mesmas vantagens intrínsecas para cada um dos processos, por ex. como a possibilidade de soldar em todas as posições)

Soldagem SMAW	Soldagem MIG/MAG
<p>Equipamento que possui versatilidade para o manuseio, é relativamente simples, barato, portátil e ocupa pouco espaço.</p> <p>A proteção e o metal de adição (alma) são fornecidos pelo eletrodo revestido, não necessitando fluxos ou gases externos.</p> <p>Possui facilidade para atingir áreas de acesso restrito e é viável em locais com pouco espaço.</p> <p>Devido ao efeito canhão na ponta do eletrodo é menos sensível a corrente de ar (pode ser usado em trabalhos no campo), diferente do processo MIG/MAG.</p> <p>Há uma grande variedade de eletrodos e são facilmente encontrados no mercado.</p> <p>Pode ser utilizado para a soldagem da maioria dos metais e ligas metálicas mais comuns no mercado (aço carbono, aços de baixa, média e alta liga, aço inoxidável, ferro fundido, cobre, níquel e suas ligas e algumas ligas de alumínio).</p> <p>Pode realizar a soldagem de materiais dissimilares.</p> <p>É o processo mais utilizado na soldagem subaquática.</p> <p>Equipamentos podem ser usados também para outros processos (tais como o processo de soldagem TIG e o corte Arco-grafite).</p> <p>Baixa poluição sonora.</p> <p>Relativa insensibilidade à contaminação, como ferrugem, escamas, óleos, graxas.</p>	<p>Operado na forma semiautomática e automática. Pode também ser robotizado.</p> <p>Diferentes combinações de gases de proteção, parâmetros de soldagem e características da fonte produzem soldas com características bem distintas.</p> <p>Requer pouca limpeza do cordão após soldado, pois não produz escórias.</p> <p>Pode-se variar o aporte térmico em grande faixa.</p> <p>Processo com eletrodo contínuo (o que elimina paradas frequentes).</p> <p>Possui elevada taxa de deposição de metal, maior do que a soldagem com processo SMAW.</p> <p>Processo de fácil domínio prático, pois exige, em geral, menos habilidade do soldador que a soldagem SMAW.</p> <p>A penetração pode ser controlada pelo gás de proteção e tipo de transferência metálica.</p> <p>Possui altas velocidades de soldagem.</p> <p>Não há perda de pontas dos eletrodos consumíveis como acontece no processo SMAW.</p> <p>Assegura um baixo teor de hidrogênio.</p>

Tabela 17 – Limitações dos processos de soldagem SMAW e MIG/MAG, Autoria Própria (2022).
(Obs.: Não são mostradas as mesmas limitações intrínsecas para cada um dos processos)

Soldagem SMAW	Soldagem MIG/MAG
<p>Processo manual (dependente muito da habilidade do soldador) e de baixa produtividade, com um fator de operação de não mais do que 25%.</p> <p>Alimentação do metal de adição não é contínua. Tem paradas para trocar os tocos para eletrodos novos (perda de tempo produtivo).</p> <p>Possui uma baixa taxa de deposição se comparado com o processo MIG/MAG.</p> <p>Não é adequada para metais reativos como, por ex., titânio, pois a proteção gerada não é adequada para evitar a oxidação do metal.</p> <p>Não é adequada para materiais com espessura abaixo de 2 mm.</p> <p>Produz escória, que deve ser retirada após a soldagem ou após cada passe.</p> <p>É necessário a ressecagem de alguns tipos dos eletrodos antes de sua utilização.</p> <p>Perdas de 30-35% dos eletrodos, podendo ter como principal causa o mal uso dos eletrodos (além de tocos descartados de eletrodos).</p> <p>Necessidade de cuidados especiais com os eletrodos.</p> <p>Grande volume de gases e fumos gerados no processo.</p> <p>Não mecanizável.</p>	<p>O equipamento é mais complexo, caro e menos portátil do que o para o processo SMAW.</p> <p>Mais difícil de usar em locais de difícil acesso.</p> <p>Demanda maior rigor na limpeza e preparação da junta.</p> <p>Ação metalúrgica limitada (não tem nem fluxo, nem revestimento com elementos de liga, desoxidantes, estabilizadores do arco, ...).</p> <p>Altos níveis de calor e iluminação irradiados: maior resistência do operador é exigida.</p> <p>O arco necessita ser protegido contra a corrente de ar (não é recomendado para trabalhos no campo, diferente do processo SMAW).</p> <p>Processo de ajuste mais difícil e sensível do que no processo SMAW.</p> <p>Pode gerar elevada quantidade de respingos.</p>

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram comparados os prós e contras da substituição da soldagem manual SMAW pela soldagem semiautomática MIG/MAG, tendo como base na comparação trabalhos experimentais de outros autores.

No decorrer deste trabalho foi possível analisar algumas situações em que os dois processos de soldagem em questão são utilizados, como na soldagem de aços de alta resistência para a indústria naval, manutenção de eixos propulsores ou ainda em alguns testes experimentais.

Se tratando de qualidade da solda e propriedades mecânicas, em todos os experimentos tanto a soldagem MIG/MAG quanto a SMAW tiveram resultados satisfatórios, no entanto, para a recuperação de revestimento de eixos propulsores os resultados do processo MIG/MAG se mostraram melhores do que os do processo SMAW.

Se comparando a taxa de deposição, ou seja, produção que é avaliada durante o arco aberto, os resultados apresentados pelo processo de soldagem MIG/MAG foram bem superiores.

Como já esperado pela literatura, a produtividade, que é avaliada levando em consideração o ciclo de trabalho, foi maior para o processo MIG/MAG, tendo como destaque, na análise apresentada nesse trabalho, a soldagem de aços de alta resistência para a indústria naval, onde a produtividade chegou a ser até 2,5 vezes maior do que o processo de soldagem com eletrodos revestidos.

Além disso, o processo de soldagem MIG/MAG é caracterizado por uma maior facilidade de domínio por um soldador iniciante quando comparado ao processo de soldagem com eletrodos revestidos. Ou seja, o tempo de treinamento prático para um soldador do processo MIG/MAG é bem mais curto.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aventa. **A História da Soldagem**. Aventa. 2015. Disponível em: <https://aventa.com.br/novidades/infografico-historia-da-soldagem#:~:text=Em%201890%2C%20C.%20L.,%2C%20assim%2C%20fazer%20uma%20solda.> Acessado em 16 de julho de 2022.
- MODENESI, P. J., MARQUES, P. V., SANTOS, D. B. (2012). **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: UFMG
- MACHADO, I. G. (1996). **Soldagem e técnicas conexas: Processos**. Porto Alegre: UFRGS.
- WAINER, E., Brandi, S. D., & Mello, F. D. (2004). **Soldagem: Processos e Metalurgia**. São Paulo: EDGARD BLÜCHER LTDA.
- MARQUES, P. V., MODENESI, P. J., BRACANESE, A. Q. (2016). **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 4ª Edição. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda.
- SCOTTI, A., PONOMAROV, V. (2014). **Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, melhor desempenho**. São Paulo: ArtLiber.
- PONOMAROV, V. (2020). **Anotações de Aula: Tópico 1.7 - Soldagem MIG/MAG (GMAW) e (FCAW)**. Uberlândia: UFU
- PONOMAROV, V. (2020). **Anotações de Aula: Tópico 1.5: Soldagem com Eletrodo Revestido (ER)**. Uberlândia: UFU
- JUNIOR, A. S. L., COSTA, H. R. M., SOUZA, L. F. G., JORGE, J. C. F. (2014). **Propriedades mecânicas e microestruturais de juntas soldadas do aço HY-80 pelos processos eletrodo revestido e GMAW**. Rio de Janeiro: CEFET/RJ
- American Bureau of Shipping, **Rules for Materials and Welding, Part 2**, Houston, 2012, 398p.
- US Department of Defense, **Military Specification – MIL-STD – 1688-A, Fabrication, Welding and Inspection of HY-80/100 Submarine Applications**, Washington, 1990, 179p.
- BELÉM, C. A. P., CORRÊA, A. C., ASSUNÇÃO, P. D. C., CORRÊA, D. C. G., LEÃO, C. C. S., PEIXOTO, A. L., FERREIRA, V. O. (2017). **Avaliação entre o processo de soldagem SMAW e GMAW para fabricação de revestimento em eixos propulsores**. Belém: UFPA
- SILVA, D. A. (2006). **Diagnóstico de Equipamentos de Propulsão Naval Através de Análise de Vibração**. Rio de Janeiro: UFRJ
- CRUZ, J. R.; CABRAL, T. S. (2008). **Especificação de Procedimentos de Soldagem MIG para o Preenchimento de Cavidades pela Técnica de Camadas Sucessivas**. Belém: UFPA
- GALVÃO, G. V. (2017). **Avaliação da eficiência térmica do processo de soldagem MIG/MAG**. Uberlândia: UFU

CARRARO, G. (2017). **Avaliação da eficiência térmica do processo de soldagem por eletrodos revestidos**. Uberlândia: UFU

HARPER, D. **What is the easiest type of welding to learn as a beginner?** Welding Troop. 2022. Disponível em: <https://weldingtroop.com/what-is-the-easiest-type-of-welding-to-learn-as-a-beginner/>. Acessado em 25 de outubro de 2022.

HARPER, D. **How long does it take to learn welding?** Welding Troop. 2022. Disponível em: <https://weldingtroop.com/how-long-does-it-take-to-learn-welding/>. Acessado em 27 de outubro de 2022.

NORTON, B. **Best welding method for beginners, the 15 minutes guide**. WeldItMyself. 2022. Disponível em: <https://welditmyself.com/best-welding-method-for-beginners/>. Acessado em 27 de outubro de 2022.

Modenesi, P.J. (2000). **Características Econômicas dos Eletrodos Revestidos (Guia de Aula Prática)**. Belo Horizonte: UFMG

Modenesi, P.J. (2001). **Estimativa de Custos em Soldagem**. Belo Horizonte: UFMG