



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Faculdade de Engenharia Mecânica
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica



ESTIMATIVA COMPARATIVA SIMPLIFICADA DE CUSTOS NOS PROCESSOS GMAW E FCAW

LEONARDO GIBELLI PARADA

Orientador: Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov

Uberlândia
2022

LEONARDO GIBELLI PARADA

**ESTIMATIVA COMPARATIVA SIMPLIFICADA DE CUSTOS
NOS PROCESSOS GMAW E FCAW**

**Projeto de Final de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Mecânica como
requisito parcial para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.**

Orientador: Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov

**Uberlândia
2022**

LEONARDO GIBELLI PARADA

**ESTIMATIVA COMPARATIVA SIMPLIFICADA DE CUSTOS
NOS PROCESSOS GMAW E FCAW**

Banca examinadora:

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

Prof. Dr. Leandro João da Silva
Universidade Federal de Uberlândia

Profa. Dra. Anna Tokar
Centro Universitário da Grande Dourados

**Uberlândia
2022**

Agradecimentos

A minha família, razão de minha existência.

A Deus.

Agradeço a meu orientador pela paciência e grandes ensinamentos.

“Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina.”

Cora Coral

RESUMO

Este trabalho é uma estimativa comparativa dos custos de soldagem dos processos GMAW e FCAW. Essa estimativa foi feita usando principalmente os parâmetros de custos dos consumíveis e mão de obra. No Brasil, a soldagem GMAW é a mais utilizada, entretanto os fabricantes de arame tubular sugerem que o processo FCAW seja utilizado em maior escala devido ao aumento de sua produtividade e por gerar uma solda com melhor acabamento. Um estudo feito pela ESAB (2000) demonstrou que a soldagem com arame tubular seria mais econômica em países cujo custo de mão de obra era mais elevado. Foi possível confirmar o estudo por meio de cálculos realizados nesse trabalho. Os resultados mostraram que o baixo custo de mão de obra foi a justificativa para o processo GMAW se destacar no Brasil. Assim, mostrou-se que o processo FCAW se torna mais econômico somente se for aplicado onde o custo de mão de obra é acima de 60 reais por hora.

Palavras-Chaves: Taxa de deposição, GMAW, FCAW, Custo

ABSTRACT

This work is a comparative estimate of the welding costs of the GMAW and FCAW processes. This estimate was made using primarily consumables and labor cost parameters. In Brazil, GMAW welding is the most used. Cored wire manufacturers suggest that the FCAW process be used on a larger scale due to increased productivity and to generate a weld with a better finish. A study by ESAB (2000) showed that welding with cored wire would be more economical in countries with higher labor costs. It was possible to confirm the study by means of calculations performed in this work. The results showed that the low cost of labor was the justification for the GMAW process to stand out in Brazil. Thus, it was shown that the FCAW process becomes more economical only if it is applied where the labor cost is above 60 reais per hour.

Lista de Figuras

Figura 1 - Princípio da soldagem por Fusão.....	14
Figura 2 - Um exemplo da soldagem por Pressão	15
Figura 3 - Soldagem Mig/Mag.	16
Figura 4 - Esquema de soldagem MIG/MAG.....	17
Figura 5 - Soldagem com arame tubular	18
Figura 6 - Micrografia de seções transasversais de eletrodos tubulares (flux-cored).....	19
Figura 7 - Tocha MIG/MAG	21
Figura 8 - Fonte MIG/MAG ESAB Smashweld 380 Volts Trifásica.....	22
Figura 9 - Alimentador de Arame	23
Figura 10 - Mecanismos de Alimentação	23
Figura 11 - Roletes utilizados no processo FCAW.....	24
Figura 12 - Comparativo taxa de deposição GMAW e FCAW: (a) 120 A e gás Ar + 25% CO ₂ ; (b) 120 A e gás 100% CO ₂ ; (c) 160 A e gás Ar + 25% CO ₂ e (d) 160 A e gás CO ₂ 100%.....	29
Figura 13 - Comparativo rendimento GMAW e FCAW: (a) 120 A e gás Ar + 25% CO ₂ ; (b) 120 A e gás 100% CO ₂ ; (c) 160 A e gás Ar + 25% CO ₂ e (d) 160 A e gás CO ₂ 100%	30
Figura 14 - (a) Taxa de deposição, (b) Fator de soldagem, (c) Tempo de arco aberto, e (d) Tempo de soldagem	33
Figura 15 - Comparativo taxa de deposição GMAW e FCAW com gás 100%CO ₂	36
Figura 16 - Comparativo taxa de deposição GMAW e FCAW com gás Ar+25%CO ₂	36
Figura 17 - Taxa de deposição em função da corrente para um diâmetro de 0,045"	39
Figura 18 - Custo total (considerando salário médio no Brasil de R\$17,00/h)..	46
Figura 19 - Custo total em função da variação de salários.....	47
Figura 20 - Fatores que determinam a posição do ponto de intersecção entre FCAW e GMAW	48

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Linha do tempo da Soldagem.....	13
Tabela 2 - Processos de soldagem por Fusão	14
Tabela 3 - Processos de soldagem por Pressão.....	15
Tabela 4 - Faixas da taxa de deposição para os processos de soldagem MIG/MAG e FCAW	20
Tabela 5 - Cálculos dos processos de soldagem para GMAW e FCAW.....	32
Tabela 6 - Valores médios de tensão (U) e corrente (I), taxa de fusão (T_F), taxa de deposição (T_d) e rendimento (ϵ_D).....	32
Tabela 7 - Taxa de deposição (FCAW) conforme diâmetro, corrente (A) e eficiência (%) para os arames E70T-1, E71T-1, E70T-2, E70T-5	37
Tabela 8 - Taxa de deposição conforme diâmetro, corrente (A), rendimento (%) e gás de proteção.....	38
Tabela 9 - Parâmetros utilizados para os cálculos de custos em FCAW e GMAW.....	39
Tabela 10 - Custo de mão de obra, arame e gás para os processos GMAW e FCAW.....	40
Tabela 11 - Parâmetros custos de soldagem para os processos GMAW e FCAW.....	42
Tabela 12 - Custo do arame maciço (ER70S-6) e tubular (E71T-1).....	43
Tabela 13 - Custo do gás de proteção utilizados nos processos GMAW e FCAW.....	43
Tabela 14 - Salário médio do soldador nos países desenvolvidos (EUA, Japão, Canadá, Austrália) e em desenvolvimento (Brasil, Colômbia e Argentina)	44
Tabela 15 - Resultados dos custos de arame, gás e mão de obra e de tempo para 1kg de metal depositado nos processos GMAW e FCAW	45
Tabela 16 - Efeito dos custos dos processos GMAW e FCAW a longo prazo (utilizando o salário no Brasil e a média do salário nos países desenvolvidos)	47

Lista de Símbolos e Abreviações

ε_D – Rendimento de deposição
A – Amperes
Ar – Argônio
AWS – American Welding Society
CC – Corrente Contínua
CO₂ – Dióxido de carbono
CS – Comprimento de solda
d – Diâmetro
FCAW – Flux-cored Arc Welding
FO – Fator de operação
Gasl – Gás para 1kg de metal depositado
GMAW – Gas Metal Arc Welding
He – Hélio
MAG – Metal Active Gas Welding
Mf/Pf – Massa final do corpo de prova
Mi/Pi – Massa inicial do corpo de prova
MIG – Metal Inert Gas Welding
PMD – Peso do material depositado
SITEFA – Simpósio de Tecnologia Fatec
T1kg – Custo de 1kg de metal depositado
Tab/TAA – Tempo de Arco Aberto
Td – Taxa de deposição
TTA – Tempo total de soldagem
Val – Velocidade de Alimentação do Arame
Vgás – Vazão do gás de proteção
VS – Velocidade de soldagem
 ρ – Densidade do metal de arame

Sumário

1. INTRODUÇÃO	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 INTRODUÇÃO HISTÓRICA.....	12
2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	13
2.3 SOLDAGEM MIG/MAG	16
2.4 SOLDAGEM COM ARAMES TUBULARES (FCAW).....	18
2.5 EQUIPAMENTOS.....	20
2.5.1 TOCHA E ASSESSÓRIOS	20
2.5.2 FONTE MIG/MAG	21
2.5.3 ALIMENTADOR DE ARAME	22
2.6 GÁS DE PROTEÇÃO	24
2.7 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DA SOLDAGEM MIG/MAG	24
2.8 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO PROCESSO FCAW	25
2.9 SEGURANÇA EM SOLDAGEM.....	26
3. METODOLOGIA	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1 CÁLCULOS DOS CUSTOS DAS SOLDAGENS MIG/MAG E FCAW..	45
4.2 ECONOMIA DE CUSTO A LONGO PRAZO	49
5. CONCLUSÕES	50
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

1. INTRODUÇÃO

Atualmente com o mercado competitivo é de extrema importância que as indústrias se atualizem e busquem melhorias nos processos constantemente. Na área de soldagem existem inúmeros processos para executar a mesma tarefa, o que pode gerar uma indecisão. Dessa forma, um tema importante para o engenheiro é saber mensurar os custos de projeto para a empresa, já que os gastos são relevantes para o preço final de um produto. E devido ao grande número de variáveis que devem ser levadas em consideração na soldagem, acaba sendo um desafio da indústria e do engenheiro mensurar o custo sobre o processo, sempre buscando trazer orçamentos mais competitivos.

A soldagem com arame tubular (FCAW) e arame maciço (MIG/MAG), são dois processos semelhantes quanto ao uso de equipamentos, mudando praticamente apenas o tipo de arame utilizado. Porém o arame tubular surgiu depois com o intuito de aumentar a produtividade devido a uma maior taxa de deposição e possuir uma solda com melhor acabamento. Entretanto observa-se que no Brasil se utiliza mais o processo de soldagem MIG/MAG quando comparado ao processo FCAW. E um estudo da ESAB (2000) mostrou que comparando os custos entre os dois processos, o FCAW seria o mais economicamente viável. Assim, sabendo que o arame tubular possui maior vantagem tecnológica para a indústria, pode-se questionar o porquê de o arame maciço ser mais utilizado. Uma busca para a resposta é um dos objetivos deste trabalho, o outro seria definir as condições em que o FCAW seria mais vantajoso.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO HISTÓRICA

O processo de soldagem tem como uma das definições ser, uma operação que visa obter a coalescência localizada produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a aplicação de pressão e de metal de adição, segundo a AWS – American Welding Society. Em que a história da soldagem começou na idade do Bronze (3300 AC – 1200 AC), onde arqueólogos encontraram evidências em artefatos que foram confeccionados utilizando recursos da brasagem (um processo afim à soldagem), ou seja, um processo de união, onde se utiliza a adição de um metal diferente dos metais de base; de acordo com HISTÓRIA e evolução dos processos de soldagem (2018). E posteriormente na idade do ferro (1200 AC – 200 AC) foi encontrado evidências da utilização de soldagem por forjamento, sendo as peças aquecidas a altas temperaturas e unidas posteriormente por pressão. Com o desenvolvimento tecnológico, já na idade moderna, a soldagem evoluiu com a descoberta do arco elétrico em 1801.

A seguir a Tabela 1 mostra a linha do tempo e evolução da soldagem. Assim, fica evidente que com o passar do tempo a soldagem sofreu mudanças e novos processos foram surgindo, de maneira que cada um com o seu diferencial e propósito.

Tabela 1 - Linha do tempo da Soldagem, EEEP (2012).

1801	Sir Humphey Davis descobre o fenômeno do arco elétrico
1836	Edmund Davy descobre o Acetileno
1885	N. Bernardos e S. Olsewski depositam patente do processo de soldagem por arco elétrico
1889	N.G. Slavianoff e C. Coffin substituem o eletrodo de grafite por arame metálico
1901	Fouché e Picard desenvolvem o primeiro maçarico industrial para soldagem oxiacetilênica
1903	Goldschmidt descobre a solda aluminotérmica
1907	O. Kjellberg deposita a patente do primeiro eletrodo revestido
1919	C. J. Halsag introduz a corrente alternada nos processos de soldagem
1926	H.M. Hobart e P.K. Denver utilizam gás inerte como proteção do arco elétrico (nos EUA)
1930	Primeiras normas para eletrodo revestido nos EUA
1935	Desenvolvimento dos processos de soldagem TIG e Arco Submerso
1948	H.F. Kennedy (nos EUA) desenvolve o processo de soldagem MIG
1950	França e Alemanha desenvolvem o processo de soldagem por feixe de elétrons
1953	Surgimento do processo MAG (nos EUA)
1957	Desenvolvimento do processo de soldagem com arame tubular e proteção gasosa (nos EUA)
1958	Desenvolvimento do processo de soldagem por eletro-escória, na Rússia
1960	Desenvolvimento de processo de soldagem a laser, nos EUA
1970	Aplicados os primeiros robôs nos processos de soldagem

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM

Hoje pode-se presumir que existem em torno de 70 processos de soldagem, lembrando que esse seria um número dinâmico pois existem outros processos em desenvolvimento para que em breve possam ser feitas as alterações no mercado. Assim, cada processo tem suas particularidades e aplicações, vantagens e desvantagens. A seguir serão mostrados alguns dos

principais métodos de soldagem, dividindo em dois grupos, soldagem por fusão e soldagem por pressão.

O processo de soldagem por fusão é a união de metais através da aplicação do calor, em que os metais de adição e base se fundem. A Tabela 2 mostra os principais processos de soldagem por fusão e suas características.

Tabela 2 - Processos de soldagem por Fusão, EEEP (2012).

Eletrodo Não Consumível	Soldagem a gás com eletrodo de tungstênio (GTAW ou TIG)
	Soldagem a plasma (PAW) Soldagem com eletrodo de carvão (CAW)
	Soldagem de prisioneiros (SW)
	Soldagem com hidrogênio atômico (AHW)
	Soldagem com arco magneticamente impelido (MIAB)
Eletrodo Consumível	Soldagem a gás com eletrodo metálico (GMAW ou MIG/MAG)
	Soldagem com eletrodos revestidos (SMAW)
	Soldagem com arame tubular (FCAW)
	Soldagem ao arco submerso (SAW)
	Soldagem eletro-gás (EGW)

Vale salientar que a reação do material fundido com os gases da atmosfera faz com que seja necessário a utilização de um meio de proteção com o intuito de diminuir essas reações. A Figura 1 ilustra o princípio do processo de soldagem por fusão.

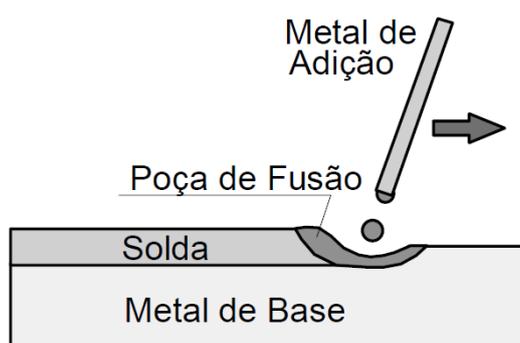


Figura 1 – Princípio da soldagem por Fusão, Soldagem (2018).

Na soldagem por pressão é aplicada uma força mecânica nas peças com o objetivo de deformá-las e assim produzir uma união dos materiais como é feito, por exemplo, no forjamento, com certa troca de átomos entre as peças. A Tabela 3 mostra os principais processos de soldagem por pressão.

Tabela 3 – Processos de soldagem por Pressão, EEEP (2012).

Energia Mecânica	Soldagem a frio (CW)
	Soldagem por pressão a quente (HPW)
	Soldagem por forjamento (FOW)
	Colaminação (ROW)
	Soldagem por fricção (FRW)
	Soldagem por ultrassom (USW)
	Soldagem por explosão (EXW)
	Soldagem por difusão (DFW)
Energia Elétrica	Soldagem de prisioneiros (SW)
	Soldagem com arco magneticamente impelido (MIAB)
	Soldagem por resistência a ponto (RSW)
	Soldagem por resistência de costura (RSEW)
	Soldagem por projeção (PW)
	Soldagem por centelhamento (FW)
	Soldagem por resistência de topo (UW)
	Soldagem por indução (HFRW)

A Figura 2 ilustra um processo de soldagem por pressão.



Figura 2 – Um exemplo da soldagem por Pressão, Aventa (2018).

2.3 SOLDAGEM MIG/MAG

A soldagem com proteção gasosa que usa o arame maciço, também conhecida como soldagem MIG/MAG, é um processo onde um arco elétrico é estabelecido entre a peça e um consumível na forma de arame. De acordo com a nomenclatura, MIG se refere a Metal Inert Gas, em que a soldagem é realizada com um arame protegido do ar atmosférico por um fluxo de gás inerte como o Hélio ou Argônio ou uma misturas destes, não tendo nenhuma atividade física desses gases com a poça de fusão. Este processo de soldagem geralmente é indicado para a soldagem de materiais não ferrosos como bronze, cobre e suas ligas, alumínio e outros. Enquanto MAG – Metal Active Gas seria a soldagem com o arame protegido por um fluxo de gás ativo (geralmente o dióxido de carbono – CO_2 , puro o em mistura com o argônio) que interage quimicamente com a poça de fusão. Este processos de soldagem assegura uma maior penetração na chapa a ser soldada, e geralmente indicado para soldagem de metais ferrosos. A Figura 3 ilustra o processo de soldagem MIG/MAG.



Figura 3 - Soldagem MIG/MAG, Soldagem (2018).

O desenvolvimento desse processo de soldagem levou ao nome formal GMAW – Gas Metal Arc Welding (nome mais usado nos EUA) sendo que tanto os gases inertes quanto reativos podem ser utilizados.

Esse processo funciona com corrente contínua (CC), em que geralmente o arame fica no polo positivo, sendo conhecido como polaridade reversa. Segundo ESAB (2005) a configuração de polaridade direta não é muito utilizada devido a transferência deficiente do metal fundido do arame para a poça de fusão. As faixas de correntes que podem ser empregadas variam de 50 A até 600 A, enquanto as tensões do arco de 15 V até 35 V. Além disso, com o desenvolvimento dos processos de soldagem, materiais ultra finos com espessura acima de 0,8 mm podem ser soldados em praticamente todas as posições (ESAB, 2005).

A soldagem MIG/MAG pode ser realizada tanto de forma semiautomática quanto de forma automática, em que no processo semiautomático a tocha será guiada pelo próprio soldador. A Figura 4 ilustra um esquema do processo de soldagem semiautomático. Assim, pode-se observar os principais componentes da GMAW.

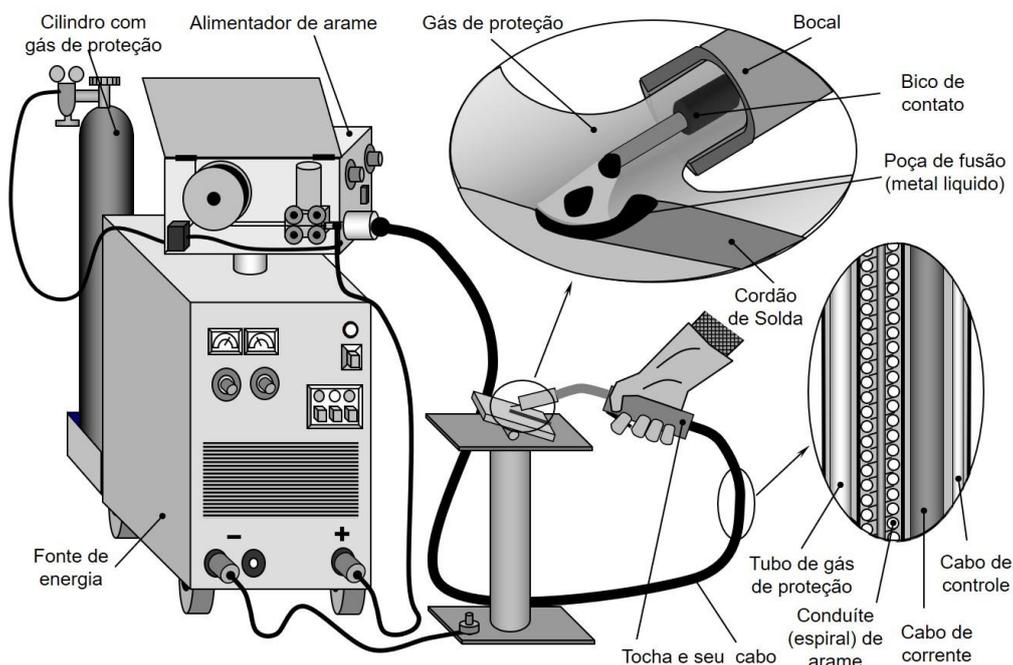


Figura 4 - Esquema de soldagem MIG/MAG, Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, melhor desempenho; Scotti e Ponomarov 2014.

Observando a imagem pode-se concluir, de modo direto, que os principais equipamentos do processo seriam uma fonte de energia, alimentador de arame, tocha de soldagem e acessórios, e o sistema com o gás de proteção.

2.4 SOLDAGEM COM ARAMES TUBULARES (FCAW)

O processo de soldagem utilizando arame tubular, também conhecido como FCAW (Flux-cored arc welding), promove a união dos metais por meio do arco elétrico entra a ponta do arame e a peça de trabalho. A Figura 5 ilustra o esquema de soldagem com arame tubular.

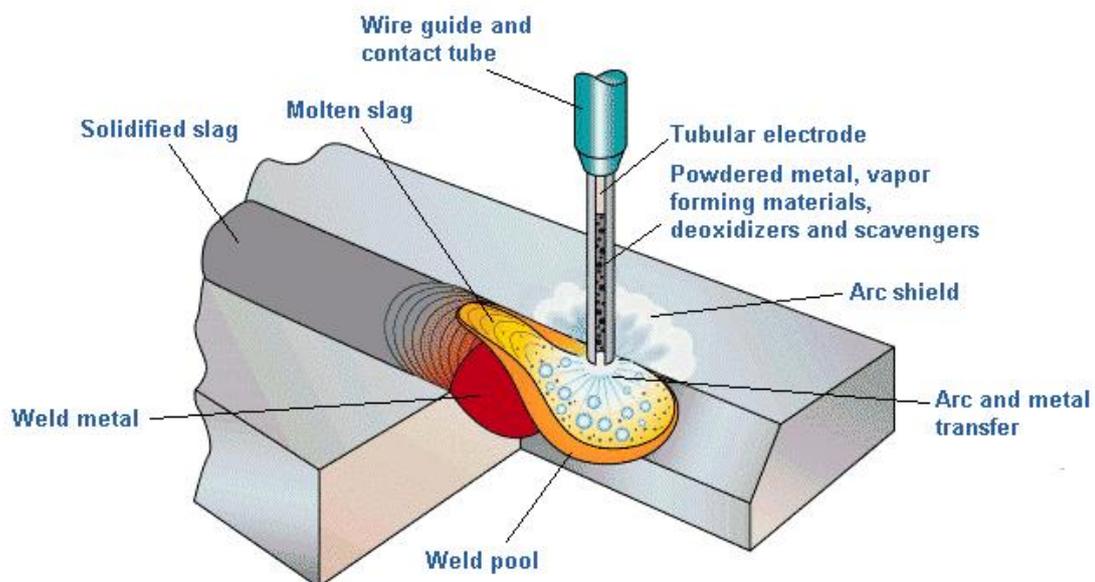


Figura 5 - Soldagem com arame tubular, InfoSolda (2022).

Com relação aos equipamentos utilizados, seriam os mesmos da soldagem MIG/MAG. Mas ao invés de se utilizar o arame maciço, seria utilizado o arame tubular, que possui o interior preenchido por um fluxo. Esse fluxo influencia nas propriedades mecânicas do metal depositado, e também produz soldas com baixo nível de respingos e um arco estável. Normalmente as aplicações da soldagem com arame tubular são nos setores de construção pesada, reparo e manutenção, perfis estruturais e o setor naval.

Os arames tubulares foram desenvolvidos com o intuito de melhorar o controle metalúrgico do processo através do fluxo contido no interior do arame, e reduzir o consumo do gás de proteção graças ao uso de arames tubulares autoprotetidos, que não precisam de proteção gasosa externa já que o fluxo no interior gera gases para proteção da poça de fusão e do arco elétrico.

A Figura 6 mostra as micrografias de seções transversais de eletrodos tubulares em que se pode explicar o porquê da maior taxa de deposição do arame tubular. No arame sólido, toda a seção transversal conduz a corrente, diferente do arame tubular, onde a corrente é conduzida pelo invólucro tubular metálico. Isso faz com que a densidade de corrente e o efeito Joule garantem uma maior taxa de fusão para arames tubulares, por isso para os mesmos parâmetros de soldagem (por exemplo 150 A) tem-se uma maior taxa de fusão para FCAW.

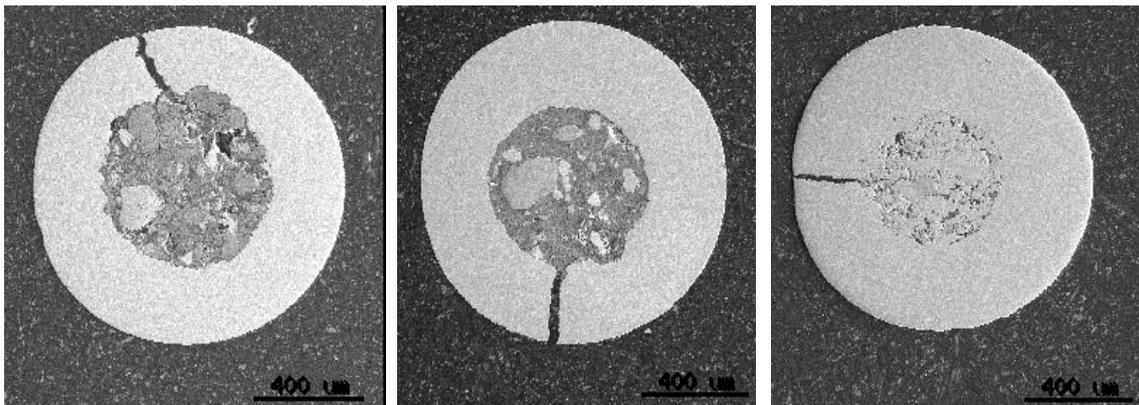


Figura 6 - Micrografia de seções transversais de eletrodos tubulares (flux-cored), Starling & Modenesi, 2005.

Além disso, a tensão utilizada no arame tubular será maior, devido a uma maior queda de tensão na extensão. Pois a tensão medida seria a tensão entre bico de contato e peça (e não apenas a tensão do arco), e por isso cresce a tensão total quando medida.

Comparando com o processo de soldagem MIG/MAG, em que os arames maciços conduzem corrente elétrica como um todo; os arames tubulares só conduzem a corrente na região de fita metálica (no invólucro), aumentando a taxa de fusão por efeito joule. Vale salientar que a escória dos arames tubulares acaba sustentando a poça de fusão na soldagem fora de posição, fazendo com

que se possa utilizar maiores correntes. Assim, tem-se uma maior produtividade quando comparada a MIG/MAG e eletrodo revestido. A seguir, a Tabela 4 mostra a diferença quanto a taxa de deposição estimada entre esses dois processos de soldagem.

Tabela 4 - Faixas da taxa de deposição para os processos de soldagem MIG/MAG e FCAW, TWI Global (2022).

Processo de soldagem	Taxa de deposição, kg/h	
	min	max
MIG/MAG (Arame Maciço)	0,6	12,0
FCAW (Arame Tubular)	1,0	15,0

2.5 EQUIPAMENTOS

2.5.1 TOCHA E ASSESSÓRIOS

A tocha, que, na soldagem semiautomática, é movimentada pelo soldador, seria a responsável por guiar o arame, o gás de proteção, e a corrente até o arame. Existem diversos tipos de tocha, cada um com o intuito de otimizar o processo de soldagem. Assim, as variações dependem do ciclo de trabalho que envolve tochas robustas para altas correntes, até tochas com baixas correntes e mais leves; variando também o formato, sendo retas ou curvas. Segundo ESAB (2005), para aumentar ainda mais a corrente permitida, podem ser adicionados sistemas de refrigeração na própria tocha. A Figura 7 mostra componentes básicos da tocha MIG/MAG.

O bico de contato será responsável pela condução da energia de soldagem até o arame e o direcionamento do arame até a peça. Importante salientar que o arame e o bico devem possuir um bom contato elétrico, e que o responsável pela ligação da fonte até o bico é o cabo de força.

O bocal é responsável por direcionar o fluxo de gás na poça de fusão. Existe uma relação entre o nível de corrente de soldagem e o tamanho do bocal, quanto maior a corrente, maior será o bocal.

Já o conduíte do eletrodo será responsável por direcionar o arame do alimentador até o bico de contato. Importante que a alimentação ocorra de maneira uniforme para manter a estabilidade do arco e do processo de soldagem como um todo.

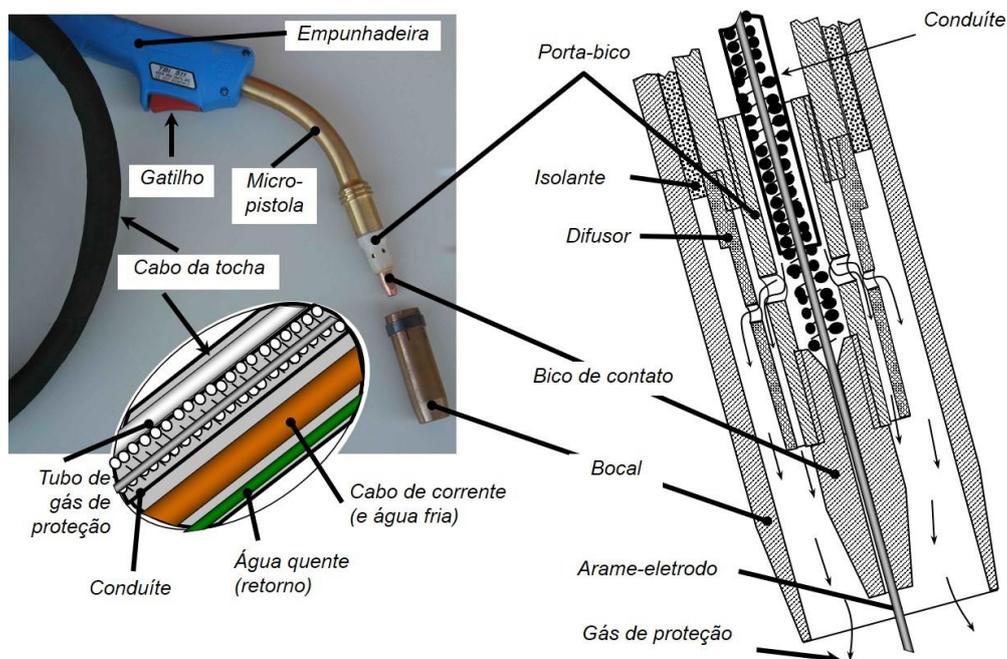


Figura 7 - Tocha MIG/MAG, Notas de Aula Prof. Dr. Vladimir (2022).

2.5.2 FONTE MIG/MAG

A fonte de soldagem para o processo MIG/MAG é uma fonte de corrente contínua (Fig. 8). Esta que será responsável por gerar a corrente de soldagem e por controlar a tensão acarretando diretamente no comprimento do arco. Assim, caso tenha alguma alteração da velocidade de alimentação ou na própria tensão do arco, a fonte de tensão constante altera o valor da corrente de maneira que mantenha o comprimento do arco constante. Portanto, o comprimento do arco elétrico está diretamente ligado a tensão disponibilizada pela fonte.



Figura 8 - Fonte MIG/MAG ESAB Smashweld 380 Volts Trifásica, LC Ferragens (2022).

2.5.3 ALIMENTADOR DE ARAME

O alimentador de arame conta com um mecanismo de alimentação que será responsável por levar o arame do carretel até o arco (Fig. 9). Importante que a velocidade seja pré-determinada e constante, pois como mencionado acima, a velocidade de alimentação está diretamente relacionada com a corrente de soldagem. O controle irá regular o início e final da alimentação do arame, a partir do sinal do gatilho. Os mecanismos de alimentação, podem ser simples (um par de roletes) ou duplos (dois pares de roletes), em que a escolha do rasgo de rolete é em função do diâmetro do arame (Fig. 10). Geralmente para arame tubular são utilizados 2 pares de roletes (para aumentar o atrito sem ter que aumentar o aperto com o risco de amassar o arame tubular), enquanto para arame maciço é apenas um par.

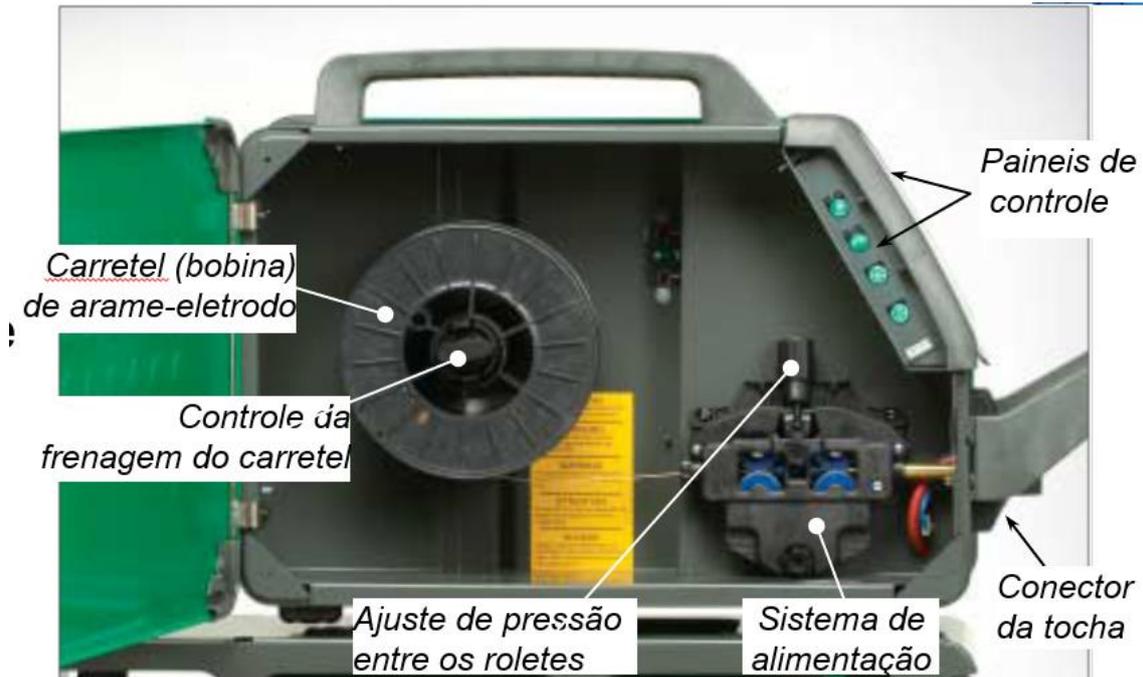


Figura 9 - Alimentador de Arame, Notas de Aula Prof. Dr. Vladimir (2022).

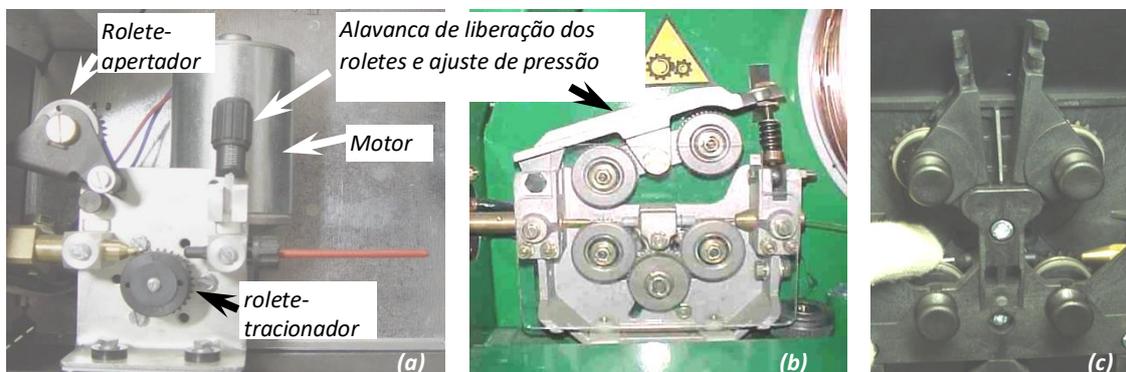


Figura 10 – Mecanismos de alimentação, Notas de Aula Prof. Dr. Vladimir (2022).

Usualmente, no processo FCAW, são utilizados roletes com rasgos serrilhados (recartilhados), em que se pode utilizar 1 par de roletes, mas o recomendado seria a utilização de 2 pares (Figura 11). Deve-se tomar cuidado com o aperto dos roletes de forma que este não amasse os eletrodos.

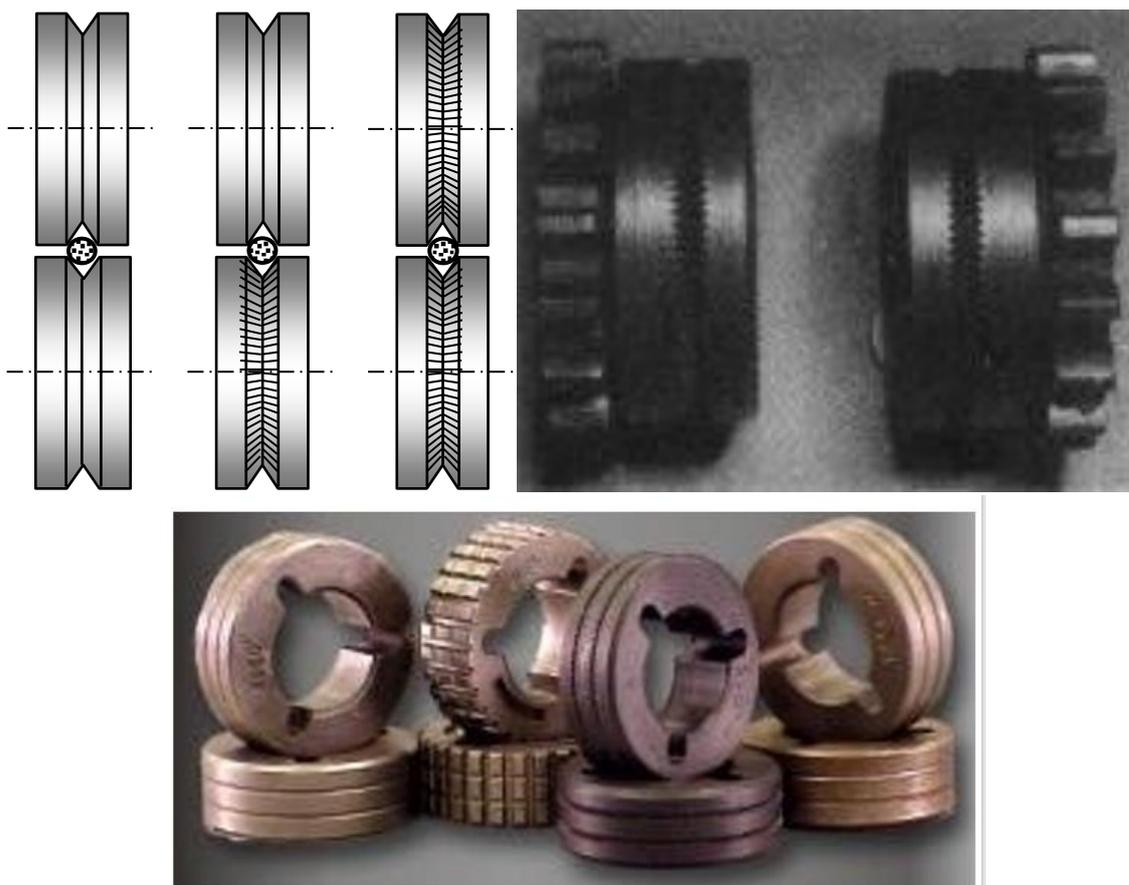


Figura 11: Roletes utilizados no processo FCAW, Notas de Aula Prof. Dr. Vladimir, (2022).

2.6 GÁS DE PROTEÇÃO

O intuito da utilização do gás de proteção é expulsar o ar atmosférico da região de soldagem para evitar uma possível contaminação da poça de fusão. Os gases que são responsáveis pela contaminação seriam o oxigênio (O_2), o nitrogênio (N_2) e os vapores d'água (H_2O). Em que, de acordo com ESAB (2005), o oxigênio no aço combina com o carbono e forma monóxido de carbono, gerando porosidade. O nitrogênio diluído no aço reduz a ductilidade e tenacidade dele. E os vapores d'água diluem no metal de base e resultam em porosidade. Assim, para evitar esses problemas são utilizados os gases de proteção, que geralmente podem ser o argônio (Ar), hélio (He) e dióxido de carbono (CO_2) ou uma mistura deles. Normalmente, a aplicação de misturas de gases acarreta melhores resultados no processo de soldagem.

2.7 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DA SOLDAGEM MIG/MAG

O processo de soldagem MIG/MAG, que é um dos processos mais utilizados no Brasil, possui as seguintes vantagens:

- Alta taxa de deposição do metal de adição;
- Penetração de raiz mais uniforme;
- Fácil a ser dominado pelo soldador;
- Pode-se utilizar altas velocidades de soldagem;
- Executável em todas as posições.

Este processo de soldagem também possui algumas limitações como:

- Devido ao fato da proteção ser gasosa (ou seja, de fácil remoção), esse processo de soldagem não é recomendado para os lugares, onde têm correntes de ar (p.ex., no campo na presença de ventos);
- Possui altas velocidades de resfriamento (aumentando riscos de trincas);
- Não é apropriado para os locais de difícil acesso;
- As vezes, gera muitos respingos;
- Manutenção trabalhosa.

2.8 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO PROCESSO FCAW

As vantagens do processo de arame tubular são:

- A taxa de deposição ainda maior do que no processo MIG/MAG;
- Bom acabamento e aparência do cordão de solda;
- Menos susceptível a trincas;
- Soldagem pode ser feita em todas as posições do mesmo jeito como o processo MIG/MAG;
- Menor geração de respingos.

Porém este processo de soldagem possui algumas limitações como:

- Precisa de remoção de escória;
- Arame é mais caro do que o arame maciço;
- Gera mais fumos do que o processo GMAW.

2.9 SEGURANÇA EM SOLDAGEM

Os processos de soldagem em geral podem ser nocivos à saúde. Por isso é importante o soldador conhecer as medidas de segurança para a operação, dentre eles é necessário se atentar a:

Fumos e Gases: não respirar os fumos e gases pois podem prejudicar a saúde. Um meio de evitar esse tipo de problema seria se atentar a ventilação do local. Assim, é necessário avaliar o local, para ver quais medidas devem ser tomadas; pois existem casos mais leves e outros não.

Choque elétrico: tomar cuidado com os equipamentos elétricos, evitando o contato com peças energizadas. As medidas de prevenção são de se certificar que as conexões elétricas estão apertadas e secas, estejam em boas condições, usar o diâmetro correto de cabo de corrente de soldagem, evitar de se submeter à tensão de circuito aberto e a utilização de luvas para mexer nos equipamentos.

Radiação e respingos: importante se atentar a radiação gerada pelo arco elétrico, em que emitem raios infravermelhos e ultravioletas. Isso pode gerar a queima dos olhos e da pele em um curto período exposto. Assim, as medidas para a prevenção consistem na utilização dos óculos de proteção, roupas de proteção (aventais e jaquetas resistentes ao calor), botas, proteção para os ouvidos, uma touca, dentre outros.

Assim, é importante que o soldador use equipamentos de segurança como máscara de solda, respirador, óculos, avental de raspa, calçado, protetor auditivo e luvas para sua proteção.

Sabendo que as indústrias utilizam mais a soldagem MIG/MAG, pode-se perguntar o porquê do processo FCAW ser menos utilizado. Visto que em suas vantagens este apresentaria uma maior produtividade e acabamento em relação ao GMAW. Apesar do arame tubular possuir maior custo, talvez o menor tempo de soldagem do processo FCAW compense tal gasto em um determinado ponto. Além disso, um estudo apresentado pela ESAB (2000) chegou à conclusão de que o processo de arame tubular seria mais barato, tornando a discussão de custos entre os dois processos tangível.

Entretanto, dimensionar os consumos em soldagem é algo complexo, uma vez que muitas variáveis devem ser levadas em consideração. No caso, é necessário se atentar para os parâmetros de soldagem, como a corrente, tensão, material do arame, diâmetro do arame, vazão do gás, material a ser soldado e tipo de gás de proteção. Além disso, o soldador também possui custo de mão de obra envolvido, em que sua experiência no processo influi de maneira significativa no resultado.

Resumindo, precisa-se descobrir quais são as condições em que o processo FCAW será mais vantajoso do que a soldagem MIG/MAG, o que é um dos objetivos deste trabalho de fim de curso.

3. METODOLOGIA

Para a realização da pesquisa serão utilizados como fonte quatro artigos, em que os dados experimentais com relação a taxa de deposição tiveram resultados diferentes. Isso mostra a grande quantidade de fatores que podem influenciar no processo de soldagem.

A pesquisa desenvolvida por *Souza e Ferraresi (2013)*, Análise Comparativa dos Processos de Soldagem GMAW e FCAW com Transferência Metálica por Curto-Circuito na Posição Horizontal, se mostrou discordante quanto aos resultados esperados pela literatura e afirmados pelos fabricantes de arame tubular.

De acordo com *Souza e Ferraresi (2013)* o experimento utilizou uma fonte de soldagem eletrônica multiprocesso (operando em FCAW e GMAW), e dois gases de proteção (CO₂ 100% e Ar + 25% CO₂) com uma vazão de 14 l/min. Com relação aos arames, foram utilizados para o processo GMAW o arame maciço AWS E70S-6 e para o processo FCAW o arame tubular tipo rutílico AWS E71T-1M, ambos com diâmetro de 1,2 mm. As faixas de corrente variam de 120 a 160 A e as tensões de 18 a 24 V. E as placas de teste produzidas em aço carbono ABNT 1020 com as dimensões de 6,3 x 50,8 x 250 mm.

Para este trabalho será analisado apenas a capacidade produtiva, onde foi avaliada a taxa de deposição (T_d) e o rendimento de deposição (η_d), os cálculos foram feitos da seguinte equação:

$$T_d = \frac{M_f - M_i}{T_{ab}} \quad (1)$$

Onde:

T_d – Taxa de deposição (g/min)

M_i – Massa inicial (g)

M_f – Massa final (g)

T_{ab} – Tempo de arco aberto (min)

E para o rendimento:

$$\eta_d = \frac{T_d}{T_f} * 100\% \quad (2)$$

Onde:

η_d – Rendimento de deposição
 T_f – Taxa de fusão (g/min)

Assim, os resultados obtidos com base nesses dados são mostrados na Figura 12 (taxa de deposição x tensão do arco):

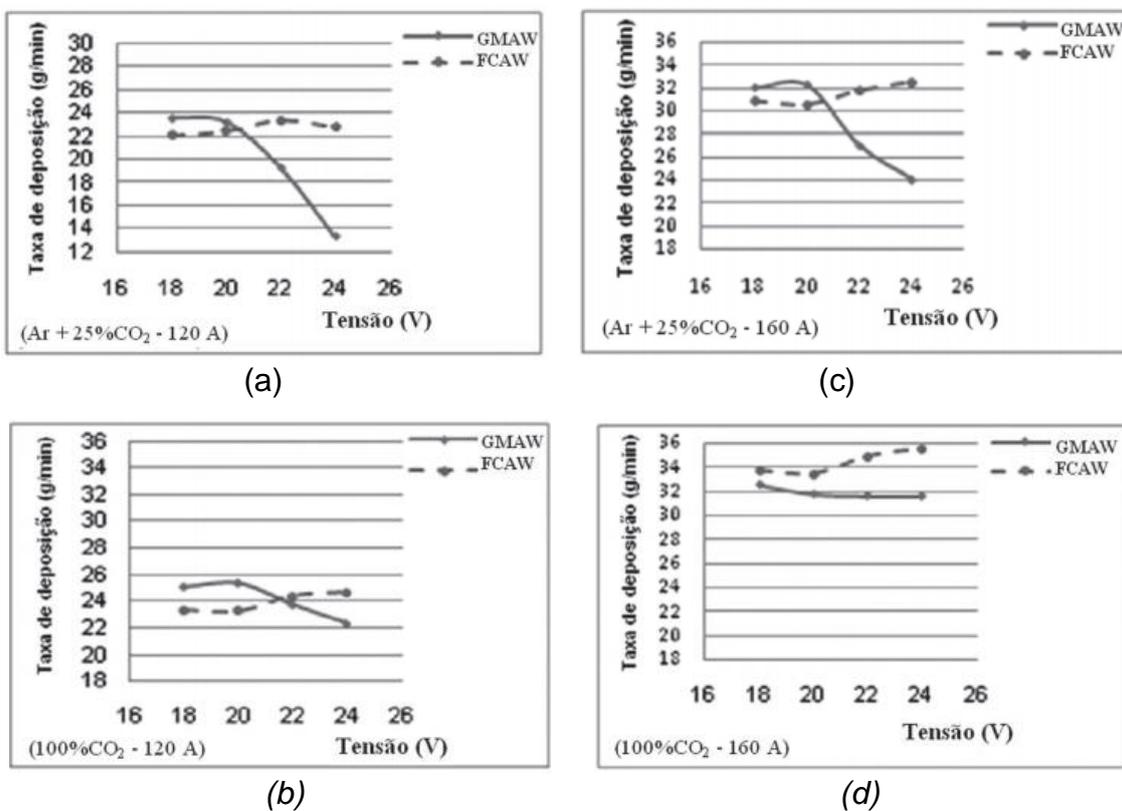


Figura 12 - Comparativo taxa de deposição GMAW e FCAW: (a) 120 A e gás Ar + 25% CO₂; (b) 120 A e gás 100% CO₂; (c) 160 A e gás Ar + 25% CO₂ e (d) 160 A e gás CO₂ 100%; Souza e Ferraresi (2013).

Com relação ao rendimento, a Figura 13 ilustra gráficos do rendimento de deposição x tensão do arco:

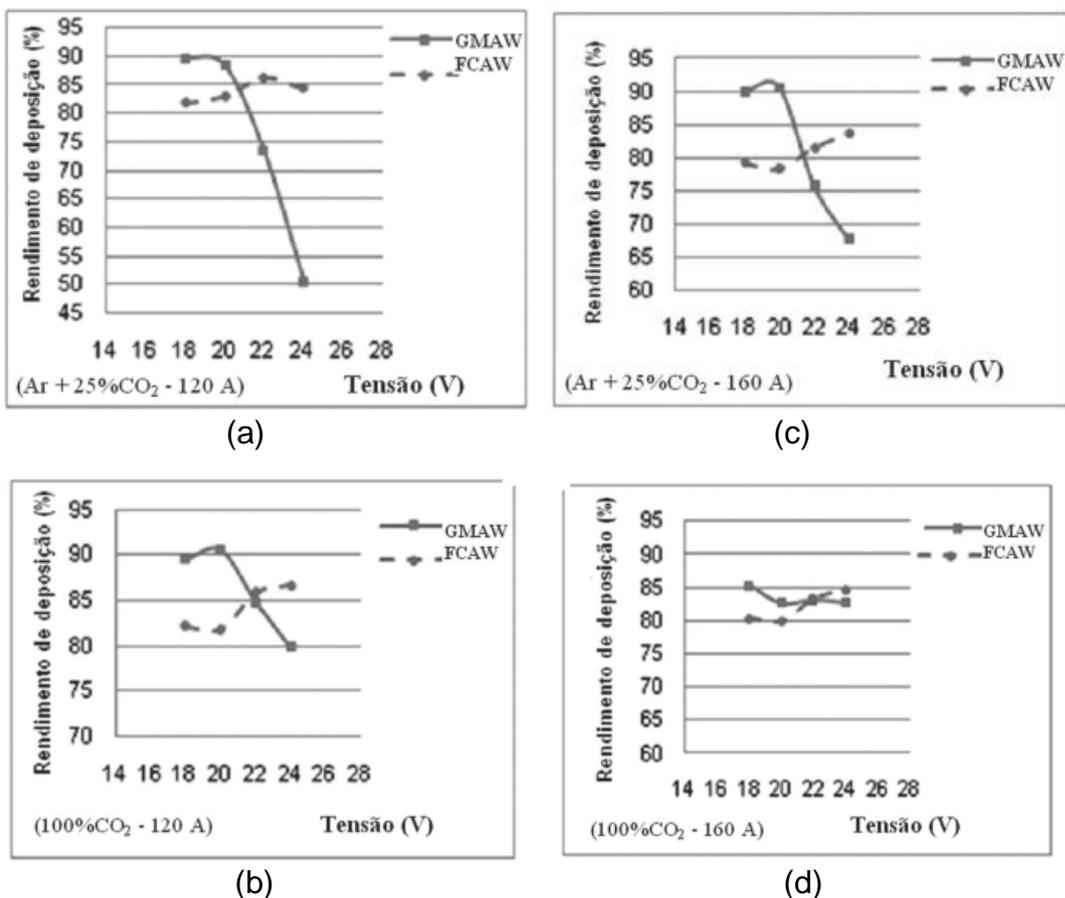


Figura 13 - Comparativo rendimento GMAW e FCAW: (a) 120 A e gás Ar + 25% CO₂; (b) 120 A e gás 100% CO₂; (c) 160 A e gás Ar + 25% CO₂ e (d) 160 A e gás CO₂ 100%; Souza e Ferraresi (2013).

Analisando a Figura 12 observa-se que a baixas tensões a taxa de deposição do GMAW é superior comparado ao FCAW, exceto no último gráfico onde aumentou-se a corrente e o gás era CO₂. E que quando a tensão atinge o ponto de 22 V até 24 V, o FCAW se torna superior enquanto o processo GMAW tem sua taxa de deposição diminuindo rapidamente. Além disso, de acordo com a Figura 10, o gás de proteção utilizado influenciou diretamente e de forma significativa na taxa de deposição.

Na Figura 13, identifica-se que os melhores resultados do GMAW também foram para valores de tensão menores com um rendimento de deposição próximo a 90%. Enquanto para o processo de FCAW os melhores rendimentos (valores próximos a 85%) foram com uma faixa mais alta de tensão.

Assim, observando as Figuras 12 e 13 é possível identificar que os parâmetros como o gás utilizado e a variação de tensão influenciam diretamente tanto no rendimento quanto na taxa de deposição.

Um outro artigo que foi publicado por um grupo da SITEFA (Simpósio de Tecnologia Fatec), com o título de “Comparação da Taxa de Deposição do Arame Sólido ER10S6, 1,2 mm, no Processo GMAW (MAG), com o Arame Tubular E71T1, 1,2 mm, no Processo FCAW no Aço ASTM A 36”. Esse artigo também comparou os processos FCAW e GMAW em aspectos como o fator de operação, taxa de deposição e tempo de soldagem.

O experimento de *SITEFA* utilizou como material dois tipos de arame, para o processo de GMAW, um arame sólido AWS A5.18 ER70S-6 com o diâmetro de 1,2 mm. Em que o gás de proteção ativo foi uma mistura contendo 75% de argônio e 25% CO₂ com uma vazão de 12 a 15 l/min, uma corrente de 200 A e tensão do arco de 29 V, e uma alimentação de arame de 6,8 m/min.

Já no processo FCAW, foi utilizado o arame tubular AWS A5.20 E71T-1 com diâmetro de 1,2 mm. Em que o gás de proteção foi 100% CO₂ com uma vazão de 18 a 25 l/min, corrente de 200 A e tensão do arco de 25 V, e uma alimentação de arame de 8,5 m/min. O equipamento utilizado em ambos os processos foi o mesmo, mudando apenas os parâmetros citados acima.

Para os cálculos da taxa de deposição utilizaram conforme Brito Paranhos (2005) as equações a seguir.

$$FO = \frac{TAA}{TTS} * 100 \quad (3)$$

Onde:

FO – Fator de operação (%)
TAA – Tempo de arco aberto (s)
TTS – Tempo total de soldagem (s)

$$TAA = \frac{CS}{VS} \quad (4)$$

Onde:

TAA – Tempo de arco aberto (min)
CS – Comprimento de solda (cm)
VS – Velocidade de soldagem (cm/min)

$$TS = \frac{PMD}{TD*FO} \quad (5)$$

Onde:

TS – Tempo de soldagem (h)
 PMD – Peso do material depositado (kg)
 TD – Taxa de deposição (kg/h)
 FO – Fator de operação (%)

$$TD = \frac{PF*PI}{TAA} \quad (6)$$

Onde:

TD – Taxa de deposição (kg/h)
 PF – Peso final da placa de teste (kg)
 PI – Peso inicial da placa de teste (kg)
 TAA – Tempo de arco aberto (h)

Segundo SITEFA, foi utilizado um cronômetro para encontrar os valores de tempo do arco aberto e tempo de soldagem. A Tabela 5 mostra o resultado dos cálculos para os processos GMAW e FCAW. E a Figura 14 relaciona os resultados em forma de gráficos.

Tabela 5 - Cálculos dos processos de soldagem para GMAW e FCAW, adaptado SITEFA (2018).

	GMAW	FCAW
Taxa de Deposição (TD)	1,31 kg/h	1,24 kg/h
Fator de Operação (FO)	13,71%	15,94%
Tempo de Arco Aberto (TAA)	6,17 min	5,58 min
Tempo de Soldagem (TS)	45 min	35 min

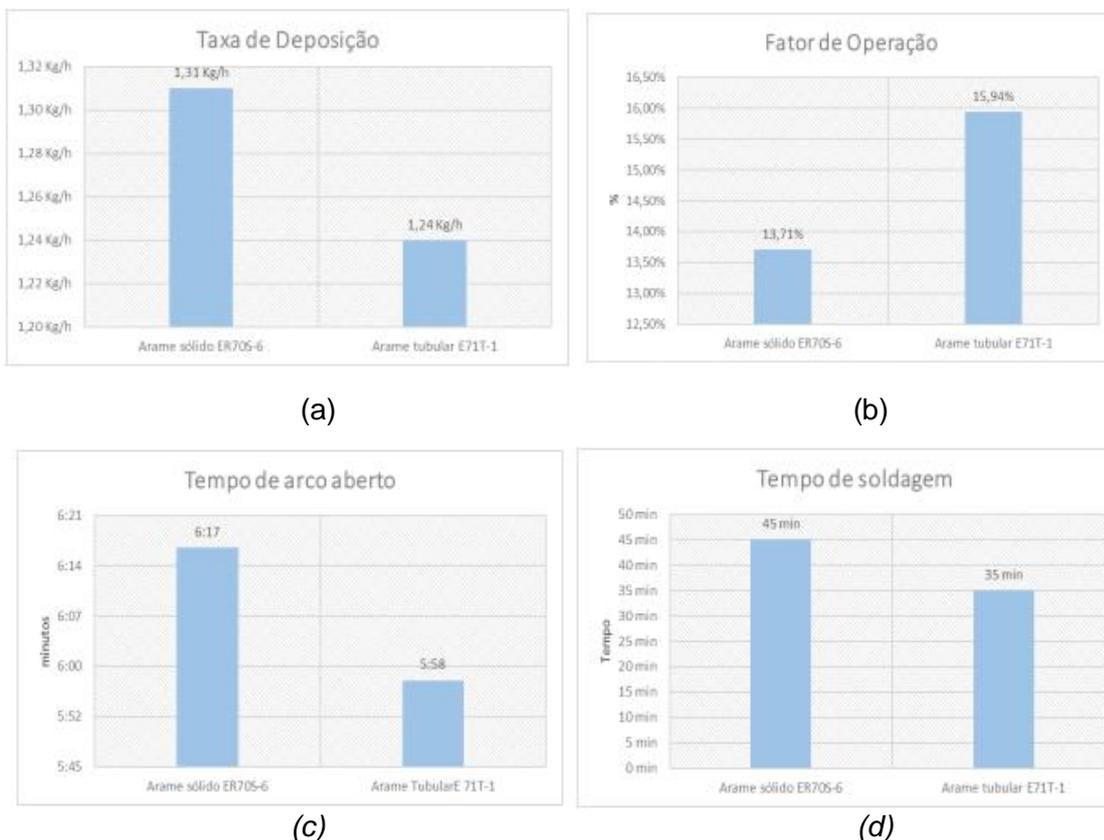


Figura 14 - (a) Taxa de deposição, (b) Fator de soldagem, (c) Tempo de arco aberto, e (d) Tempo de soldagem; SITEFA (2018).

Analisando a Tabela 5 e a Figura 14 apresentadas anteriormente, é notório uma diferença de resultado entre os dois processos. De acordo com o experimento foi encontrada uma maior taxa de deposição para o GMAW e menor para o FCAW. Com relação aos outros fatores, o FCAW teve um desempenho melhor que o GMAW, tendo menor tempo de soldagem, menor tempo de arco aberto, e o fator de operação foi acima do MIG/MAG.

De acordo com SITEFA (2018), a pesquisa mostrou que a taxa de deposição foi maior para o arame sólido, e que a variável de velocidade de alimentação influi diretamente no rendimento do processo.

O experimento feito por *Scotti e Garcia* (2011) com o título de “Uma metodologia para Análises Comparativas da Capacidade Produtiva entre Arames Maciços (MIG/MAG) e Tubulares (Eletrodo Tubular)” também apresentou resultados interessantes, quanto a comparação dos dois métodos.

Para o processo MIG/MAG foi utilizado o arame maciço ER70S-6, enquanto para o processo FCAW foi utilizado o arame tubular E71T-1, ambos com diâmetro de 1,2 mm. Os gases de proteção foram os mesmos, tanto o 100%CO₂ e o 75%Ar+25%CO₂, com uma vazão de gás de 15 l/min para o arame maciço e uma vazão de 20 l/min (devido à maior distância do bico à peça) para o arame tubular. Com relação a corrente e tensão do arco, elas foram variadas na faixa de 150 a 300 A e 25 a 32 V respectivamente.

As equações utilizadas para os cálculos foram organizadas da seguinte forma:

$$T_d = \frac{M_f - M_i}{T_{ab}} \quad (7)$$

Onde:

T_d – Taxa de deposição (g/min)
 M_f – Massa final da placa de teste (g)
 M_i – Massa inicial da placa de teste (g)
 T_{ab} – Tempo de arco aberto (min)

$$T_D = \frac{T_d}{V_{sol}} \quad (8)$$

Onde:

T_D – Taxa de deposição por unidade de comprimento do cordão (g/cm)
 V_{sol} – Velocidade de soldagem (cm/min)

$$\varepsilon_D = \frac{T_d}{T_F} \quad (9)$$

Onde:

ε_D – Rendimento de deposição (%)
 T_F – Taxa de fusão (g/min)

$$T_F = \frac{\pi * d^2}{4} * V_{al} * \rho \quad (10)$$

Onde:

T_F – Taxa de fusão (g/min)
 d – Diâmetro do arame (c)
 V_{al} – Velocidade de alimentação do arame (cm/min)
 ρ – densidade do arame (g/cm³)

Dessa maneira, obteve-se a tabela a seguir (Tabela 6):

Tabela 6 - Valores médios de tensão (U) e corrente (I), taxa de fusão (T_F), taxa de deposição (T_d) e rendimento (ϵ_D); adaptado Scotti e Garcia (2011).

		Teste	U (V)	I (A)	T_F (g/min)	T_d (g/min)	ϵ_D (%)
TUBULAR	100% CO ₂	1	25,4	148,2	37,29	32,04	85,9
		2	27,2	203,7	59,28	50,39	85,0
		3	30,5	254,3	79,39	66,65	84,0
		4	32,4	303,5	106,26	92,49	87,0
	25%Ar + 100% CO ₂	5	25,2	148,6	34,53	30,05	87,0
		6	27,5	201,6	53,40	47,20	88,4
		7	30,7	252,6	71,47	61,97	86,7
		8	32,5	307,2	100,51	88,32	88,0
MACIÇO	100% CO ₂	9	21,5	148,8	28,54	26,68	93,5
		10	23,3	203,7	45,66	43,38	95,0
		11	25,2	253,4	58,76	55,24	94,0
		12	29,1	300,0	74,73	71,30	95,5
	25%Ar + 100% CO ₂	13	19,6	147,8	25,85	24,20	93,6
		14	21,5	195,2	39,63	37,85	95,5
		15	21,4	247,2	57,50	54,63	95,0
		16	27,3	303,8	75,46	73,20	97,0

Analisando a Tabela 6 e as Figuras 15 e 16 a seguir, observa-se que a taxa de deposição do FCAW foi superior em todos os casos. Tanto na mudança dos gases de proteção, quanto na mudança de corrente, e que para maiores níveis de corrente a diferença da taxa de deposição entre os dois aumenta. Isso mostra que está de acordo com o que os fabricantes de arame tubular prometem e está de acordo com o que a literatura diz ser uma vantagem do processo de arame tubular, que seria o aumento da produtividade devido a maior taxa de deposição.

De acordo com Scotti e Garcia (2011), o experimento concluiu que o arame tubular então possui maior taxa de deposição, reduzindo o tempo de soldagem e, assim, aumentando a produtividade. Porém, o menor rendimento de deposição do arame tubular faz com que se consuma mais do arame tubular em relação ao maciço, o que deve ser considerado nos custos (considerando respingos, fumos, escórias, etc...).

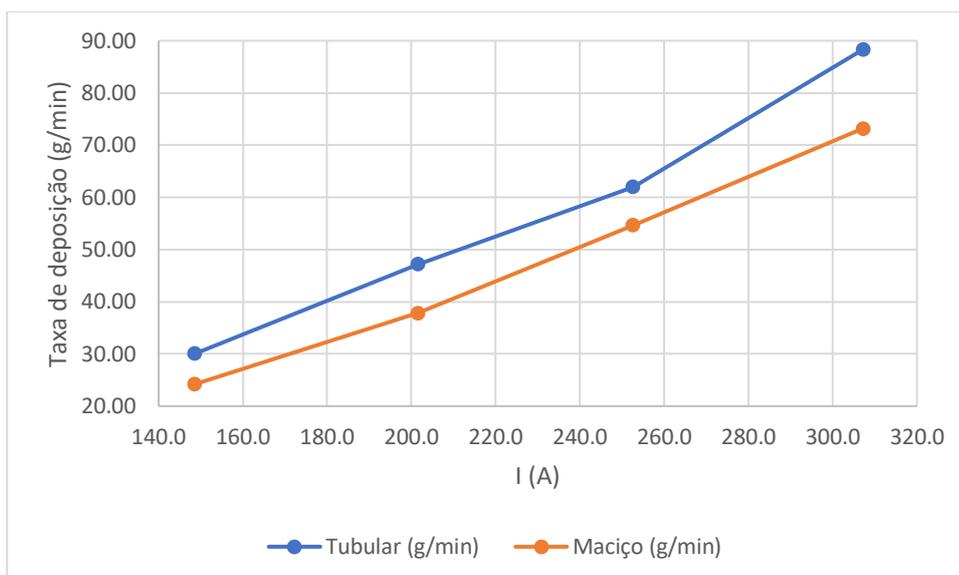


Figura 15 - Comparativo taxa de deposição GMAW e FCAW com gás 100%CO₂, Autoria Própria baseado trabalho Scotti e Garcia 2022.

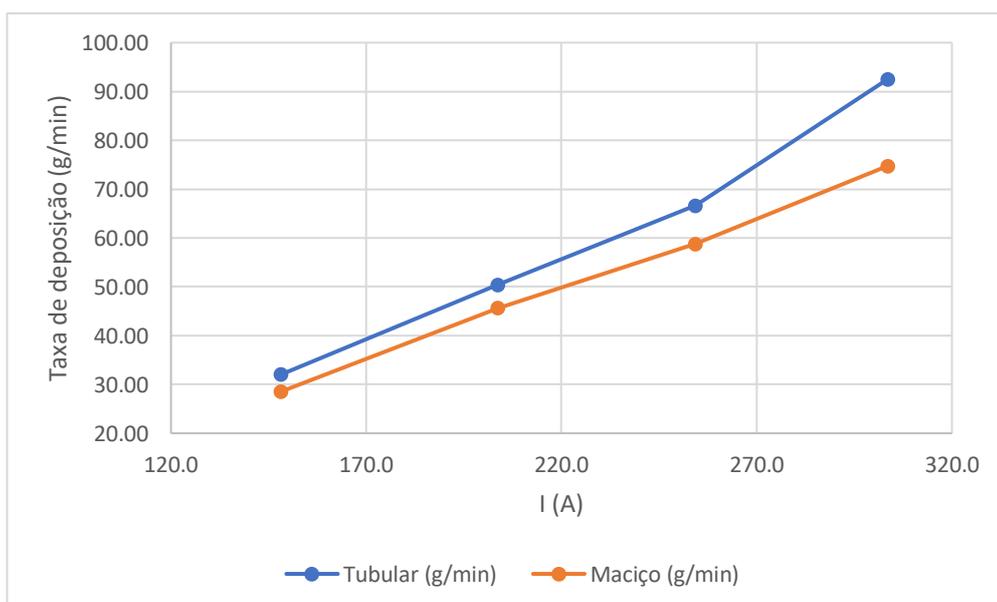


Figura 16 - Comparativo taxa de deposição GMAW e FCAW com gás Ar+25%CO₂, Autoria Própria baseado trabalho Garcia e Scotti 2022.

Um estudo comparativo de custos entre o FCAW e GMAW elaborado pela ESAB (2000) se mostrou interessante ao fato de que o arame tubular foi mais econômico que o arame maciço, uma vez que normalmente aqui no Brasil é ao contrário.

As Tabelas 7 e 8 mostram os parâmetros de soldagem de acordo com o tipo de processo de soldagem (FCAW ou GMAW) como o diâmetro, taxa de deposição e eficiência de deposição, devido aos percentuais perdidos por conta dos respingos, fumos e escórias.

Tabela 7 – Taxa de deposição (FCAW) conforme diâmetro, corrente (A) e eficiência (%) para os arames E70T-1, E71T-1, E70T-2, E70T-5; ESAB (2000).

Eletrodo Diâmetro (")	I (A)	Taxa de deposição (libras/h)	Eficiência (%)
0.035 ou 0.889 (mm)	130	3,2	82
	140	3,6	82
	160	4,2	83
	180	5,6	83
	200	6,5	84
	220	7,5	85
0.045 ou 1.143 (mm)	160	4,0	83
	180	4,9	87
	200	6,5	90
	220	6,8	84
	240	7,3	84
	280	10,5	89
0.052 ou 1.320 (mm)	170	3,9	84
	190	5,3	87
	210	5,5	86
	240	6,7	85
	270	8,1	85
	300	10,3	87
16/01 ou 1.590 (mm)	180	4,2	87
	200	4,7	85
	220	5,6	87
	250	7,7	86
	275	8,5	86
	300	9,3	86
5/64 ou 1.984 (mm)	350	11,7	86
	250	6,4	85
	350	10,5	85
32/03 ou 2.38 (mm)	450	14,8	85
	400	12,7	85
	450	15	86
	500	18,5	86

Tabela 8 – Taxa de deposição conforme diâmetro, corrente (A), rendimento (%) e gás de proteção; ESAB (2000).

Diâmetro (")	I (A)	Taxa de deposição (libras/h)		
		Ar+2%O ₂ *98%	Ar+25%CO ₂ *96%	100%CO ₂ *93%
0.03 ou	75	2,0	1,9	1,8
	100	2,6	2,6	2,5
0.762 (mm)	150	4,1	4,0	3,9
	200	6,8	6,7	6,5
0.035 ou	80	2,2	2,1	2,0
	100	2,7	2,7	2,6
0.889 (mm)	150	4,2	4,1	4,0
	200	6,2	6,0	5,9
	250	9,0	8,8	8,6
	100	2,1	2,0	1,9
0.045 ou	125	2,8	2,8	2,7
	150	3,6	3,5	3,4
1.143 (mm)	200	5,6	5,5	5,3
	250	7,8	7,6	7,4
	300	10,2	10,0	9,7
	350	13,2	12,9	12,5
	250	6,5	6,4	6,2
	16/01	275	7,7	7,6
ou	300	9,0	8,8	8,5
	1.590	350	11,3	11,0
(mm)	400	14,0	13,7	13,3
	450	17,4	17,1	16,5

* - Rendimento de deposição do metal de adição.

Considerando a análise quanto a taxa de deposição e corrente, as Tabelas 7 e 8 apresentam a relação de que, quanto maior a corrente, maior a taxa de deposição em ambos os casos, o que é óbvio, pois a corrente de soldagem é determinada pela velocidade de alimentação do arame. Além disso, o fator do diâmetro do arame também influencia, visto que quando se tem um maior diâmetro é possível utilizar correntes mais altas e conseqüentemente se tem uma maior taxa de deposição.

Para facilitar a visualização o Figura 17 abaixo apresenta uma comparação da taxa de deposição do arame tubular e arame maciço em função da corrente. Mas esse gráfico seria uma aproximação, já que existem vários tipos

de arames e cada um com suas propriedades. Portanto, a taxa de deposição do arame tubular é superior ao do arame maciço.

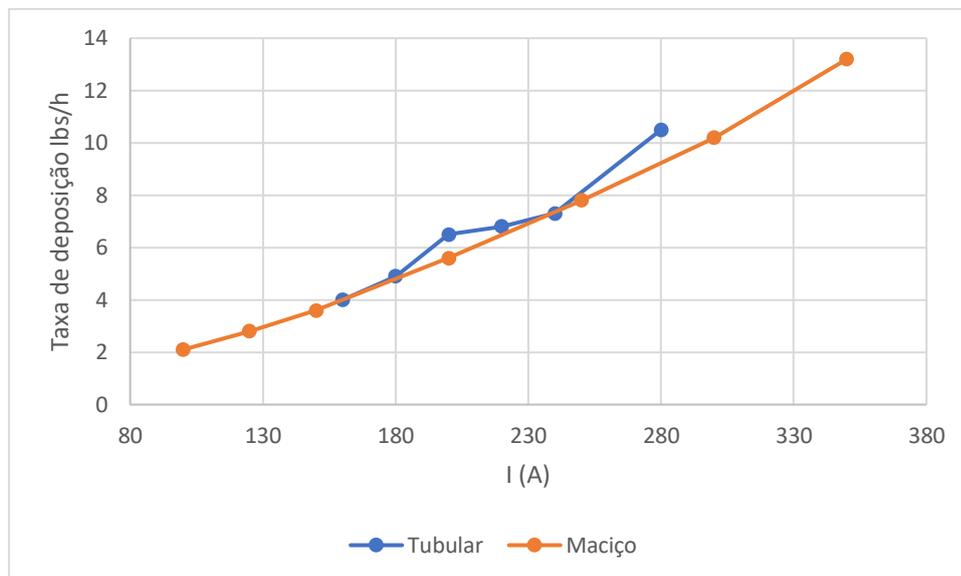


Figura 17 - Taxa de deposição em função da corrente para um diâmetro de 0,045", baseado em ESAB (2000) Autoria Própria (2022).

Levando em conta os dados das Tabelas 7 e 8, a ESAB realizou um estudo relativo a custos de soldagem, desconsiderando o custo de energia e os componentes iguais que os dois processos precisam, como as máquinas utilizadas para soldagem e componentes de proteção para o soldador, etc. Os parâmetros utilizados para os cálculos estão dispostos na Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros utilizados para os cálculos de custos em FCAW e GMAW, ESAB (2000).

	FCAW	GMAW
Tipo de eletrodo	0,045" diâmetro. E71T-1	0,045" diâmetro. ER70S-3
Mãos de obras e despesas em gerais	US\$ 30,00/h	US\$ 30,00/h
Corrente de soldagem	180 amperes	125 amperes
Taxa de deposição	4,9 lbs/h	2,8 lbs/h
Fator Operacional	45%	50%
Custo de Eletrodo	US\$ 1,44/lb	US\$ 0,66/lb
Eficiência de Deposição	85%	96%
Taxa de fluxo de gás	35 cfh	35 cfh
Custo de gás por Cu.pés	\$0,03 CO ₂	\$0,11 Ar+25%CO ₂

Obs.: 0.045" = 1.143 mm.

Após calculados os gastos o resultado é mostrado na Tabela 10.

Tabela 10 - Custos de mão de obra, arame e gás para os processos GMAW e FCAW; adaptado ESAB (2000).

	FCAW	GMAW	Maciço p/ Tubular %
Custo/kg	\$ 13,605	\$ 21,429	36,51%
Arame	\$ 1,694	\$ 0,688	-146,22%
Gás	\$ 0,214	\$ 1,179	81,85%
Total	\$ 15,513	\$ 23,296	33,41%

Assim, a Tabela 10 mostrou que o processo de soldagem FCAW seria mais econômico em torno de 33% comparado ao GMAW. O fator que mais contribuiu para esse resultado foi a taxa de deposição, em que utilizando o arame tubular foi 42,85% maior em relação ao arame maciço. Assim, isso evidencia que realmente está de acordo com o que a literatura e os fabricantes dizem com relação ao aumento da produtividade. Ainda, esses cálculos não podem ser considerados justos, levando em conta que a soldagem FCAW foi “favorecida” por uma maior corrente (180 A) e, logo, uma bem maior taxa de deposição (Tabela 9). Além de que, pensando no salário do Brasil, trinta dólares é um custo operacional bem alto e que não condiz com a realidade brasileira.

Analisando de forma geral os artigos citados, observa-se que os dois primeiros apresentaram um resultado onde o GMAW possui maior taxa de deposição do que o FCAW, o que foi inesperado. Porém, percebe-se que existem alguns fatores que podem ter contribuído para esse resultado. Por exemplo, o uso do arco muito curto com a transferência metálica por curto-circuito no FCAW, enquanto, este processo de soldagem usa arcos mais longos com a transferência metálica sem curto-circuito, o que pode ter afetado os resultados. Ademais, no segundo artigo, a comparação de processos não foi justa, devido à diferença na tensão, diferença de velocidade de alimentação do arame e diferença na vazão dos gases. Esses fatores podem ter contribuído para o resultado da taxa deposição do arame tubular ser inferior ao do arame maciço.

Já na pesquisa realizada por Scotti e Garcia (2011), os parâmetros foram utilizados de maneira justa, comparando os dois processos na mesma faixa de

corrente, mas com a tensão do arco ótima para cada processo (veja Tabela 6). No qual, o resultado se apresentou como o esperado na literatura. Entretanto, o artigo não tinha um foco econômico.

Fundamentado na literatura e no que afirmam os fabricantes de arame tubular, será considerado como válido e verdadeiro os artigos que tiveram o processo FCAW com maior taxa de deposição. Ademais, os cálculos serão com base no quilo de metal depositado, e não de acordo com a hora de trabalho. E para este trabalho, os custos em comum, como equipamentos, cilindro de gás, fonte, tocha, alimentador de arame, itens de segurança, dentre outros, foram desconsiderados pois seriam gastos mais ou menos iguais.

Além disso, o propósito é trazer uma comparação econômica de forma pertinente a nossa realidade e de uma maneira onde os parâmetros para tais comparações sejam equivalentes (como valores de corrente), enquanto que os valores da tensão do arco devem ser ótimos para cada processo.

No que se diz respeito aos custos operacionais em soldagem, pode-se ter como parâmetro os seguintes itens:

- **Taxa de deposição:** seria quantidade de metal de solda depositado por unidade de tempo (kg/h). É considerado como tempo contínuo, ou seja, sem parar para que haja limpeza, remoção de escória dentre outros. Geralmente aumenta de acordo com o aumento da corrente;
- **Mão de Obra:** pode ser quantificado de acordo com a hora de trabalho paga ao soldador. O valor pode variar bastante de acordo com o país, o tempo de experiência do soldador e o tipo de empresa onde ele trabalha;
- **Fator de operação:** seria a porcentagem de tempo que o soldador gasta realmente soldando, ou seja, se o fator operacional for de 50%, o soldador passa metade do tempo realizando outras operações como a remoção de escória, posicionando a solda, instalando um novo arame, dentre outros. Ao utilizar os arames sólidos, os fatores operacionais variam de 45% a 55%, enquanto para arames tubulares entre 40% e 50% (5% a menos que o GMAW devido ao tempo utilizado para a limpeza das escórias);
- **Eficiência da taxa de deposição:** se refere a relação do peso de metal de solda depositado em relação ao peso do arame consumido na

realização da solda. No processo FCAW se perde do arame em torno de 15% devido à escória e fumaça, enquanto no GMAW a perda é de 2 a 3%.

Fundamentado nos parâmetros mencionados acima e na taxa de deposição dos Testes 1 e 13 do artigo publicado por Scotti e Garcia (2011), Tabela 6, pode-se formar a Tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros e custos de soldagem para os processos GMAW e FCAW, Autoria Própria 2022.

	GMAW	FCAW
Arame	ER70S-6	E71T-1
Diâmetro	1,2 mm	1,2 mm
Corrente de soldagem	148,2 A	147,8 A
Tensão de soldagem	19,6 V	25,4 V
Taxa de deposição	1,44 kg/h	1,92 kg/h
Fator Operacional	50%	45%
Eficiência de Deposição	93,60%	85,90%
Vazão gás	15 l/min	20 l/min
Mão de obra	x	x

As relações de cálculos de custo foram com base no quilo de metal depositado, ou seja, quanto custaria para depositar um quilo de metal. Assim, com a taxa de deposição em kg/hora, pode-se encontrar quantos minutos levará para soldar um quilo de metal depositado com a Equação 11.

$$T_{1kg} = \frac{60}{T_d} \quad (11)$$

Onde:

T_{1kg} – Custo de 1 kg de metal depositado (min)

T_d – Taxa de deposição (kg/h)

Encontrado o tempo para se soldar 1 kg, usando a vazão em l/min, pode-se encontrar quantos litros de gás seriam utilizados para soldar um quilo de metal depositado, como mostra a Equação 12.

$$Gás_l = T_{1kg} * V_{gás} \quad (12)$$

Onde:

$Gás_l$ – Gás de proteção necessário para um quilo (l)

T_{1kg} – Custo de 1 kg de metal depositado (min)

$V_{gás}$ – Vazão do gás em (l/min)

Mensurando os custos do arame maciço ER70S-6 e do arame tubular E71T-1 de acordo com a média aritmética do mercado atual, em que a fonte de preços foram estabelecimentos comerciais online como a Loja do Mecânico e até mesmo Mercado Livre forma-se a Tabela 12. Em que o esperado era o preço do arame tubular ser 2 vezes mais caro que o arame maciço como de costume, porém talvez por uma questão de oferta e demanda, não foi o encontrado. A Tabela 12 mostra os custos dos arames.

Tabela 12 - Custo do arame maciço (ER70S-6) e tubular (E71T-1), Autoria Própria 2022.

	Quantidade	Preço
ER70S-6	15 kg	R\$ 389,90
E71T-1	15 kg	R\$ 449,90

Enquanto os custos para o gás de proteção vieram de um orçamento realizado na White Martins, considerando o refil de gás de proteção (desconsiderando o custo do cilindro). Onde a expectativa era de que o CO₂ fosse mais barato que a mistura, porém não foi o encontrado também. A Tabela 13 mostra os custos do gás de proteção.

Tabela 13 - Custo do gás de proteção utilizados nos processos GMAW e FCAW, Autoria Própria 2022.

	Quantidade	Preço
Gás CO₂	10 m ³	R\$ 276,00
Ar+4%CO₂	10 m ³	R\$ 240,00

A variável que pode justificar uma maior utilização do processo de soldagem FCAW em outros países seria o maior salário por hora do soldador. Assim, para as pesquisas foram utilizadas fontes da média salarial em sítios web

de empregos internacionais e nacionais, como o Glassdoor, Talent e Salary Expert. Dessa maneira ficou possível dimensionar a diferença de salário entre os países. Nesse trabalho será considerado a média salarial de 4 países julgados como desenvolvidos (Estados Unidos, Japão, Canadá, Austrália) e 3 países classificados como em desenvolvimento (Brasil, Colômbia e Argentina). Vale ressaltar que os dados obtidos estavam em dólares, porém, por convenção aos cálculos, foram convertidos para o real com a cotação atual de que um dólar equivale a R\$5,06 (para o dia 3 de fevereiro de 2022). A Tabela 14 mostra os salários do soldador por hora.

Tabela 14 – Salário médio do soldador nos países desenvolvidos (EUA, Japão, Canadá, Austrália) e em desenvolvimento (Brasil, Colômbia e Argentina), Autoria Própria 2022.

	Salário médio/ hora (R\$)
Estados Unidos	93,35
Japão	94,70
Canadá	101,20
Austrália	166,98
Brasil	17,00
Colômbia	9,17
Argentina	16,92

Vale salientar que os salários seriam médias aritméticas das faixas salariais, em que existe uma diferença de acordo com o nível de experiência dos soldadores. E que para este trabalho não foi considerado o fator operacional, sendo que na literatura seria uma diferença de 5% do FCAW para o GMAW, pois, é variável de acordo com a experiência do soldador e também a diferença não seria muito ampla. Assim, com todas as variáveis definidas pode-se analisar os resultados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CÁLCULOS DOS CUSTOS DAS SOLDAGENS MIG/MAG E FCAW

Os cálculos da Tabela 15 a seguir foram pautados na comparação de 1kg de metal depositado, de maneira que ficasse uma analogia justa. Dessa forma fica fácil visualizar a diferença de custo de cada consumível e do custo da mão de obra.

Tabela 15 – Resultados dos custos de arame, gás e mão de obra e de tempo para 1kg de metal depositado nos processos GMAW e FCAW, Aatoria Própria (2022).

	GMAW	FCAW
Massa de metal depositado (kg)	1	1
Tempo (min)	41,67	31,21
Gás de Proteção (R\$)	15,13	17,22
Mão de Obra (R\$)	11,81	8,84
Arame (R\$)	25,86	30,71
Total (R\$)	52,79	56,77

Observando a Tabela 15, o gás de proteção do GMAW (96% Ar+4%CO₂) foi mais barato que o gás do FCAW (CO₂). E a diferença do custo de arame entre os dois processos aumentou devido ao rendimento diferenciado. Enquanto o arame tubular tem 85%, ou seja, ao comprar 1 kg de arame na verdade estaria comprando 850 g de metal depositado, o arame maciço tem 95% de rendimento, ou seja, comprando 950 g de metal depositado.

Além disso, quando se compara os custos de mão de obra por quilo de metal depositado, tem-se que o FCAW possui menor custo. O que era esperado pois a maior taxa de deposição do arame tubular faz com que se gaste menos tempo para a soldagem, ou seja, paga-se menos para o soldador.

A segunda linha da Tabela 15 é a comparação entre o tempo dos dois processos de soldagem. O tempo para o FCAW é menor devido a taxa de deposição mais alta. Assim, em um projeto de indústria onde o tempo é um parâmetro de prioridade, faria sentido a utilização do arame tubular.

Levando em consideração a média salarial que é paga para o soldador por hora no Brasil (R\$17), a Figura 18 indica o comportamento de todos os custos envolvidos no processo de soldagem. Percebe-se que em todo o tempo o GMAW acaba sendo mais econômico em relação ao FCAW. Ou seja, que mesmo com uma maior taxa de deposição da soldagem FCAW, o baixo custo da mão de obra, praticado no Brasil, foi um fator decisivo em favor do processo MIG/MAG, no que diz respeito aos ganhos econômicos. Assim, de acordo com o preço atual de mercado e os parâmetros mencionados, o processo de soldagem MIG/MAG ainda possui menor custo, contribuindo para a justificativa de ser um processo muito utilizado no Brasil, devido ao custo mais baixo do metal depositado.

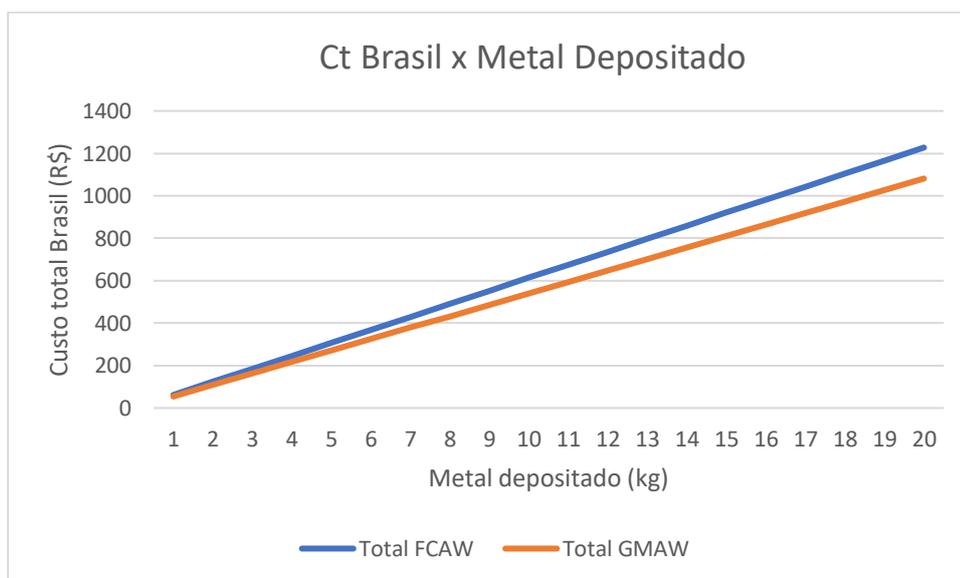


Figura 18 - Custo total para 1kg de metal depositado nos processos GMAW e FCAW (considerando salário médio no Brasil de R\$17,00/h), Autoria Própria (2022).

Entretanto, o estudo da ESAB (2000) mostrou exatamente o contrário, que o processo FCAW deveria ser mais barato. Uma análise mais detalhada da influência do custo da mão de obra nos resultados da comparação econômica dos processos de soldagem mostrada a seguir ajuda explicar essa divergência. A Tabela 14 deixa evidente a diferença salarial entre os países classificados como desenvolvidos e os países em desenvolvimento. Isso colaborou para que os custos do FCAW no ESAB (2000) ficassem mais baratos, pois como o tempo

de soldagem gasto seria bem menor, a economia salarial tornou ser decisiva (pois o salário de base foi considerado alto o bastante, US\$ 30.00/h). Assim, sabendo da importância da remuneração nos cálculos é possível idealizar que existe um valor salarial em que, o processo FCAW se torna mais econômico que o processo MIG/MAG (Figura 19).

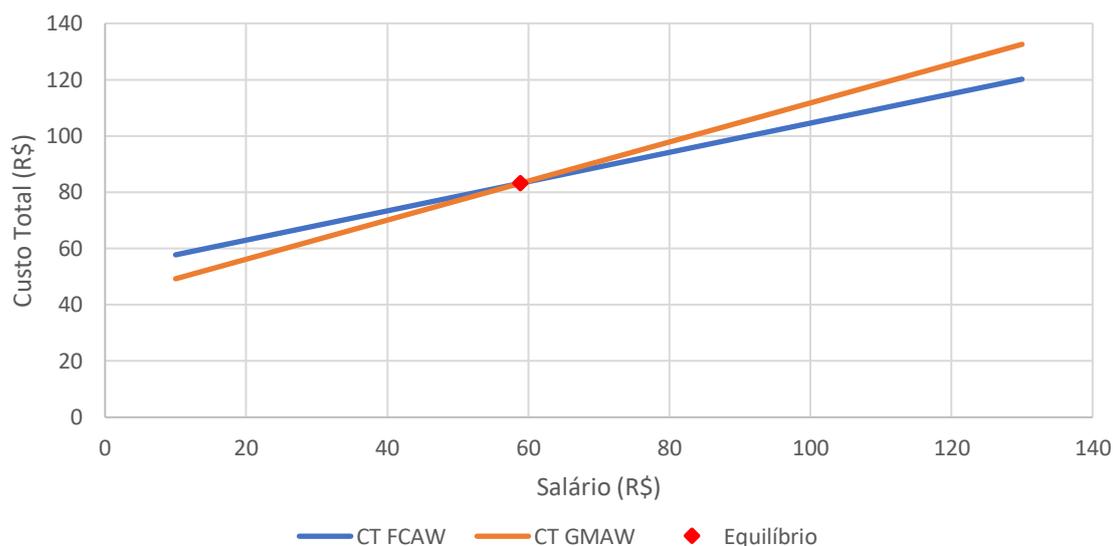


Figura 19 - Custo total de 1kg de metal depositado em função da variação de salários, Autoria Própria 2022.

O gráfico da Figura 19 foi desenvolvido considerando os parâmetros mencionados anteriormente e variando os custos de mão de obra. A Figura 20 exhibe as duas retas com os custos totais do processo FCAW e GMAW em função da mudança do valor de salário. Nota-se que realmente existe um ponto de intersecção onde o processo FCAW seria mais econômico em relação ao processo MIG/MAG. Assim, a justificativa para uma utilização preferencial do processo FCAW em outros países está nos salários mais elevados.

Pode-se tirar algumas relações da Figura 19 que serão apresentadas a seguir, na Figura 20.

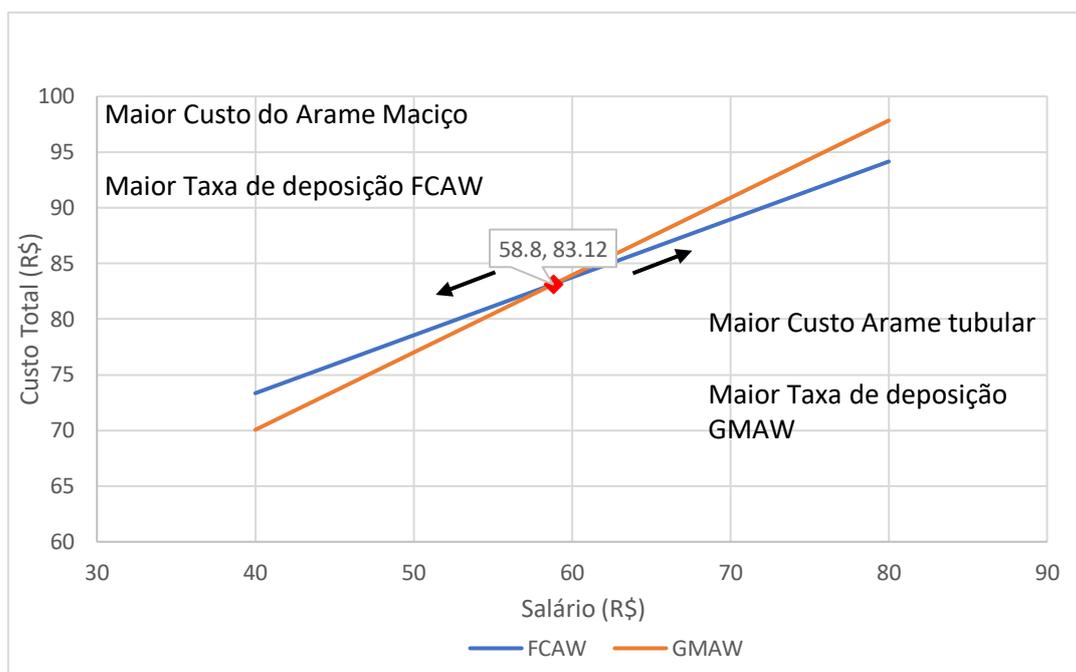


Figura 20 – Fatores que determinam a posição do ponto de intersecção entre FCAW e GMAW, Autoria Própria 2022.

De acordo com a Figura 20, identifica-se que o ponto de equilíbrio, ou seja, onde os processos de FCAW e GMAW teriam gastos equivalentes, seria com o salário de R\$ 58,80 por hora. Além disso, vale salientar que a mudança de preço de mercado do gás de proteção, dos arames e até mesmo a taxa de deposição irá influenciar a posição do ponto de equilíbrio. Em que esse poderia ser deslocado para a direita ou esquerda do gráfico.

Os fatores que deslocariam o ponto de equilíbrio para a direita seria o aumento do custo do arame tubular e da taxa de deposição para o processo MIG/MAG.

E os fatores que deslocariam o ponto de equilíbrio a esquerda do gráfico seriam o aumento do custo do arame maciço e da taxa de deposição do processo FCAW.

4.2 ECONOMIA DE CUSTO A LONGO PRAZO

Uma forma interessante de mostrar como isso afeta a produção a longo prazo, seria a Tabela 16, considerando o horizonte de 5 anos. Em que para os

cálculos, foram considerados um ano como 252 dias úteis e uma meta de 8 kg de metal depositado por dia com cada processo.

Tabela 16 - Efeito dos custos dos processos GMAW e FCAW a longo prazo (utilizando o salário no Brasil e a média do salário nos países desenvolvidos), Autoria Própria 2022.

Custos e Tempo	Salário Brasil (R\$17,00)		Média Salário Países Desenvolvidos (R\$96,41)	
	GMAW	FCAW	GMAW	FCAW
Custo, 1 ano (R\$)	97.041,46	109.032,47	220.206,56	207.014,51
Tempo (hrs)	1400,00	1048,66	1400,00	1048,66
Custo, 2 anos (R\$)	194.082,92	218.064,93	440.413,11	414.029,02
Tempo (hrs)	2800,00	2097,31	2800,00	2097,31
Custo, 3 anos (R\$)	291.124,39	327.097,40	660.619,67	621.043,53
Tempo (hrs)	4200,00	3145,97	4200,00	3145,97
Custo, 4 anos (R\$)	88.165,85	436.129,87	880.826,22	828.058,04
Tempo (hrs)	5600,00	4194,62	5600,00	4194,62
Custo, 5 anos (R\$)	485.207,31	545.162,34	1.101.032,78	1.035.072,54
Tempo (hrs)	7000,01	5243,28	7000,01	5243,28
Economia em 5 anos (R\$)	59,955.03		65,960.24	
	(se usar MIG/MAG)		(se usar FCAW)	
Economia de tempo (em dias) em 5 anos: 220				

A Tabela 16 permite visualizar a influência dos gastos e do tempo a longo prazo, comparando os processos MIG/MAG e FCAW. Na primeira coluna foi considerado o salário médio no Brasil de R\$ 17,00/h e como esperado o processo GMAW foi mais barato, com uma economia de quase 60 mil reais em 5 anos. Já utilizando o salário médio dos países desenvolvidos que seria R\$ 96,41/h, o comportamento também foi como esperado, em que o FCAW foi mais econômico em torno de 66 mil reais.

Além disso, apesar da taxa de deposição não aparentar ter uma grande diferença entre os processos, observa-se que a longo prazo provoca uma grande alteração. No qual para soldar os mesmos 10080 kg de metal depositado (ao longo dos 5 anos), tem-se uma discrepância de praticamente 1 ano, ou seja, o FCAW entregaria o resultado 220 dias antes do GMAW. Assim, é importante ter uma referência a longo prazo visto que seria difícil visualizar esses dados que possuem inegável relevância.

5. CONCLUSÕES

Contempla-se que é muito complicado mensurar e comparar economicamente os processos de soldagem devido a um número elevado de variáveis que estão envolvidos na soldagem, mas estes dados são de suma importância pois servem como base para uma empresa que deseja entender melhor qual seria o impacto financeiro entre os dois processos. Os cálculos mostraram que o fator principal que determina se um processo de soldagem será economicamente viável ou não é o custo da mão de obra. Por isso, a dedução da pesquisa feita pela ESAB (2000), onde o FCAW era mais barato, não se aplica ao Brasil, onde o custo da mão de obra é bem mais baixo do usado nos cálculos da ESAB.

Alguns pontos que foram considerados para este trabalho e que possuem ação direta no custo são apresentados a seguir.

- Há artigos e pesquisas que encontraram uma maior taxa de deposição para o GMAW, mesmo com a literatura e os fabricantes de arame tubular garantirem uma maior taxa de deposição para o processo FCAW.
- A oscilação de preços de mercado, como a expectativa de que o custo do arame tubular fosse 2 vezes mais caro que o arame maciço, e a expectativa de que o CO₂ fosse mais barato que a mistura; essas diferenças podem ser questões de oferta e demanda, variação do câmbio e outros fatores.
- Necessidades de um projeto, em que ocasionalmente seria uma prioridade da indústria economizar o tempo e ter uma solda com melhor acabamento, podem exigir o uso do processo FCAW mesmo sendo menos econômico do que o processo MIG/MAG.
- Preferência do soldador, onde o mesmo pode ter uma facilidade e preferência em relação a um processo de soldagem que o outro.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Apostila de Soldagem MIG/MAG ESAB. Disponível em: <https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev1_apostila_soldagemmigmag_nova.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2022

Apostila ESAB. Apostila Regras para Segurança em soldagem, goivagem e corte ao arco elétrico. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/apostila_seguranca_na_soldagem_rev1.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2022.

Curso Técnico em Mecânica (2012). **Processos de Soldagem.** Escola Estadual de Educação Profissional (EEEP).

MODENESI, Paulo. **Introdução aos processos de soldagem.** Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil.

O'BRIEN, R. L. (1997). **Welding handbook: Welding processes.** Miami: American Welding Society.

PONOMAROV, V. (2022). **Notas de aula soldagem.** Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, Brasil.

SCOTTI, A., PONOMAROV, V. (2014). **Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, melhor desempenho.** São Paulo: ArtLiber.

SCOTTI, A; GARCIA, R. (2011). **Uma metodologia para Análises Comparativas da Capacidade Produtiva entre Arames Maciços (MIG/MAG) e Tubulares (Eletrodo Tubular).** Universidade Federal de Uberlândia, Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem, Laprosolda, Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, Brasil.

SILVA; J. (2018). **Determinação dos custos de soldagem em chapas de aço ASTM AH-36, soldadas pelo processo FCAW-G: estudo multicascos na indústria da construção naval do estado de Pernambuco.** Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Mecânica, Recife, Pernambuco, Brasil.

SOUZA, C; FERRARESI, V. (2013). **Análise comparativa dos processos de soldagem GMWA e FCAW com transferência metálica por Curto- Circuito na posição horizontal.** Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Laprosolda, Uberlândia, MG, Brasil.

VULCÃO, M.; SILVA, M. (2004). **Comparação da taxa de deposição do arame sólido ER70S6, 1,2mm, no processo GMAW (MAG), com arame tubular E71T1, 1,2mm, no processo FCAW no aço ASTM A 36.** Faculdade de Tecnologia (FATEC), Sertãozinho, São Paulo, Brasil.

WAINER, E., Brandi, S. D., & Mello, F. D. (2004). **Soldagem: Processos e Metalurgia.** São Paulo: EDGARD BLÜCHER LTDA.