

Tiago da Cruz Gomes

**AVALIAÇÃO DE PRODUTIVIDADE,
SOLDABILIDADE E CUSTOS ENTRE OS
PROCESSOS DE SOLDAGEM GMAW COM OS
CONSUMÍVEIS ARAME SÓLIDO E ARAME
TUBULAR DE NÚCLEO METÁLICO E FCAW COM
CONSUMÍVEL ARAME TUBULAR DE NÚCLEO
FLUXADO.**

Monografia apresentada ao Programa de
Educação Continuada em Engenharia da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
conclusão de curso de Especialização.

São Paulo

Março/2016

Tiago da Cruz Gomes

Especialização em Engenharia de Soldagem, Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo, 2015

**AVALIAÇÃO DE PRODUTIVIDADE,
SOLDABILIDADE E CUSTOS ENTRE OS
PROCESSOS DE SOLDAGEM GMAW COM OS
CONSUMÍVEIS ARAME SÓLIDO E ARAME
TUBULAR DE NÚCLEO METÁLICO E FCAW COM
CONSUMÍVEL ARAME TUBULAR DE NÚCLEO
FLUXADO.**

Monografia apresentada ao Programa de
Educação Continuada em Engenharia da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
conclusão de curso de Especialização.

Área de Concentração:

Engenharia da Soldagem

Orientador:

Antonio Cordeiro de Souza

São Paulo

Janeiro/2016

*Os dias prósperos não vêm por acaso, nascem de muita fadiga e
persistência.*

(Henry Ford)

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a minha esposa Naiara, por todo apoio que me
deste em todos os momentos que precisei.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as bênçãos em minha vida;

A minha esposa pelo apoio e incentivo e aos meus pais por todo carinho que me educaram;

Ao meu orientador Prof. Dr. Antonio C. Souza, por acreditar neste projeto, pela dedicação e profissionalismo;

A empresa *Lincoln Electric Automation* por ceder toda estrutura necessária para a realização dos testes de soldagem, em especial os colaboradores Vinícius Suzukayama e Augusto Reigota Blanco

Ao colega de curso Ramon Dias pela ajuda

Ao coordenador do curso de especialização em engenharia de soldagem: Professor Dr. Sérgio Duarte Brandi.

CURRICULUM VITAE

Tiago da Cruz Gomes

ENGENHEIRO MECÂNICO

Formação Acadêmica

Pós-graduação: Especialização em Formação Pedagógica de Docentes para a Educação Profissional de Nível Médio. Centro Paula Souza - Concluído 12/2014

Graduação em Engenharia Mecânica – concluído em 06/2011
Faculdade Anhanguera de Matão - SP

Graduação em Tecnologia de Produção – concluído em 08/2005
FATEC - Faculdade de Tecnologia de Taquaritinga-SP

Ingom

Empresa do segmento de conexões hidráulicas e peças agrícolas.

Atuou como engenheiro Mecânico

2010 até 2015

Centro Paula Souza – ETEC Elias Nechar

Escola técnica do estado de São Paulo

Atua de como docente do curso técnico em mecânica

2010 até o momento

RESUMO

Devido à competitividade entre as empresas no cenário atual fatores como alta produtividade, menor custo de fabricação e qualidade são características fundamentais para a organização manter-se competitiva. Na área da soldagem a busca pela produtividade se destaca os processos GMAW (*Gás Metal Arc Welding*) e FCAW (*Flux Cored Arc Welding*) pela elevada taxa de deposição e melhor relação custo-benefício. O presente trabalho procurou comparar os processos de soldagem GMAW (arame maciço e arame tubular *Metal Cored*) e FCAW (arame fluxado), quanto à soldabilidade, qualidade e produtividade da peça soldada, levando em conta também os custos de cada processo. As soldas foram realizadas em robô de soldagem a fim de que as variações inerentes ao soldador fossem diminuídas ao extremo, com o mesmo gás de proteção mantendo a mesma velocidade de soldagem e alterando a corrente para avaliação do efeito da mesma em relação à taxa de deposição e penetração. Realizou-se um cordão com formato em "U" em uma das faces de todos os corpos de prova e posteriormente feita macrografia para analisar a penetração e largura do cordão. Todos os processos apresentaram resultados satisfatórios com destaque para o *Metal Cored* que apresentou elevadas taxas de deposição e penetração.

ABSTRACT

Due to the competition between companies in the current scenario of factors such as high productivity, lower manufacturing costs and quality are essential characteristics for the organization to remain competitive. In the welding area the search for productivity stands out the GMAW (Gas Metal Arc Welding) and FCAW (Flux Cored Arc Welding) for high deposition rate and better benefits costs. This study compares the welding processes GMAW (solid wire and cored wire Metal Cored) and FCAW (flux cored wire), and the weldability, quality and productivity of the welded part, taking into account also the costs of case. The were performed in welding robot so that the inherent variations welder were reduced in the extreme, with the same protective gas while maintaining the same welding speed and changing the welding current for evaluating the effect of the same in relation to the deposition rate and penetration. It was carried out a weld bead with format "U" on one side of all specimens and later made macrography to analyze the penetration and the bead width. All cases showed satisfactory results highlighting the Cored Metal that showed high rates of deposition and penetration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação da soldagem pelo processo GMAW

Figura 2.2 – Representação esquemática do modo de transferência por curto-círcuito

Figura 2.3 – Representação esquemática do modo de transferência globular não axial

Figura 2.4 – Representação esquemática do modo de transferência por *spray*

Figura 2.5 – Representação das forças atuantes na transferência metálica:
Força peso (F_p); Tensão superficial gota/casca metálica (F_{tm}); e gota/escória (F_{te}); Força de compressão (F_c); Força de arraste do plasma (F_d); Força de evaporação metálica (F_v); Força devido a reações químicas (bolhas) (F_q)

Figura 2.6 – Representação stick-out

Figura 2.7 – Acessórios para soldagem do processo GMAW

Figura 2.8 – Representação da soldagem pelo processo FCAW com proteção gasosa

Figura 2.9 – Representação do processo de fabricação do arame tubular

Figura 2.10 – Representação da soldagem pelo processo FCAW sem proteção gasosa, conhecido como auto-protégido

Figura 2.11 – Geometria das seções transversais do arame tubular

Figura 4.0 – Robô utilizado no trabalho

Figura 4.1 – Composição química para aços ASTM A-36

Figura 4.2 – Dimensões do metal de base

Figura 4.3 – Aquisição dos dados de soldagem

Figura 4.4 – Fonte de energia

Figura 4.5 – Alimentação do arame

Figura 4.6 – Célula robótica utilizada na soldagem

Figura 5.1 – Preparação do corpo de prova

Figura 5.2 – Deslocamento do robô e geometria do cordão de solda

Figura 5.3 – Cordões de solda realizados como consumível E71T-1 (FCAW)

bitola 1,2mm nas respectivas correntes: CP01: 236,6A e CP02: 340,9A

Figura 5.4 – Cordões de solda realizados como consumível ER70C-6M (METAL CORED) bitola 1,2mm nas respectivas correntes: CP06: 241,69A e CP07: 313^a

Figura 5.5 – Cordões de solda realizados com o consumível ER70S-6 (GMAW)

bitola 1,2mm nas respectivas correntes: CP14: 230,9A e CP17: 365,3A

Figura 5.6 – Cordões de solda realizados com o consumível E71T-1 (FCAW)

bitola 1,6mm nas respectivas correntes: CP21: 265,8A e CP23: 376,4A

Figura 5.7 – Cordões de solda realizados com o consumível ER70C-6M (METAL CORED) bitola 1,6mm nas respectivas correntes: CP26: 304,4A e CP28: 450A

Figura 5.8 – Cordões de solda realizados com o consumível ER70S-6 (GMAW)

bitola 1,6mm nas respectivas correntes: CP32: 276,8A e CP34: 362,9A

Figura 5.9 – Efeito da corrente sobre a taxa de deposição em arames com 1,2 mm de diâmetro.

Figura 5.10 – Efeito da corrente sobre a taxa de deposição em arames com 1,6 mm de diâmetro.

Figura 5.11 – Representação geométrica do cordão. W – largura, D – profundidade, H – Reforço

Figura 5.12 – Cordões de solda realizados com o consumível E71T-1 (FCAW)

bitola 1,2mm nas respectivas correntes: CP01: 236,6A e CP02: 340,9A

Figura 5.13 Cordões de solda realizados com o consumível ER70C-6M (METAL CORED) bitola 1,2mm nas respectivas correntes: CP06: 241,69A e CP07: 313A

Figura 5.14 – Cordões de solda realizados com o consumível ER70S-6 (GMAW)

Bitola 1,2mm nas respectivas correntes: CP14: 230,9A e CP17: 365,3A

Figura 5.15 – Cordões de solda realizados com o consumível E71T-1 (FCAW)

bitola 1,6mm nas respectivas correntes: CP21: 265,8A e CP23: 376,4 A

Figura 5.16 – Cordões de solda realizados com o consumível ER70C-6M (METAL CORED) bitola 1,6mm nas respectivas correntes: CP26: 304,4A e CP28: 450A

Figura 5.17 – Cordões de solda realizados com o consumível ER70S-6 (GMAW)

bitola 1,6mm nas respectivas correntes: CP32: 276,8A e CP34: 362,9A

Figura 5.18 – Efeito da corrente em relação à penetração do cordão de solda em arames com 1,2 mm de diâmetro.

Figura 5.19 – Efeito da corrente em relação à penetração do cordão de solda em arames com 1,6 mm de diâmetro.

Figura 5.20 – Custo de soldagem em função da corrente de soldagem para arames com bitola de 1,2mm

Figura 5.21 – Custo de soldagem em função da corrente de soldagem para arames com bitola de 1,6mm

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Aplicabilidade e desempenho do consumível

Tabela 4.1 – Composição química para aços ASTM A-36

Tabela 4.2 – Resumo das execuções das soldagens para cada corpo de prova conforme alteração da corrente e bitola do arame

Tabela 4.3 – Composição química dos arames eletrodos

Tabela 5.1 – Resumo das correntes, tensões e velocidades de soldagem para cada corpo de prova realizado com arames de bitola de 1,2 mm

Tabela 5.2 – Resumo das correntes, tensões e velocidades de soldagem para cada corpo de prova realizado com arames de bitola de 1,6 mm

Tabela 5.3 – Resumo das dimensões do cordão de solda para todos os processos realizados com arame de bitola 1,2mm.

Tabela 5.4 – Resumo das dimensões do cordão de solda para todos os processos realizados com arame de bitola 1,6mm.

Tabela 5.5 – Exemplo de planilha comparativa entre os custos dos consumíveis na corrente de 350A na bitola de 1,2 mm.

Tabela 5.6 – Exemplo de planilha comparativa entre os custos dos consumíveis na corrente de 450A na bitola de 1,6 mm.

Tabela 5.7 – Resumo dos custos por kg de metal depositado

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

AWS: American Welding Society

ASTME: American Society for Testing and Materials

LR: Limite de Resistência à Tração

ZAC: Zona Afetada pelo Calor

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	ii
AGRADECIMENTOS	iii
CURRICULUM VITAE	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS	xi
SUMÁRIO	xii
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Processos de soldagem com arco voltaico.....	3
2.1.1 Definição dos processos GMAW e FCAW	4
2.1.2 Gás de proteção nos processos GMAW e FCAW	6
2.1.3 Modos de transferência de metal depositado.....	9
2.1.3.1 Método de transferência metálica no arame fluxado e Metal Cored	15
2.1.4 Principais variáveis de soldagem.....	17
2.1.4.1 Correntes de soldagem	18
2.1.4.2 Tensão de arco	19
2.1.4.3 Velocidade de soldagem.....	19
2.1.4.4 Extensão livre do eletrodo (stick out).....	19
2.2 Aplicação do processo GMAW, conhecido como MIG/MAG.	21
2.2.1 Características do processo GMAW	22
2.2.2 Consumíveis.....	23
2.2.3 Classificação dos consumíveis.	23
2.2.4 Equipamentos para o processo GMAW.	25
2.3 Processo FCAW, conhecido como eletrodo tubular.	26
2.3.1 Característica do processo FCAW.....	27
2.3.2 Consumíveis.....	29
2.3.3 Classificação dos consumíveis.	29
2.3.3.1 Arames tubulares rutilicos.	31
2.3.4 Arame tubular fluxado auto protegido.....	32
2.3.5 Equipamentos para o processo FCAW.	33
2.4 Processo GMAW com fluxo metálico, conhecido como <i>Metal Cored</i>).	34
2.4.1 Aplicação.	35
2.4.2 Característica do processo.	35
2.4.3 Proteção gasosa no processo <i>Metal Cored</i>	36

2.4.4 Consumíveis no processo <i>Metal Cored</i>	38
2.4.5 Classificação dos consumíveis pelo processo <i>Metal Cored</i> ..	39
2.4.6 Equipamentos para o processo GMAW - <i>Metal Cored</i>	39
2.5 Custos em Soldagem.....	40
2.5.1 Custo do metal depositado.....	40
2.5.1.1 Peso do metal depositado	41
2.5.1.2 Custo do consumível.....	42
2.5.1.2.1 Preço do consumível	43
2.5.1.2.2 Quantidade de consumível	43
2.5.1.2.2.1 Consumo de gás	44
2.5.1.3 Eficiência na deposição	44
2.5.1.4 Carga tributária em um produto	45
2.5.2 Custo da mão-de-obra e " <i>Overhead</i> "	46
2.5.3 Custo da energia elétrica	46
2.5.4 Depreciação do equipamento	47
2.5.5 Custo de manutenção do equipamento	47
2.5.6 Despesas gerais	48
2.6 Definição de Produtividade.....	49
3. OBJETIVOS.....	50
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	51
4.1 Introdução.....	51
4.2 Local do trabalho	52
4.3 Metal de base.	52
4.4 Procedimento de soldagem.....	53
4.5 Aquisição de dados de soldagem.....	54
4.6 Equipamentos utilizados na soldagem.	55
4.6.1 Fonte de Energia.....	55
4.6.2 Alimentadores de arames	56
4.7 Sistema de deslocamento do robô.....	57
4.8 Consumíveis de soldagem.....	58
4.8.1 Arames eletrodos	58
4.8.2 Proteção gasosa.....	59
4.9 Experimento	60
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	62
5.1 Preparação e soldagem das peças.....	62
5.1.1 Comparaçāo visual dos cordões de solda	62
5.2 Efeito da corrente de soldagem na taxa de eficiência e deposição.....	67
5.3 Efeito da corrente de soldagem na penetração e largura do cordão	71
5.4 Custo de soldagem.....	78

6. CONCLUSÕES	84
<i>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</i>	86
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	86

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.

A acirrada competição entre as empresas exige uma alta produtividade onde qualidade e baixo custo de fabricação são fatores cruciais para permanência no mercado global. Nesse contexto a produtividade e qualidade são as principais características que afetam a escolha de um processo de soldagem. Conhecer as características, vantagens e restrições dos processos GMAW e FCAW na soldagem do aço carbono baixa liga é de fundamental importância para as empresas que produzem grande volume de soldagem.

Os eletrodos tubulares e os arames sólidos possuem muita similaridade quanto aos equipamentos usados na soldagem como nos tipos de aplicações recomendadas. Características como alta produtividade, flexibilidade e facilidade na operação tornam os processos GMAW e FCAW altamente competitivos e, em muitos casos, concorrentes diretos nas aplicações de soldagem. Muitas empresas de maneira errônea deixam de investir em novas práticas de produção por questão financeira e também por resistência às mudanças. No setor de soldagem não é diferente.

O presente trabalho busca utilizar o mesmo equipamento de soldagem para os dois processos de soldagem, utilizando três arames consumíveis: Arame sólido, arame tubular (processo GMAW), e eletrodo tubular (processo FCAW), utilizando como gás de proteção o CO₂ por ser um gás de menor custo com relação à misturas de gases, com o propósito de auxiliar nas tomadas de decisões no que diz respeito a processos de soldagem.

Com isso o trabalho avaliará o desempenho de cada processo no que se refere à qualidade e produtividade da junta soldada nas posições plana e horizontal, visando sempre a melhor relação custo/benefício proporcionando maior competitividade.

A qualidade da junta soldada será avaliada através de visualização por macrografia e aferindo-se a profundidade e largura do cordão. E em relação aos custos de soldagem, será avaliada custo/benefício por massa de metal depositado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

2.1 – PROCESSOS DE SOLDAGEM COM ARCO ELÉTRICO.

Arco elétrico é a região por onde passa uma grande quantidade de corrente elétrica entre a ponta do eletrodo de soldagem e o metal de base produzindo alta intensidade de calor e luz. Na soldagem pelos processos GMAW e FCAW a união de metais é realizada por meio da fusão que acontece pela ação direta e localizada desse arco elétrico que age como fonte de calor, tendo como cortina de proteção da atmosfera gasosa o gás de proteção, que por sua vez poderá ser uma mistura (geralmente de Argônio e CO₂) ou puramente CO₂ [SCOTTI 2014].

Segundo Modenesi [2012], o arco elétrico é a fonte de calor mais utilizada na soldagem por fusão de materiais metálicos devido a uma série de combinações favoráveis como: concentração adequada de energia para a fusão, baixo custo, riscos aceitáveis de operação dos equipamentos.

A condição para que o arco elétrico mantenha-se em funcionamento pode ser descrita pela seguinte definição:

[...“descarga elétrica através de um gás ionizado, iniciada por uma quantidade de elétrons emitidos do eletrodo negativo e mantida pela ionização do gás aquecido”.[“Welding for engineers”, H.Udin, E.R.Funk, J.Wulff, 1954...] citado por [Brandi 1992].

2.1.1 – DEFINIÇÃO DOS PROCESSOS GMAW E FCAW

O processo de soldagem GMAW conhecido como MIG/MAG realiza uniões de materiais metálicos pelo seu aquecimento e fusão localizados através de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu consumível, maciço ou tubular, e um metal de base, sob uma proteção gasosa sendo esta ativa (MAG) ou inerte (MIG) [BRANDI 1992].

Esse processo de soldagem ao arco com Atmosfera de Proteção Gasosa, foi introduzido na década de 1920 e tornado comercialmente viável a partir de 1948. GMAW é uma abreviação adotada pela AWS (*American Welding Society*-Associação Americana de Soldagem) que representa: *Gas Metal Arc Welding*. Já as abreviações MIG/MAG referem-se ao uso do gás ativo ou inerte, uma vez que MIG representa (*Metal Inert Gas*) e MAG (*Metal Active Gas*). Os gases inertes são aqueles que não reagem quimicamente com o metal de solda (comercialmente o Argônio e o Hélio), enquanto que os gases ativos são aqueles que possuem certa reatividade química controlada com o metal de solda (comercialmente o CO₂ e o O₂).

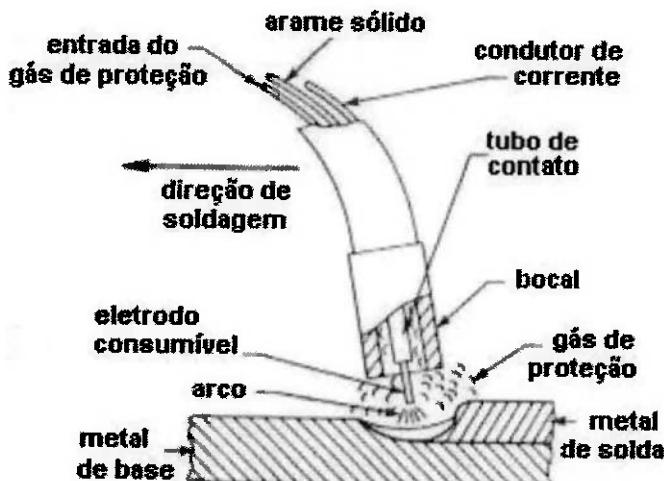


Figura 2.1 – Representação da soldagem pelo processo GMAW [POEPCKE 2013].

A figura acima demonstra a soldagem pelo processo GMAW, onde a região da solda é protegida da atmosfera através de um gás de proteção, podendo ser inerte, ativo ou misturas deles. Para soldagem com aço-carbono o gás de proteção adotado é o gás ativo (classificação MAG), que pode ser puro (CO_2) ou misturado ($\text{Ar}+\text{CO}_2$, $\text{He}+\text{CO}_2$).

O arame consumível *Metal Cored* enquadra-se no processo GMAW, conhecido como arame tubular com o fluxo interno composto por pó metálico e, assim como nos processos e FCAW e GMAW tradicional, também é obtido através do arco elétrico entre o eletrodo e a peça. O fluxo metálico no interior do tubo tem a função de conduzir elementos para aumentar a força do material depositado e ajudar na desoxidação. É conhecido por apresentar alta taxa de deposição com mínima quantidade de escória e respingos e excelente aparência da solda [POEPCKE 2013].

O processo de soldagem FCAW conhecido como eletrodo tubular fluxado significa (*Flux-Cored Arc Welding*), pois há um fluxo interno não metálico no núcleo do arame. Assim como no processo GMAW, a união de metais pelo processo FCAW é realizada pelo aquecimento destes com o arco elétrico, estabelecido entre um eletrodo e o metal de base, podendo ou não haver um gás de proteção, isso porque no processo FCAW existe a possibilidade do arame consumível conter em seu núcleo elementos que protegem a poça de fusão do gás atmosférico quando o arco é estabelecido, nesse caso o processo é conhecido como FCAW-SS, ou seja, sem gás de proteção [MARQUES 1991]. Essa opção tem bom desempenho na soldagem em campo, onde o transporte de cilindros de gás de proteção torna-se inconveniente.

O fluxo interno nos arames tubulares atua como agente desoxidante, podendo acrescentar alguns elementos de liga para obter maior qualidade na solda, além de proteger a soldagem da contaminação atmosférica.

2.1.2 – GÁS DE PROTEÇÃO NOS PROCESSOS GMAW E FCAW

Para que ocorra o arco elétrico é necessária a presença de um gás de proteção, tanto para proteger o arco do gás atmosférico, quanto para estabilizá-lo. A AWS refere-se ao arco elétrico como: "a descarga elétrica através de um gás ionizado, iniciada por uma quantidade de elétrons emitidos

do eletrodo negativo e mantida pela ionização do gás aquecido". [BRANDI 1992].

Além de propiciar a ionização do arco elétrico, o gás também protege a região da poça de fusão do ar atmosférico. Os gases mais comuns usados são o argônio, CO₂, O e He, sendo o último menos utilizado devido ao seu preço elevado. O gás de proteção pode conter gases puros como Argônio e Hélio que não alteram as propriedades metalúrgicas do metal de solda, por isso são chamados de gases inertes, característicos do processo MIG. Já os gases ativos como o CO₂ puro ou misturado com Ar, podem alterar algumas propriedades do metal de solda, ou seja, o gás de proteção nesse caso além de propiciar estabilidade do arco e proteger do ar atmosférico, também altera propriedades metalúrgicas do metal de solda [MODENISI 2000].

Scotti [2014] afirma que o gás de proteção tem a função de evitar contaminação do arame, do metal fundido em transferência e da poça de fusão pelos gases da atmosfera.

A escolha do gás a ser utilizado nos processos GMAW e FCAW, depende do material de base e sua espessura, bem como do tipo de transferência do metal de adição. Ou seja, é preciso levar em consideração vários parâmetros para a escolha correta do gás de proteção. Scotti [2014] afirma que o gás de proteção também tem o papel de ser o meio ionizante, possibilitando a estabilidade do arco e controlando a transferência metálica entre o metal de adição e o metal de base.

O dióxido de carbono (CO₂) é o gás de proteção de menor custo, pois sua produção torna-se barata por estar presente em pequenas quantidades no ar atmosférico e pode ser utilizado puro na soldagem de aços de baixo carbono. A alta capacidade de troca de calor do CO₂ e sua energia liberada na recombinação aumenta a quantidade de calor para o metal de base, obtendo ótima penetração, porém demanda maior tensão para manter o arco aberto. Ou seja, o CO₂ puro combinado com o arame eletrodo adequado pode ser uma escolha eficiente e economicamente mais barata para a soldagem de aços com baixo teor de carbono.

Para o processo FCAW especificamente, além da opção sem gás de proteção (auto-protégido), pode-se utilizar-se gás de proteção complementar. O gás de proteção usualmente utilizado pelo processo de Arame Tubular é o Dióxido de carbono (CO₂) ou uma mistura deste com Argônio (Ar). O uso de mistura de gases no processo FCAW combina as vantagens separadas dos gases constituintes, como no caso da adição do gás inerte com o CO₂, aumentando a eficiência de transferência dos desoxidantes do fluxo do arame, porém compromete a penetração do cordão [POEPCKE 2013].

Atualmente há diversos tipos de misturas disponíveis, sendo umas das mais usadas com 75% de Argônio (Ar) e 25% de Dióxido de carbono (CO₂), propiciando alto limite de escoamento e resistência à tração, comparado com a proteção gasosa com 100% CO₂ quando o mesmo não for selecionado com o arame eletrodo ideal, portanto é de extrema importância conhecer as características do arame consumível nesse caso. No entanto, a decisão da

escolha da composição do gás é influenciada pelas características do fluxo interno [BROCARENSE 2015].

O gás de proteção tem uma grande influencia nas características do arco elétrico, no tipo de transferência de metal, nas velocidades de soldagem, respingos, na penetração e na forma externa da solda. Apesar de determinante, Quites [2002] afirma que o gás de proteção representa apenas 3% do custo da soldagem, sendo 18% de arame, 2% de energia e 77% de mão de obra.

2.1.3 – MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE METÁLICA

A transferência do eletrodo consumível para a poça de fusão através do arco elétrico ocorre através de gotas de metal fundido geradas na ponta do arame-eletrodo. Esse mecanismo não é constante, basta alterar alguma variável como diâmetro do arame-eletrodo, gás de proteção, intensidade e polaridade da corrente elétrica e comprimento do arco, que o modo de transferência também se altera, sejam com diferentes tempos de crescimento, dimensões e freqüências de destacamento. A variável corrente tem efeito determinante na transferência metálica, sendo a corrente de transição responsável por essa mudança. De acordo com Brandi [1992] a corrente de transição é a faixa de corrente em que ocorre uma diminuição bastante acentuada do volume e massa das gotas em razão do aumento da corrente elétrica.

O modo de transferência do metal de adição para a poça de fusão é de fundamental importância para a estabilidade do arco, posição de soldagem, penetração e qualidade da geometria da solda e é por variações de alguns fatores como gás de proteção, fontes de energia e tipos de arames [SCOTTI 2014].

A escolha do tipo de transferência metálica deve contribuir para a facilidade da soldagem, minimizar as transformações na zona afetada pelo calor e distorções nas estruturas soldadas sempre buscando melhor taxa de deposição.

Basicamente o processo GMAW possui os modos de transferência metálica: transferência por curto circuito, transferência globular e transferência por *spray*. Já no processo FCAW o modo transferência metálica pode ser realizada pela transferência globular repulsiva, ou curto circuito quando submetida à correntes mais baixas.

- TRANSFERÊNCIA POR CURTO CIRCUITO

A transferência por curto-círcuito está relacionada com a soldagem de baixas correntes e pequenos diâmetros de arame principalmente na soldagem de chapas finas, pois produz uma poça de fusão pequena e de rápida solidificação propiciando à soldagem em todas as posições [POEPCKE 2013].

Nesse modo, a transferência é feita por contato, ou seja, a ponto do eletrodo atinge periodicamente a poça de fusão, ocasionando um curto circuito

elétrico e a extinção momentânea do arco, essa freqüência segundo Scotti [2014] varia entre 20 a 200 vezes por segundo.

Engloba a soldagem com baixas correntes e pequenos diâmetros de arame, produzindo uma poça de fusão pequena e de rápida solidificação o que permite a soldagem fora de posição e a soldagem de chapas finas.

O metal é transferido do arame para a peça somente durante o período em que o arame está em contato com a poça de fusão, ou seja, nenhum metal é transferido através do arco. Esse fenômeno somente acontece devido à baixa tensão em aberto do arco.

Mudanças na composição do gás afetam drasticamente o tamanho da poça e duração do curto circuito, bem como o tipo de gás e sua composição química influencia as características operacionais do arco e a penetração do cordão de solda. O dióxido de carbono (CO₂) produz altos níveis de respingos comparados aos gases inertes, como Argônio (Ar) e Hélio (He), porém favorece maior penetração.

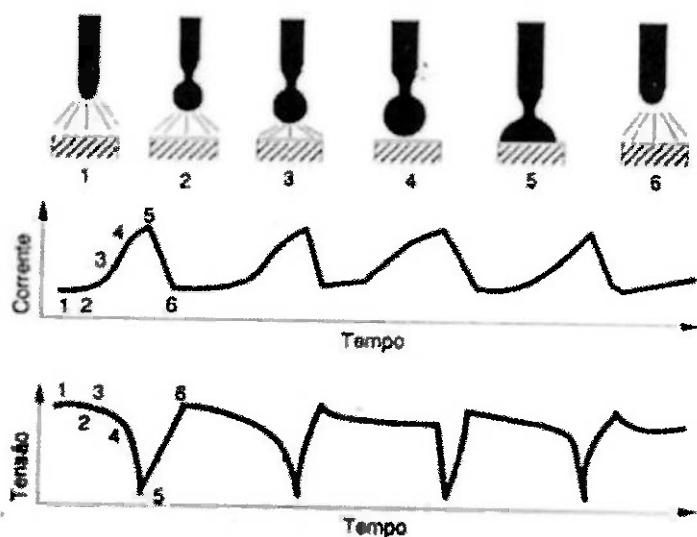


Figura 2.2 – Representação esquemática do modo de transferência por curto-circuito [FORTES 2005].

- TRANSFERÊNCIA GLOBULAR

Na transferência globular, o metal de adição se destaca do eletrodo por ação da gravidade, o que limita na posição plana. Ocorre em níveis de tensão mais elevados que no curto-círcito e as gotas apresentam diâmetros maiores que o do arame eletrodo. É comum nesse modo de transferência ocorrer falta de fusão, penetração e ocorrência acentuada de respingos [MODENESI 2000].

Ocorre em tensões elétricas mais elevadas com relação à transferência por Curto Circuito. As gotas de metal fundido são transferidas para a poça de fusão com a ajuda da força gravitacional, limitando-se a soldagem apenas na posição plana. As gotas apresentam diâmetros maiores que o do arame, sendo comum a ocorrência de falta de fusão, falta de penetração e respingos. Por apresentar muitas limitações, esse mecanismo de transferência não é muito utilizado nas indústrias [QUITES, 2002]. Porém quando a soldagem com

eletrodos tubulares são realizadas com proteção gasosa que favoreça o aumento das forças de reação como o CO₂, a transferência metálica se torna Globular Repulsiva, na qual obtém excelente penetração e boa estabilidade de arco ideal para processos que necessitam de alta produtividade.

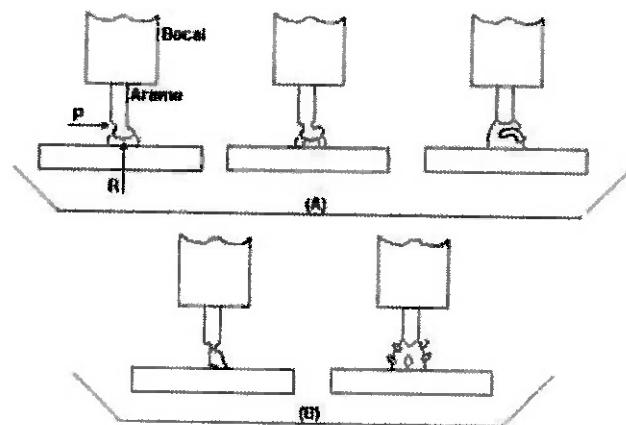


Figura 2.3 – Representação esquemática do modo de transferência globular não axial [FORTES 2005].

- TRANSFERÊNCIA POR SPRAY

Através de uma proteção gasosa rica em Argônio e com o aumento da corrente de soldagem, as gotas tendem a diminuir seus diâmetros em medidas muito pequenas e começam a se destacar facilmente na ponta do arame através de forças eletromagnéticas que atuam nas direções radiais e axiais, nesse momento ocorre à mudança de transferência globular em *spray*.

A soldagem apresenta um bom acabamento e praticamente não há respingos, porém devido aos elevados níveis de corrente elétrica e,

conseqüentemente elevado aporte térmico, a soldagem se torna restrita à posição plana e horizontal, pois em outras posições como vertical e sobre-cabeça poderá ocorrer escorrimento da poça de fusão [MODONESI 1994].

É produzida através da proteção gasosa rica em Argônio (Ar) aliada a um nível de corrente elétrica acima de um valor crítica denominado de corrente de transição. Ou seja, a partir da transferência Globular, com aumento da corrente de soldagem, o diâmetro das gotas de metal que se transferem para a peça diminui, até certa faixa de corrente no qual o modo de transferência muda bruscamente de globular para *spray*.

As gotas por sua vez são pequenas e começam a destacarem-se na ponta do arame devido à forças eletromagnéticas que atuam nas direções radiais e axiais. O cordão tem um bom acabamento e sem respingos, porém limita-se também a posição plana devido aos altos níveis de corrente elétrica [MODONESI ET AL, 1994].

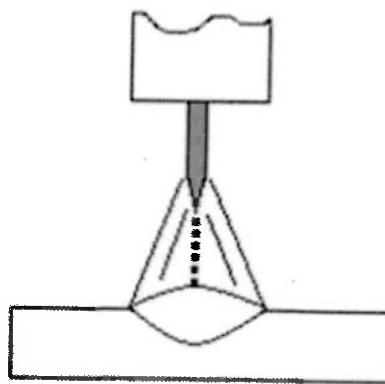


Figura 2.4 – Representação esquemática do modo de transferência por *spray* [FORTES 2005].

2.1.3.1 – MÉTODO DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA NO ARAME FLUXADO E METAL CORED

Uma grande vantagem de soldagem pelo processo arame tubular é o fato que a área da secção metálica transversal do arame tubular é menor em relação ao arame sólido, ou seja, a mesma corrente elétrica é conduzida pelo invólucro tubular metálica favorecendo o efeito *Joule* ($R \times I^2$) gerando maior fusão [FORTES 2000].

A transferência metálica em arames e eletrodos tubulares depende particularmente das características do fluxo no núcleo do arame. De acordo com Norrish [1992], arames tubulares básicos operam normalmente com transferência globular não axial a correntes elevadas e curto circuitos para baixas correntes. E arames tipo *metal cored* que contém poucas adições não metálicas se comporta de forma similar aos arames sólidos.

A transferência metálica na soldagem com *metal cored*, dentre outros fatores, é afetada pela composição química do arame, pelo seu diâmetro, pela geometria da sua seção transversal e pela sua relação fluxo/metal. Devido às propriedades físicas, elétricas e metalúrgicas bastante diferentes entre a capa metálica e o fluxo, observa-se a ocorrência de um atraso na fusão do fluxo em relação à capa metálica (Figura 6), interferindo na estabilidade do arco voltaico e na proteção das gotas metálicas, além de impedir a transferência axial das gotas [NASCIMENTO 2005].

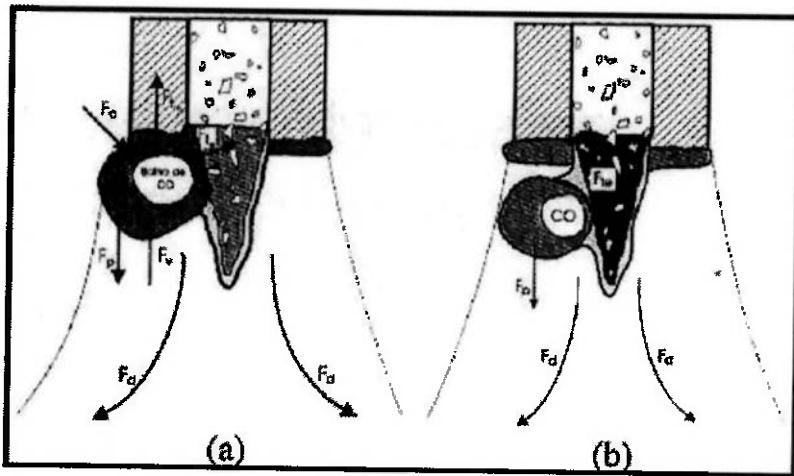


Figura 2.5 – Representação das forças atuantes na transferência metálica: Força peso (F_p); Tensão superficial gota/casca metálica (F_{tm}); e gota/escória (F_{te}); Força de compressão; (F_c); Força de arraste do plasma (F_d); Força de evaporação metálica (F_v); Força devido às reações químicas (bolhas) (F_q) [BRANDI e SOUZA, 2000]

Esse fenômeno ocorre por exemplo em gás de proteção que favorece o aumento de forças de reação como o CO₂. Nessa condição a gota passa a sofrer uma pressão elevada sobre uma pequena área na sua parte inferior, podendo ser empurrada para cima e desviada de sua trajetória normal. Essas forças de reação contrapõem as forças favoráveis à transferência, de modo que a gota apenas se destaca quando atinge um volume elevado fazendo com que a força da gravidade supera a força de reação.

Modenesi [2006] em seu estudo sobre o comportamento de transferência metálica do arame *metal cored*, constatou que na soldagem com 100% CO₂ para valores mais baixos de corrente, a transferência é do tipo

globular repulsiva. Para maiores valores de corrente, a freqüência da transferência parece aumentar com o aumento da corrente.

Portanto, vários pesquisadores vêm tentando desenvolver uma melhor compreensão das características de transferência de metal deste processo para uma melhor utilização que a proteção com CO₂ proporciona. Dilthey [1972] citado por [LIU S., SIEWERT T.A.] relata três modos de transferências metálica com proteção gasosa 100% CO₂ com *metal cored*: globular, subarc e curtos-circuitos.

O modo *subarc* caracteriza-se por uma corrente com maior densidade. Nesse caso o arco tem um comprimento muito curto (Baixa tensão) e ocorre abaixo da superfície da peça de trabalho. Pequenas gotas são independentes e transferidas através do arco. No entanto, Rothschild [1956] citado por [LIU S., SIEWERT T.A.], afirma que o modo *subarc* não pode ser classificado como uma verdadeira transferência de pulverização semelhante ao modo *spray*, uma vez que as gotículas são transferidas lateralmente para a poça de fusão.

2.1.4 - PRINCIPAIS VARIÁVEIS DE SOLDAGEM

As variáveis do processo são determinantes para o resultado final da solda, tanto em nível de acabamento, como em propriedades mecânicas. As principais variáveis nos processos GMAW e FCAW são: corrente de soldagem, tensão do arco, velocidade da soldagem, extensão e diâmetro do eletrodo (*stick*

out), inclinação da tocha de soldagem, proteção gasosa e a velocidade de alimentação do arame.

De acordo com Scotti [2014], as variáveis mais importantes são a corrente elétrica e a tensão de arco, sendo responsáveis por fornecerem um arco elétrico com as características desejáveis, no entanto, o autor ressalta que essas duas variáveis também são responsáveis por registrarem a maior parte das peculiaridades do processo.

Outras variáveis como: velocidade de soldagem, extensão e diâmetro do eletrodo (*stick out*), inclinação da tocha de soldagem, proteção gasosa e a velocidade de alimentação do arame também afetam o resultado da solda.

2.1.4.1 – CORRENTE DE SOLDAGEM

Influencia na tacha de deposição, no modo de transferência metálica e na geometria do cordão de solda. A configuração da corrente elétrica depende da espessura das peças a serem soldadas, do diâmetro do eletrodo bem como das características desejadas dos cordões de solda. Caso forem mantidas as variáveis do processo e ocorrer mudanças apenas na corrente elétrica, poderá haver baixa estabilidade ao arco elétrico e falta de penetração se a mesma for reduzida de intensidade, porém caso haja um aumento da intensidade da corrente, poderá ocorrer aumento excessivo da penetração e na profundidade da solda e mordeduras [POEPCKE 2013].

A corrente de soldagem tem grandes efeitos no processo com arames tubulares, sendo que a taxa de deposição e a penetração do processo são diretamente proporcionais ao aumento da corrente de soldagem.

2.1.4.2 – TENSÃO DE ARCO

A tensão de arco afeta o modo de transmissão metálica bem como a geometria do cordão, influenciando diretamente o comprimento do arco, que por sua vez controla o perfil do cordão de solda, a profundidade da penetração e incidência de respingos [BRACARENSE 2000].

2.1.4.3 – VELOCIDADE DE SOLDAGEM

É a representação da taxa linear em que o arco se move através da tocha ao longo da junta. A velocidade de soldagem tem influência determinante na penetração, visto que um ajuste desapropriado entre corrente elétrica e diâmetro do eletrodo com a velocidade de soldagem, hora causa falta de penetração quando a velocidade é baixa

, pois o arco tende mais para a poça de fusão do que o metal de base, hora pode causar excesso de penetração mudando apenas a velocidade de soldagem e mantendo os demais parâmetros constantes [FORTES 2004].

2.1.4.4 – EXTENSÃO LIVRE DO ELETRODO (STICK OUT)

Segundo AWS 3.1, “*stick out*” é o termo usado na língua inglesa para representar a distância final do arco até a ponta do bico de contado.

Quanto maior for o “*stick-out*” essa distância, maior será o calor desenvolvido por efeito Joule, influenciando a fusão do consumível e o aquecimento do fluxo interno do eletrodo. Assim, um “*stick out*” muito elevado pode causar excesso de salpicos, cordões convexos e falta de penetração, já uma extensão pequena pode ocasionar porosidades, excesso de salpicos, oxidação da poça de fusão.

Marques [1991] afirma que a soldagem pelo processo FCAW utiliza as mesmas técnicas operatórias da soldagem GMAW, com pequenas variações e ambos processos utiliza-se elevado *stick out* para alta produção de peças.

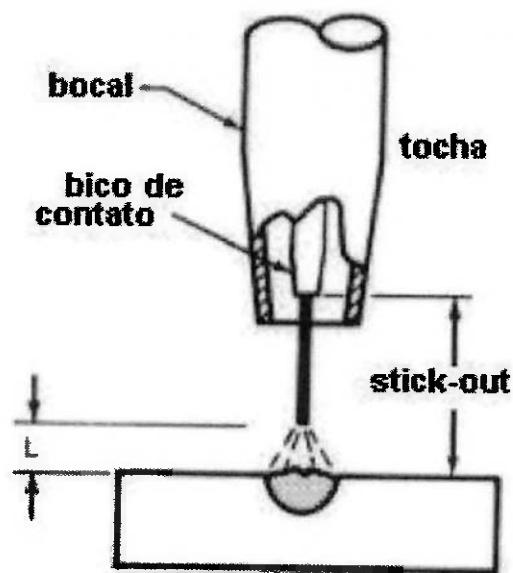


Figura 2.6 – Representação stick-out [FORTES 2005].

2.2 – APLICAÇÃO DO PROCESSO GMAW, CONHECIDO COMO (MIG/MAG)

A aplicação do processo MIG/MAG destina-se à soldagem de materiais de diversas espessuras, ferrosos ou não, como alumínio, cobre, magnésio, níquel e suas ligas, aços de alta resistência e aços inoxidáveis. Esse processo é indicado tanto na fabricação como na manutenção de equipamentos e peças metálicas, com alta produtividade por ser um processo semi-automático com possibilidade de mecanização [POEPCKE 2013].

Segundo Brandi [1992], o processo MIG/MAG é adequado à soldagem de aços-carbono, aços de baixa, média e alta liga, aços inoxidáveis, alumínio e

ligas, magnésio e ligas de cobre. Já o processo MAG é utilizado na soldagem de aços de baixo carbono e aços de baixa liga.

2.2.1 – CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO GMAW

O processo GMAW é caracterizado pela alimentação contínua de um eletrodo maciço nu (consumível) protegido por um suprimento externo de gás. Apresenta grandes vantagens por ser um processo semi-automático versátil de fácil adaptação para a soldagem automática. Alta taxa de deposição, e boa produtividade, uma vez que o eletrodo é alimentado continuamente e alta densidade de corrente no eletrodo. Além da possibilidade de soldagem em todas as posições [BRANDI 1992].

Scotti [2014] afirma que os arames para o processo MIG/MAG podem ser maciços e tubulares como o arame tubular *metal cored*, conhecido por apresentar enchimentos com ligas metálicas contendo adição de básica de elementos de liga na alma.

Porém como em todo processo de soldagem, o processo GMAW possui algumas limitações que restringem sua utilização. Por não haver escória protetora, aumenta a velocidade de resfriamento, favorecendo a ocorrência de trincas. A soldagem deve ser protegida de correntes de ar atmosférico e apresenta certa dificuldade na soldagem em locais de acesso restrito devido ao bocal de vazão do gás de proteção da tocha [POEPCKE 2013].

2.2.2 – CONSUMÍVEIS

Os consumíveis referentes ao processo GMAW são o arame (eletrodo) e o gás de proteção sendo que as composições químicas do arame, metal de base e gás de proteção determinam a composição química do cordão de solda. Portanto é de fundamental importância conhecer algumas informações como a espessura do metal de base e sua composição química, propriedades mecânicas requeridas para o metal de solda, posição de soldagem e o modo de transferência pretendido [POEPCKE 2013].

O arame eletrodo é fornecido em bobinas para permitir uma alimentação contínua do material de adição, fornecidos em diâmetro de 0,8-0,9-1,0, 1,2 e 1,6 mm. Arames com diâmetros menores se comparados com arames com diâmetros maiores permitem maior penetração e maior taxa de deposição devido à densidade de corrente elétrica [BRANDI 1992].

2.2.3 – CLASSIFICAÇÃO DOS CONSUMÍVEIS

Para facilitar a seleção do arame eletrodo, o Brasil adota a norma America AWS (*American Welding Society*) na qual estabelece as seguintes normas para a soldagem de alguns materiais pelo processo GMAW:

- A 5.7 – especificação para arames na soldagem de Cobre e suas ligas;
- A 5.9 – especificação para arames na soldagem de Aço inox e aços com alto teor de Cr;
- A 5.10 – especificação para arames na soldagem de alumínio e sua ligas;
- A 5.14 – especificação para arames na soldagem de Níquel e sua ligas;
- A 5.16 – especificação para arames na soldagem de Titânio e sua ligas;
- A 5.18 – especificação para arames na soldagem de Aço-carbono;
- A 5.19 – especificação para arames na soldagem de Magnésio e sua ligas;
- A 5.28 – especificação para arames na soldagem de Aço baixa liga;

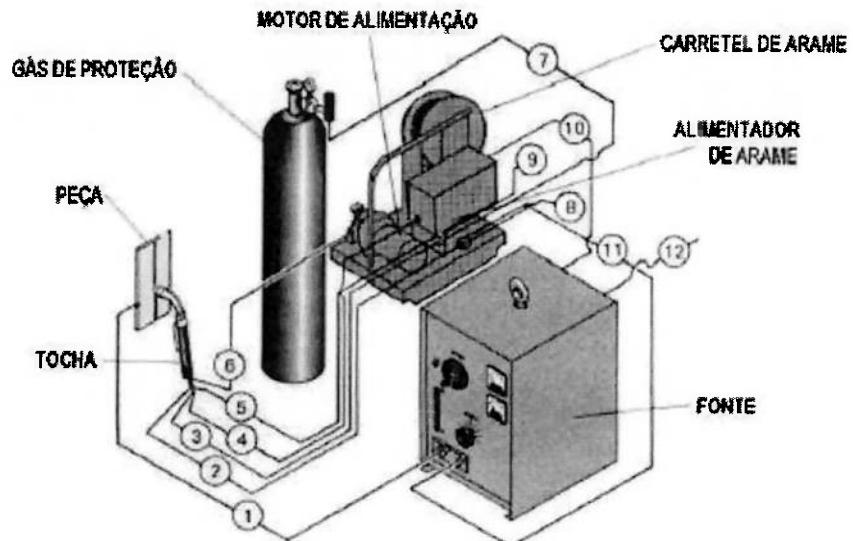
A norma para arames eletrodos de aço ao carbono é a AWS A5.18/28 [SCOTTI 2014].

O sistema de classificação AWS tem o seguinte formato: E R X X S - ZZ, onde E indica que se trata de um eletrodo para soldagem a arco; o primeiro dígito, representado por X, indica à resistência mínima à tração do metal depositado, em 10.000 psi; a letra S indica ser um arame maciço, enquanto a letra C indicaria ser um arame com alma de pó de ligas; as letras ZZ qualifica à composição química nominal do arame, onde um dígito representa aço ao carbono e mais de um dígito para aços baixa liga.

2.2.4 – EQUIPAMENTOS PARA O PROCESSO GMAW

O equipamento básico para o processo MIG-MAG é composto de uma fonte de alimentação, alimentador de arame, tocha de soldagem, fonte de gás de proteção com regulador de pressão e fluxômetro.

Fontes de energia para soldagem a arco voltaico é o equipamento que recebe energia elétrica da rede externa e produz saídas de corrente e tensão em níveis e com características adequadas para o processo de soldagem. O alimentador de arame é o sistema que impulsiona o arame na direção da tocha, sendo responsável pela alimentação do material de consumo. A tocha de soldagem integra o sistema de alimentação, nela é fixado o bico de contato contendo furo interno por onde passa o arame e então o contato elétrico é fechado. A tocha de soldagem também é responsável por fixar o bocal de proteção gasosa, no qual o fluxo de gás é direcionado para a poça de soldagem [SCOTTI 2014].



1. CABO DE SOLDA (NEGATIVO)
2. REFRIGERAÇÃO DA TOCHA (ÁGUA)
3. GÁS DE PROTEÇÃO
4. GATILHO DA TOCHA
5. ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO PARA A TOCHA
6. CONDUÍTE DO ARAME
7. GÁS DE PROTEÇÃO VINDO DO CILINDRO
8. SAÍDA DE ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO
9. ENTRADA DE ÁGUA DE REFRIGERAÇÃO
10. ENTRADA DE 42 V (CA)
11. CABO DE SOLDA (POSITIVO)
12. CONEXÃO PARA A FONTE PRIMÁRIA (220/380/440 V)

Figura 2.7 – Acessórios para a soldagem do processo GMAW [FORTES 2005].

2.3 – APLICAÇÃO DO PROCESSO FCAW, CONHECIDO COMO ELETRODO TUBULAR

De acordo com Brocarense [2005], embora os processos GMAW e FCAW possuam características incomuns como a utilização do mesmo equipamento, alto fator de trabalho, alta taxa de deposição e facilidades para automação, o

processo FCAW apresenta grande versatilidade na soldagem de variados tipos de materiais, devido às composições químicas do fluxo interno.

Devido à versatilidade na composição do fluxo, o processo FCAW vem substituindo o processo por eletrodo revestido, uma vez que a taxa de deposição é muito maior, além do fato da soldagem poder ser realizada em todas as posições e em ambientes abertos como em campo quando não há proteção gasosa. Ou seja, o processo FCAW incorpora as principais vantagens dos outros processos com proteção gasosa, como alta taxa de deposição, grande rendimento, excelente qualidade da solda e, as vantagens do eletrodo revestido como alta versatilidade e facilidade para operar no campo. Sem contar a melhor estabilização do arco e menor vazão de gás [POEPCKE 2013].

2.3.1 – CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO FCAW

Para o arame tubular com proteção gasosa, Bracarense [2009], afirma que o processo FCAW possui duas características particulares. A primeira é que o fluxo interno do arame tem a função de desoxidante e de introduzir elementos de liga. A segunda é que a proteção da atmosfera e a ionização da do arco elétrico ficam a cargo do gás de proteção introduzido à parte. Obviamente quando o processo FCAW for auto-protégido, o fluxo interno também é responsável pela proteção gasosa.

Popcke [2013], afirma que o processo FCAW com proteção gasosa está sendo bastante utilizado na soldagem de aço carbono, baixa liga, inoxidável e na construção de vasos de pressão e tubulações, bem como vem sendo usado pela indústria automobilística na fabricação de partes de chassi, eixo diferencial, componentes de suspensão entre outras.

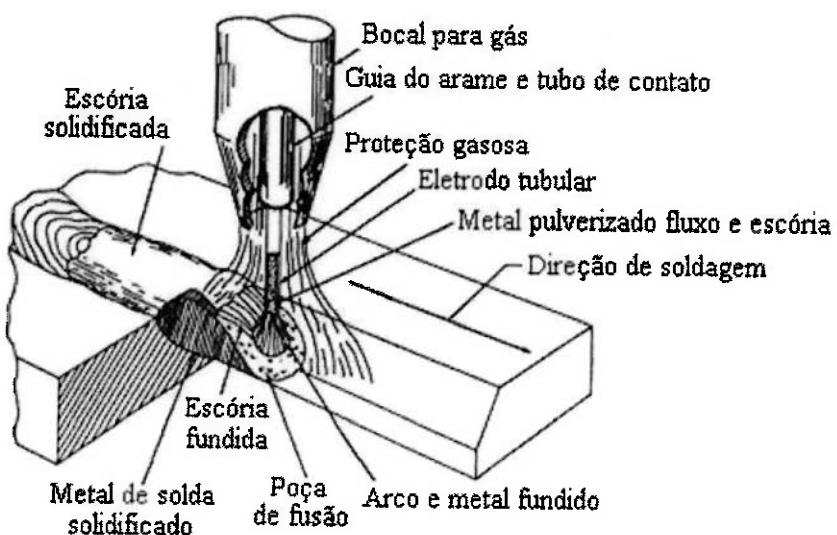


Figura 2.8 – Representação da soldagem pelo processo FCAW com proteção gasosa [POEPCKE 2013].

No processo Arame Tubular os gases ricos em CO₂ são os mais utilizados na proteção gasosa no aço carbono e baixa liga, favorecendo melhores taxas de deposição, cordões mais largos e melhor perfil do que os produzidos com arame sólido como no processo MAG, sendo adequado a uma grande variedade de juntas e para todas as posições de soldagem [FORTES 2004].

2.3.2 – CONSUMÍVEIS

Na fabricação de arames tubulares uma fita passa por um conjunto de rolos de conformação até sua seção transversal possuir um perfil tipo "U". A seguir o processo é alimentado com o fluxo que por sua vez será novamente conformado por outro conjunto de rolos que fecharão o perfil "U" e ajustado no diâmetro desejado. O tipo de fechamento da fita pode ser de topo e sobreposto conforme figura:

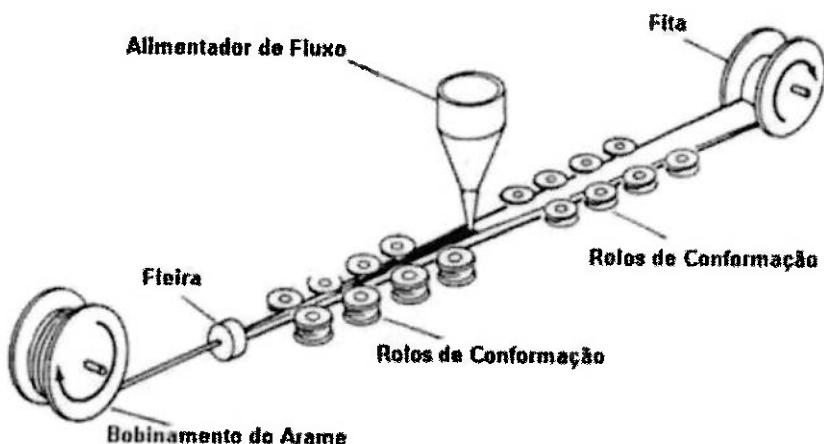


Figura 2.4 – Representação do processo de fabricação do arame tubular [FORTES 2004].

2.3.3 – CLASSIFICAÇÃO DOS CONSUMÍVEIS

Os arames tubulares para soldagem de aços-carbono e aços de baixa liga são classificados pela AWS (*American Welding Society*) segundo as

especificações AWS A 5.20-79 e AWS 5.29-80 respectivamente, onde baseiam-se na aplicabilidade do arame com relação à soldagem mono ou multipasse e também quanto ao uso ou não de proteção gasosa suplementar [MARQUES 1991].

Ainda de acordo com a AWS (*American Welding Society*) a soldagem com o processo FCAW possui três especificações destinadas aos consumíveis:

- A5.20 – especificação para arames tubulares de aço carbono;
- A5.22 – especificação para arames tubulares de aço inoxidável;
- A5.29 – especificação para arames tubulares de aço de baixa liga.

O sistema de classificação AWS tem o seguinte formato:

E X Y T - Z - K, onde E indica que se trata de um eletrodo para soldagem a arco; o primeiro dígito, representado por X, indica a resistência mínima à tração do metal depositado, em 10.000 psi; o segundo dígito, representado por Y, indica as posições de soldagem representadas, onde é zero para as posições plana e horizontal ou um para todas as posições; a letra T indica que se trata de um arame tubular; a letra Z indica a aplicabilidade e desempenho do consumível (tabela 2.1); o dígito representado pela letra K indica os requisitos de composição química do metal depositado, sendo usado apenas para soldagem de aços de baixa liga.

Tabela 2.1 – Aplicabilidade e desempenho do consumível [MARQUES 1991].

TIPO DO ARAME	PROTEÇÃO	N DE PASSES	POLARIDADE	REQ. DE COMP. QUÍMICA
T-1	CO2	Múltiplos	Eletrodo +	Sim
T-4	---	Múltiplos	Eletrodo +	Sim
T-5	CO2	Múltiplos	Eletrodo +	Sim
T-6	----	Múltiplos	Eletrodo +	Sim
T-7	----	Múltiplos	Eletrodo -	Sim
T-8	----	Múltiplos	Eletrodo -	Sim
T-11	----	Múltiplos	Eletrodo -	Sim
T-G	Fabricante	Múltiplos	Fabricante	Sim
T-GS	Fabricante	Único	Fabricante	Não
T-2	CO2	Único	Eletrodo +	Não
T-3	CO2	Único	Eletrodo +	Não
T-10	CO2	Único	Eletrodo -	Não

2.3.3.1 – ARAMES TUBULARES RUTÍLICOS

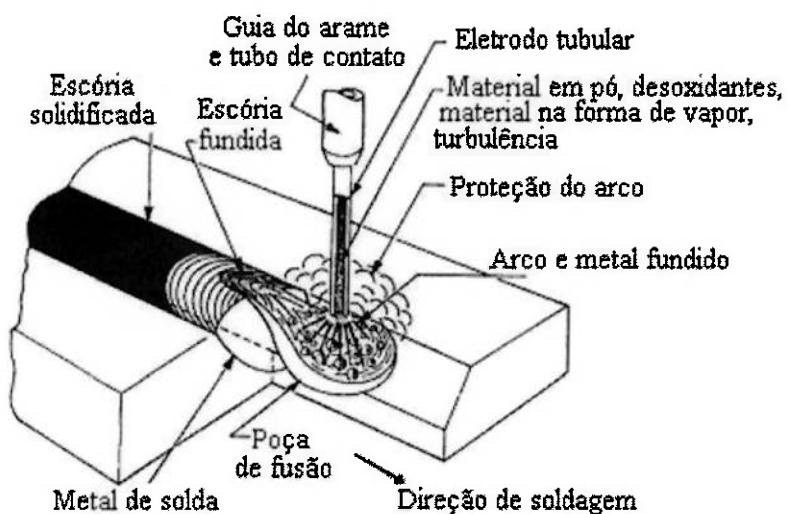
Contém em seu interior fluxos não metálicos, formadores de escória e estabilizadores do arco elétrico, atribuindo a eles (fluxos) a função de proteger e purificar o metal de solda, reduzir a quantidade de respingos e controlar a fusão do eletrodo.

Os fluxos rutílicos contêm em seu interior quantidades significativas de óxido de titânio (rutila) e alguns silicatos. Os fluxos básicos possuem grande quantidade de carbonato de cálcio (calcário) e fluoreto de cálcio (fluorita).

2.3.4 – ARAME TUBULAR AUTO-PROTEGIDO

De acordo com Poepcke [2013], no caso de soldagem com arame auto-protégido a própria fusão, a queima, a formação de escória e a vaporização dos elementos do fluxo, são responsáveis pela proteção da poça de fusão e estabilização do arco elétrico, procedimento muito semelhante ao eletrodo revestido.

Figura 2.5 – Representação da soldagem pelo processo FCAW sem proteção gasosa, conhecido como auto-protégido [POEPCKE 2013].



2.3.5 – EQUIPAMENTOS PARA O PROCESSO FCAW

O equipamento de soldagem do processo FCAW é praticamente o mesmo utilizado no processo GMAW, basta apenas mudar a bobina de arame sólido pelo tubular, podendo ou não ter aplicação gasosa para proteção da poça de fusão. Devido ao fato dos armes tubulares não suportarem muita pressão, há necessidade das roldanas de alimentação em arames tubulares serem recartilhada. O resultado final da soldagem em todos os aspectos apresenta grandes diferenças, uma delas é a formação de uma camada de escória quando não há proteção gasosa [POEPCKE 2013].

Para a soldagem com arames do tipo auto-protégidos utiliza-se uma tocha mais simples visto que não há necessidade do uso de gás de proteção.

Conseqüentemente, para o processo FCAW com proteção gasosa, necessita-se de uma tocha com bocal para passagem do gás de proteção, podendo ser a mesma do processo MIG-MAG.

2.4 - PROCESSO GMAW COM FLUXO METÁLICO, CONHECIDO COMO METAL CORED

O consumível conhecido como *Metal Cored* é conhecido como um consumível arame tubular com núcleo metálico que se enquadra no processo GMAW. Conhecido como *metal cored*, esse consumível contém núcleo interno no qual seus elementos têm a função de unir o metal de solda com o objetivo de aumentar o material depositado e também auxiliar na desoxidação, oferecendo grandes vantagens em termos de qualidade da solda, nível de hidrogênio difusível e taxa de deposição [ARAUJO 2004]. É válido lembrar que existe no mercado um equívoco em que o consumível *Metal Cored* e o consumível arame tubular fluxado enquadram-se no mesmo processo. O *Metal Cored* corresponde ao processo GMAW e o arame tubular fluxado se enquadra no processo FCAW.

Os arames tubulares com fluxo interno metálico são contidos por tiras de metálicas conformadas e preenchidas internamente com componentes metálicos proporcionando maior taxa de deposição. Tal propriedade se deve ao fato de que a corrente de soldagem flui predominantemente pela capa

metálica, obtendo maior densidade de corrente, características dos arames tubulares [NASCIMENTO 2005].

De acordo com Fortes [2004], os arames tubulares *Metal Cored* possuem eficiência de aproximadamente 95% de deposição, com quantidade de fumos gerados menor que o arame tubular com fluxo não metálico. Outras vantagens segundo o autor é que pode conseguir uma economia de até 30% em soldas de filete mono passe através de uma profunda penetração, que aumenta a espessura da garganta efetiva, com uma redução correspondente na dimensão da perna de até 20%. Todas essas características favorecem o processo *Metal Cored* na aplicação na soldagem com robôs.

2.4.1 – APLICAÇÃO

O processo *Metal Cored* é utilizado principalmente em sistemas de soldagem robótica onde a velocidade e repetibilidade são obrigatórios para manter um elevado volume de produção. A indústria automobilística é a maior consumidora dessa tecnologia, onde o retorno financeiro obtido na aplicação de robôs pode ser acelerado com o uso de consumíveis adequados como o uso de arame tubular com fluxo metálico [CORTINA 2005].

2.4.2 – CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO

O processo *Metal Cored* apresenta grandes vantagens quando o assunto é produtividade. Em um sistema robótico típico pode ser descrito em três fases distintas – pré-solda, solda, e pós-solda. Muitas vezes, a oportunidade para a melhoria do tempo de ciclo com fios de metal tubular tem o seu maior impacto nas fases pré e pós-soldagem.

O Arame *Metal Cored* apresenta algumas características particulares conforme Cortina [2005] ressaltou em sua pesquisa. Ao trocar o Arame tubular de fio sólido (MAG) em uma célula robótica pelo arame tubular *Metal Cored*, houve um aumento de 40% no aumento de produção em quantidade de peças, sem levar em consideração ainda a redução da preparação das peças para soldagem. Isso se deve ao fato do arame tubular apresentar em seu fluxo quantidades de desoxidantes suficientes para diminuir o tempo de limpeza das peças, algo inimaginável no arame sólido, onde todas as partes a serem soldadas devem estar rigorosamente isentas de qualquer corpo estranho, o que de certa forma aumenta o tempo de parada nos sistemas robotizados.

2.4.3 – PROTEÇÃO GASOSA NO PROCESSO METAL CORED

Todos os tipos de gás de proteção afetam a emissão de fumos na soldagem com arame tubular. Além disso, também afetam outras características como penetração, composição e propriedades mecânicas da solda.

Os arames com núcleo metálico fornecem alta taxa de deposição e baixíssima formação de escória. Eles normalmente operam usando proteção gasosa rica em argônio e em densidades de corrente e de tensão que facilitem a transferência metálica no tipo spray, porém o uso do gás de proteção com 100% CO₂ além de proporcionar menor custo propicia maior penetração quando comparado com misturas gasosas. Correntes de soldagem para esses arames são então usualmente de altos valores. Em baixas correntes o metal é transferido em grandes gotas e, como resultado, a capacidade de soldagem fora de posição fica comprometida [FRENCH e BOSWORTH].

Embora os arames de fluxo básico com núcleo metálico (*Metal Cored*) oferecem vantagens potenciais em termos de propriedade mecânica da solda, níveis de hidrogênio difusível, taxa de deposição e eficiência, os mesmos apresentam algumas desvantagens como à restrita faixa de corrente na qual eles operam, restringindo na posição plana e horizontal.

Os gases menos reativos, ou seja, os com base em argônio, por exemplo, apesar de propiciarem grande estabilidade no arco, produzem menos penetração no metal de solda, reduzidos níveis de salpico e fumos e ligeiramente melhores propriedade de resistência ao impacto do que gases oxidantes como o CO₂. No entanto, alguns arames tubulares possuem ótimo desempenho com gás de proteção CO₂, além de terem relativamente baixa emissão de fumos e propriedades mecânicas bastante satisfatórias [FRREE 1995].

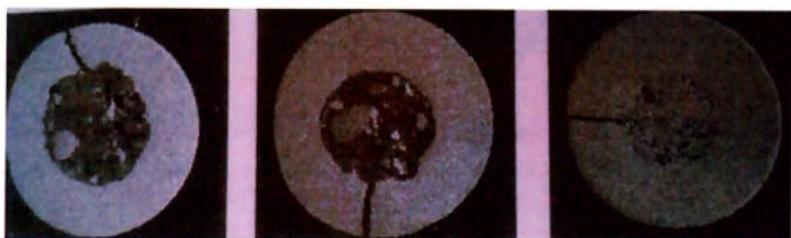
2.4.4 – CONSUMÍVEIS NO PROCESSO METAL CORED

Os arames tipo *Metal Cored* fornecem uma alta taxa de deposição e baixíssima formação de escória. Eles normalmente operam usando proteção gasosa rica em argônio e em densidades de corrente e de tensão que facilitem a transferência metálica globular repulsiva, que muitas vezes pode ser confundida pela transferência metálica tipo *spray*.

Os consumíveis comumente utilizados neste processo de soldagem, geralmente são fabricados em diâmetros que variam de 1,0 a 3,2 mm com a configuração geométrica metal/fluxo, conforme ilustrado abaixo.

Figura 2.6 – Geometria das seções transversais do arame tubular

[SCOTTI 2014].



A figura acima representa as micrografias de seções transversais de eletrodos tubulares (fluxo-cored), rutílico (esquerda) e básico (centro), e de arame tubular (metal-cored) à direita.

2.4.5 – CLASSIFICAÇÃO DOS CONSUMÍVEIS PELO PROCESSO METAL CORED

Por se tratar de um arame tubular classificado dentro do processo GMAW, a AWS classifica o processo *Metal Cored* como tal, dentro das normas AWS A5.18 e AWS A5.36, conforme exemplo abaixo:

Arame eletrodo: Cord-ER70C6-C;

Assim como na classificação para aços carbonos no processo GMAW, o sistema de classificação AWS para o consumível *metal cored* tem o seguinte formato: E R X X C - C, onde E indica que se trata de um eletrodo para soldagem a arco; o primeiro dígito, representado por X, indica à resistência mínima à tração do metal depositado, em 10.000 psi; a letra C indica ser um arame composto com núcleo metálico com pó de ligas; a letra C no final indica que é um consumível sob proteção gasosa de CO₂.

2.4.6 – EQUIPAMENTOS PARA O PROCESSO METAL CORED

O equipamento de soldagem do processo *Metal Cored* é praticamente o mesmo utilizado no processo GMAW, e FCAW, composto de uma fonte de alimentação, alimentador de arame, tocha de soldagem, fonte de gás de proteção com regulador de pressão e fluxômetro.

2.5 – CUSTOS EM SOLDAGEM

De acordo com Brito [2005], o custo da soldagem é composto pela soma de vários fatores como: Custo do metal depositado, custo da mão-de-obra, depreciação do equipamento, custo de manutenção, custo de energia elétrica e despesas gerais. Sendo os dois primeiros custos responsáveis por aproximadamente 92% de todo o custo envolvido na soldagem.

Brito 2005, afirma que para calcular o custo de soldagem de um produto ou de um equipamento é fundamental conhecer o custo da soldagem expresso em moeda por massa (\$/kg) e o custo em moeda por comprimento (\$/m). Com esses valores calculados, o custo de soldagem pode ser realizado com uma simples operação aritmética de multiplicação.

2.5.1 – CUSTO DO METAL DEPOSITADO

A metodologia sobre os custos referentes à soldagem deste trabalho segue o autor BRITO [2005]. Onde afirma que o custo do metal depositado é o produto entre a massa do metal depositado e o custo do consumível :

$$CMD \left(\frac{\$}{m} \right) = PMD \left(\frac{kg}{m} \right) \times CC \left(\frac{\$}{kg} \right) \quad ... (01)$$

Onde:

CMD é o custo do metal depositado, onde:

PMD é o peso do metal depositado, CC: Custo do consumível.

2.5.1.1 – PESO DO METAL DEPOSITADO

Peso do metal depositado é obtido pelo produto entre o volume do metal de solda e a densidade (peso específico) do material, equação XX. O volume pode ser calculado conhecendo-se a área da seção transversal e o comprimento a ser *soldado*.

$$PMD = V \times \rho \quad ... (02)$$

$$V = A \times L \quad ... (02-A)$$

Onde

PMD é o Peso do metal depositado

V é o Volume do metal de solda

ρ é o peso específico da composição do metal de solda

2.5.1.2 – CUSTO DO CONSUMÍVEL

É obtido pelo produto do preço do consumível multiplicado pela quantidade do mesmo. Em processos que utilizam gás de proteção, deve-se ainda somar o custo do gás, onde o mesmo é obtido pelo produto de seu preço multiplicado pela vazão e pelo tempo de arco aberto.

$$CC(\$) = PC \left(\frac{\$}{kg} \right) \times QC (kg) \quad(03)$$

Onde:

CC é o custo do Consumível

PC é o preço do consumível

QC é a quantidade do consumível

$$CC_{gas}(\$) = PC_{gas} \left(\frac{\$}{l} \right) \times V_{gas} \left(\frac{l}{min} \right) \times \text{Tempo arco ab (min)} \quad ... (04)$$

Onde:

CCgas é o custo do gás

PCgas é o preço do gás

Vgas é a vazão do gás

Tempo arco ab é o Tempo de arco aberto

2.5.1.2.1 – PREÇO DO CONSUMÍVEL

É o valor em moeda do Consumível por quilograma, para os processos GMAW e FCAW deve-se acrescentar o custo do gás de proteção.

2.5.1.2.2 – QUANTIDADE DE CONSUMÍVEL

É a quantidade de consumível obtida multiplicando-se o peso do metal depositado pelo comprimento de solda desejado e dividindo-se pela eficiência de deposição.

$$QC(kg) = \frac{PMD \left(\frac{kg}{m} \right) \times L (m)}{ED (\%)} \quad ... (05)$$

Onde:

QC é a quantidade de Consumível

PMD é o peso do metal depositado

C é o comprimento

ED é a eficiência de deposição

2.5.1.2.2.2.1 – CONSUMO DE GÁS

O Consumo de gás depende do tempo de arco aberto e taxa de deposição. Segundo Brito [2005], o processo com maior taxa de deposição tende a consumir menor quantidade final de gás. Conforme equação 6:

$$CG(l/m) = \frac{100 \times VG \left(\frac{l}{min} \right) \times NP}{VS \left(\frac{cm}{min} \right)} \quad ... (06)$$

Onde:

CG é o consumo de Gás

VG é a vazão do Gás

NP é o número de passes

VS é a velocidade de soldagem

2.5.1.3 – EFICIÊNCIA DE DEPOSIÇÃO

A eficiência de deposição é importante para se calcular o volume de massa necessária para a soldagem de uma junta de acordo com o processo de soldagem em uso.

De acordo com Brito [2005], arames sólidos no processo GMAW tem uma eficiência de deposição por volta de 0,65 e, arames tubulares (FCAW) com proteção gasosa, uma eficiência de deposição de 0,87.

$$ED = \frac{PMD \text{ (g)}}{PMC \text{ (g)}} \quad \dots(07)$$

Onde:

ED é a eficiência de deposição

PMD é o peso do metal depositado

PMC é o peso do material consumido

2.5.1.4 – CARGA TRIBUTÁRIA EM UM PRODUTO

De uma maneira geral, ocorrem mudanças de tempos em tempos na legislação quando se trata de carga tributária em um produto. Brito [2005] afirma que na aquisição de consumíveis, equipamentos, ferramentas e materiais de soldagem, incidem vários tipos de impostos. Sendo que alguns impostos depois de pagos podem ser recuperados e descontados na carga

tributária incidente nos produtos acabados vendidos pela empresa, portanto, devem ser descontados quando se avaliam os custos dos insumos de soldagem.

2.5.2 – CUSTO DA MÃO-DE-OBRA E “OVERHEAD”

O cálculo dos custos com mão-de-obra é de suma importância para se determinar corretamente os custos com soldagem, pois pode representar até 80% do custo da soldagem.

Segundo Brito [2005], o valor da mão-de-obra deve ser definido como o valor do salário do soldador acrescido dos encargos sociais e também a inclusão do “overhead”, que são os salários dos gerentes e do pessoal da administração envolvidos no processo de soldagem. Essa somatória de salários deve ser expressa em valor da moeda por hora de trabalho: (\$/h).

2.5.3 – CUSTO DA ENERGIA ELÉTRICA

O custo da energia elétrica na soldagem representa cerca de 3% do total e pode ser representado pela seguinte equação:

$$CEE = \frac{1,73 \times E(V) \times TS \left(\frac{h}{m} \right) \times W \left(\frac{\$}{kwh} \right)}{1000 \times Ef} \quad ... (08)$$

Onde:

CEE é o custo da energia elétrica

E é a tensão do arco

I é a intensidade de corrente elétrica de soldagem

TS é o tempo de soldagem

Ef é a eficiência de soldagem

2.5.4 – DEPRECIAÇÃO DO EQUIPAMENTO

O custo da depreciação é calculado dividindo-se a depreciação mensal pela produção mensal, onde a mesma pode ser calculada considerando-se 10% ao ano do valor do equipamento, assim o equipamento é totalmente amortizado no final de 10 anos.

2.5.5 – CUSTO DE MANUTENÇÃO DO EQUIPAMENTO

O custo de manutenção basicamente envolve consertos e reparos nos equipamentos e a mão-de-obra envolvida. Pode ser calculada dividindo-se a despesa mensal com manutenção pela produção mensal em kg/mês de metal depositado.

2.5.6 – DESPESAS GERAIS

Despesas gerais em soldagem englobam todos os custos necessários para a execução da soldagem, tais como pré-aquecimento, alinhamento, ensaios não-destrutivos, tratamento térmico, corte, usinagem, qualificação de soldadores, anti-respingos, material de proteção individual, porta eletrodos, bico de contato, bocais, goivagem e outros. Pode ser calculada multiplicando-se a quantidade gasta no mês dos itens citados pela sua quantidade e, dividindo-se pela produção mensal de metal depositado.

2.6 – DEFINIÇÃO DE PRODUTIVIDADE

Segundo Moreira, [2002, p. 599] a produtividade refere-se ao maior ou menor aproveitamento dos recursos no processo de produção, ou seja, quanto que a empresa consegue produzir partindo de uma determinada quantidade de recursos. Considera que a produtividade além de observar que trata-se de um conceito principal, dado um sistema de produção, onde insumos após processados são combinados para fornecer uma saída.

Um crescimento da produtividade implica em um melhor aproveitamento desses recursos como funcionários, máquinas, da energia e dos combustíveis consumidos, da matéria-prima, etc. É a produtividade que determina e permite a competitividade da empresa, ou seja, uma empresa é competitiva em relação às outras, quando pode produzir produtos de melhor qualidade com custos reduzidos num prazo de tempo menor. A competitividade é a melhor arma para a empresa lidar com seus concorrentes.

3 – OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo comparar o desempenho dos processos de soldagem: MAG (Gás Metal Arc Welding), Arame Tubular (Flux Cored Arc Welding) e *Metal Cored*, através do metal depositado em chapas de aços A36 utilizando um robô de soldagem para garantir a repetibilidade na soldagem, com a finalidade de avaliar melhor desempenho e custos entre os consumíveis. Comparando a taxa e à eficiência de deposição entre o arame sólido ER70S-6, arame tubular E71T-1C e o arame tubular com alma metálico ER70C-6M, utilizando o gás 100% CO₂ como proteção gasosa, nas bitolas de arames de 1,2mm e 1,6mm.

4 – MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo foram abordadas as particularidades que compõe este trabalho desde os materiais que dão base para a realização e execução dos experimentos.

Os experimentos foram realizados em um robô de soldagem da marca *Motoman* cedido pela empresa *Lincoln automation* para que não haja quase que nenhuma interferência pelo soldador. As soldagens executadas pelo robô foram realizadas com proteção gasosa de 100% CO₂ para os três processos: Arame sólido (MIG/MAG) Arame tubular (FCAW) e Arame tubular *Metal Cored*.



Figura 4.1 – Robô utilizado no trabalho.

4.2 – LOCAL DO TRABALHO

Os testes foram realizados na empresa *Lincoln Automation*, localizada na cidade de Indaiatuba-SP. Foi utilizado um robô de soldagem da com fonte de energia elétrica de 500A, com proteção gasosa com 100% de CO₂, em chapas de aço A36. Os testes de soldagem foram feitos na posição plana por simples deposição de cordões sobre chapas de aço. Foi utilizada também uma balança de precisão modelo para aferição das massas dos corpos de prova, metal depositado e bobina do arame, afim de verificar a eficiência de cada consumível.

4.3 – METAL DE BASE

O metal de base utilizado na soldagem deste trabalho é o Aço ASTM A36. Aços com baixo teor de carbono geralmente contém menos de 0,25% desse elemento na liga, sua microestrutura consiste basicamente em ferrita e perlita, possuem boa tenacidade, ductibilidade e excelente soldabilidade, além de serem mais baratos que os demais aços [CALLISTER, 2008].

Tabela 4.1 – Composição química para aços ASTM A-36 [CALLISTER, 2008].

C (%)	Si (%)	Mn (%)	Ni (%)	Mo (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)	Al (%)	V (%)
0,17	0,23	0,62	0,01	0,013	0,027	0,018	0,3	0,1	0,1

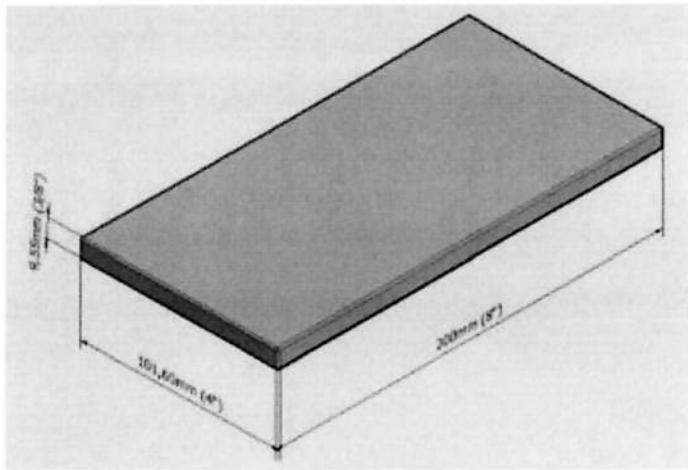


Figura 4.2 – Dimensões do metal de base

4.4 – PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM

Os três consumíveis de soldagem em estudo serão avaliados com duas bitolas de arames, uma com 1,2mm e outra com 1,6mm de diâmetro. Além do acompanhamento do efeito na soldagem causada pela alteração da corrente elétrica conforme tabela abaixo.

Tabela 4.2 – Resumo das execuções das soldagens para cada corpo de prova conforme alteração da corrente e bitola do arame.

Arames com Diâmetro 1,2mm – 100% CO2			
Corrente de Soldagem (A)	Arame Sólido	Arame Tubular	Metal Cored
	ER70S-6	E71T-1	ER70C6-C
200	1	2	3
250	4	5	6
300	7	8	9
350	10	11	12
400	13	14	15
Arames com Diâmetro 1,6mm – 100% CO2			
Corrente de Soldagem (A)	Arame Sólido	Arame Tubular	Metal Cored
	ER70S-6	E71T-1	ER70C-6M
250	16	17	18
300	19	20	21
350	22	23	24
400	25	26	27
450	28	29	30

4.5 – AQUISIÇÃO DE DADOS DE SOLDAGEM

O *software* do Robô (sistema *Arclink*) possibilita o acesso às informações relevantes durante a soldagem. Essa aquisição de dados fornecida é essencial para o cálculo de desempenho. Variáveis como Corrente, tensão, tempo de

arco, velocidade, entre outras, possibilitam efetuar cálculos como eficiência e custos de soldagem.



Figura 4.3 – Aquisição dos dados de soldagem

4.6 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA SOLDAGEM

4.6.1 - FONTE DE ENERGIA

Foi utilizado uma fonte de energia modelo Power Wave S500 com ajuste automático de tensão de entrada constante, com as seguintes configurações:

Fabricante: Lincoln Electric

Programa de soldagem: Convencional, pulsado e especiais

Tensão de entrada: 200 até 600 V

Corrente de entrada: 27 A em 440V trifásico

Potência Nominal: 36,5V / 450A 100%

Saída Nominal: 5 – 550 A



Figura 4.4 – Fonte de energia

4.6.2 – ALIMENTADOR DE ARAMES

O sistema de alimentação de arame utilizado no robô consiste em um cabeçote de alimentação contínua específica para os processos GMAW e FCAW, conforme figura 4.5., ou seja, as roldanas de tração para arames tubulares possuem estriadas diferenciadas dos arames sólidos para não amassar o tubo. O

modelo do alimentador de arame utilizado é o *Autodrive 4R100*. Também foi utilizado um refrigerador à água de tocha modelo *CoolArc 55* e a tocha modelo Binzel W500 refrigerada 22 graus.



Figura 4.5 – Alimentação do arame

4.7 – SISTEMA DE DESLOCAMENTO DO ROBÔ

O robô foi programado para soldar as chapas na posição plana e horizontal com um único cordão de solda sem interrupção no formato em "U", com velocidade de soldagem constante de 30 cm por minuto para todos os testes. O modelo do robô é o System 55 da marca Motoman MA 1900 (6 eixos) com duas estações de trabalho, cada uma com posicionador *headstock/tailstock* MH-505 (1 eixo). Este equipamento tem capacidade de carga de 6kg e alcance de 1900 mm, utiliza um controlador robótico *Motoman DX 100* com posicionador MH-505 (1 eixo) com *payload* nominal de 505 kgf.

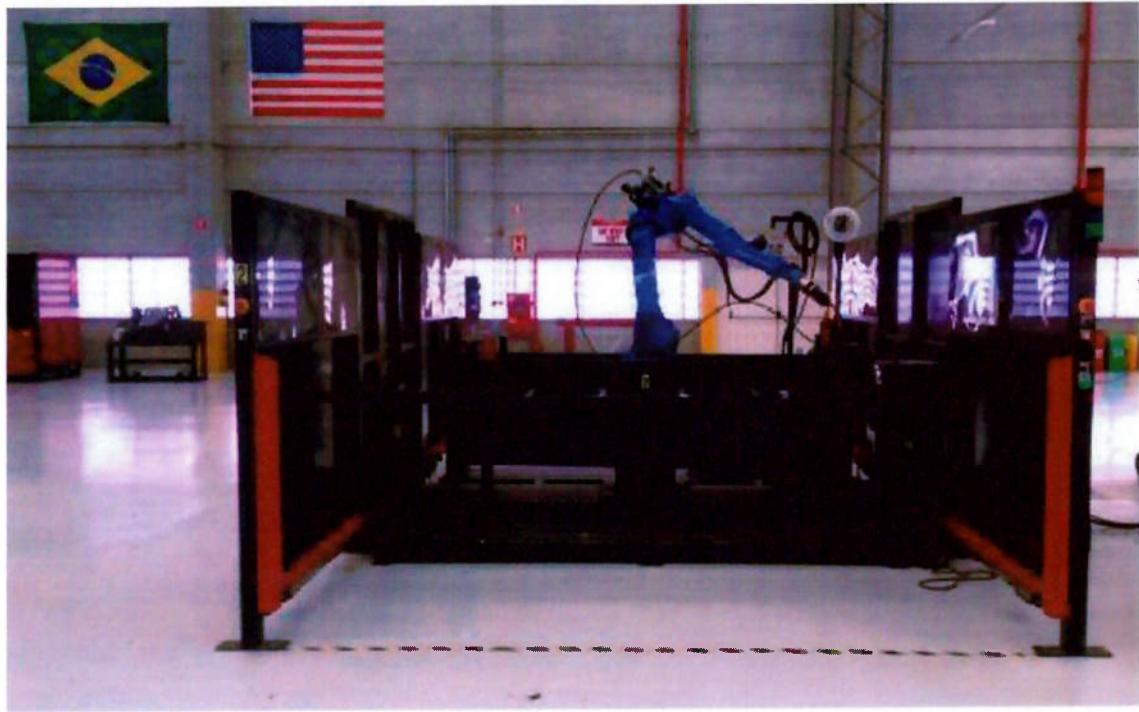


Figura 4.6 – Célula robótica utilizada na soldagem

4.8 – CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM

Neste trabalho foram utilizados três consumíveis de soldagem: Processo MIG/MAG, consumível ER70S-6 (arame sólido), processo FCAW consumível E71T-1 (arame fluxado) e consumível E70C-6M (arame tubular). Todas as soldagens foram realizadas nas bitolas de 1,2 mm e 1,6 mm.

4.8.1 – ARAMES ELETRODOS

A tabelas a seguir exibe à composição química dos três consumíveis utilizados.

Tabela 4.3 – Composição química dos arames eletrodos.

CONSUMÍVEL	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)
GMAW (ER70S-6)						
Arame sólido	0,06-0,15	0,80-1,15	1,40-1,85	0,025	0,035	0,5
FCAW (E71T-1)						
Arame fluxado	0,03	0,55	1,45	0,013	0,01	
GMAW (ER70C6-C)						
Metal Cored	0,12	0,9	1,75	0,03	0,03	0,5

4.8.2 – PROTEÇÃO GASOSA

De acordo com às propriedades químicas dos arames eletrodos utilizados, bem como orientação do fabricante dos consumíveis, a proteção gasosa proposta será com 100% de CO₂ com vazão de 18 litros por minutos para todos os procedimentos de soldagem.

Alguns arames tubulares possuem ótimo desempenho com gás de proteção CO₂, além de terem relativamente baixa emissão de fumos e propriedades mecânicas bastante satisfatórias. Os gases com base em argônio,

apesar de propiciarem grande estabilidade no arco, produzem menos penetração no metal de solda [FRREE 1995].

4.9 – EXPERIMENTO

As amostras do metal de base utilizadas no trabalho são de aço ASTM A36 padronizadas com as seguintes dimensões: espessura 101,60mm, altura 9,55mm e comprimento 200mm.

Os testes foram realizados obedecendo aos parâmetros específicos indicados pelo fabricante para o melhor desempenho de cada processo, além de realizar cada processo em experimento com duas faixas de corrente elétrica com o propósito de analisar o efeito dessa importante variável.

Os experimentos serão realizados conforme citado anteriormente com duas bitolas: 1,2mm e 1,6mm, bem como à alteração da corrente em 5 graduações para cada bitola. Na bitola de 1,2 mm, os testes serão realizados nas correntes: 200A, 250A, 300A, 350A, 400A. Já nos arames com 1,6mm de bitola, as correntes serão de: 250A, 300A, 350A, 400A, 450A. Totalizando 30 corpos de provas.

Para cada um dos trinta corpos de provas, será aferida em uma balança de precisão a massa do arame eletrodo antes e depois da soldagem, afim de obter a relação entre o consumo de arame e metal depositado.

Para atingir o propósito do trabalho será realizadas macrografias nas amostras de soldagem para aferir as dimensões do cordão de solda como largura e penetração de soldagem.

Por fim, será feita uma comparação entre os custos de soldagem dos três procedimentos envolvidos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

Este capítulo refere-se à apresentação e discussão dos resultados de acordo com a metodologia proposta para o desenvolvimento do trabalho em estudo. O intuído central do trabalho é de comparar os processos: arame sólido (GMAW), arame tubular (FCAW) e *metal cored* (FCAW), no que diz respeito à produtividade, qualidade e economia da soldagem.

Os três procedimentos descritos foram realizados com correntes diferentes e com bitolas de 1,2 mm e 1,6 mm, com o propósito de avaliar as características da solda em função da variação da corrente.

5.1 PREPARAÇÃO E SOLDAGEM DAS PEÇAS.

As chapas foram preparadas primeiramente com o corte da barra laminada no comprimento de 200 mm, e posteriormente lixada com o disco de granada número da lixadeira na face que recebeu a soldagem.



Figura 5.1 – Preparação do corpo de prova

O cordão de solda foi realizado no formato em "U" sem interrupção da soldagem. O corte para a Macrografia foi feito na posição indicada pelo retângulo vermelho, aproximadamente 75 mm do começo do cordão.



Figura 5.2 – Deslocamento do robô e geometria do cordão de solda

5.1.1 – COMPARAÇÃO VISUAL DOS CORDÕES DE SOLDA

Inicialmente pretendia-se utilizar a mesma velocidade de soldagem para todos os testes, porém alguns cordões com a velocidade de 30 cm por minutos começaram a perfurar o corpo de prova, tendo então de aumentar a velocidade de soldagem. É válido ressaltar que a velocidade de soldagem não compromete a taxa de deposição, que é um dos principais assuntos abordados nesse trabalho.

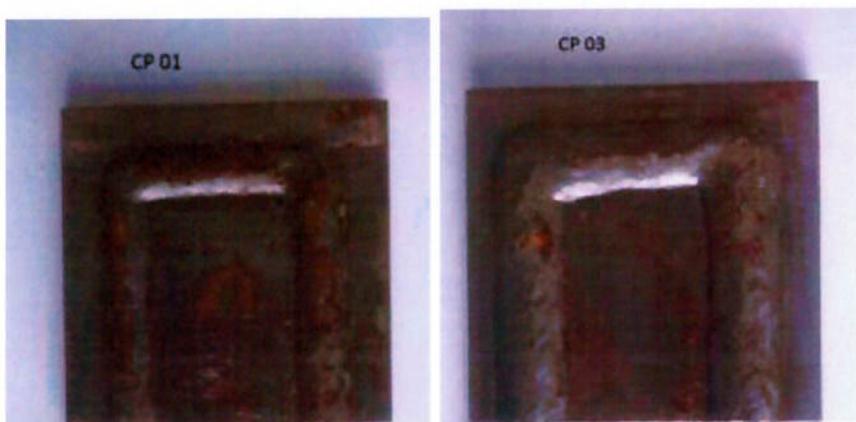


Figura 5.3 – Cordões de solda realizados com o consumível E71T-1 (FCAW) bitola 1,2 mm nas respectivas correntes: CP01: 236,6A e CP02: 340,9A

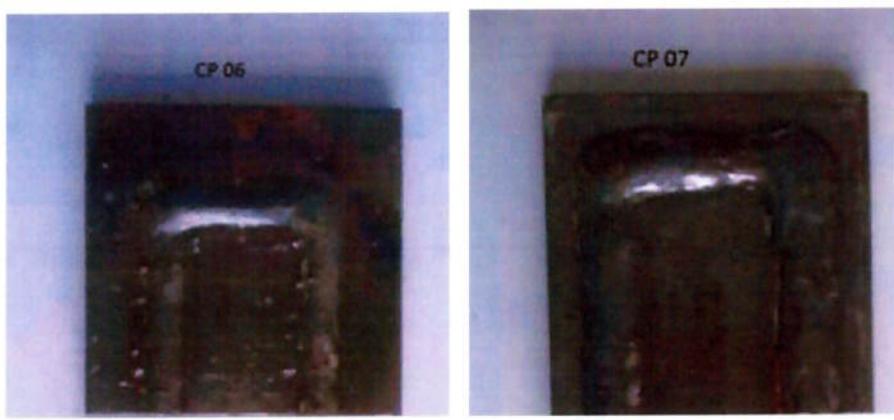


Figura 5.4 – Cordões de solda realizados com o consumível ER70C6-C (METAL CORED) bitola 1,2 mm nas respectivas correntes: CP06: 241,69A e CP07: 313A

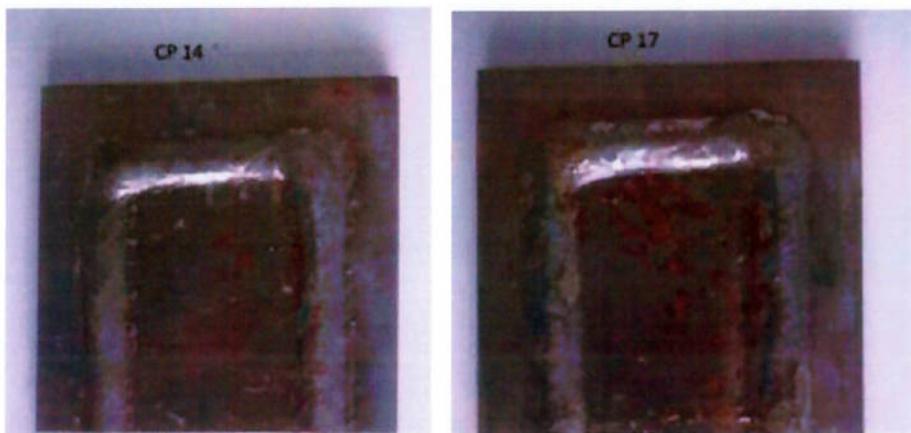


Figura 5.5 – Cordões de solda realizados com o consumível ER70S-6 (GMAW) bitola 1,2 mm nas respectivas correntes: CP14: 230,9A e CP17: 365,3A

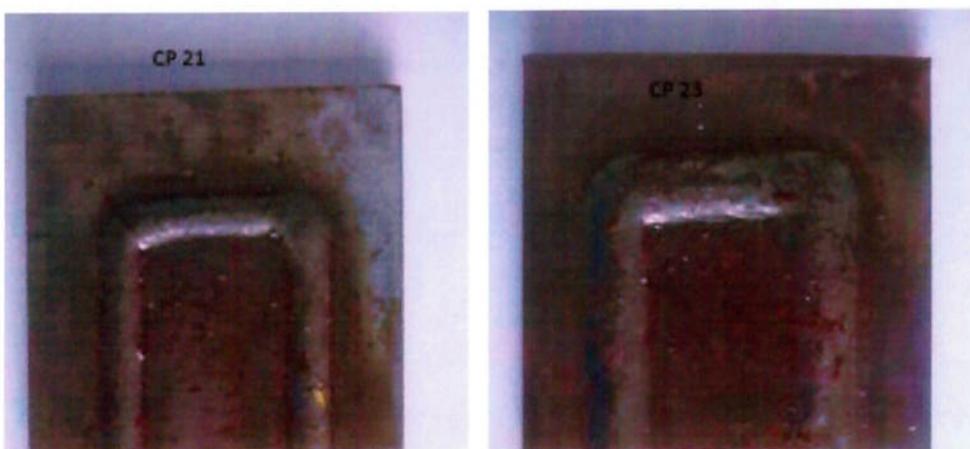


Figura 5.6 – Cordões de solda realizados com o consumível E71T-1 (FCAW) bitola 1,6 mm nas respectivas correntes: CP21: 265,8A e CP23: 376,4A



Figura 5.7 – Cordões de solda realizados com o consumível ER70C6-C (METAL CORED) bitola 1,6 mm nas respectivas correntes: CP26: 304,4A e CP28: 450A

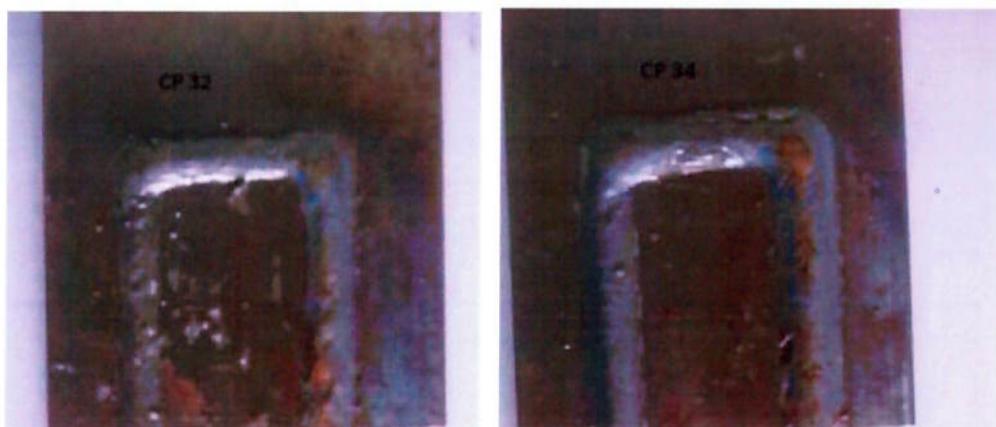


Figura 5.8 – Cordões de solda realizados com o consumível ER70S-6 (GMAW) bitola 1,6 mm nas respectivas correntes: CP32: 276,8A e CP34: 362,9A

5.2 EFEITO DA CORRENTE DE SOLDAGEM NA TAXA E EFICIÊNCIA DE DEPOSIÇÃO.

A corrente de soldagem teve grande efeito na taxa de deposição e na penetração. Constatou-se aumento proporcional da taxa de deposição e da penetração, em função da corrente de soldagem, sendo que num determinado valor essa proporção cessa.

A tabela a seguir resume as correntes e velocidades de soldagem reais utilizadas em cada corpo de prova.

Tabela 5.1 – Resumo das correntes, tensões e velocidades de soldagem

para cada corpo de prova realizado com arames de bitola de 1,2 mm.

Processo	Corrente (A)	Tensão (V)	Veloc. Sold. (cm/min)	Taxa dep. (kg/hr)	Eficiência
FCAW-E71T-1	199,9	24,9	30	2,810	87%
FCAW-E71T-1	236,6	25,9	30	3,541	86%
FCAW-E71T-1	275,5	27,9	30	4,409	86%
FCAW-E71T-1	340,9	31,9	30	6,185	88%
FCAW-E71T-1	358,3	32,9	30	6,686	89%
<hr/>					
Metal Cord-ER70C6-C	227,7	29,9	30	2,773	83%
Metal Cord-ER70C6-C	241,9	29,9	30	3,145	86%
Metal Cord-ER70C6-C	313	31,9	30	2,055	96%
Metal Cord-ER70C6-C	340,8	32,9	40	5,070	91%
Metal Cord-ER70C6-C	379,5	33,9	50	7,734	96%
<hr/>					
GMAW-ER70S-6	214,3	30,1	30	2,765	89%
GMAW-ER70S-6	230,9	29,9	30	3,14	92%
GMAW-ER70S-6	300	31,9	30	4,638	94%
GMAW-ER70S-6	365,3	34,9	50	6,4	96%
GMAW-ER70S-6	381,7	35,9	50	7,257	97%

Tabela 5.2 – Resumo das correntes, tensões e velocidades de soldagem para cada corpo de prova realizado com arames de bitola de 1,6 mm.

Processo	Corrente (A)	Tensão (V)	Veloc. Sold. (cm/min)	Taxa dep. (kg/hr)	Eficiência
FCAW-E71T-1	247,1	23,9	45	2,979	86%
FCAW-E71T-1	265,8	23,8	45	3,212	83%
FCAW-E71T-1	336,2	26,9	45	4,52	86%
FCAW-E71T-1	376,4	31,9	45	5,354	86%
FCAW-E71T-1	423	32,9	45	6,837	88%
<hr/>					
Metal Cord-ER70C6-C	278,4	28,9	45	3,227	89%
Metal Cord-ER70C6-C	304,4	29,9	45	3,806	92%
Metal Cord-ER70C6-C	346,2	31,9	45	4,551	92%
Metal Cord-ER70C6-C	415,6	32,4	45	6,013	94%
Metal Cord-ER70C6-C	450	32,9	45	6,041	80%
<hr/>					
GMAW-ER70S-6	238,7	27	45	2,750	83%
GMAW-ER70S-6	276,8	28,9	45	3,145	83%
GMAW-ER70S-6	310,7	30,9	45	3,789	88%
GMAW-ER70S-6	362,9	31,9	45	4,778	92%
GMAW-ER70S-6	412	34,9	45	5,386	95%

A figura 5.3 e 5.4 demonstra graficamente o efeito da corrente de soldagem em relação à taxa de deposição, para os arames de bitola 1,2 e 1,6 mm respectivamente.

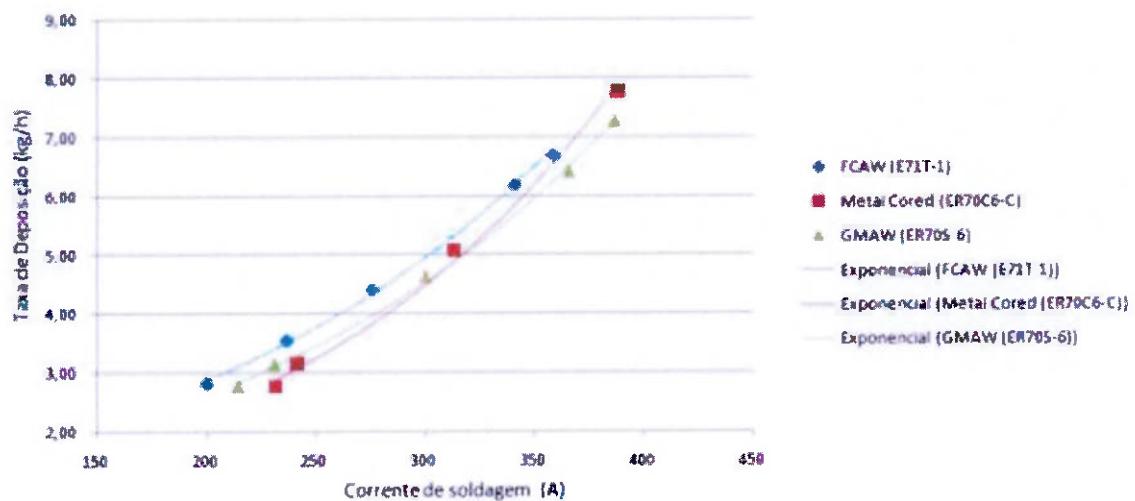


Figura 5.9 – Efeito da corrente sobre a taxa de deposição em arames com 1,2 mm de diâmetro.

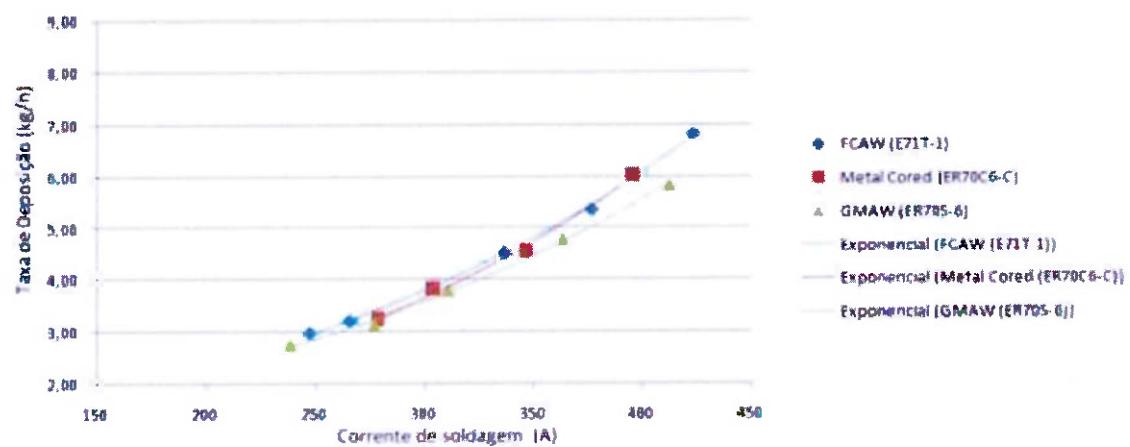


Figura 5.10 – Efeito da corrente sobre a taxa de deposição em arames com 1,6 mm de diâmetro.

5.3 EFEITO DA CORRENTE DE SOLDAGEM NA PENETRAÇÃO E LARGURA DO CORDÃO DE SOLDA

O presente trabalho também procurou avaliar o efeito da variação da corrente elétrica na penetração e largura do cordão em cada corpo de prova avaliado.

Para a verificação da penetração do cordão de solda, foram feitas macrografias para obter as dimensões da largura e profundidade da seção transversal do cordão de solda.

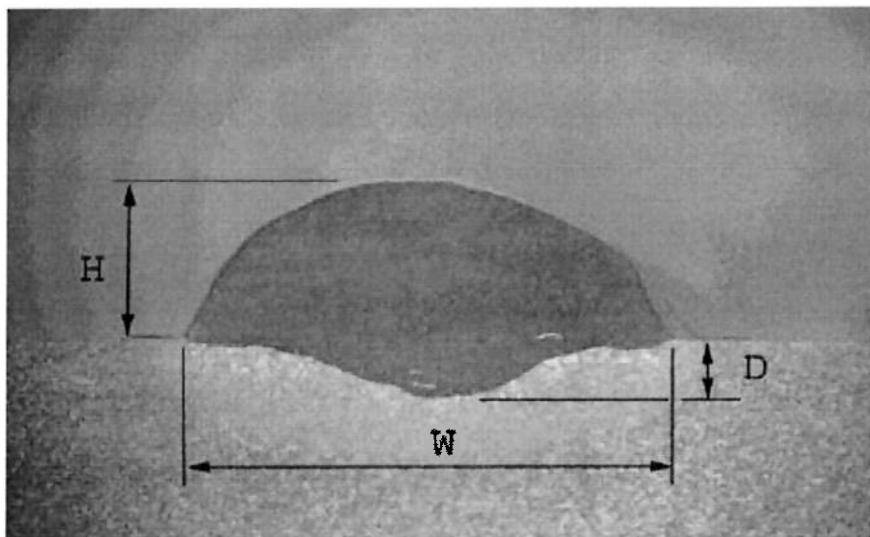


Figura 5.11 – Representação geométrica do cordão. W – largura, D – profundidade, H – Reforço [Fonte: Autor].

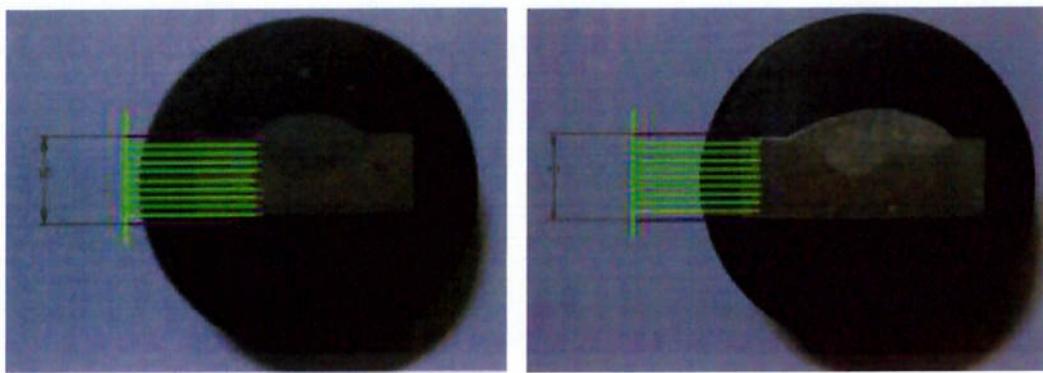


Figura 5.12 – Cordões de solda realizados com o consumível E71T-1 (FCAW) bitola 1,2 mm nas respectivas correntes: CP01: 236,6A e CP02: 340,9A

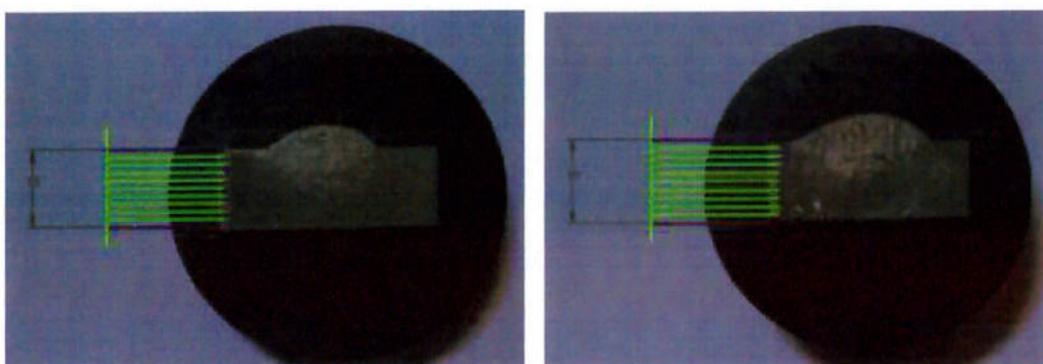


Figura 5.13 – Cordões de solda realizados com o consumível ER70C6-C (METAL CORED) bitola 1,2 mm nas respectivas correntes: CP06: 241,69A e CP07: 313A

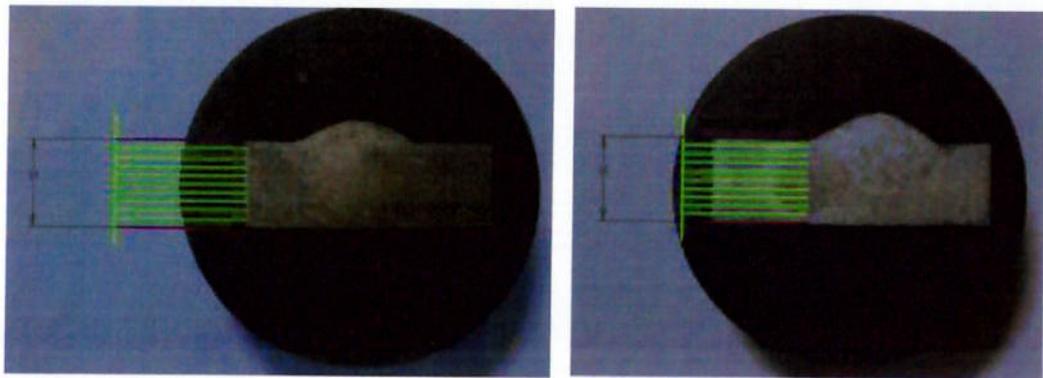


Figura 5.14 – Cordões de solda realizados com o consumível ER70S-6
(GMAW) bitola 1,2 mm nas respectivas correntes: CP14: 230,9A e CP17: 365,3A

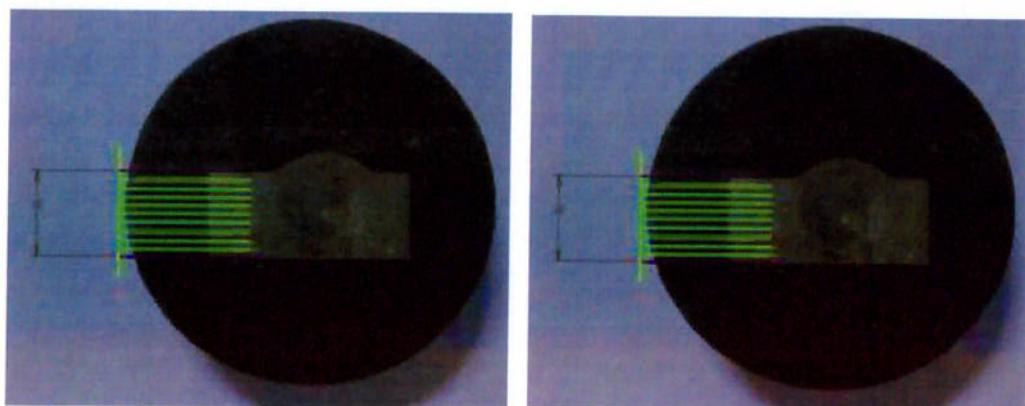


Figura 5.15 – Cordões de solda realizados com o consumível E71T-1
(FCAW) bitola 1,6 mm nas respectivas correntes: CP21: 265,8A e CP23: 376,4A

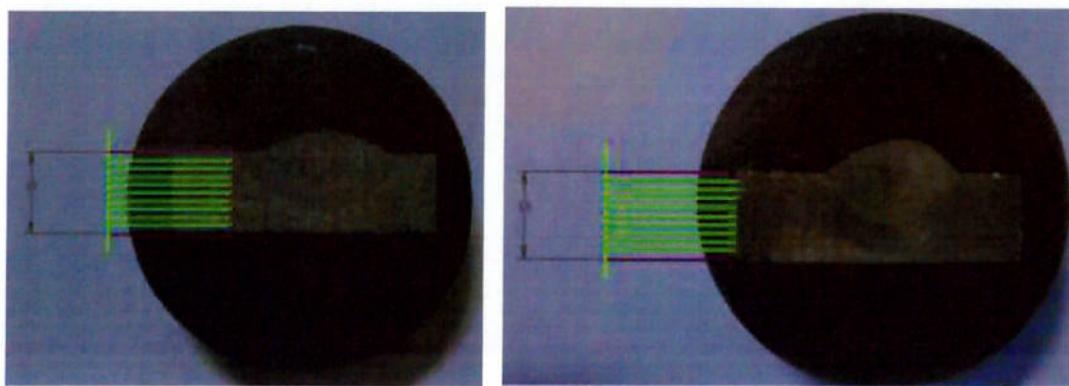


Figura 5.16 – Cordões de solda realizados com o consumível ER70C6-C (METAL CORED) bitola 1,6 mm nas respectivas correntes: CP26: 304,4A e CP28: 450A

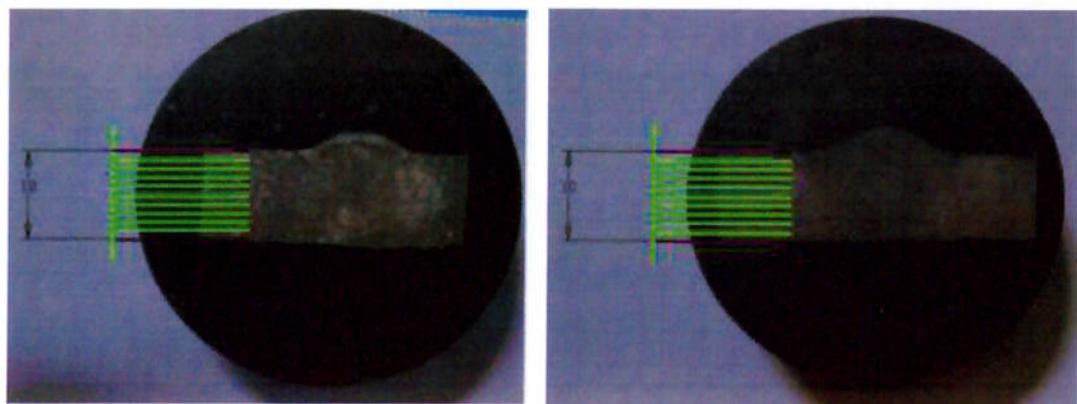


Figura 5.17 – Cordões de solda realizados com o consumível ER70S-6 (GMAW) bitola 1,6 mm nas respectivas correntes: CP32: 276,8A e CP34: 362,9A

De acordo com os dados obtidos através da macrografia realizada em todos os corpos de prova, foi elaborada uma tabela que exibe as dimensões da largura e profundidade dos cordões de solda.

Tabela 5.3 – Resumo das dimensões do cordão de solda para todos os processos realizados com arames de bitola de 1,2 mm.

Processo	Corrente (A)	Tensão (V)	Largura (W) (mm)	Profundidade (D) (mm)
FCAW-E71T-1	199,9	24,9	12	1
FCAW-E71T-1	236,6	25,9	15	1,5
FCAW-E71T-1	275,5	27,9	17	2
FCAW-E71T-1	340,9	31,9	19	3,4
FCAW-E71T-1	358,3	32,9	21	3,6
<hr/>				
Metal Cord-ER70C6-C	227,7	29,9	14,3	2,3
Metal Cord-ER70C6-C	241,9	29,9	14,5	2,5
Metal Cord-ER70C6-C	313	31,9	17,2	3
Metal Cord-ER70C6-C	340,8	32,9	13	6
Metal Cord-ER70C6-C	379,5	33,9	12,5	7,5
<hr/>				
GMAW-ER70S-6	214,3	30,1	11,5	3,5
GMAW-ER70S-7	230,9	29,9	14	4,5
GMAW-ER70S-8	300	31,9	16,5	4,8
GMAW-ER70S-9	365,3	34,9	12,5	5,5
GMAW-ER70S-10	381,7	35,9	13,1	6,5

Tabela 5.4 – Resumo das dimensões do cordão de solda para todos os processos realizados com arames de bitola de 1,6 mm.

Processo	Corrente (A)	Tensão (V)	Largura (mm)	Profundidade (mm)
FCAW-E71T-1	247,1	23,9	11	1
FCAW-E71T-1	265,8	23,8	10,5	1,7
FCAW-E71T-1	336,2	26,9	13	3,5
FCAW-E71T-1	376,4	31,9	14,5	2,5
FCAW-E71T-1	423	32,9	17	2
<hr/>				
Metal Cord-ER70C6-C	278,4	28,9	9	1,5
Metal Cord-ER70C6-C	304,4	29,9	12,5	3,5
Metal Cord-ER70C6-C	346,2	31,9	15	4
Metal Cord-ER70C6-C	415,6	32,4	16	6,5
Metal Cord-ER70C6-C	450	32,9	15	5,5
<hr/>				
GMAW-ER70S-6	238,7	27	11	3
GMAW-ER70S-6	276,8	28,9	10	3
GMAW-ER70S-6	310,7	30,9	12,5	5
GMAW-ER70S-6	362,9	31,9	13,5	5,5
GMAW-ER70S-6	412	34,9	17	6,5

A figura 5.18 e 5.19 demonstra graficamente o efeito da corrente de soldagem em relação à penetração do cordão de solda, para os arames com bitolas 1,2 e 1,6 mm respectivamente.

Figura 5.18 – Efeito da corrente em relação à penetração do cordão de solda em arames com 1,2 mm de diâmetro.

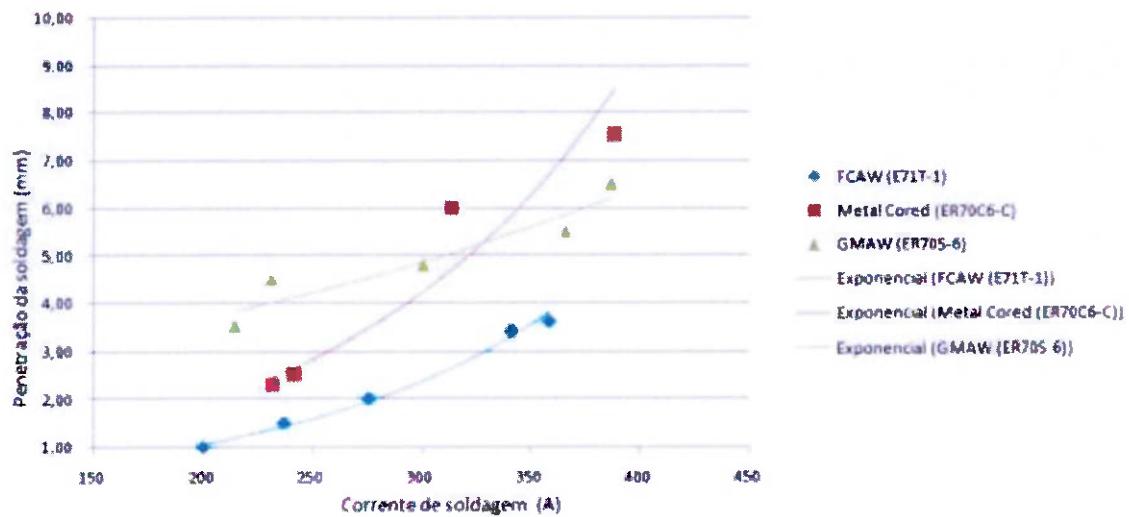
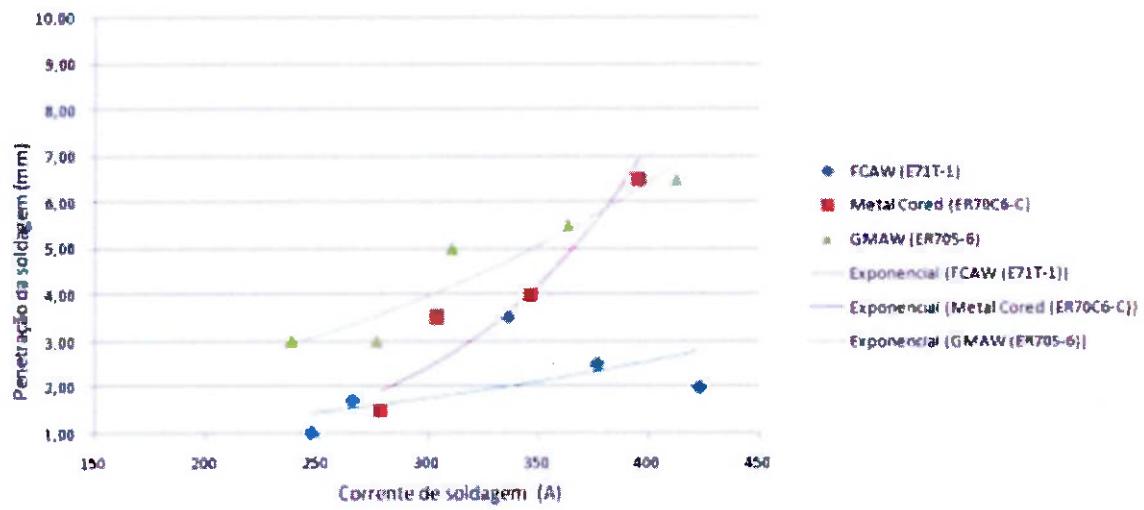


Figura 5.19 – Efeito da corrente em relação à penetração do cordão de solda em arames com 1,6 mm de diâmetro.



5.4 CUSTOS DE SOLDAGEM

O levantamento dos custos de soldagem é fundamental para a conclusão deste trabalho. Após conclusão da realização dos testes, coleta de dados e macrografia, a análise de custos demonstrou-se umas das etapas mais conflitantes para atingir um resultado imparcial, ou seja, muitos materiais disponíveis no mercado de certa forma saem do aspecto técnico e são tendenciosos.

Observou-se que o trabalho em questão corrobora com o estudo realizado por Souza [2013] após elaboração de planilha de custos que o autor elaborou para análise do retorno de investimento como fator de decisão na escolha da alternativa de fabricação de um *pipeshop* em uma refinaria de petróleo.

Após a aquisição dos dados de soldagem, como os parâmetros típicos de cada processo, foi possível quantificar a eficiência de soldagem, fator de operação em um sistema robótico (de 65% a 70%) no qual é possível conhecer a limitação de cada processo quantificando a porcentagem efetiva em que a célula de soldagem está em operação. A taxa de deposição efetiva foi calculada multiplicando a taxa de deposição pelo fator de operação da célula robótica.

O cálculo dos custos de consumíveis de soldagem foi realizado através do preço do quilograma de cada arame eletrodo somado aos custos com o gás de proteção que, no caso em estudo foi utilizo proteção gasosa de 100% CO₂ no valor de R\$ 10,00/kg.

Para o calculo da mão-de-obra num processo robótico, Souza [2013] propõe um ajudante para cada 10 operadores da célula, ou seja, é necessário somar 10% ao valor do salário do operador que em média ganha três salários mínimos. A planilha também inclui o valor dos impostos sobre o preço dos consumíveis.

Por fim, para o cálculo do custo de energia elétrica, além das informações dos parâmetros de soldagem para calcular a potencia em kW consumida, são necessárias também informações do rendimento e fator de potência dos equipamentos. Esse resultado é multiplicado pelo valor cobrado pela concessionária de eletricidade (em torno de R\$0,50 kwh) dividido pela taxa de deposição do processo de soldagem em estudo, obtendo então o custo da energia elétrica em R\$/kg.

Algumas informações necessárias para elaboração dos custos de soldagem como valor de mão de obra e depreciação do equipamento, podem ser padronizadas nesse trabalho por serem realizados no mesmo equipamento e com a mesma vazão de gás de proteção (18 l/m).

De modo geral, esse trabalho procurou elaborar uma planilha na qual seja possível realizar a comparação dos custos de soldagem nos três consumíveis (FCAW-E71T-1, Metal Cord-ER70C6-C e GMAW-ER70S-6) nas seguintes faixas de corrente: 200A, 250A, 300A, 350A, 400A (bitola 1,2mm) e 250A, 300A, 350A, 400A, 450A (bitola 1,6mm).

Tabela 5.5 – Exemplo de planilha comparativa entre os custos dos consumíveis na corrente de 350A e arame na bitola de 1,2mm.

Arame: 1,2 mm	FAIXA DE CORRENTE 4	FCAW Robotizado	GMAW (Metal Cored) Robotizado	GMAW Robotizado
Processo	Corrente de Soldagem (A)	350	350	350
	Tensão de Arco (V)	31,9	32,9	34,9
	Eficiência (%)	88%	96%	96%
	Fator de Operação	65%	65%	65%
	Taxa de Deposição (kg/h)	6,4882	6,0798	5,9545
	Taxa de Deposição Efetiva (kg/h)	4,21733	3,95187	3,870425
Consumíveis de Soldagem	Custo do Consumível (R\$)	R\$ 7,82	R\$ 7,64	R\$ 5,46
	Tipo de Gás de Proteção	100% CO2	100% CO2	100% CO2
	Preço Gás de Proteção (R\$/litro)	R\$ 0,02	R\$ 0,02	R\$ 0,02
	Vazão de Gás de Proteção (l/min)	18	18	18
	Consumo de Gás de Proteção (l/h)	702	702	702
	Custo de Gás de Proteção (R\$/h)	R\$ 16,59	R\$ 16,59	R\$ 16,59
	Custo de Gás de Proteção Efetivo (R\$/kg)	R\$ 3,93	R\$ 4,20	R\$ 4,29
	Custo Total Efetivo dos Consumíveis (R\$/kg)	R\$ 11,75	R\$ 11,84	R\$ 9,74
	Quantidade de Mão-de-obra	1S + 10% A	1S + 10% A	1S + 10% A
	Custo de mão de obra (R\$/kg)	24,44	24,44	24,44
Custo Mão-de-Obra	Custo Efetivo mão-de-obra (R\$/kg)	R\$ 5,80	R\$ 6,18	R\$ 6,31
	Tempo de soldagem (s)	74,3	37,7	74,2
Custo de Energia	Potência Consumida da Rede kWh	13,616	14,043	14,896
	Potência Reativa da Rede kVArh	0	0	0
	Custo Efetivo da Energia (R\$/kg)	R\$ 1,61	R\$ 1,78	R\$ 1,92
Custo total de Soldagem	Consumíveis + mão-de-obra + Energia R\$/kg	R\$ 19,16	R\$ 19,80	R\$ 17,98

Tabela 5.6 – Exemplo de planilha comparativa entre os custos dos consumíveis na corrente de 450A e arame na bitola de 1,6mm.

Arame: 1,6 mm	FAIXA DE CORRENTE 5	FCAW Robotizado	GMAW (Metal Cored) Robotizado	GMAW Robotizado
Processo	Corrente de Soldagem (A)	450	450	450
	Tensão de Arco (V)	32,9	32,9	34,9
	Eficiência (%)	88%	80%	95%
	Fator de Operação	65%	65%	65%
	Taxa de Deposição (kg/h)	7,6993	7,9591	6,8344
	Taxa de Deposição Efetiva (kg/h)	5,004545	5,173415	4,44236
Consumíveis de Soldagem	Custo do Consumível (R\$)	R\$ 7,64	R\$ 7,46	R\$ 5,27
	Tipo de Gás de Proteção	100% CO2	100% CO2	100% CO2
	Preço Gás de Proteção (R\$/litro)	R\$ 0,02	R\$ 0,02	R\$ 0,02
	Vazão de Gás de Proteção (l/min)	18	18	18
	Consumo de Gás de Proteção (l/h)	702	702	702
	Custo de Gás de Proteção (R\$/h)	R\$ 16,59	R\$ 16,59	R\$ 16,59
	Custo de Gás de Proteção Efetivo (R\$/kg)	R\$ 3,31	R\$ 3,21	R\$ 3,73
	Custo Total Efetivo dos Consumíveis (R\$/kg)	R\$ 10,95	R\$ 10,66	R\$ 9,01
	Quantidade de Mão-de-obra	1S + 10% A	1S + 10% A	1S + 10% A
Custo Mão-de-Obra	Custo de mão de obra (R\$/kg)	24,44	24,44	24,44
	Custo Efetivo mão-de-obra (R\$/kg)	R\$ 4,88	R\$ 4,72	R\$ 5,50
Custo de Energia	Tempo de soldagem (s)	74,3	62,3	74,2
	Potência Consumida da Rede kWh	18,055	18,055	19,152
	Potência Reativa da Rede kVArh	0	0	0
	Custo Efetivo da Energia (R\$/kg)	R\$ 1,80	R\$ 1,74	R\$ 2,16
Custo total de Soldagem	Consumíveis + mão-de-obra + Energia R\$/kg	R\$ 17,64	R\$ 17,13	R\$ 16,66

A tabela a seguir apresenta os custos de soldagem por kg de metal depositado nos três consumíveis com suas respectivas faixas de corrente.

Tabela 5.7 – Resumo dos custos por kg de metal depositado.

Consumível		Tensão	Corrente	Custo
FCAW(E71T-1)	1,2	24,9	200	31,45
FCAW(E71T-1)	1,2	25,9	250	26,13
FCAW(E71T-1)	1,2	27,9	300	22,18
FCAW(E71T-1)	1,2	31,9	350	19,16
FCAW(E71T-1)	1,2	32,9	400	16,68
<hr/>				
Metal Cord (ER70C6-C)	1,2	29,9	200	37,16
Metal Cord (ER70C6-C)	1,2	29,9	250	29,52
Metal Cord (ER70C6-C)	1,2	30,9	300	23,97
Metal Cord (ER70C6-C)	1,2	31,9	350	19,80
Metal Cord (ER70C6-C)	1,2	33,9	400	16,70
<hr/>				
GMAW(ER70S-6)	1,2	30,1	200	31,77
GMAW(ER70S-6)	1,2	29,9	250	25,86
GMAW(ER70S-6)	1,2	31,9	300	21,39
GMAW(ER70S-6)	1,2	34,9	350	17,98
GMAW(ER70S-6)	1,2	35,9	400	15,23
<hr/>				
FCAW (E71T-1)	1,6	23,9	250	30,54
FCAW (E71T-1)	1,6	23,8	300	26,18
FCAW (E71T-1)	1,6	26,9	350	22,61
FCAW (E71T-1)	1,6	31,9	400	19,98
FCAW (E71T-1)	1,6	32,9	450	17,64
<hr/>				
Metal Cord (ER70C6-C)	1,6	28,9	250	32,30
Metal Cord (ER70C6-C)	1,6	29,9	300	27,06
Metal Cord (ER70C6-C)	1,6	31,9	350	23,01
Metal Cord (ER70C6-C)	1,6	32,4	400	19,72
Metal Cord (ER70C6-C)	1,6	32,9	450	17,13
<hr/>				
GMAW(ER70S-6)	1,6	27	250	29,77
GMAW(ER70S-6)	1,6	28,9	300	25,29
GMAW(ER70S-6)	1,6	30,9	350	21,92
GMAW(ER70S-6)	1,6	31,9	400	18,96
GMAW(ER70S-6)	1,6	34,9	450	16,66

Através da tabela obtida acima, foi possível elaborar um gráfico comparativo do custo de soldagem em função da corrente de soldagem.

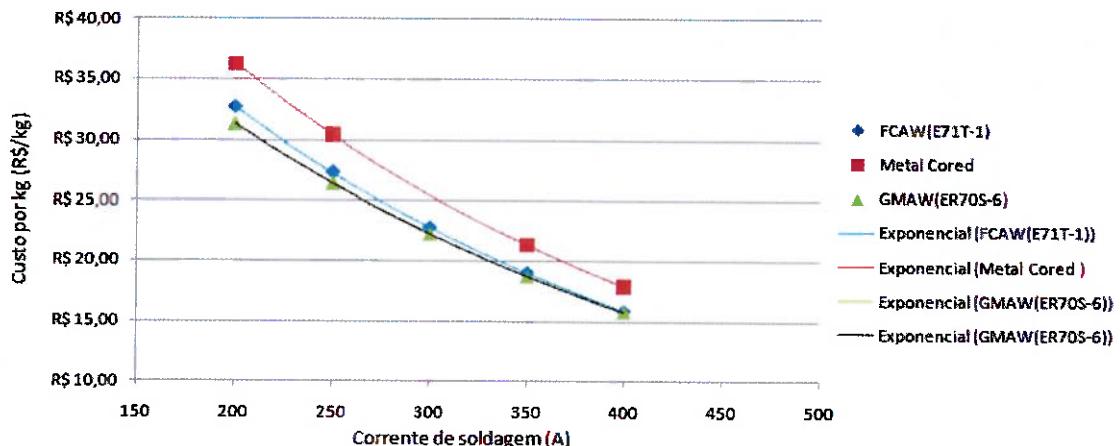


Figura 5.20 – Custo de soldagem em função da corrente de soldagem para arames com bitola de 1,2 mm.

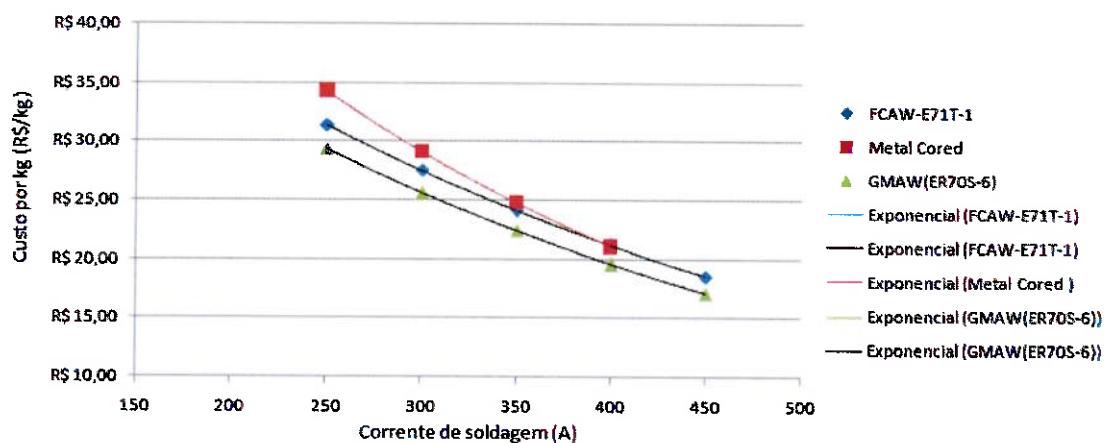


Figura 5.21 – Custo de soldagem em função da corrente de soldagem para arames com bitola de 1,6 mm.

6. CONCLUSÕES.

Os três consumíveis em estudo apresentaram desempenhos satisfatórios quanto à taxa de deposição e penetração. Porém o trabalho destacou que alguns processos de soldagem quando submetidos à uma determinada corrente de soldagem apresentaram valores expressivos de produtividade.

1. Pode-se concluir que à medida que aumenta a corrente de soldagem, aumenta-se a taxa de deposição, penetração e diminuição dos custos de soldagem.
2. De todos os experimentos realizados o processo Metal Cored, arame ER70C6-C de 1,2mm obteve maior taxa de deposição em corrente de 380A: cerca de 7,257 kg/h com uma eficiência de soldagem de 97% sem ocorrência de respingos com largura do cordão de solda nessas condições foi de 12,5 mm com 7,5 mm de penetração.
3. As soldas realizadas com o processo FCAW arame E71T-1 apresentaram baixas quantidades de respingos e formação de escória, porém os resultados alcançados em relação à taxa deposição foram levemente inferiores ao processo arame sólido (GMAW) no arame de bitola 1,2 mm.

4. O consumível *Metal Cored* ER70C6-C apresentou melhores taxas de deposição e penetração tanto em relação ao arame sólido (ER70S-6) quanto ao arame fluxado (E71T-1), além de não ter apresentado formação de escórias, e baixíssimas quantidades de respingos, apenas algumas ilhas de sílica.
5. Embora o consumível arame sólido (ER70S-6) tenha apresentado bom desempenho em relação à taxa de deposição, penetração e baixo custo, o mesmo gerou muito respingos nos corpos de provas, fator que gera aumento nos custos de produção.
6. Em relação aos custos de soldagem os três cordões de solda com menor custo de metal depositado foram : Metal Cored, arame 1,2mm, 400A com custo de R\$ 16,70, Arame Sólido, arame 1,6mm, 450A com custo de R\$ 16,66 e Arame sólido, arame 1,2mm, 400A com custo de R\$ 15,23, porém o consumível *Metal Cored* na faixa de 400A bitola de 1,2mm apresentou excepcional acabamento do cordão, excelente penetração e largura em com baixo custo.
7. Embora o consumível *Metal Cored* (ER70C6-C) tenha apresentado excelentes qualidades como taxa de deposição, penetração, baixo custo de soldagem e acabamento do cordão de solda, por outro lado necessita trabalhar em uma faixa restrita de corrente de soldagem para obter bom desempenho, (entre 350-400A).

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.

Tendo em vista à produtividade alcançada com o consumível *Metal Cored* e sua qualidade na soldagem do aço A36 com proteção 100% CO₂, pretende-se em um trabalho futuro fazer à análise comparativa entre os consumíveis arame sólido, arame tubular fluxado e arame tubular com núcleo metálico para avaliar a qualidade e produtividade de uma junta soldada tendo como metal de base aços baixa liga alta resistência. A proposta consiste em avaliar uma junta soldada em aços baixa liga alta resistência utilizados na fabricação de plataformas de petróleo. Será necessária a análise micrográfica bem como testes de ensaios que cumprem as normas reguladoras. Pretendem-se com esse estudo futuro contribuir com a produtividade e qualidade na fabricação envolvendo casos de pressão.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELO, F. D. H. Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgar Blücher, 1995. 494 p.
2. FUNDAÇÃO BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DE SOLDAGEM, Apostila do Curso de Inspetor de Soldagem, Rio de Janeiro, 2002.
3. GIMENES, Luiz Jr., Apostila de Processo de soldagem MIG/MAG, São Paulo: Infosolda, 2000.20p.
4. LINCON, Eletric Company, The procedure hand book of arc welding, 12 Edição, 1973.
5. SETAL, FELS, Planilha de custo de processo de soldagem por quilo de metal depositado, Niterói, 1999.
6. TELLES, Pedro C. S. Vasos de Pressão, 2 Ed., Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1996. 158 p..
7. MODONESI, P. J., MARQUES, P. V. Soldagem I – Introdução aos processos de soldagem. Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.
8. POEPCKE, José Saturnino, Soldagem. Editora SENAI-SP, São Paulo, 2013.
9. BAUNÉ, E., BONNET, C. and LIU S. – Reconsidering the basicity of a FCAW Consumable. Part 1 – Solidified slag composition of a FCAW Consumable as basicity indicator”, Welding Journal , march, 2000, pp. 57s-64s
10. RODRIGUES, L. O., PAIVA, A.P. E COSTA,S.C. Otimização do processo de soldagem com eletrodo tubular através da análise da geometria do cordão de solda. Soldagem & Inspeção, v.13, n. 2, p. 118-127, 2008

11. FORTES, C. Apostila Arames Tubulares, ESAB BR, 2004, 103p.
12. BRACARENSE, A.Q., MODONESI, P.J., MARQUES, P.V. Soldagem – Fundamentos e tecnologia. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009. 362 p.
13. BRACARENSE, A.Q., Processo de Soldagem por Arame Tubular. Apostila UFMG. Belo Horizonte, 2000, PP. 88-104.
14. MARQUES, P.V. Tecnologia da Soldagem, ESAB BR, 1991, Belo Horizonte
15. FORTES, C. Metalurgia da soldagem, ESAB BR, 2004, 94p.
16. MODONESI, P. J., NIXON, J. H. *Arc instability phenomena in GMAW. Welding Journal/v.73*, p. 219-224, 1994.
17. MODENESI, P. J., Soldagem I – Introdução à Física do Arco Elétrico. Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.
18. FORTES, C. Soldagem Mig Mag, ESAB BR, 2005, 133p.
19. ARAÚJO, W.R. (2004), "Comparação entre Soldagem Robotizada com Arame Sólido e Metal Cores – A Ocorrência do Finger", Dissertação de Mestrado, UFMG, 79p.
20. NASCIMENTO, A. S. do, "Aspectos operacionais e metalúrgicos da soldagem com arame metal cored". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará 2005.
21. CORTINA, P. . *Solid Wire VS Metal Cored Wire: which should be used to optimize the Robotic Process?*. Welding Journal, May, 2005.
22. FERREE, S. E. New Generation of Cored Wires Creates Less Fume and Spatter. **Welding Journal**, December, 1995.

23. FRENCH, I. E.; BOSWORTH, M. R. A Comparison of Pulsed and Conventional Welding With Basic Flux Cored and Metal Cored Welding Wires. **Welding Journal**, June, 1995
24. BRITO, J. D.; PARANHOS, R. Como Determinar os Custos da Soldagem, Campos dos Goytacazes – RJ, Ronaldo Paranhos, 2005.
25. SOUZA, P. C. R. D. Análise da transferência metálica na soldagem com arame tubular. São Paulo, 1997. 129p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
26. MOREIRA, Daniel Augusto. Administração da Produção e Operações. São Paulo, Pioneira Thonson Learning, 2002.
27. DILTHEY, U. 1973. *Metal transfer during CO₂ welding*. IIW DOC 212-273-73.
28. ROTHSCHILD, G., MULLER, A. and GREENE, W., *Characteristics of inert-gas-shielded metal-arcs*. *Welding journal* 30(8)717-727.
29. SOUZA, A. C. , A Análise do retorno de investimento como fator de decisão na escolha da alternativa de fabricação de um pipeshop em uma refinaria de petróleo. FIA , Universidade de São Paulo, 2013.