



CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A SOLDAGEM COM ARAME
SÓLIDO E TUBULAR EM JUNTA TIPO FILETE**

Vinícius Pereira de Souza

Horizontina - RS

2017

Vinícius Pereira de Souza

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A SOLDAGEM COM ARAME
SÓLIDO E TUBULAR EM JUNTA TIPO FILETE**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica na Faculdade Horizontina, sob a orientação do Prof. Dr. Geovane Webler.

Horizontina - RS

2017

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTALINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso

**“ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A SOLDAGEM COM ARAME
SÓLIDO E TUBULAR EM JUNTA TIPO FILETE”**

Elaborado por:

Vinícius Pereira de Souza

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

Aprovado em: 21/11/2017
Pela Comissão Examinadora

Prof. Dr. Geovane Webler
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador

Prof. Me. Eloir Fernandes
FAHOR – Faculdade Horizontalina

Prof. Me. Marlene Bieger
FAHOR – Faculdade Horizontalina

Horizontalina - RS

2017

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Fernando Moroni de Souza e Janete Pereira de Souza pelo apoio incondicional durante todos os momentos.

AGRADECIMENTO

Aos meus pais, e à minha irmã Fernanda Pereira de Souza pelo total suporte durante esta importante jornada da minha vida.

À minha eterna avó Esmeralda, pelas orientações e ensinamentos.

À toda minha família, que sempre me incentivou durante estes anos da minha formação, em especial aos tios José Luiz Konrath e Adriana Moroni de Souza Konrath pelo apoio irrestrito.

À empresa Bruning Tecnometal Ltda., por oportunizar a condição de realizar este trabalho, assim como todos os colegas envolvidos.

Ao meu orientador, Dr. Geovane Webler pelas dicas e grande prestabilidade em me ajudar nesta etapa tão importante da minha formação acadêmica.

MUITO OBRIGADO!

“A mente que se abre a uma nova ideia, jamais voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

RESUMO

No decorrer das últimas décadas, ocorreram importantes avanços tecnológicos, no que se refere aos processos de fabricação, sendo que a soldagem dos metais e suas ligas, foco principal deste estudo, acompanhou muito próximo este crescimento. Com novas tecnologias agregadas aos processos já conhecidos de soldagem, cabe aos executores definir qual a melhor forma de aplicação, assim como a técnica empregada. Novos materiais chegam ao mercado a cada dia, mas muitas vezes não se tem a percepção real de quanto que uma nova alternativa pode ou não agregar em um processo produtivo. Saber qual consumível utilizar, por exemplo, sem ter nenhum tipo de problema, e com ganho de produtividade é de fundamental importância na busca dos objetivos desejados. Com isso, este estudo mostrou comparativamente se o arame de soldagem Metal Cored apresenta vantagens significativas em termos de produtividade em relação ao arame sólido, ambos de diâmetro 1.6 mm. Foram soldadas 9 amostras, sendo 3 amostras do arame sólido, 3 amostras do arame Metal Cored e mais 3 amostras do arame Metal Cored no padrão otimizado (maior velocidade de soldagem), pelos processos de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) e FCAW (*Flux Cored Arc Welding*). Foram mantidos os mesmos parâmetros de soldagem, dando a certeza que a comparabilidade fosse idêntica em todos os testes. Os resultados mostraram uma condição mais favorável ao uso do arame Metal Cored, considerando o Aporte Térmico, Taxa de Deposição e Rendimento Depositado como quesitos principais para a comparação, assim como a qualidade da junta soldada.

Palavras-chave: Processos, Soldagem, Arame.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma dos tipos de processos de fabricação por junção.....	18
Figura 2 - Classificação dos processos de soldagem a partir da união.....	20
Figura 3 - Equipamento de soldagem processo - GMAW/FCAW.....	20
Figura 4 - Soldagem GMAW.....	21
Figura 5 - Soldagem FCAW.....	23
Figura 6 - Seção transversal de um arame tubular.....	24
Figura 7 - Especificações AWS para consumíveis para MIG/MAG.....	26
Figura 8 - Processo de fabricação de arames tubulares.....	26
Figura 9 - Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência para a soldagem GMAW.....	27
Figura 10 - Representação da distância contato peça e da projeção do arame (<i>stickout</i>).....	29
Figura 11 - Perfil de cordões de solda feitos com diferentes gases.....	30
Figura 12 - Influência da velocidade de alimentação do arame.....	30
Figura 13 - Modos de transferência do metal.....	32
Figura 14 - Fluxograma das etapas dos experimentos.....	37
Figura 15 - Corpo de prova.....	41
Figura 16 - Dimensões do corpo de prova.....	42
Figura 17 – Manipulador e Robô de Solda.....	43
Figura 18 – Roldana com perfil liso	44
Figura 19 – Roldana recartilhada.....	44
Figura 20: Fonte de soldagem TPS 500 digital e controlador remoto digital.....	45

Figura 21 – Software Fronius Xplorer - processamento dos dados de soldagem.....	46
Figura 22 – Dispositivo de soldagem.....	46
Figura 23 – Balança para a pesagem dos corpos de prova.....	47
Figura 24 – Juntas soldadas em tipo filete.....	49
Figura 25 – Esboço de corte.....	51
Figura 26 – Serra fita em processo de corte da amostra.....	51
Figura 27 – Amostra após ser lixada e polida.....	52
Figura 28 – Microscópio Dino Lite - AM4115ZTL.....	52
Figura 29 – Amostras dispostas lado a lado para inspeção visual.....	54
Figura 30 – Junta soldada com arame tubular e sólido.....	55
Figura 31 – Macrografia de junta soldada com arame sólido.....	56
Figura 32 – Macrografia de junta soldada com arame tubular.....	56
Figura 33 – Resultados dos testes referentes ao aporte térmico.....	58
Figura 34 – Resultados dos testes referentes a taxa de deposição.....	59
Figura 35 – Resultados dos testes referentes ao rendimento depositado.....	60
Figura 36 – Resultados dos testes referentes ao tempo de soldagem.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações AWS de materiais de adição para soldagem MIG/MAG.....	25
Tabela 2 – Eficiência térmica para cada processo de soldagem.....	33
Tabela 3 – Vantagens, limitações e aplicações da soldagem GMAW.....	36
Tabela 4 – Vantagens, limitações e aplicações da soldagem FCAW.....	36
Tabela 5 – Propriedades químicas – Arame ER70S-6.....	38
Tabela 6 – Propriedades mecânicas – Arame ER70S-6.....	39
Tabela 7 – Composição química – Arame Metal Cored.....	39
Tabela 8 – Propriedades mecânicas – Arame Metal Cored.....	40
Tabela 9 – Composição química e propriedades mecânicas.....	41
Tabela 10 – Parâmetros iniciais do processo.....	47
Tabela 11 – Planejamento e análise dos experimentos.....	48
Tabela 12 – Aporte térmico para as diferentes etapas dos testes.....	57
Tabela 13 – Taxa de deposição para diferentes etapas dos testes.....	58
Tabela 14 – Rendimento depositado para diferentes etapas dos testes.....	59

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 TEMA	15
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	15
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA	16
1.4 HIPÓTESES.....	16
1.5 JUSTIFICATIVA	16
1.6 OBJETIVOS	16
1.6.1 Objetivo Geral	177
1.6.2 Objetivos Específicos	177
2 REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	17
2.2 SOLDAGEM	18
2.3 PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW (GAS METAL ARC WELDING)	21
2.4 PROCESSO DE SOLDAGEM FCAW (FLUX CORED ARC WELDING).....	22
2.5 ARAMES PARA SOLDAGEM	25
2.6 VARIÁVEIS DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM GMAW E FCAW	27
2.6.1 Tensão e Corrente de Soldagem	27
2.6.2 Velocidade de Soldagem.....	28
2.6.3 Comprimento do eletrodo	288
2.6.4 Proteção Gasosa.....	29
2.6.5 Velocidade de Alimentação do Arame	300
2.7 TIPOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA.....	311
2.8 APORTE TÉRMICO NA SOLDAGEM.....	322
2.9 TAXA DE DEPOSIÇÃO DO ARAME.....	344
2.10 RENDIMENTO DEPOSITADO.....	355

2.11 VANTAGENS E DESVANTAGENS NO PROCESSO GMAW E FCAW.....	366
3 METODOLOGIA.....	37
3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS.....	37
3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS.....	38
3.2.1 MATERIAIS.....	38
3.2.1.1 Consumíveis – Metal de adição e Gás de proteção.....	38
3.2.1.2 Metal base.....	400
3.2.1.3 Corpos de prova.....	411
3.2 EQUIPAMENTOS DE SOLDAGEM.....	422
3.2.1 Robô de solda.....	422
3.2.2 Fonte de soldagem e RCU.....	444
3.2.3 Fronius Xplorer – Software para obtenção de dados relativos a soldagem....	455
3.2.4 Base de soldagem.....	466
3.2.5. Balança convencional – Determinação da massa dos corpos de prova.....	47
3.3 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS.....	47
3.4 PROCEDIMENTOS PARA AVALIAÇÕES DAS SOLDAGENS.....	49
3.4.1 Inspeção visual.....	49
3.4.2 Rendimento depositado.....	49
3.4.3 Taxa de deposição.....	50
3.4.4 Aporte térmico.....	500
3.4.5 Plano de corte das amostras.....	500
3.4.6 Caracterização macroestrutural.....	522
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	544
4.1 Inspeção visual das amostras soldadas.....	544
4.2 Ensaio macrográfico das juntas soldadas.....	555
4.3 Aporte térmico.....	5757
4.4 Taxa de deposição.....	58

4.5 Rendimento depositado.....	59
4.6 Tempo de processo de soldagem	600
CONCLUSÃO.....	622
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	633

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, a soldagem vem se desenvolvendo nas mais variadas formas e apresentando constantemente melhorias em relação a si mesma e aos demais processos de fabricação, no que tange a união dos materiais. Tem relação direta com a indústria desde meados do século XIX, e parcela significativa de contribuição com os avanços no mundo globalizado atual, sobretudo no que diz respeito aos bens de consumo, sendo considerada essencial e até mesmo insubstituível.

Existem atualmente diversos tipos de processos de soldagem, sendo que a escolha do melhor método está atrelada ao tipo de material que será soldado, sobretudo às propriedades químicas e mecânicas, e também sua forma de execução, podendo ser manual ou robotizada. Os processos robotizados de soldagem ganharam a indústria mundial nas últimas décadas, especialmente por tornarem a atividade mais rápida e eficaz, acarretando assim de forma direta em um ganho de produtividade incomparável. No entanto, as técnicas de soldagem executadas manualmente ainda ocupam lugar de destaque, pois usufruir de avançada tecnologia na maioria das vezes exige certa demanda de recursos financeiros, que grande parte dos pequenos e médios empresários não dispõe. Além do mais, este tipo de operação apresenta atributos que os processos robotizados em determinadas situações não contemplam, como por exemplo soldar em lugares de acesso limitado em estruturas mecânicas complexas.

A soldagem tem como principal característica unir os metais e suas ligas através do calor e da eletricidade. Para tanto, os consumíveis apresentam papel fundamental nesta tarefa, em especial os arames de solda. Existem diversos tipos de arame, sendo que a escolha do mais adequado deve ser avaliada previamente, levando primeiramente em consideração qual será a sua aplicação, dentro da atividade. Os Arames Sólidos são a grande maioria dentre todos os modelos, e representam um maior mercado. Contudo, nos últimos anos, os arames Metal Cored, ou popularmente conhecidos como Arames Tubulares surgiram com a proposta de revolucionar o comércio de consumíveis de soldagem, por apresentarem singularidade quanto a um ganho maior de produtividade.

Todavia, sua forma de fabricação o tornou um produto caro por via de regra, sendo que a melhor maneira de identificar se a aplicação deste é rentável ou não, em termos de custos de manufatura, torna necessário elaborar um estudo teórico e prático detalhado.

Com o objetivo de identificar se o Arame Tubular apresenta vantagem de produtividade em relação ao Arame Sólido, este estudo foi montado seguindo uma série de requisitos, para que pudesse se estabelecer uma condição de comparabilidade entre ambos. Determinou-se que os diâmetros dos arames testados seriam de 1.6 mm, assim como a forma de execução da soldagem seria através dos processos GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) e FCAW (*Flux Cored Arc Welding*), robotizados. A junta soldada será realizada no formato de filete ou ângulo em passe único de soldagem, com parâmetros de soldagem idênticos em todos os testes. Foram desconsiderados os custos diretos de fabricação, e realizada apenas uma avaliação superficial, no tocante a valor de capital agregado.

Em linhas gerais, os testes serão realizados utilizando uma metodologia prática e intuitiva, para avaliar nos quesitos Rendimento Depositado, Taxa de Deposição e Aporte Térmico, qual tipo de arame apresenta vantagens em qualidade da junta soldada e em produtividade.

1.1 TEMA

Estudo comparativo e avaliativo entre os processos de soldagem com Arame Sólido e Tubular de 1.6 mm, em junta soldada na forma ângulo ou filete.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O tema delimita-se em avaliar comparativamente a soldagem com Arame Sólido e tubular em junta filete, coletando dados para que estes sirvam de parâmetros na identificação de qual dos dois processos é o mais vantajoso, considerando o Aporte Térmico, a Taxa de Deposição, e o Rendimento Depositado de ambos, assim como a qualidade da junta soldada de um modo geral.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

Existem diversos tipos de consumíveis no mercado, sendo que muitas vezes encontrar o modelo que apresenta as melhores condições de empregabilidade exige avaliação criteriosa. Com isso, este estudo tem por objetivo, identificar qual o tipo de arame testado apresenta maior vantagem produtiva nos parâmetros de Aporte Térmico, Taxa de Deposição, e Rendimento Depositado, assim como a qualidade da junta soldada.

1.4 HIPÓTESES

Em geral, os Arames Sólidos apresentam ainda maiores vantagens em relação aos Arames Tubulares, principalmente no que diz respeito a facilidade de aquisição, pois são ofertados pela grande maioria dos fornecedores a um custo menor. Isso se deve principalmente pois, seu processo de fabricação é menos complexo quando comparado com o Arame Metal Cored. Chama a atenção as respostas positivas que o arame Metal Cored reporta quando em operação, avaliado assim por diversos autores e pessoas ligadas à indústria. Cabe a este estudo identificar qual dos dois tipos de arames é o mais indicado a ser utilizado dentro das condições estabelecidas nos testes de soldagem. Uma avaliação definitiva só será possível após um novo estudo focado nos custos de processo.

1.5 JUSTIFICATIVA

Este estudo tem como ponto mais relevante maximizar a quantidade de informações a respeito da empregabilidade do arame Metal Cored na área de soldagem, comparando-o com o Arame Sólido, e definindo através das informações obtidas, qual é o tipo de arame mais indicado para os parâmetros de soldagem apresentados.

1.6 OBJETIVOS

Desenvolver um estudo comparativo entre a soldagem com Arame Sólido e Tubular, ambos com diâmetro 1.6 mm, através de testes experimentais de solda em junta de ângulo, ou filete.

1.6.1 Objetivo Geral

Comparar os dados obtidos nos testes experimentais práticos das juntas soldadas em formato de ângulo, e analisar com embasamento em bibliografias qual tipo de arame tem seu uso mais indicado para esse modelo de soldagem.

1.6.2 Objetivos Específicos

Após testes devidamente realizados e finalizados, determinar, qual dos dois tipos de arames apresenta maior vantagem de empregabilidade no que diz respeito ao Rendimento Depositado, Taxa de Deposição e Aporte Térmico, levando em consideração os conhecimentos na área de soldagem, assim como pesquisas em bibliografias relacionadas ao assunto.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

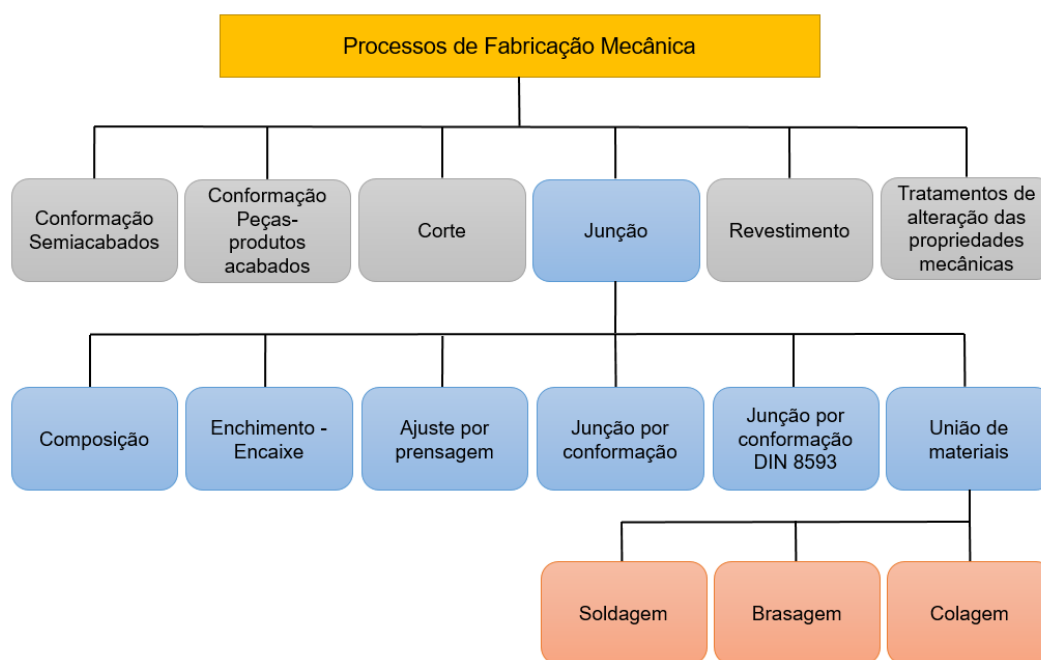
Os processos de fabricação conhecidos nos dias atuais surgiram da necessidade do homem em encontrar alternativas para a produção de ferramentas, máquinas e equipamentos usados em suas atividades diárias. Com passar dos anos, foram desenvolvidos diversos processos e técnicas de fabricação, com o intuito de somar aos já existentes ou substituir os obsoletos. Sua evolução, corrobora sobretudo com o fato de o homem moderno estar em busca permanente de soluções viáveis e rápidas para suas atividades produtivas.

Os processos de fabricação estão intimamente relacionados ao tipo de material a que serão aplicados, pois causam alteração nas propriedades, e na geometria, desde a matéria prima até o produto final. Para a fabricação de produtos metálicos são usados processos que visam dar forma (geometria, dimensões, acabamento superficial) ao metal puro ou liga metálica com as especificações estabelecidas para o produto, e também conferir a este o conjunto de propriedades (resistência mecânica, dureza, resistência ao desgaste, resistência à corrosão, condutividade elétrica, densidade etc.) exigido para o seu bom desempenho (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013).

Para este estudo, o grupo de processo de fabricação de maior interesse, é o processo denominado Junção. Este por sua vez, subdivide-se em seis grupos distintos, no qual o grupo “União de Materiais” está inserido, e deriva-se dando origem a três novos grupos de grande importância: a Soldagem a Brasagem e a Colagem. Estas informações, podem ser visualizadas em forma de fluxograma na Figura 1.

Para tanto, a soldagem, foco principal deste trabalho, tem posição de destaque dentre as demais, e é considerada um processo de junção inalterável. Na mesma linha, Batalha (2003) defende que Junção é a ligação permanente ou uma colocação em contato de duas ou mais peças com determinada forma geométrica ou até mesmo de peças com material sem forma definida, em um processo no qual a composição local é alterada e misturada como um todo.

Figura 1: Fluxograma dos tipos de processos de fabricação por junção.



Fonte: Adaptado de Batalha (2003, p. 4).

2.2 SOLDAGEM

Por apresentar grande emprego e envolver volume considerável de atividades, a soldagem tem posição de destaque entre os processos de união de materiais.

Com ela, a união dos metais e suas ligas é realizada através da fusão dos mesmos em contato, através da fusão de ambos e adição de outro material fundido, ou ainda por simples contato dos mesmos. Em suma, torna as partes soldadas uma só unidade, sendo que a junta soldada pode ter resistência mecânica superior ao metal de base.

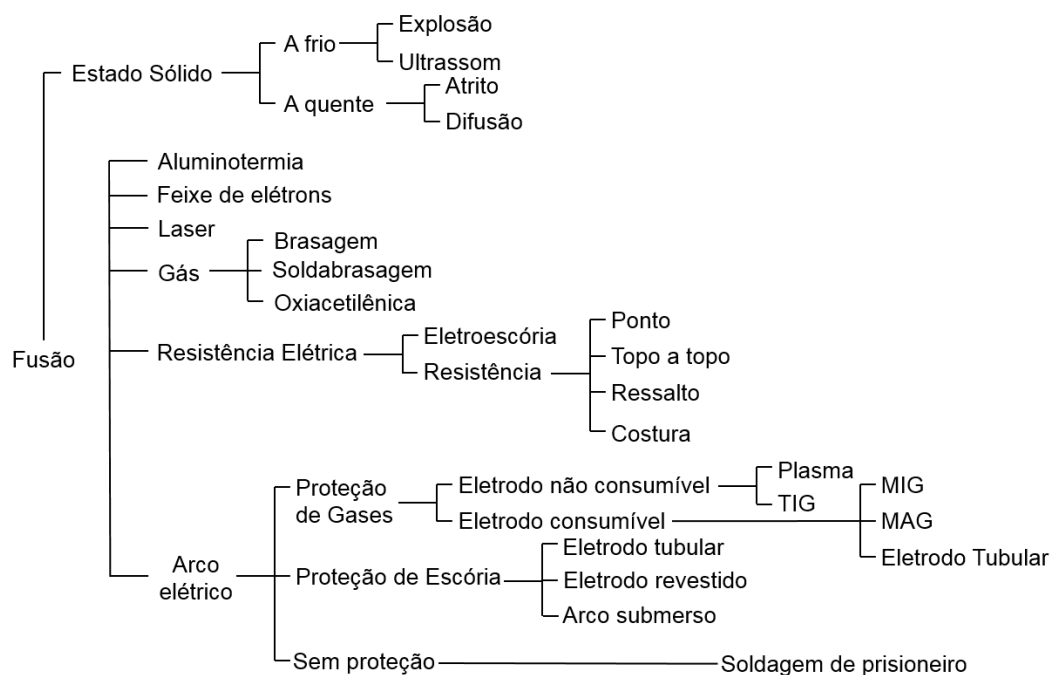
A soldagem apresenta grande versatilidade no que diz respeito a sua empregabilidade e custos de fabricação, além de conferir excelentes propriedades mecânicas às uniões metálicas. Segundo Kuntz (2016), atualmente através do emprego de técnicas modernas, muitos processos de soldagem ou variações destes são usados para deposição de material sobre uma superfície, visando a recuperação de peças desgastadas ou para a formação de um revestimento com características especiais. Em linhas gerais, a soldagem é um conjunto de processos de manufatura pelos quais duas partes metálicas são unidas permanentemente pela “coalescência” da interface de contato, que é induzida pela combinação de temperatura, pressão e condições metalúrgicas (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013).

Segundo Machado (1996), existem três grandes grupos de processos dedicados à união dos materiais, sendo eles, a Soldagem, a Brasagem e a Solda Branda, além dos Adesivos, o Corte térmico e a Pulverização Térmica. A Figura 2 ilustra a classificação dos processos de soldagem a partir da união, fazendo referência a fusão com arco elétrico, onde a soldagem MIG/MAG e Eletrodo Tubular estão inseridos e são objetos deste trabalho.

Os processos de soldagem por arco elétrico com gás de proteção, mais conhecidos como GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) e FCAW (*Flux Cored Arc Welding*), tem como características principais utilizar o aquecimento e a fusão no processo de união dos materiais aos quais forem submetidos.

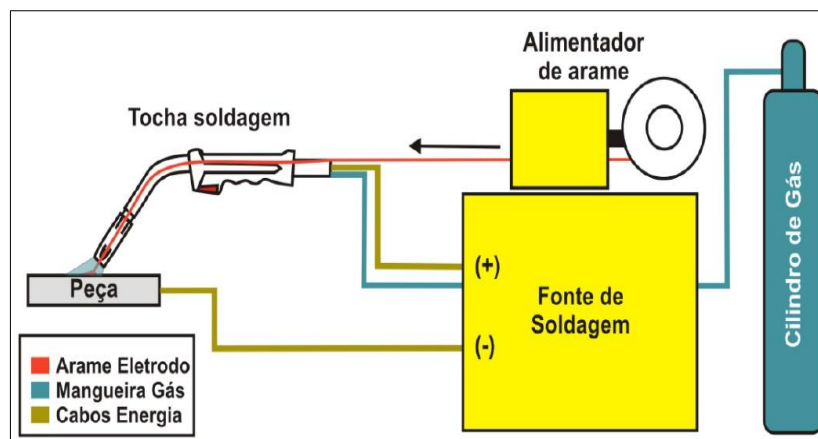
Para que a fusão ocorra e a união se estabeleça de fato, com a formação da junta soldada, o processo deve ocorrer após formar um arco elétrico entre um arame nu, continuamente alimentado e o material a ser soldado. A poça de fusão, deve manter-se protegida, ou seja, é necessário que esta seja envolta por um gás ativo ou inerte que flui pelo bocal, concentricamente com o arame. A soldagem pode ser semiautomática ou automática.

Figura 2: Classificação dos processos de soldagem a partir da união.



Fonte: Adaptado de Wainer (2004, p. 3).

Figura 3: Desenho de um equipamento de soldagem para processo GMAW/FCAW.



Fonte: Junior; Cabral (2008, p. 11).

Este trabalho será desenvolvido com auxílio de um equipamento com os mesmos princípios do já esboçado na Figura 3, porém automatizado. Ainda sobre os equipamentos de soldagem, estes são evidenciados no meio industrial por apresentarem grande capacidade produtiva, assegurada principalmente pela alta densidade de corrente, o que garante alta taxa de fusão, alto fator de trabalho e automatização do processo (SOUZA, 2011).

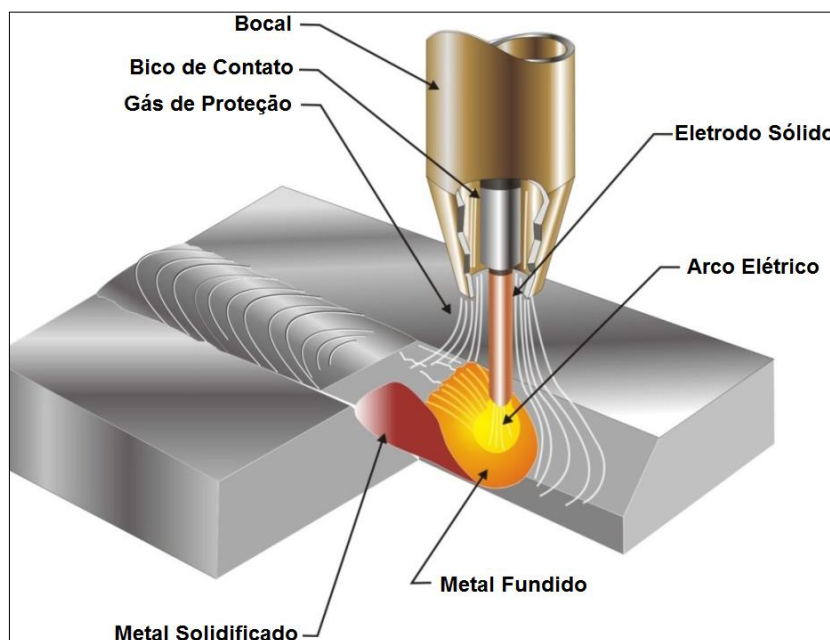
O que difere o processo GMAW do processo FCAW é o tipo de consumível. Enquanto o primeiro utiliza arame maciço, o segundo utiliza arame tubular, com um composto interno rico em material metálico. Com isso, vem à tona questões que envolvem qualidade, produtividade e operacionalidade, como meios comparativos entre ambos, e que são sobretudo objeto principal deste estudo.

2.3 PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW (GAS METAL ARC WELDING)

O processo de soldagem MIG/MAG (Metal Inert Gas / Metal Active Gas - também conhecido como GMAW (Gas Metal Arc Welding)) é um processo que se baseia na fonte de calor de um arco elétrico, mantido entre a extremidade de um arame no consumível, alimentado continuamente, e a peça a soldar. A proteção da região da solda é realizada por uma atmosfera protetora de gás inerte (Argônio (Ar) e Hélio (He)) ou um gás ativo (CO₂ ou mistura O₂ e N₂) (SCOTTI; PANOMAREV, 2008).

Este modo de soldagem, pode ser utilizado com gás ativo ou gás inerte, dependendo de qual tipo de trabalho será desenvolvido. De um modo geral, o processo GMAW apresenta características similares ao esboçado na Figura 4.

Figura 4: Soldagem GMAW.



Fonte: Junior; Cabral (2008, p. 11).

Dentre outras variantes, a soldagem neste tipo de processo apresenta excelente estabilidade do arco elétrico, tendo por diferencial o fato de poder soldar em diversas posições, formando reduzida quantidade de escória. Isto só é possível, por não haver nenhum tipo de material para preparar área da solda, ou em outras palavras meio fluxante.

Estas características favoráveis, tornam o processo de soldagem GMAW adequado a robotização, trazendo entre outros fatores, agilidade na demanda produtiva e sobretudo qualidade na junta soldada.

De acordo com Souza (2011), uma restrição pertinente ao uso de processo GMAW ocorre devido às limitadas ações metalúrgicas proporcionada pela quantidade de composições de arames disponíveis no mercado, comprometendo a versatilidade na soldagem de materiais com exigências de composições especiais. Ou seja, cada tipo de consumível apresenta uma utilidade específica, restringindo muito sua utilização dentro dos tipos de aços e suas ligas disponíveis no mercado.

Em conformidade com Scotti, Panomarev (2008), as principais vantagens do processo MIG/MAG são:

- ✓ Soldagem de praticamente de todos os metais e ligas comerciais;
- ✓ Alimentação contínua do eletrodo;
- ✓ Soldagem em todas as posições;
- ✓ Elevada taxa de fusão do arame eletrodo e também de deposição;
- ✓ Alta capacidade produtiva;
- ✓ Geração de pouco fumo e pouca escória;
- ✓ Permite a automatização industrial, possibilitando a utilização de robôs.

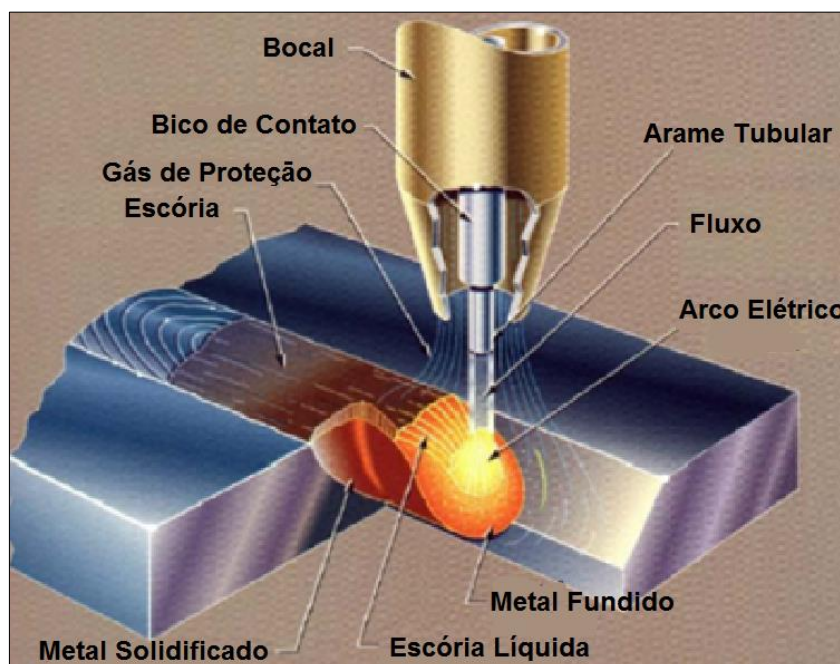
2.4 PROCESSO DE SOLDAGEM FCAW (FLUX CORED ARC WELDING)

A soldagem com arame tubular apresenta muitas semelhanças com o processo MIG/MAG, principalmente no que tange à equipamentos e princípio de funcionamento. Normalmente, trata-se de um processo semiautomático que permite a automatização. Do ponto de vista metalúrgico, a ação do fluxo confere a este processo propriedades semelhantes ao eletrodo revestido. (GARCIA, 2010).

Para Machado (1996), nesse processo o arco elétrico se forma entre a peça e um tubo metálico (cujo interior é preenchido por fluxo fusível), o qual é continuamente alimentado desde uma bobina. A poça de fusão assim produzida, é envolvida por escória e gases resultantes da decomposição do fluxo. Adicionalmente, pode ser empregado gás de proteção, o qual flui pelo bocal da tocha.

No que refere a este estudo, o processo FCAW será realizado por equipamento de soldagem similar ao utilizado no processo GMAW, onde, conforme a Figura 5, a região da poça de fusão terá proteção gasosa do equipamento, pois este estará trabalhando com um arame Metal Cored, ou seja, sem fluxo gasoso interno.

Figura 5: Visão geral da soldagem com arame tubular com proteção gasosa.



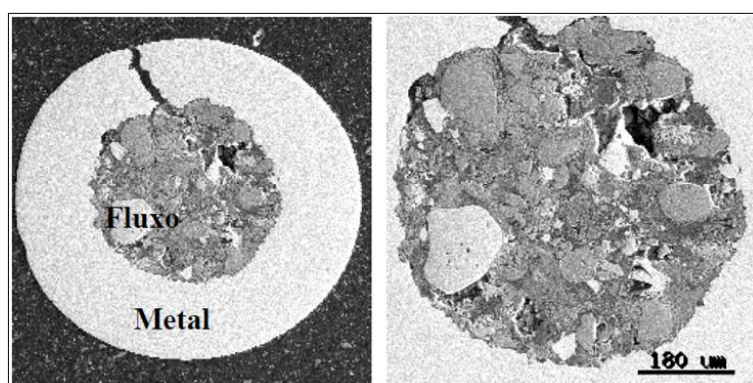
Fonte: Garcia (2010, p. 14).

Corroborando com o que já foi exposto anteriormente e contribuindo significativamente, a afirmação de Modenesi (2012), onde o mesmo cita que o processo FCAW apresenta duas variações principais, sendo elas a soldagem auto protegida, em que o fluxo interno fornece toda a proteção necessária na região do arco, e a soldagem com proteção gasosa, em que a proteção é fornecida por um gás, semelhante ao processo GMAW.

Em ambas as formas, o processo é normalmente operado na forma semiautomática, utilizando basicamente o mesmo equipamento do processo GMAW e podendo ser operada também na forma automática. É importante ressaltar que esta última será utilizada nos testes experimentais deste trabalho.

Para ter um melhor entendimento sobre a estrutura interna no arame tubular, deve-se levar em consideração citação de Fortes (2004), que na mesma linha de pensamento afirma que o arame tubular é fabricado de fita de aço em forma de tubo e contém um fluxo interno com características operacionais adequadas ao tipo de soldagem requerida. A Figura 6, mostra a seção transversal de um arame tipo tubular, tendo assim um melhor entendimento de como se apresenta sua estrutura interna.

Figura 6: Seção transversal de um arame tubular.



Fonte: Modenesi; Marques (2006, p. 21).

Gomes (2006) relata que este processo de soldagem apresenta muitas vantagens, como, por exemplo, alta qualidade do metal de solda depositado, excelente aparência do cordão de solda, boas características de arco, baixo nível de respingo. Segundo o autor, existe uma taxa de fusão do arame tubular maior que do Arame Sólido, na mesma faixa de corrente, pois o invólucro tubular metálico tem menor massa condutora e isso proporciona maior densidade relativa de corrente.

Garcia (2010), relata que a maior limitação no uso do arame tubular está no custo de aquisição deste consumível, que é compensado pela produtividade e qualidade do cordão de solda. Entretanto, o processo GMAW continua merecendo grande aceitação no meio industrial, principalmente com estudo e aperfeiçoamento de equipamentos que melhoram o desempenho de uso do arame maciço.

2.5 ARAMES PARA SOLDAGEM

Assim como os demais consumíveis utilizados, os arames são fundamentais nos processos de soldagem, pois são os responsáveis por depositar o material de adição necessário à formação da junta soldada. Com isso, cabe aos seus fabricantes desenvolverem técnicas apuradas para a fabricação dos mesmos, atendendo as normas técnicas vigentes, que darão a eles sua classificação mais apropriada em relação a suas ligas. De acordo com Machado (1996), os arames para os processos MIG/MAG devem ser produzidos com estrito controle da composição e pureza, assim como suas propriedades mecânicas e da seção considerada – tais como resistência a tração, dureza e rigidez – fatores estes importantes ao processo.

Tabela 1: Especificações AWS de materiais de adição para soldagem MIG/MAG.

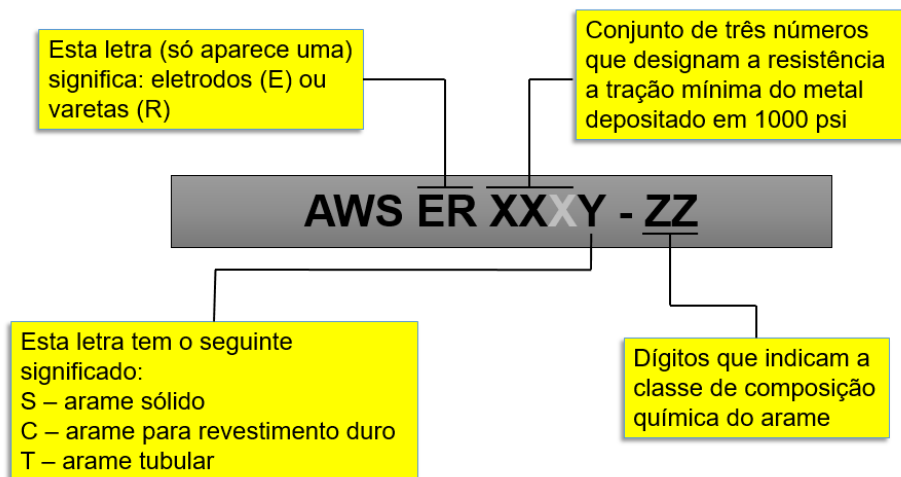
Especificação	Consumível
AWS A 5.7	Arames de cobre e suas ligas
AWS A 5.9	Arames de aço inoxidável
AWS A 5.10	Arames de alumínio e suas ligas
AWS A 5.14	Arames de níquel e suas ligas
AWS A 5.15	Arames para soldagem de ferro fundido
AWS A 5.16	Arames de titânio e suas ligas
AWS A 5.18	Arames tubulares de aço carbono com pó metálico interno
AWS A 5.19	Arames de magnésio e suas ligas
AWS A 5.20	Arames tubulares de aço carbono com fluxo interno
AWS A 5.21	Arames para revestimento
AWS A 5.22	Arames tubulares para soldagem de aço inoxidável
AWS A 5.24	Arames para a soldagem de zircônio
AWS A 5.28	Arames de aços de baixa liga

Fonte: Adaptado de Marques (2009, p. 249).

No que diz respeito a normatização destes consumíveis, a norma AWS A 5.18 é responsável por reger a classificação dos arames-eletrodos para a soldagem dos aços. A seleção do arame em dada operação é feita em termos de composição química do metal de base, do gás de proteção a ser usado e da composição química e propriedades mecânicas desejadas para a solda (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011). Estes por sua vez são classificados de acordo com suas ligas e estão expostos na Tabela 1.

Os arames tubulares dividem-se ainda em dois tipos: O Flux Cored, que possui fluxo convencional (será utilizado nos testes de soldagem) e o Metal Cored, que possui uma mistura de pós metálicos em seu interior. A AWS (American Welding Society), criou um padrão para identificação dos arames utilizados na soldagem de aços ao carbono e baixa liga. Este padrão pode ser visto na Figura 7.

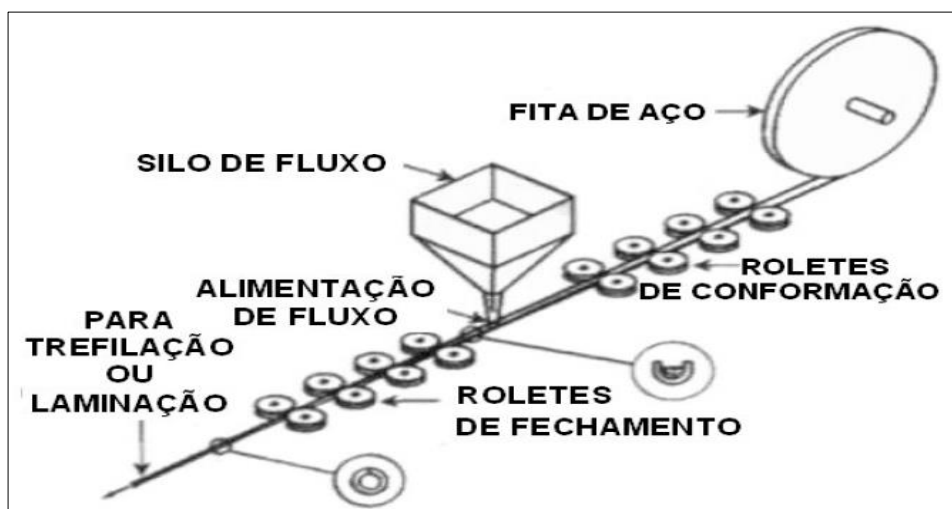
Figura 7: Especificações AWS para consumíveis para MIG/MAG.



Fonte: Adaptado de Solci (2015, p. 8).

Para um melhor entendimento de como é fabricado o arame tubular, a Figura 8 mostra as etapas de fabricação, onde resumidamente o processo inicia a partir de uma tira de chapa fina, que é curvada em uma máquina conformadora para tubos e no processo seguinte recheados de fluxo em seu interior.

Figura 8: Processo de fabricação de arames tubulares.



Fonte: Fortes (2004, p.4).

2.6 VARIÁVEIS DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM GMAW E FCAW

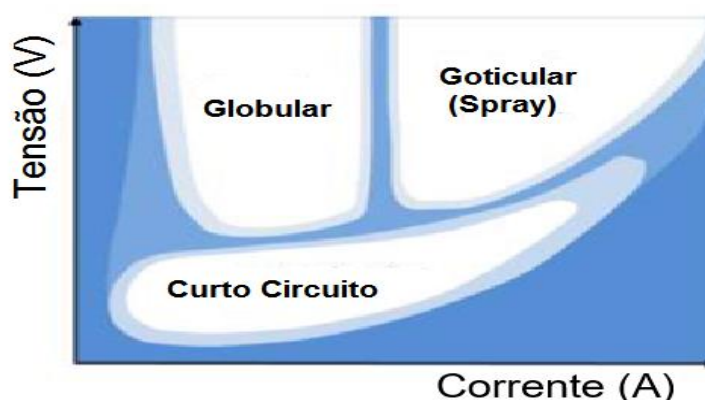
Diversas variáveis influenciam nas características do cordão de solda. Destacam-se a tensão e corrente de soldagem, a velocidade de soldagem, o comprimento e diâmetro do eletrodo, a inclinação da tocha de soldagem, a proteção gasosa e a velocidade de alimentação do arame. (BARBEDO, 2011).

2.6.1 Tensão e Corrente de Soldagem

Gomes (2006 apud Joaquim, 2001; Bracarense, 2000) cita que a tensão do arco e o seu comprimento estão diretamente relacionados, podendo afetar a aparência, penetração e as propriedades do cordão de solda. Grandes comprimentos de arco causam muitos respingos e irregularidade na morfologia do cordão, enquanto que para tensões baixas (arco com comprimento menor) há diminuição na tensão superficial da poça de fusão, pois a área de contato entre o arco e o metal base é menor.

Grandes comprimentos de arco causam muitos respingos e irregularidade na morfologia do cordão, além da introdução de nitrogênio no banho (para arames auto protegidos), enquanto que para pequenos comprimentos de arco há uma diminuição na tensão superficial do banho, originando cordões convexos de pouca penetração (JOAQUIM, R). A seguir, a Figura 9 mostra de forma clara o limiar entre tensão e corrente e os tipos de transferência metálica formados a partir de suas variações.

Figura 9: Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência para a soldagem GMAW.



Fonte: Adaptado de Modenesi (2012, p.70).

2.6.2 Velocidade de Soldagem

A velocidade de soldagem influencia a energia de soldagem, e assim, a quantidade de calor cedido à peça (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011). Com isso, conclui-se que com uma baixa velocidade de soldagem, além de aumentar o tempo do processo produtivo como um todo, aumenta a energia de soldagem, gerando assim custos desnecessários. Por outro lado, ter uma elevada velocidade de soldagem pode acarretar em problemas como mordedura e falta de penetração na junta soldada.

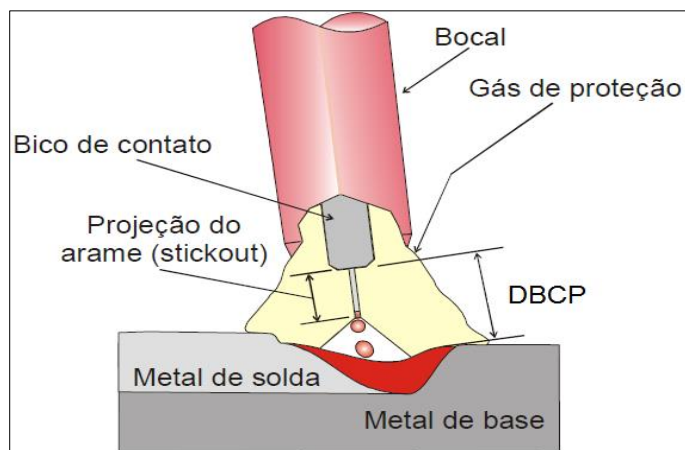
Além de sua óbvia ação sobre a taxa de deposição, a velocidade com que a tocha se desloca exerce influência sobre a geometria da poça de fusão. Sendo um importante fator na produtividade, este parâmetro deve ser o maior possível para uma dada aplicação. Entretanto, uma excessiva velocidade de soldagem pode provocar certos defeitos, entre eles trinca de solidificação. (MACHADO, 1996).

2.6.3 Comprimento do eletrodo

O comprimento energizado do eletrodo, ou extensão elétrica, ou ainda *Stickout*, é definido como a distância entre a extremidade do bico de contato da tocha e a extremidade do arame em contato com o arco. Entretanto, como esta distância é difícil de ser medida com o arco em operação, em geral toma-se o *stickout* como sendo a distância da extremidade do bico de contato até a peça (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011). Conhecida ainda como DBCP, ou distancia de contato entre o bico e a peça, está representada na Figura 10 e tem maior estabilidade nos processos robotizados do que nos processos manuais de soldagem.

Segundo Gomes (2006, p. 18, apud JOAQUIM, 2001), se o *stickout* é pequeno, o pré-aquecimento do fluxo é insuficiente e a produção de gases não é adequada à proteção do banho de fusão. Para grandes valores de *stickout* pode ocorrer dissociações prematuras do CO₂, causadas pelo aquecimento do arame e atmosfera circundante, originando respingos excessivos, deterioração da morfologia do cordão, além de elevar a temperatura do arame para próximo da temperatura de fusão provocando o amolecimento do mesmo antes de atingir a poça de fusão, causando desvios na linha de solda.

Figura 10: Representação da distância contato peça e da projeção do arame (*stickout*).



Fonte: Adaptado de Barra (2003, p.18).

2.6.4 Proteção Gasosa

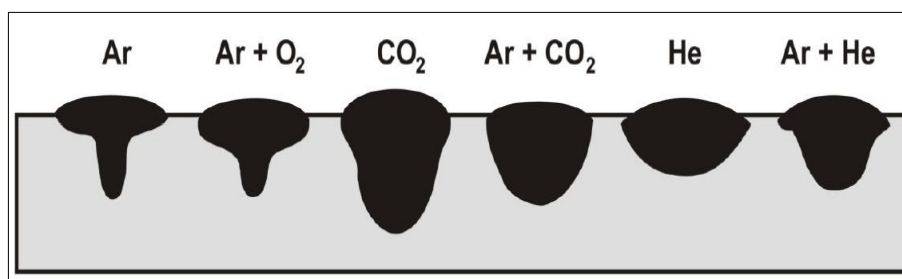
Os processos de soldagem com gás de proteção são amplamente utilizados na soldagem de aços de baixo carbono e de baixa liga, produzindo altas taxas de deposição e eficiência. Podem ser soldados em todas as posições e é adequado a uma grande variedade de juntas (Gomes, 2006). Os gases de proteção são alimentados concentricamente ao arame de soldagem, sendo que estes são expelidos para fora da tocha de soldagem pelo bocal do equipamento, indo ao encontro da poça de fusão do metal base e metal de adição, garantindo total proteção gasosa a região a ser soldada.

Os gases utilizados na soldagem MIG/MAG podem ser inertes ou ativos, ou ainda, misturas destes. O tipo de gás influencia as características do arco e a transferência de metal, a penetração, a largura e o formato do cordão de solda, a velocidade máxima de soldagem, a tendência ao aparecimento de mordeduras e o custo da operação (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Fortes (2004), relata que, o fluxo de gás deve ser ajustado no regulador do cilindro, mas a medição da vazão do gás de proteção deve ser sempre medida no bocal da tocha com um medidor de vazão (fluxômetro). Os vazamentos podem ser verificados comparando-se a vazão medida no regulador com a medida no fluxômetro.

Este é um tipo de teste realizado sempre como procedimento preliminar a soldagem pelo operador, sendo de fundamental importância seu engajamento com as atividades, tendo em vista que um equipamento com vazamentos pode acarretar em problemas na qualidade da junta soldada e custos desnecessários ao processo.

Figura 11: Perfil de cordões de solda feitos com diferentes gases.

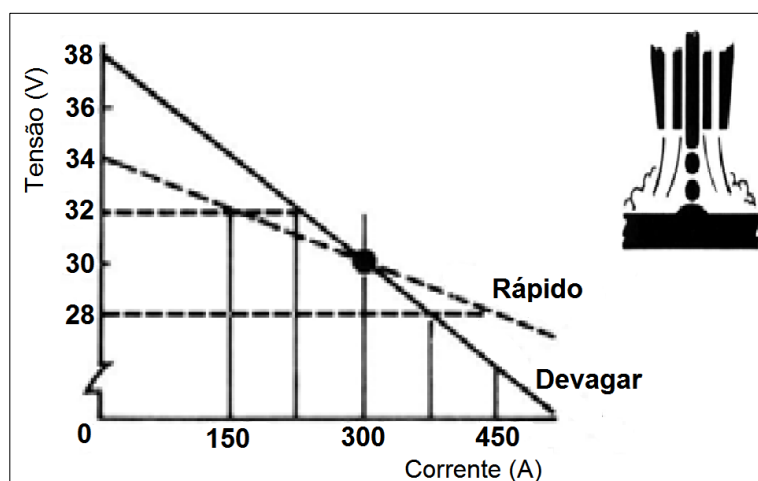


Fonte: Junior, L. P. da S.; Cabral, T. dos S. (2008, p.12).

2.6.5 Velocidade de Alimentação do Arame

No processo GMAW a corrente de soldagem está diretamente relacionada à velocidade de alimentação do arame (desde que a extensão do eletrodo seja constante). Quando a velocidade de alimentação do arame é alterada, a corrente de soldagem varia no mesmo sentido (BARBEDO 2011, p. 16, apud GIRALDO, 2008). A influência da velocidade do arame em função da tensão e corrente podem ser observada na Figura 12.

Figura 12: Influência da velocidade de alimentação do arame.



Fonte: Adaptado de Fortes (2005, p.11).

2.7 TIPOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA

Dentre as características fundamentais de operacionalidade e eficiência do processo, estão os modos de transferência do metal de adição, pois eles afetam muitas características do processo, como por exemplo: a estabilidade do arco, a quantidade de gases (principalmente hidrogênio, nitrogênio e oxigênio) absorvida pelo metal fundido, a aplicabilidade do processo em determinadas posições de soldagem e o nível de respingos gerados (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Segundo Gomes (2006), existem três tipos diferentes de transferência metálica, sendo elas:

a) Transferência Globular:

Ocorre geralmente em tensões não muito baixas e correntes moderadas, porém com a utilização de CO₂ como gás de proteção, a transferência globular pode acontecer também em correntes elevadas. Neste modo de transferência quando a gota é formada, esta permanece no eletrodo devido a ação da força de tensão superficial (Figura 13(a)). A partir do momento em que o seu volume se torna grande (maior que o diâmetro do eletrodo) o suficiente para que seu peso, juntamente com a força eletromagnética, supere a força da tensão superficial, a gota tenderá a se destacar. Este tipo de transferência é limitado à posição plana de soldagem (GOMES, 2006)

b) Spray ou Aerossol:

Este tipo de transferência é caracterizado pela grande quantidade de pequenas gotas (menor que o diâmetro do arame tubular) a alta frequência, quase formando um jato contínuo, como pode ser observado na Figura 13 (b). Estas gotas são depositadas com alta energia (altas correntes e tensões) e fazem com que a poça de fusão seja bastante fluída, limitando o processo para a posição plana ou horizontal, geralmente em metal de base com espessura superior a 3 mm, em situações onde se deseja taxas de deposição máxima (JOAQUIM, 2001).

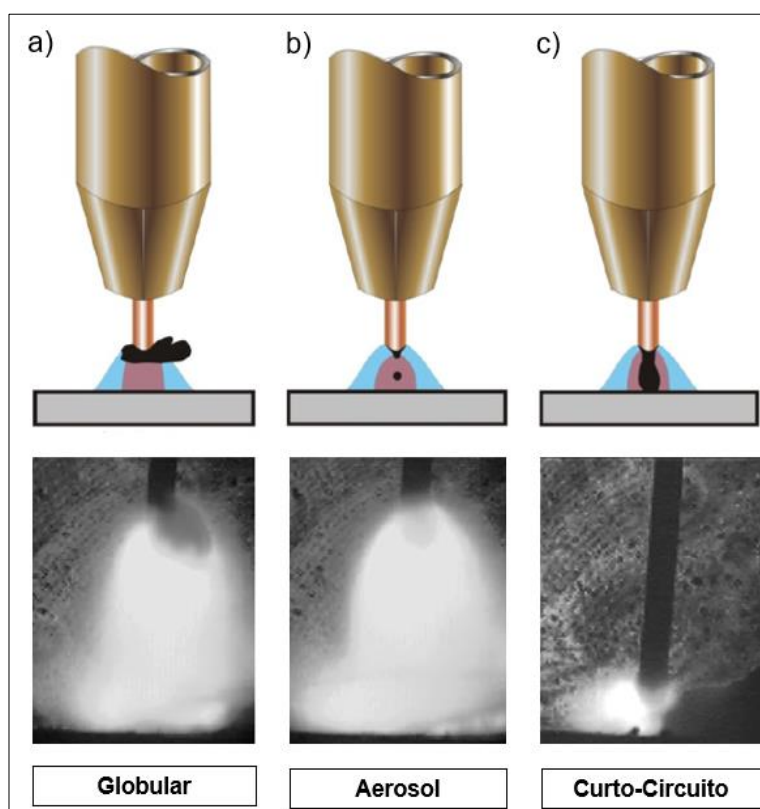
c) Curto-circuito:

O material é transferido para poça de fusão somente quando ocorre o contato do arame com a poça, não ocorre transferência de material pelo arco elétrico.

O curto-circuito, conforme Figura 13 (c), ocorre em níveis relativamente baixos de corrente e tensão, possibilitando assim a soldagem de pequenas espessuras. (BARBEDO, 2011).

Para um melhor entendimento de como ocorrem os modos de transferência do metal no momento da soldagem, a Figura 13 mostra cada um dos três tipos detalhadamente.

Figura 13: Modos de transferência do metal.



Fonte: Adaptado de Junior; Cabral (2008, p.6 e 7).

Analisando cada um dos três modos, identificou-se no modo de transferência curto-circuito a melhor opção para este estudo, pela necessidade de se ter uma maior estabilidade do arco elétrico durante a soldagem, evitando assim possíveis variantes ao processo e que por consequência pudessem afetar de alguma forma a integridade dos testes realizados.

2.8 APORTE TÉRMICO NA SOLDAGEM

A maioria dos processos de soldagem por fusão é caracterizada pela utilização de uma fonte de calor intensa e localizada.

Esta energia concentrada pode gerar em pequenas regiões temperaturas elevadas, altos gradientes térmicos, variações bruscas de temperatura e, conseqüentemente, extensas variações de microestrutura e propriedades em um pequeno volume de material. Na soldagem a arco elétrico o aporte térmico (heat input) é definido como o calor cedido à junta soldada por unidade de comprimento (FORTES, 2004).

Segundo Kuntz (2016), a Equação 1 define o aporte térmico da seguinte forma:

(1)

$$AT = \frac{U \cdot I \cdot 60}{v_s \cdot 1000} \cdot K = \left[\frac{KJ}{mm} \right]$$

Onde:

U = Tensão de soldagem [V]

I = Corrente de soldagem [A]

v_s = Velocidade de soldagem [mm/min]

K = Eficiência térmica (conf. DIN EM 1011-1:2002)

Para obter-se o fator K , deve-se levar em consideração qual o tipo de processo de soldagem utilizado. Com isso, o primeiro passo é consultar a Tabela de Eficiência Térmica (Tabela2), localizada na norma DIN EN 1011-1, 2012, conforme relata Kuntz (2016).

Tabela 2: Eficiência térmica para cada processo de soldagem.

Nº	Processo	Fator K
111	Arco elétrico com eletrodo revestido	0,8
131	Soldagem MIG	0,8
135	Soldagem MAG	0,8
114	Arame tubular com revestimento interno e proteção gasosa	0,8
136	Arame tubular com revestimento interno e proteção de gás ativo	0,8
137	Arame tubular com revestimento interno e proteção de gás inerte	0,8
138	Arame tubular com proteção de gás ativo	0,8
139	Arame tubular com proteção gasosa - Soldagem TIG	0,8

Fonte: Adaptado de DIN EN 1011-1 (2002).

A energia de soldagem é um parâmetro cuja medida é simples, sendo utilizado em normas e trabalhos técnicos para especificar as condições de soldagem. Contudo, sua utilização deve ser feita com alguma cautela. Nem sempre existe uma relação direta entre a energia de soldagem e seus efeitos na peça, pois os parâmetros de soldagem (corrente, tensão e velocidade de deslocamento) afetam de modo diferente a intensidade do arco e o rendimento térmico do processo. Assim, embora utilizando o mesmo processo e energia de soldagem, é possível obter soldas de formatos completamente diferentes pela variação individual dos parâmetros de soldagem (MARQUES; MODENESI; SANTOS).

2.9 TAXA DE DEPOSIÇÃO DO ARAME

Barbedo (2011) relata que a soldagem com arame tubular possui inúmeras semelhanças em relação ao processo GMAW, no que diz respeito aos equipamentos e princípios de funcionamento. Mas um fator de grande importância em ambos os processos é a alta taxa de deposição, que nada mais é que o peso depositado de material por unidade de tempo, ambos influenciados pela densidade de corrente.

De acordo com Garcia (2011), a taxa de deposição é uma característica que pode sofrer influência de vários parâmetros de soldagem tais como, transferência metálica, tipo de gás de proteção, diâmetro de eletrodo entre outros (instabilidades de qualquer ordem no arco podem resultar num índice maior de respingos e numa menor taxa de deposição).

Santos (2010), cita que a taxa de deposição, pode ser calculada de acordo com a Equação 2:

$$Td = \frac{(M_f - M_i)}{T_{ab}} \quad [\text{g/min}] \quad (2)$$

Onde:

M_f – Massa final [g];

M_i – Massa inicial [g];

T_{ab} – Tempo de arco aberto [min]

Devido à maior taxa de deposição alcançada, o arame tubular permite velocidades de soldagem superiores às empregadas para o arame maciço, reduzindo, então, o tempo para realização da soldagem para a confecção de um cordão de mesmo volume (GARCIA, 2011).

A soldagem a arco com arame tubular (FCAW) e Arame Sólido (GMAW) são processos que acumulam vantagens, como: alto fator de trabalho do soldador, alta taxa de deposição, resultando em alta produtividade e qualidade da solda produzida (BARBEDO, 2011).

2.10 RENDIMENTO DEPOSITADO

O rendimento de um processo de soldagem é definido como a relação entre a taxa de deposição e a taxa de fusão do arame. Inerentemente, processos de soldagem com arame maciço possuem geralmente valores maiores de rendimento. Visto que eles geram pouca escória e fumos de soldagem, a perda de material consiste sobretudo dos salpicos que não fazem parte do cordão de solda (NASCIMENTO, 2005).

Kuntz (2016), descreve que o rendimento pode ser calculado de acordo com a Equação 3:

(3)

$$\eta_r = \frac{M_f - M_i}{m_e \cdot c} \cdot 100$$

Onde:

η_r = Rendimento depositado

M_f = Massa final CP [g]

M_i = Massa inicial CP [g]

m_e = Massa linear do arame [g/m]

c = Consumo linear médio do arame para cada CP [m]

2.11 VANTAGENS E DESVANTAGENS NO PROCESSO GMAW E FCAW

De acordo com Barbedo (2011, p. 5, apud VENTRELLA, 2006), o aumento da participação dos processos de soldagem FCAW e GMAW em todo o mundo tem ocorrido à custa de um declínio do processo eletrodo revestido. Isto porque os processos de soldagem a arco elétrico com atmosfera protetora (FCAW e GMAW) têm apresentado um contínuo desenvolvimento devido às suas características e baixo custo, sendo esses processos os mais adequados à mecanização.

As Tabelas 3 e 4 ilustram as principais vantagens e desvantagens dos dois métodos de soldagem comentados anteriormente.

Tabela 3: Vantagens, limitações e aplicações da soldagem GMAW.

Vantagens e limitações	Aplicações
Processo com eletrodo contínuo; Permite soldagem em qualquer posição; Elevada taxa de deposição de metal; Elevada penetração; Pode soldar diferentes ligas metálicas; Exige pouca limpeza após soldagem; Proteção do arco é sensível a correntes de ar; Pode gerar elevada quantidade de respingos;	Soldagem de ligas ferrosas e não ferrosas; Soldagem de carrocerias e estruturas; Soldagem de tubulações, etc.;

Fonte: Adaptado de Marques; Modenesi; Santos (2012, p. 1.12).

Tabela 4: Vantagens, limitações e aplicações da soldagem FCAW.

Vantagens e limitações	Aplicações
Elevada produtividade e eficiência. Soldagem em todas as posições. Custo relativamente baixo. Produz soldas de boa qualidade e aparência Equipamento relativamente caro. Pode gerar elevada quantidade de fumos. Necessita limpeza após soldagem.	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga. Soldagem de fabricação e de manutenção. Soldagem de componentes de veículos. Soldagem de montagem no campo.

Fonte: Adaptado de Marques; Modenesi; Santos (2012, p. 1.13).

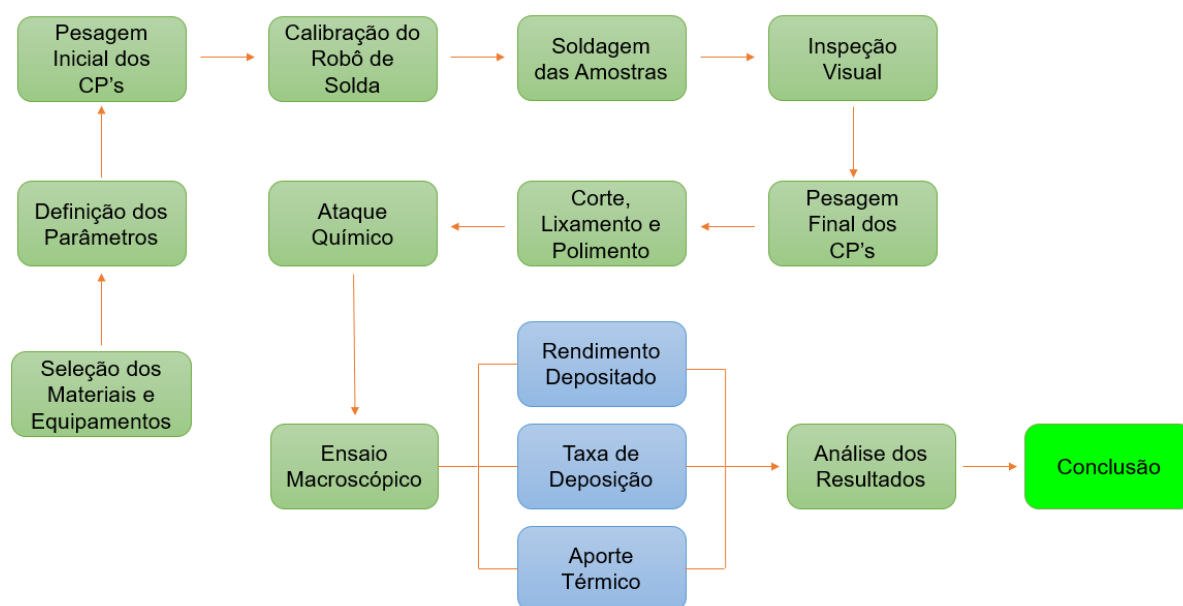
3 METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido com o propósito de analisar comparativamente dois tipos de metais de adição, pelos processos de soldagem GMAW e FCAW. Processos estes, que foram sucintamente apresentados nos itens 2.3 e 2.4, deste trabalho. Diante disso, é possível identificar quais dos dois consumíveis apresentam maiores vantagens no tocante a Taxa de Deposição, Rendimento Depositado, Aporte Térmico e Qualidade da união soldada. Manteve-se como base bibliográfica para tal livros, artigos científicos, trabalhos de conclusão de curso, teses de mestrado/doutorado, dentre outros.

3.1 MÉTODOS E TÉCNICAS

Os métodos e técnicas utilizados neste estudo, foram definidos previamente, levando-se em consideração quais os recursos disponíveis para a montagem dos experimentos e para a execução dos testes. Após diagnóstico preliminar, elaborou-se um cronograma de atividades, de forma a gerenciar todas as fases do projeto e dar o suporte necessário para que cada etapa fosse efetivamente cumprida. Este cronograma encontra-se resumido em forma de fluxograma na Figura 14.

Figura 14: Fluxograma das etapas dos experimentos.



Fonte: Autor (2017).

3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Os materiais e equipamentos utilizados foram definidos de antemão, ou seja, na montagem do cronograma gerencial de atividades (Figura 16), onde identificou-se a quantidade de matéria prima de metal base, a quantidade de metal de adição necessário aos testes e qual seria o modelo de robô e fonte de soldagem mais apropriados para execução da tarefa experimental.

3.2.1 MATERIAIS

3.2.1.1 Consumíveis – Metal de adição e Gás de proteção

Os testes foram realizados com dois modelos diferentes de material de adição. Um dos tipos utilizados foi o Arame Sólido de 1.6 mm, comercialmente conhecido como *Cooper Free*, ou seja, livre de revestimento de cobre. Sua caracterização é definida pela norma AWS 5.18 ER70S-6, assim como suas propriedades químicas e mecânicas podem ser observadas nas Tabelas 5 e 6 respectivamente.

Tabela 5: Propriedades químicas – Arame ER70S-6.

Composição Química - Arame ER70S-6	
Carbono - C	0,06 - 0,15 [%]
Manganês - Mn	1,40 - 1,85 [%]
Fósforo - P	0,025 [%]
Enxofre - S	0,035 [%]
Alumínio - Al	-
Vanádio - V	0,03 [%]
Titânio - Ti	-
Crômio - Cr	0,15 [%]
Níquel - Ni	0,15 [%]
Silício - Si	0,80 - 1,15 [%]
Molibdênio - Mo	0,15 [%]
Cobre - Cu	0,5 [%]
Zircônio - Zr	-

Fonte: Adaptado da norma AWS 5.18 (2005).

Tabela 6: Propriedades mecânicas – Arame ER70S-6.

Propriedades Mecânicas - Arame ER70S-6			
		Resistência à tração (mínimo)	70 000 psi 480 Mpa
Gás de proteção	CO ₂	Limite de escoamento (mínimo)	58 000 psi 400 Mpa
		Percentual de alongamento (mínimo)	22 %

Fonte: Adaptado da norma AWS 5.18 (2005).

O outro material de adição utilizado, foi a arame tubular Metal Cored, 1.6 mm (TUBROD 70M), produzido conforme a norma AWS A5.36/A5.36M. Suas composições químicas e propriedades mecânicas, se distinguem em relação ao Arame Sólido, e estão descritas nas Tabelas 7 e 8 respectivamente.

Tabela 7: Composição química – Arame Metal Cored.

Composição Química - Arame Metal Cored	
Carbono - C	0,05 [%]
Manganês - Mn	1,20 [%]
Silício - Si	0,6 [%]
Enxofre - S	-
Alumínio - Al	-
Vanádio - V	-
Titânio - Ti	-
Crômio - Cr	-
Níquel - Ni	-
Fósforo - P	-
Molibdênio - Mo	-
Cobre - Cu	-
Zircônio - Zr	-

Fonte: Adaptado de ESAB (2017).

Tabela 8: Propriedades mecânicas – Arame Metal Cored.

Propriedades Mecânicas - Arame Metal Cored		
Resistência à tração (mínimo)	550	Mpa
Limite de escoamento (mínimo)	480	Mpa
Percentual de alongamento (mínimo)	25	%

Fonte: Adaptado de ESAB (2017).

Tanto no processo de soldagem GMAW quanto FCAW, é necessária a utilização de um gás de proteção para a poça de fusão. Nos experimentos em questão, foi utilizado o gás denominado comercialmente PIPE. Este gás, apresenta em sua composição 90% de argônio, e 10% de CO₂ (KUNTZ, 2016).

3.2.1.2 Metal base

Os aços apresentam grande versatilidade, sendo que devido a este fator, é considerado a mais importante das ligas metálicas. Podem apresentar diversos tipos de forma, alternando assim suas aplicações. Em um contexto geral, sua maior empregabilidade é na indústria, onde se concentra uma maior busca deste tipo de material.

Devido a sua alta demanda, para atender suas exigências, cada tipo de aço é fabricado com diferentes características, ou seja, mudam-se as propriedades químicas e mecânicas das ligas, para que cada uma contemple a um determinado tipo de aplicação.

Neste trabalho, o material EN10149-2 S420MC, popularmente conhecido como “chapa branca”, foi utilizado como metal de base, não tendo nenhum tipo de influência sobre os resultados dos testes, uma vez que poderia ter sido utilizado qualquer outro tipo de aço. As composições químicas e propriedades mecânicas do material podem ser vistas na Tabela 9.

Tabela 9: Composição química e propriedades mecânicas.

Composição Química (%)	
Carbono - C	0,09
Silício - Si	0,03
Manganês - Mn	1,31
Fósforo - P	0,023
Enxofre - S	0,002
Alumínio - Al	0,049
Nióbio - Nb	0,047
Vanádio - V	0,002
Titânio - Ti	0,021
Crômio - Cr	0,02
Níquel - Ni	0,01
Estanho - Sn	0,001
Azoto - N	0,0043
Cálcio - Ca	0,0021
Propriedades Mecânicas	
Limite Escoamento (N/mm ²)	497 Mín.
Limite Resist. Tração (N/mm ²)	569 Mín
Alongamento	28 Mín

Fonte: Adaptado de Usiminas (2017).

3.2.1.3 Corpos de prova

Os corpos de prova, foram cortados em formato retangular, nas dimensões de 150 x 300 mm, pelo processo de corte denominado guilhotina. Foram cortadas 18 chapas, conforme Figura 15.

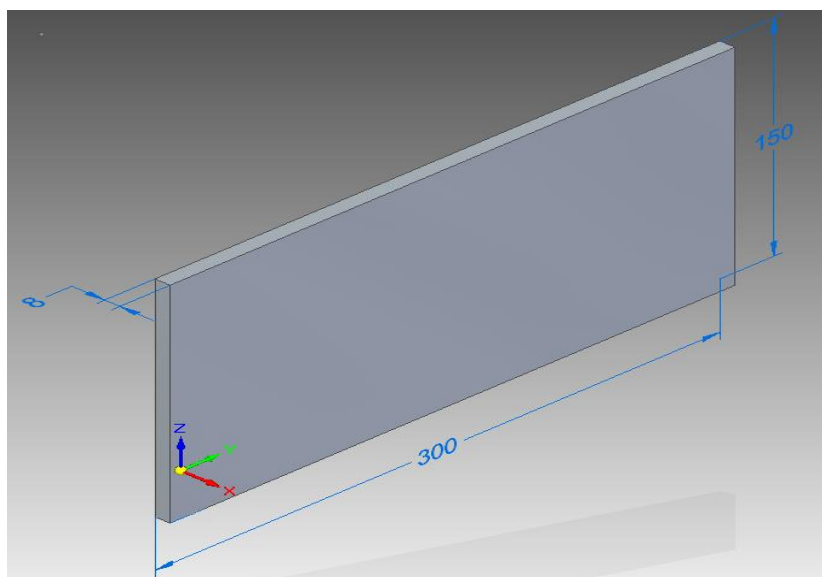
Figura 15: Corpo de prova.



Fonte: Autor (2017).

Cada uma das 18 chapas, foram previamente limpas manualmente com álcool isopropílico, eliminando assim qualquer tipo de impureza que por ventura pudesse alterar de alguma forma as características das juntas soldadas e por consequência, interferir nos resultados. Na Figura 16, podem ser visualizadas as dimensões do corpo de prova adotado para os testes nos processos GMAW e FCAW.

Figura 16: Dimensões do corpo de prova.



Fonte: Autor, 2017.

Será estabelecida a união entre duas chapas (Figura 16) nos testes, formando assim um único corpo de prova com uma junta soldada tipo filete ou ângulo.

3.2 EQUIPAMENTOS DE SOLDAGEM

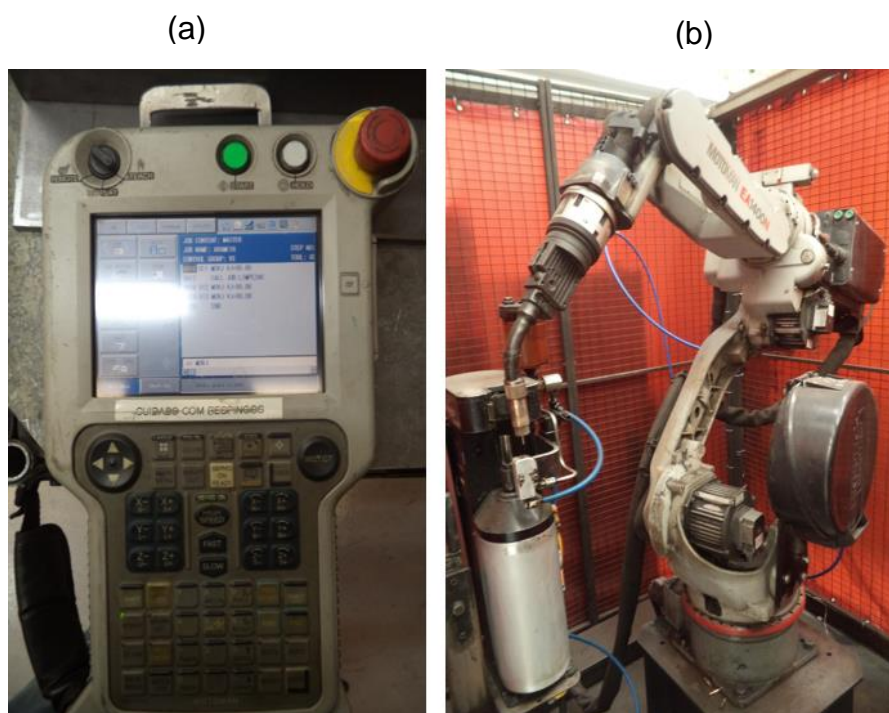
3.2.1 Robô de solda

Os processos produtivos de soldagem nos dias atuais, requerem equipamentos sofisticados, capazes de suprir as necessidades relacionadas a entrega na produção, considerando agilidade e qualidade do produto final como fatores primordiais.

Para este estudo, os experimentos foram soldados em uma célula robotizada, equipada com um robô de seis graus de liberdade da marca Yaskawa Motoman, modelo EA1400N (Figura 17(b)).

Este robô dispõe além de outros componentes de um manipulador (Figura 17(a)), responsável por transmitir os comandos do operador ao equipamento de soldagem. Na Figura 17, podem ser observados o manipulador (a) e o robô de solda (b).

Figura 17: Manipulador e Robô de Solda.

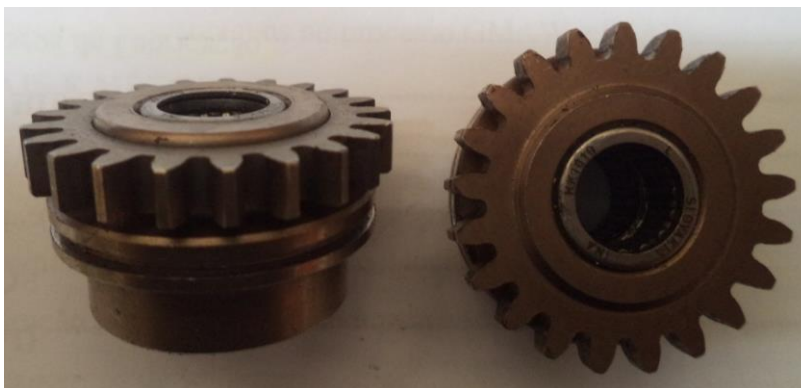


Fonte: Autor (2017).

O robô tem uma série de componentes que são vitais ao seu correto funcionamento, deixando-o em condições para desenvolver as funções a que lhe são atribuídas durante o processo de soldagem. Um dos componentes mais importantes é a tocha, localizada na parte frontal do braço do robô, e que contém um sistema complexo, onde envolve as saídas do gás de proteção, arame de soldagem e ainda a formação do arco elétrico. No que diz respeito a alimentação do arame, um dos componentes responsáveis são as roldanas. Estas desempenham o papel de tracionar o arame durante a soldagem.

Para cada tipo de arame, utiliza-se um tipo de roldana. No processo de soldagem com arame liso, as roldanas com perfil liso são empregadas. Estas podem ser visualizadas na Figura 18.

Figura 18: Roldana com perfil liso



Fonte: Autor (2017).

Já para o processo de soldagem com arame Metal Cored, utilizam-se roldanas recartilhadas (Figura 19), com o objetivo de não provocar nenhum tipo de dano a geometria do arame de solda e, por conseguinte no material fluxante que se encontra em seu interior.

Figura 19: Roldana recartilhada



Fonte: Autor (2017).

3.2.2 Fonte de soldagem e RCU

Para a realização dos experimentos, foi utilizada uma fonte de soldagem modelo TPS 5000, da marca Fronius. Esta fonte possui um controlador remoto digital assinalado pela seta na Figura 20.

Figura 20: Fonte de soldagem TPS 500 digital e controlador remoto digital.



Fonte: Autor (2017).

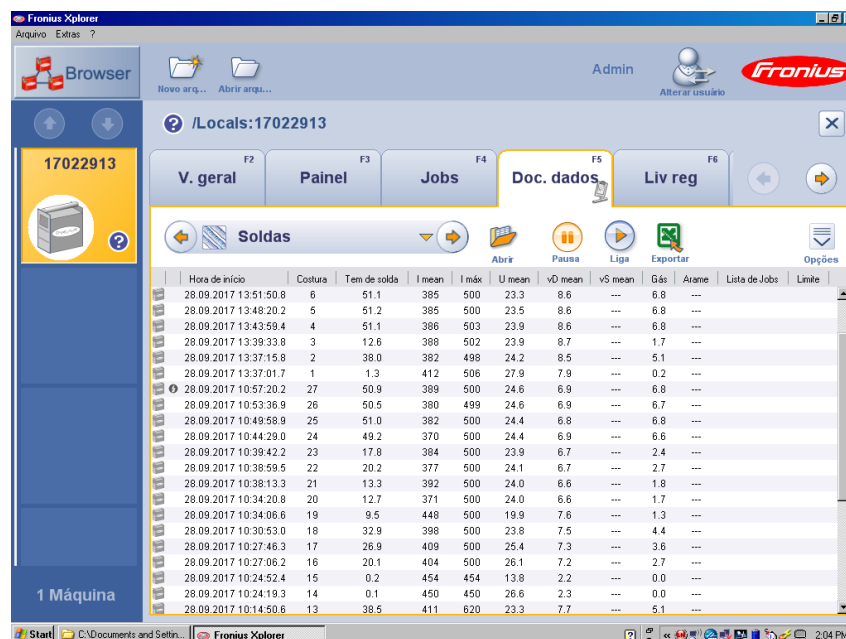
3.2.3 Fronius Xplorer – Software para obtenção de dados relativos a soldagem

Este estudo, foi desenvolvido com auxílio de diversas ferramentas tecnológicas, sendo que uma delas trouxe ganhos significativos em agilidade, para a obtenção de informações no momento do processo de soldagem. A ferramenta em questão, é o software Fronius Explorer, capaz de fazer o gerenciamento das informações a que lhe são enviadas, diretamente da fonte de soldagem (Figura 20).

Os dados gerados durante o processo pela fonte de soldagem, como a vazão do gás, velocidade de alimentação do arame, comprimento do arco, corrente, e tensão, são enviados em um intervalo de 0.1 segundos diretamente para o software (KUNTZ, 2016).

Estes dados podem ser facilmente copiados e exportados para diversos arquivos (Figura 21), tornando a análise mais precisa e eficaz, garantindo assim a confiabilidade dos testes.

Figura 21: Software Fronius Xplorer durante processamento dos dados de soldagem.



Fonte: Autor (2017).

3.2.4 Base de soldagem

A base de soldagem tem por objetivo fixar os corpos de prova que serão soldados, dando ao processo exatidão nos resultados. Isso se faz necessário pelo fato de existirem forças atuantes no deslocamento do robô durante o processo de união da junta soldada. A Figura 22 mostra o dispositivo de soldagem e seus componentes,

Figura 22: Dispositivo de soldagem.



Fonte: Autor (2017).

3.2.5. Balança convencional – Determinação da massa dos corpos de prova

Devido aos cálculos de rendimento depositado nas juntas soldadas, foi necessário pesar previamente cada um dos corpos de prova. Para realizar esta atividade, foi utilizada uma balança do tipo convencional da marca Toledo, com capacidade máxima de 50 Kg, conforme Figura 23.

Figura 23: Balança para a pesagem dos corpos de prova



Fonte: Autor (2017).

3.3 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Os experimentos foram realizados seguindo o Fluxograma das Etapas dos Experimentos (Figura 14). Em um primeiro momento, foi selecionada uma chapa branca de 8 mm de espessura, e recortados 18 corpos de prova, nas dimensões de 150 x 300 mm, conforme a norma ISO 9606-1 (2012). Cada um desses corpos de prova foi pesado e limpo individualmente.

Tabela 10: Parâmetros iniciais do processo.

Tipo de Parâmetro	Características
Material da Chapa	EN10149-2 S420MC
Metal de adição	ER 70S-6 e TUBROD 70M (Ø1.6mm)
Gás de proteção	C10 (90% Ar + 10% CO ₂)
Velocidade de alimentação de Arame	Varia em relação ao arame
Velocidade de soldagem	500 mm/min
Ângulo de avanço da tocha	15°
Ângulo de trabalho da tocha	45°

Fonte: Autor (2017).

Após análise inicial, chegou-se à conclusão que os parâmetros preliminares mais adequados a este tipo de experimento seriam os descritos na Tabela 10.

Concluída a determinação dos parâmetros iniciais, foram realizadas avaliações de soldagem preparatórias, com o propósito de definir quantos passes de solda seriam necessários para formar a junta soldada. Chegou-se à conclusão que os testes principais com Arame Sólido e tubular seriam realizados com apenas um passe de solda, pois de acordo com o tipo e o diâmetro do arame, ainda somado a isso o metal de base, seria suficiente para formar a junta soldada desejada.

A sequência de execução dos testes experimentais com o consumível metal de adição, foi desenvolvida levando em consideração um mecanismo estatístico capaz de tornar a investigação acerca dos objetivos e resultados concisa e precisa. Este mecanismo é mundialmente conhecido como DOE (*Design of Experiments*) e pode ser visto representado na Tabela 11.

Tabela 11: Planejamento e análise dos experimentos.

Corpos de Prova [Qtd.]	Arame Solda [Tipo]	Corrente [A]	CP	Peso [g]	Peso total [g]	
1	Sólido Ø1.6	380	2	A	2850,000	5705,0
2			B	2855,000		
3			3	A	2855,000	5710,0
4			B	2855,000		
5			4	A	2855,000	5695,0
6			B	2840,000		
7	Metal Cored Ø1.6	380	5	A	2875,000	5725,0
8			B	2850,000		
9			6	A	2850,000	5690,0
10			B	2840,000		
11			7	A	2875,000	5755,0
12			B	2880,000		
13	Metal Cored Ø1.6 (Parâm.Otimizado)	380	8	A	2850,000	5730,0
14			B	2880,000		
15			9	A	2860,000	5735,0
16			B	2875,000		
17			10	A	2840,000	5730,0
18			B	2890,000		

Fonte: Autor (2017).

3.4 PROCEDIMENTOS PARA AVALIAÇÕES DAS SOLDAGENS

Os corpos de prova foram soldados seguindo a sequência de parâmetros e procedimentos pré-determinados, de acordo com a Tabela 10. Para cada chapa, nominalmente conhecida como corpo de prova, foi formado após junta soldada realizada, uma amostra.

3.4.1 Inspeção visual

A avaliação das juntas soldadas foi realizada, dentre outros métodos, pelo mais rápido e tradicional: A inspeção visual.

Foram avaliadas as características da junta soldada (Figura 24), buscando identificar se estas apresentavam, acima de tudo qualidade, com bom preenchimento da junta em filete, boa penetração no material base e sem elementos preponderantes para a fragilidade da mesma, como porosidade e trincas. Para tanto, os registros realizados foram feitos com o auxílio de uma máquina fotográfica.

Figura 24: Juntas soldadas em tipo filete.



Fonte: Autor (2017).

3.4.2 Rendimento depositado

O rendimento depositado em cada uma das amostras, foi calculado através da Equação 3, onde os valores das massas iniciais (M_i) e finais (M_f), foram obtidos com auxílio de uma balança convencional (Subitem 3.2.5).

Os valores das massas lineares dos arames de solda já eram conhecidos, sendo de 15,546 g/m para o Arame Sólido e 13,854 g/m para o arame Metal Cored. Já o consumo linear dos arames solda, foram obtidos através do *software* Fronius Xplorer, exemplificado anteriormente no subitem 3.2.3. O objetivo principal neste caso foi identificar qual metal de adição apresenta maior rendimento depositado.

3.4.3 Taxa de deposição

Congruente ao que já foi explicitado no subitem 2.9, a taxa de deposição é a avaliação equacional do peso depositado de material por unidade de tempo. Conforme a Equação 2, as massas iniciais (M_i) e massas finais (M_f) foram determinadas, da mesma forma que no subitem 3.4.3, através de uma balança convencional (Subitem 3.2.5).

Já no que diz respeito ao tempo de arco aberto, para preenchimento de uma única união soldada, o *software* Fronius Xplorer fez o monitoramento necessário para avaliar os resultados.

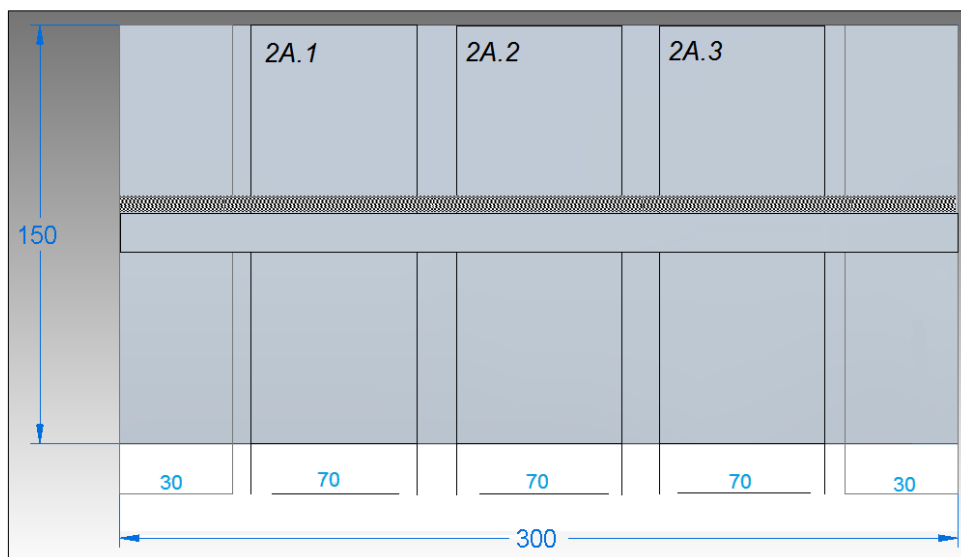
3.4.4 Aporte térmico

Assim como os cálculos do subitem 3.4.2 e subitem 3.4.3, o aporte térmico foi definido levando-se em consideração o auxílio do *software* Fronius Xplorer, que reportou as informações de tensão (U) e corrente (I), em um intervalo de 0.1 segundos. A Equação 1 foi utilizada para realizar o cálculo desejado, sempre seguindo os parâmetros pré-determinados (Tabela 11), com velocidade constante no sistema robotizado e eficiência térmica (K) 0.8, de acordo com a norma preestabelecida (Item 2.12).

3.4.5 Plano de corte das amostras

O plano de corte das amostras foi definido seguindo-se a norma DIN EN ISO 15614-1:2012, que determina para juntas soldadas tipo filete ou junta T, que 25 mm contados das extremidades em direção ao centro da amostra, devem ser descartados, para fins de testes de macrografia e dureza. Isso se justifica pelo fato de nas extremidades a junta soldada não apresentar as mesmas propriedades químicas e mecânicas, quando comparado a parte central do cordão de solda.

Figura 25: Esboço de corte.



Fonte: Autor (2017).

Para realizar o corte das amostras, foi necessário utilizar equipamento de serra fita vertical, refrigerado por fluido de corte, que garantisse assim que as propriedades químicas e mecânicas da junta soldada não sofressem nenhum tipo de alteração na estrutura cristalina do grão.

Figura 26: Serra fita em processo de corte da amostra.



Fonte: Autor (2017).

3.4.6 Caracterização macroestrutural

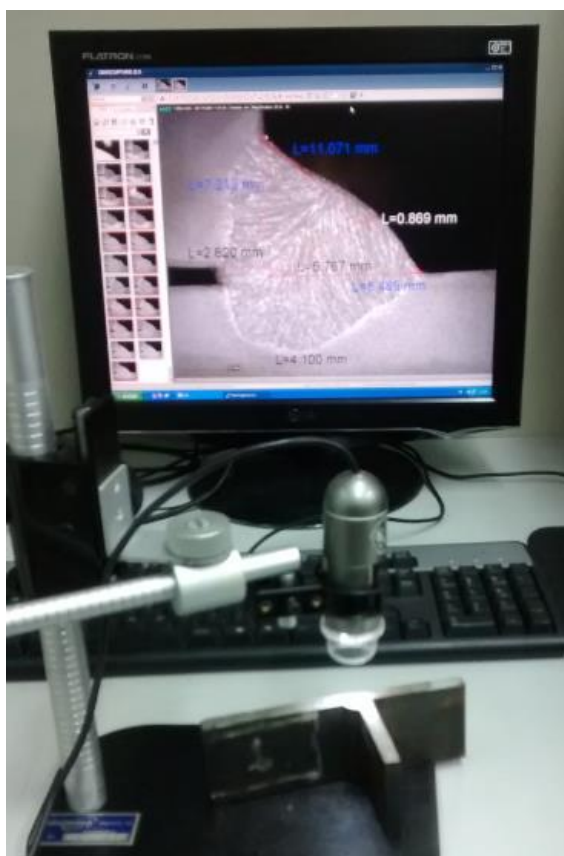
Após as amostras terem sido inspecionadas visualmente e cortadas, as mesmas foram lixadas e polidas individualmente (Figura 27), em uma de suas faces cortadas, com o auxílio de uma lixadeira plana.

Figura 27: Amostra após ser lixada e polida.



Fonte: Autor (2017).

Figura 28: Microscópio Dino Lite - AM4115ZTL.



Fonte: Autor (2017).

A visualização da macroestrutura da junta soldada, só foi possível após realizar ataque químico com solução Nital de 10% e limpeza da região com álcool isopropílico 96%. Para de fato poder analisar a macroestrutura da junta soldada, foi necessário utilizar microscópio, digital com faixa de ampliação de 40 vezes (Figura 28), como ferramenta de auxílio.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste tópico, serão apresentados os resultados dos testes experimentais com o Arame Sólido e o arame Metal Cored, soldados em processo GMAW e FCAW, onde os resultados foram obtidos após análise das 9 amostras (18 corpos de prova) soldadas. Foram considerados como iguais todos os parâmetros de soldagem, sendo que nos últimos três testes alterou-se a velocidade de soldagem, dando a este teste a caracterização de processo “Otimizado”.

4.1 INSPEÇÃO VISUAL DAS AMOSTRAS SOLDADAS

Seguindo o cronograma das etapas dos experimentos (Figura 14), após realizar a soldagem de todos os corpos de prova, realizou-se uma inspeção visual de cada uma das amostras, com o intuito de identificar quaisquer possíveis irregularidades na junta soldada, como trinca, porosidade, falta de preenchimento ou mordedura. A Figura 29 mostra parte das amostras em processo de inspeção visual.

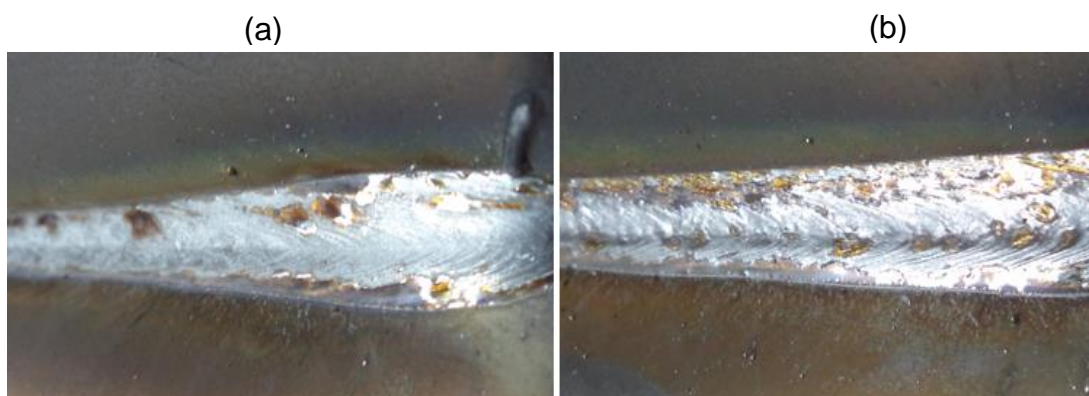
Figura 29: Amostras dispostas lado a lado para inspeção visual.



Fonte: Autor (2017).

Todas as amostras, tanto as do processo com Arame Sólido quanto arame tubular, apresentaram resultado satisfatória, sem nenhum tipo de problema de soldagem. Algumas ficaram com um pouco de escória e respingos na camada mais externa da junta, não caracterizando falha e podendo ser facilmente removida com uma escova rotativa de limpeza. A Figura 30 ilustra o cordão de solda realizado com arame tubular (a) e com Arame Sólido (b).

Figura 30: Junta soldada com arame tubular e sólido.



Fonte: Autor (2017).

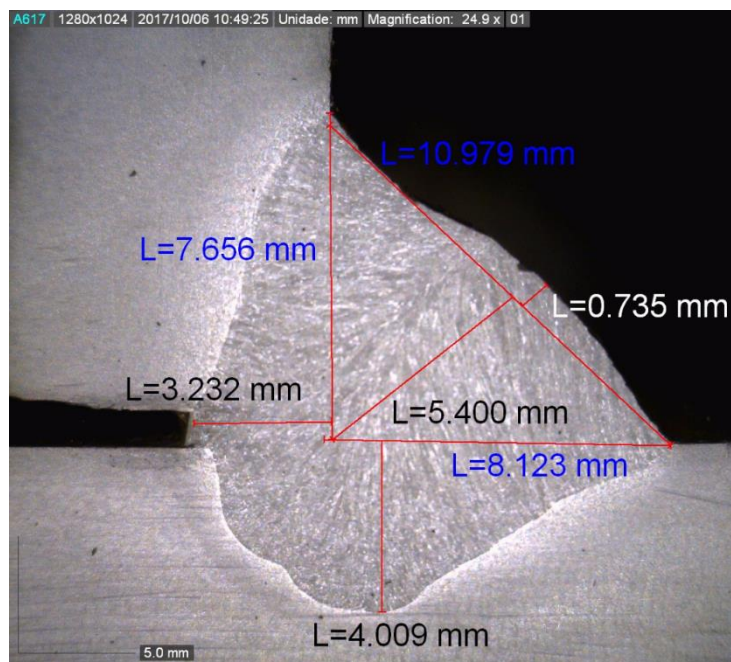
4.2 ENSAIO MACROGRÁFICO DAS JUNTAS SOLDADAS

Os ensaios macrográficos foram realizados seguindo o plano de corte das amostras, já comentado anteriormente no subitem 3.4.5 (Figura 18) e o fluxograma das etapas dos experimentos (Figura 16).

Para cada amostra, foram realizadas três macrografias da junta soldada, sendo que, para o Arame Sólido foram realizadas 9 e para o arame tubular 18. Dessas 18 amostras soldadas com arame tubular, 9 foram soldadas utilizando os mesmos parâmetros da soldagem com Arame Sólido, sendo que das 18 amostras restantes, 9 foram soldadas com parâmetro otimizado, ou seja, velocidade de soldagem maior. Todas as amostras cortadas totalizaram um montante de 27 ensaios macrográficos.

Na Figura 31 é possível identificar com ampliação de 40 vezes a estrutura interna da junta soldada pelo processo FCAW com Arame Tubular.

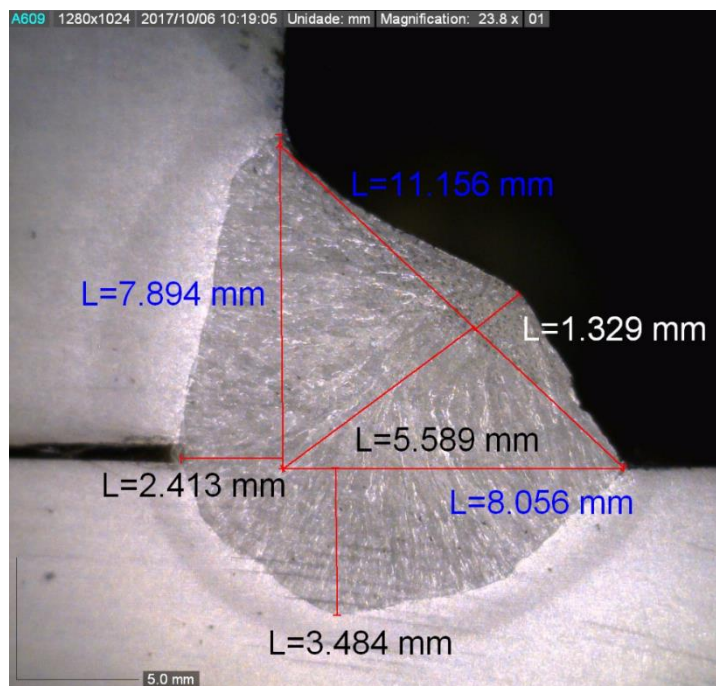
Figura 31: Macrografia de junta soldada com Arame Tubular.



Fonte: Autor (2017).

A Figura 32 mostra a estrutura interna da junta soldada em processo GMAW, com Arame Sólido.

Figura 32: Macrografia de junta soldada com Arame Sólido.



Fonte: Autor (2017).

Analisando as Figuras 31 e 32, pode ser identificado que tanto o arame tubular quanto o Arame Sólido, respectivamente, apresentaram considerável penetração da junta soldada no metal de base, destacando-se mais o primeiro caso (Figura 31), que teve uma maior inserção da união soldada.

4.3 APORTE TÉRMICO

O aporte térmico foi calculado de acordo com a Equação 1, tendo como base de dados os registros obtidos junto a fonte de soldagem (Imagem 5(b)). Os resultados foram dispostos em uma planilha, para calcular o valor do aporte térmico médio em cada um dos arames testados. Os dados e os valores calculados podem ser vistos na Imagem 12.

Tabela 12: Aporte térmico para as diferentes etapas dos testes.

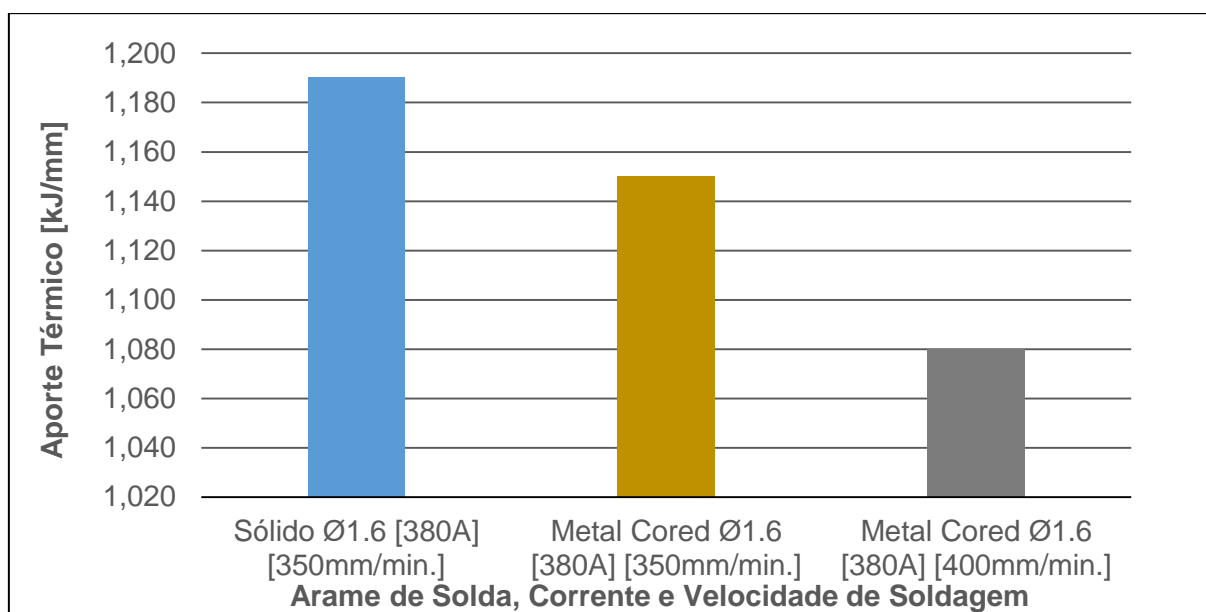
Solda	Corrente [A]	Arame Solda [Tipo]	Tensão média [V]	Corrente média [A]	Vel. Solda [mm/min.]	Eficiência térmica [η]	Aporte térmico [kJ/mm]	AT Médio [%]
1			24,40	382,00			1,177	
2	380	Sólido Ø1.6	24,50	380,00	380	0,8	1,176	1,19
3			24,60	389,00			1,209	
4			23,90	386,00			1,165	
5	380	Metal Cored Ø1.6	23,50	385,00	380	0,8	1,143	1,15
6			23,30	385,00			1,133	
7			23,00	383,00			1,057	
8	380	Metal Cored Ø1.6	23,50	385,00	400	0,8	1,086	1,080
9		(otimizado)	23,70	386,00			1,098	

Fonte: Autor (2017).

Um maior aporte térmico pode ser observado no Arame Sólido e Metal Cored, com velocidade de soldagem de 300 mm/min.. Já no arame Metal Cored (otimizado), em função de se ter uma maior velocidade de soldagem foi menor o aporte térmico apresentado.

A Figura 33, mostra comparativamente os resultados obtidos nos testes dos 9 corpos de prova, confirmando assim que o Arame Sólido apresenta uma maior penetração na junta soldada do que o arame tubular.

Figura 33: Resultados dos testes referentes ao aporte térmico.



Fonte: Autor (2017).

4.4 TAXA DE DEPOSIÇÃO

A taxa de deposição, é influenciada, tanto no arame maciço como no arame tubular, pela densidade de corrente (KUNTZ, 2016). Com isso, identificou-se após o cálculo, que o arame tubular por possuir um fluxo interno, o credencia a depositar uma maior quantidade de material na poça de fusão, durante o processo de soldagem.

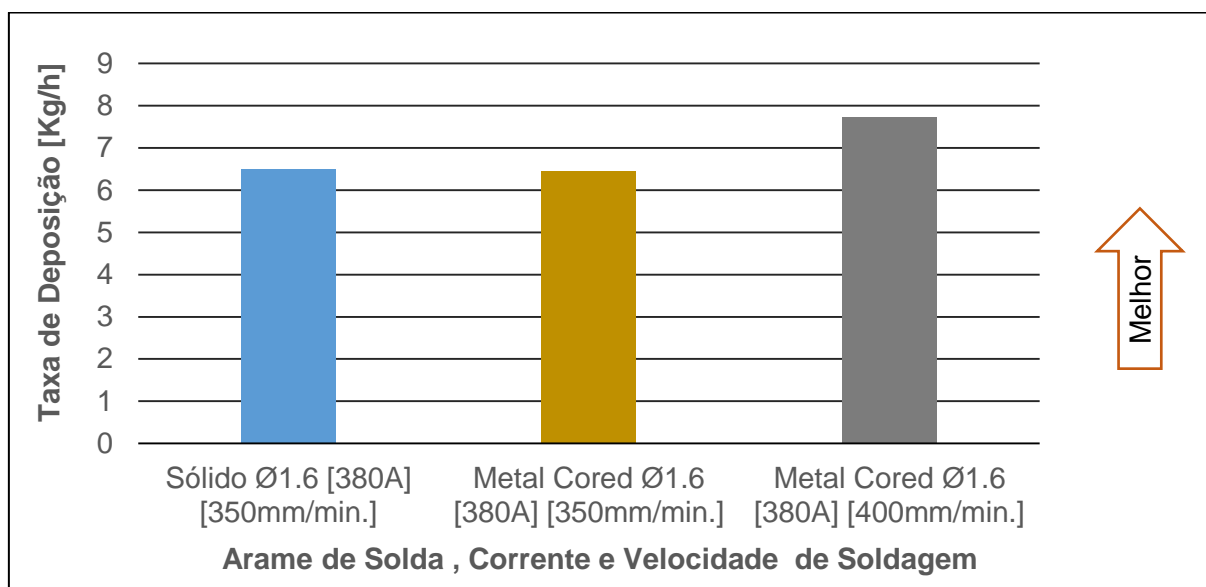
Tabela 13: Taxa de deposição para diferentes etapas dos testes.

Solda	Corrente [A]	Arame Solda [Tipo]	Mf [g]	Mi [g]	Arco Aberto [h]	TD [Kg/h]	TD média [Kg/h]
1	380	Sólido Ø1.6	5705	5795	0,01417	6,35	6,50
2			5710	5800	0,01403	6,42	
3			5695	5790	0,01414	6,72	
4	380	Metal Cored Ø1.6	5725	5815	0,01419	6,34	6,45
5			5690	5785	0,01422	6,68	
6			5755	5845	0,01419	6,34	
7	380	Metal Cored Ø1.6 (Otimizado)	5730	5825	0,01228	7,74	7,73
8			5735	5835	0,01229	8,14	
9			5730	5820	0,01231	7,31	

Fonte: Autor (2017).

A Tabela 13 mostra os valores obtidos destacados em amarelo, após cálculo realizado com a Equação 2. A Figura 34, ilustra comparativamente quanto o Arame Metal Core e Sólido depositaram durante um dado intervalo de tempo.

Figura 34: Resultados dos testes referentes a taxa de deposição.



Fonte: Autor (2017).

4.5 RENDIMENTO DEPOSITADO

Para os valores encontrados e dispostos na Tabela 14, nota-se um rendimento superior do Arame Sólido em relação ao Arame Metal cored.

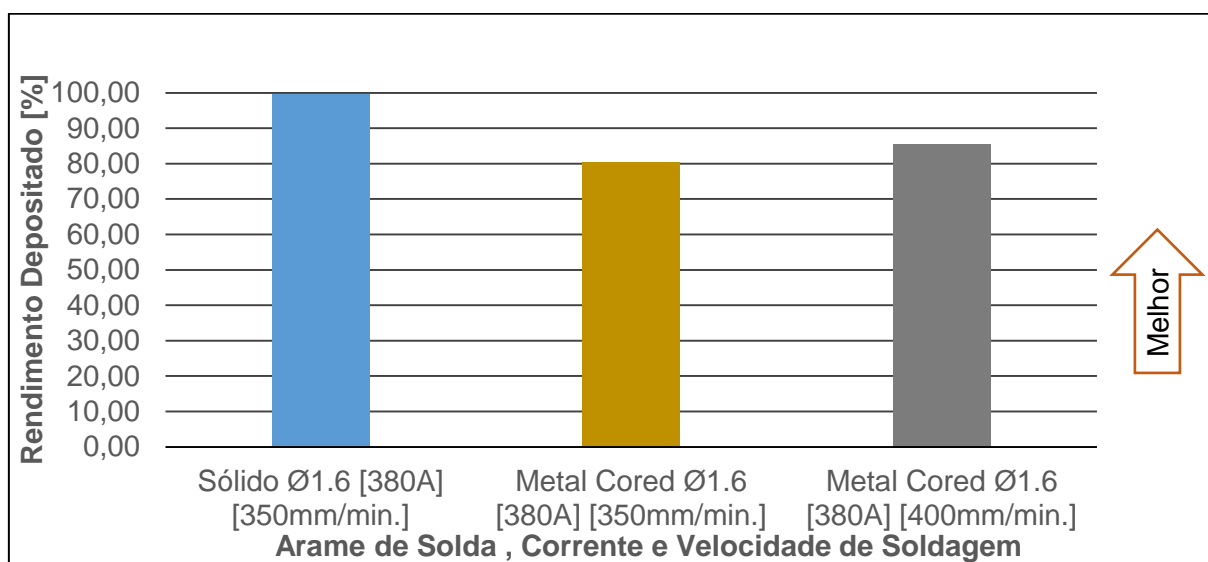
Tabela 14: Rendimento depositado para diferentes etapas dos testes.

Solda	Corrente [A]	Arame Solda [Tipo]	Mi [g]	Mf [g]	MI [g/m]	Cl [m]	η [%]	η médio [%]
1			5705	5795		5,78	100,16	
2	380	Sólido Ø1.6	5710	5800	15,546	5,81	99,69	100,92
3			5695	5790		5,94	102,91	
4			5725	5815		7,32	79,04	
5	380	Metal cored Ø1,6	5690	5785	15,546	7,34	83,27	80,45
6			5755	5845		7,32	79,04	
7			5730	5825		6,34	82,30	
8	380	Metal Cored Ø1.6	5735	5835	13,854	6,34	93,47	85,88
9		(Otimizado)	5730	5820		6,35	81,88	

Fonte: Autor (2017).

Isso decorre em função do Arame Tubular ter uma maior tendência a respingos e salpicos durante o processo de soldagem, gerando assim perdas. A Figura 35, ilustra os resultados em forma de comparativo, tanto para o processo com Arame Sólido como para o arame tubular.

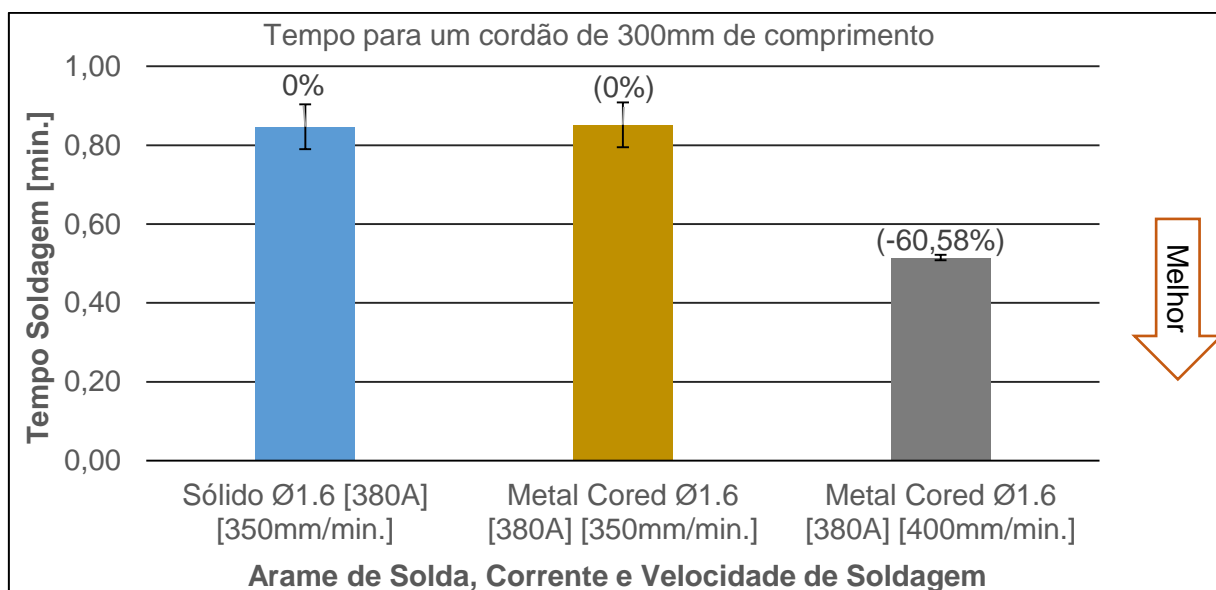
Figura 35: Resultados dos testes referentes ao rendimento depositado.



Fonte: Autor (2017).

4.6 TEMPO DE PROCESSO DE SOLDAGEM

Figura 36: Resultados dos testes referentes ao tempo de soldagem.



Fonte: Autor (2017).

Os resultados referentes ao tempo de soldagem (Figura 36), confirmam que o arame Metal Cored otimizado apresentou um melhor desempenho, em relação aos demais, pois possuía uma maior velocidade de soldagem.

A Figura 36, mostra qual a real vantagem do arame tubular no processo otimizado em relação aos demais, tendo por base que se teve um ganho de produtividade maior e conseqüentemente uma redução no tempo de operação.

CONCLUSÃO

A partir dos testes realizados com o Arame Sólido e tubular de 1.6 mm, nos processos de soldagem GMAW e FCAW robotizados, e utilizando como norte uma metodologia experimental prática, pode-se afirmar que os dois arames apresentaram resultados satisfatórios, sem nenhum tipo de problema de grau maior na junta soldada, como a existência de porosidade, mordedura e falta de preenchimento.

No entanto, de um modo geral, o Arame Metal Cored se comportou positivamente no que diz respeito aos parâmetros testados, apresentando uma maior Taxa de Deposição, assim como no processo otimizado, uma redução considerável no tempo total de soldagem. Além do mais, a junta soldada com arame Metal Cored apresentou melhor aparência visual, com pouca escória em sua camada mais externa.

É interessante expressar com ênfase que o arame Metal Cored, ostentou melhores resultados em contrapartida aos demais arames testados, sendo que uma avaliação definitiva sobre qual o melhor arame a ser empregado nas condições dos testes realizados, depende de um estudo sobre os custos envolvidos e materiais utilizados em cada um dos processos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÁQUILA, V. **Processo de Soldagem MIG/MAG e Arame Tubular**. Escola de Soldagem L&A – Centro de Formação de Soldadores, Salvador, 2012.
- AWS A5.18/A5.18M. **Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding**. An America National Standard, 2005.
- AWS A5.36/A5.36M. **Specification for Carbon and Low- Alloy Steel Flux Cored Electrodes for Flux Cored Arc Welding and Metal Cored Electrodes for Gas Metal Arc Welding**. An America National Standard, 2016.
- BARBEDO, N.D.D. **Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Outubro, 2011.
- BARRA, S. R. **Influência do processo MIG/MAG térmico sobre a microestrutura e a geometria da zona fundida**. 2003. 248 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- BATALHA, G.F. **Processos de Fabricação: Junção, Soldagem e Brasagem**. PMR 2202, Introdução a Manufatura Mecânica. Laboratório de Engenharia de Fabricação, Outubro, 2003.
- CAMPOS, P. T. **Caracterização mecânica e microestrutural de juntas soldadas pelos processos MIG/MAG (GMAW) e arame tubular (FCAW)**. 2005. 75 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Ciências Exatas e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba.
- DIN EN 1011-1. **Recommendations for welding of metallic materials. Part 1: General guidance for arc welding (includes Amendment A1)**. European Standard, September, 2012.
- DIN EN ISO 15614. **Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – Welding procedure test**. European Standard, 2012.
- FORTES, C. **Apostila de Arames Tubulares**. ESAB, Maio, 2004.
- FORTES, C. **Apostila de soldagem MIG/MAG**. ESAB, Janeiro, 2005.
- GARCIA, R. P. **“Uma avaliação dos processos MIG/MAG e Eletrodo Tubular em termos de capacidade produtiva, geração de fumos e de respingos, usando consumível para aço estrutural”**: 2010, 133 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- GARCIA, R. P. **“Uma metodologia para Análises Comparativas da Capacidade Produtiva entre Arames Maciços (MIG/MAG) e Tubulares (Eletrodo Tubular)”**.

2011, p. 146-155 Dissertação de Mestrado. Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem – Laprosolda, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

GOMES, E. B. **Análise do Comportamento da Soldagem por Curto-Circuito aplicado ao Processo Eletrodo Tubular através da Metodologia Taguchi**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2006.

JOAQUIM, R. **Processo de soldagem por arame tubular**. Info Solda, 2005. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/artigos/processos-de-soldagem/283-processo-de-soldagem-por-arama-tubular.html>>. Acesso em: 13 out. 2017.

JOAQUIM, R., (2001), **“Manual de Tecnologia de Fabricação e Soldagem – Módulo II - Processo de Soldagem Arame Tubular”**. Centro de Tecnologia de Soldagem, SP.

JUNIOR, L. P. da S.; CABRAL, T. dos S. **Especificação de Procedimentos de Soldagem MIG para o Preenchimento de Cavidades pela Técnica de Camadas Sucessivas**. 2008, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, 2008.

KIMINAMI, C.S; CASTRO, W.B. de; OLIVEIRA, M.F. de. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Blucher, 2013.

KUNTZ, M. R. K. **Análise Comparativa entre a Soldagem com Arame Sólido e Metal Cored no Processo Multipasses**. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, Dezembro, 2016.

MACHADO, I.G. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**. Editado pelo autor. Porto Alegre, 1996.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J. BRACARENSE, A. Q. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. 3ª. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.

MARQUES, P. V. MODENESI, P. J. SANTOS, D. B. **Introdução à metalurgia da soldagem**. Universidade Federal de Minas Gerais, Janeiro, 2012.

MODENESI, P. J. **Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais**. Universidade Federal de Minas Gerais, Abril, 2012.

MODENESI, P. J. MARQUES, P. V. **Introdução aos Processos de soldagem**. Universidade Federal de Minas Gerais, Fevereiro, 2006.

NASCIMENTO, A. S. **Aspectos operacionais e metalúrgicos da soldagem com arame Metal Cored**. Universidade Federal do Pará, Janeiro, 2005.

SANTOS, R. P. G. **“Uma Avaliação Comparativa dos Processos MIG/MAG e Eletrodo Tubular em Termos de Capacidade Produtiva, Geração de Fumos e de**

Respingos”, 2010, 134 p. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

SCOTTI, A; PANOMAREV, V. Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, melhor desempenho. São Paulo, Altiber Editora, 284 p., 2008.

SILVA, Edna L. da, MENEZES, Ester M., **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. Florianópolis**: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC. 3. ed. 2001., 118 p. Disponível em <[http://WWW.ppgep.ufsc.br/legislação e estrutura anterior/metodologia](http://WWW.ppgep.ufsc.br/legislação_e_strutura_anterior/metodologia)>. Acesso em: 10 mar. 2004.

SOEIRO, J. C. LUZ, M. A. BRANDI, S. D. **Comparação da taxa e eficiência de deposição entre os consumíveis ER70S-6 e E71T-1C**. Soldagem & Inspeção, 2015.

SOUZA, C. I. **“Análise comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW com transferência metálica por curto-circuito na posição horizontal”**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2011.