

**CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ITAQUERA
PROFESSOR MIGUEL REALE**

**ADILSON DE JESUS SOUZA
ALISSON DA SILVA MACHADO**

**Avaliação da influência do diâmetro de arame na soldagem GMAW
aplicada na indústria de leitos de passagem.**

**SÃO PAULO
2022**

**CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ITAQUERA
PROFESSOR MIGUEL REALE**

**ADILSON DE JESUS SOUZA
ALISSON DA SILVA MACHADO**

**Avaliação da influência do diâmetro de arame na soldagem GMAW
aplicada na indústria de leitos de passagem.**

Trabalho acadêmico realizado como requisito
para a conclusão do curso de tecnologia em
Mecânica: Processos de Soldagem.

Orientador: Prof. Me. Edgar de Souza Dutra

**SÃO PAULO
2022**

RESUMO

Este presente trabalho tem a intenção de apresentar de forma nítida uma avaliação no que tange a influência dos diâmetros de arame maciço sobre a aplicação da soldagem GMAW no modo semiautomático para a fabricação de leitos de passagem, comparando aspectos técnicos e características econômicas referentes a cada diâmetro de arame. Entre os dois casos, buscou-se a obtenção de resultados como; aumento de produtividade, aumento na qualidade dos cordões, diminuição dos insumos de soldagem, refletindo na maior eficácia. Os ensaios macrográficos realizados nas amostras soldadas no modo semiautomático na posição descendente, indicaram a falta de penetração nos corpos de prova soldados com 100A e aprovação com total com 150 nas condições testadas. As macrografias também demonstraram que todas as soldas realizadas com o arame Ø 0,8 mm foram aprovadas quanto ao requisito de perfil dos cordões. O rendimento de deposição foi menor 1,3 % a maior nas soldas realizadas com o arame Ø 1,0 mm. A taxa de deposição na soldagem com arame de Ø 0,8 mm foi de 3,68 kg/h, apresentando-se 15% maior se comparado ao arame de Ø 1,0. A energia imposta no processo foi menor utilizando o arame Ø 0,8 mm. A análise final comparativa da composição dos custos, constata que o custo da soldagem com o arame Ø 0,8 mm é menor 27% se comparado ao arame Ø 1,0 mm.

Palavras-chave: Arames; Processos GMAW; Qualidade; Desempenho.

ABSTRACT

This present work intends to clearly present an evaluation regarding the influence of solid wire diameters on the application of GMAW welding in the semiautomatic mode for the manufacture of passage beds, comparing technical aspects and economic characteristics referring to each diameter wire. Between the two cases, we sought to obtain results such as; increase in productivity, increase in the quality of the beads, reduction of welding inputs, reflecting in greater efficiency. The macrographic tests carried out on the samples welded in the semiautomatic mode in the descending position, indicated the lack of penetration in the specimens welded with 100A and approval with a total of 150 in the tested conditions. The macrographs also showed that all welds made with Ø 0.8 mm wire were approved in terms of the profile requirement of the beads. The deposition yield was lower by 1.3% and higher in welds made with Ø 1.0 mm wire. The deposition rate in welding with Ø 0.8 mm wire was 3.68 kg/h, 15% higher when compared to Ø 1.0 wire. The energy imposed in the process was lower using the Ø 0.8 mm wire. The final comparative analysis of the composition of costs shows that the cost of welding with Ø 0.8 mm wire is 27% lower compared to Ø 1.0 mm wire.

Keywords: Gauges; GMAW process; Quality; Performance.

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Exemplo de um processo de soldagem por fusão.....	15
Figura 2 - Processo de soldagem GMAW	16
Figura 3 - Fonte de soldagem GMAW	17
Figura 4 - Equipamento de soldagem GMAW	18
Figura 5 - Tipos de arames maciços	19
Figura 6 - Influências dos gases na penetração da solda.....	20
Figura 7 - - Efeito da velocidade de soldagem na penetração da solda	22
Figura 8 - Comprimento de arame livre (Stick-out)	23
Figura 9 - Condições de corrente e tensão para os tipos de transferência	25
Figura 10 - Repartição térmica.....	26
Figura 11 - Macroestrutura de uma solda de aço ao carbono	27
Figura 12 - Estrutura da ZAC de um aço de baixo carbono.....	28
Figura 13 - Descontinuidades de uma junta de ângulo	30
Figura 14 - Leito de passagem e exemplo de montagem.....	33
Figura 15 - Peça teste - Leito pesado de passagem	33
Figura 16 - Arame maciço ER 70S-6.....	34
Figura 17 - Fonte e cabeçote alimentador de arame interno	36
Figura 18 - Mistura de gases de proteção	37
Figura 19 - Fluxômetro (Bibímetro).....	37
Figura 20 - Preparações dos corpos das peças	38
Figura 21 - Balanças de precisão.....	38
Figura 22 - Teste de parametrização	39
Figura 23 - corpo de prova.....	39
Figura 24 - Execução da solda.....	40
Figura 25 - Inspeção visual com calibre e gabarito	41
Figura 26 - serra de fita circular	42
Figura 27 - Lixamento da peça.....	42
Figura 28 - Ataque químico	43
Figura 29 - Estereoscópio e computador.....	43
Figura 30 - Primeiras amostras de solda com arame Ø 0,8 mm.....	45
Figura 31 - Segunda amostras de solda com arame Ø 1,0 mm	45

Figura 32 - Rendimento de deposição (%)	47
Figura 33 - Comparativo de taxa de deposição	48
Figura 34 - Energia imposta	50
Figura 35 - Macrografias (Arame Ø 0,8mm x Arame Ø 1,0mm)	50
Figura 36 - Macrografias – Perfil de penetração (Ø 0,8mm x Ø 1,0mm)	51
Figura 37 - Macrografias – Dimensional de solda (Ø 0,8mm x Ø 1,0mm)	52
Figura 38 - Custo total da soldagem	56

Lista de tabelas

Tabela 1 - Características dos modos de transferência metálica na soldagem GMAW	24
Tabela 2 - Variáveis da equação de energia de soldagem	29
Tabela 3 - Ensaio visual	31
Tabela 4 - Composição de custos de soldagem	32
Tabela 5 - Composição química da base do material SAE1020	34
Tabela 6 - Propriedades mecânicas do material SAE1020	34
Tabela 7 - Composição química do arame ER70S-6	35
Tabela 8 - Propriedades mecânicas do arame ER70S-6	35
Tabela 9 – Inspeção visual	46
Tabela 10 - Rendimento de deposição	47
Tabela 11 - Taxa de deposição	48
Tabela 12 - Energia Imposta	49
Tabela 13 - Ensaio visual	51
Tabela 14 - Resultados das amostras	52
Tabela 15 - Custo do metal de adição depositado conforme Equação(1)	53
Tabela 16 - Custo da energia elétrica Equação (2)	54
Tabela 17 - Custo da mão de obra Equação (3)	54
Tabela 18 - Custo do gás conforme Equação(4)	55

Lista de abreviaturas e siglas

ASME - Sociedade Americana dos Engenheiros Mecânicos

ASTM - Sociedade Americana para Ensaios e Materiais

AWS - Sociedade Americana de Soldagem

AL - Alongamento

CP - Corpo de prova

DBCP - Distância do bico de contato à peça

FBTS - Fundação Brasileira de Tecnologia em Soldagem

GMAW - Soldagem a arco de metal com gás

LE - Limite de escoamento

LR - Limite de ruptura

MAG - Gás ativo no metal

MIG - Gás inerte no metal

RI - Resistência de impacto

ZAC - Zona afetada pelo calor

ZF - Zona fundida

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Justificativa.....	13
2 OBJETIVOS.....	13
2.1 Objetivo geral.....	13
2.2 Objetivos específicos.....	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1 União de materiais.....	15
3.2 Equipamentos da soldagem GMAW.....	16
3.2.1 Fonte de soldagem GMAW.....	17
3.2.2 Sistema de alimentação.....	18
3.3 Consumíveis do processo GMAW.....	18
3.3.1 Arames maciço.....	19
3.3.2 Gás de proteção (MIG/MAG)	19
3.4 Variáveis do processo GMAW.....	20
3.4.1 Tensão de arco.....	21
3.4.2 Corrente de soldagem.....	21
3.4.3 Velocidade de soldagem.....	21
3.4.4 Velocidade de alimentação do arame.....	22
3.4.5 Distância do bico à peça.....	22
3.4.7 Tipos de transferências.....	23
3.5 Metalurgia da soldagem.....	23
3.5.1 Repartição térmica.....	23
3.5.2 Macroestruturas e microestruturas da junta soldada.....	25
3.5.3 Energia imposta.....	25

3.6 Qualidade na soldagem.....	28
3.7 Custos de soldagem.....	30
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
4.1 Materiais.....	33
4.1.1 Metal de base (Produto)	34
4.1.2 Consumíveis - Arame maciço.....	34
4.2 Métodos	35
4.2.1 Equipamentos.....	35
4.2.2 Fonte de soldagem e alimentador de arame.....	36
4.2.3 Gás de proteção.....	36
4.2.4 Fluxômetro.....	36
4.2.5 Preparação dos corpos das peças.....	38
5 Balança.....	38
5 Balança (peso anterior e posteriores à soldagem.....	38
6 Método comparativo.....	388
6.1 Teste de parametrização.....	38
6.1.2 Preparação das peças	38
6.2 Execução de soldagem.....	39
6.2.1 Inspeção visual (critério de aceitação AWS D1.1)	39
6.2.2 Cálculo da taxa de deposição.....	40
6.2.3 Cálculo de energia imposta.....	40
6.2.4 Caracterização macrográfica.....	40
6.2.5 Custos de soldagem.....	43
7 RESULTADOS.....	44
7.1 Resultado corpo de prova	44
7.1.2 Inspeção visual.....	45
7.1.3 Rendimento de deposição	46

7.1.4 Taxa de deposição	47
7.1.5 Energia imposta	48
7.1.6 Caracterizações das macrografias	49
7.1.7 Resultados econômicos.....	51
7.1.7.1 Custo do metal de adição depositado.....	52
7.1.7.2 Custo de energia elétrica.....	52
7.1.7.3 Custo de mão de obra.....	53
7.1.7.4 Custo do gás.....	54
7 CONCLUSÃO.....	56
8 REFERÊNCIAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

O processo GMAW (do inglês *Gas Metal Arc Welding*) tem ampla utilização nos diferentes ramos da indústria, por sua versatilidade, custo, produtividade, facilidade, entre outras vantagens, um dos processos mais utilizados na junção de materiais através da soldagem. É empregado na fabricação, manutenção, recuperação de peças e equipamentos, e também em revestimentos de superfícies metálicas (MODENESI: 2007).

A utilização do processo semiautomático de soldagem GMAW, possui variações e características determinantes na qualidade da solda, além de possibilitar erros durante a sua execução, por se tratar de um processo que depende especificamente da habilidade do soldador, esses fatores tornam o processo instável e ineficiente gerando um número alto de falhas e consequentemente refugos elevando os custos do processo produtivo. (ALVES,2009)

A questão particular desse trabalho é despertar a atenção das tecnologias presentes como a implantação da análise do emprego de bitolas distintas e seus comportamentos com relação aos mesmos parâmetros. No caso da indústria de fabricação de eletrocalhas os ganhos se fazem ainda mais necessário, por se tratar de cordões curtos e descendentes no ângulo de 90°.

Um dos mais importantes fatores a considerar na soldagem MIG/MAG é a seleção correta do arame de solda. Esse arame, em combinação com o gás de proteção, produzirá o depósito químico que determina as propriedades físicas e mecânicas da solda. Basicamente existem cinco fatores principais que influenciam a escolha do arame para a soldagem MIG/MAG

- A composição química do metal de base;
- As propriedades mecânicas do metal de base;
- O gás de proteção empregado;
- O tipo de serviço ou os requisitos da especificação aplicável;
- O tipo de projeto de junta.

Entretanto, a grande experiência na soldagem industrial levou a *American Welding Society (AWS)* a simplificar a seleção. Foram desenvolvidos e fabricados arames que produzem os melhores resultados com materiais de base específicos.

Embora não exista uma especificação aplicável à indústria em geral, a maioria dos arames está em conformidade com os padrões da AWS. FORTES (2005).

Esse empenho tem como objetivo apresentar ganhos satisfatórios que tangem a produção, qualidade e custos, coligado com o bem-estar dos colaboradores tanto quanto ao do cliente final. Baseando-se sobre a eficácia da deposição do material de adição com parâmetros de corrente e tensão de arco, proporcionando um aumento na qualidade dos cordões soldados por um ajuste mais adequado e mais estável, se mantidas todas as exigências necessárias na montagem.

1.1 Justificativa

Otimizar os recursos humanos, tecnológicos, energéticos e os consumíveis. Em prol da satisfação do cliente final e da própria corporação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral foi verificar a influência do diâmetro do arame na soldagem GMAW aplicada na solda do leito de passagem. Em busca de uma adequação no que se refere aos parâmetros ideais para cada diâmetro, firmados na produtividade sem abrir “mão” da qualidade, satisfação e dos custos.

2.2 Objetivos específicos

Para atender o objetivo geral, é necessário que alguns objetivos específicos sejam atingidos:

- Analisar a produtividade através da taxa de deposição de soldagem (Kg/h), eficiência de deposição (%), energia imposta (kj/cm), velocidade de soldagem (cm/min.) e tempo de execução (peça/hora);
- Analisar e comparar os aspectos técnicos dos cordões de solda realizados pelo processo de soldagem GMAW nos modos de operação no processo GMAW correspondente em cada solda;

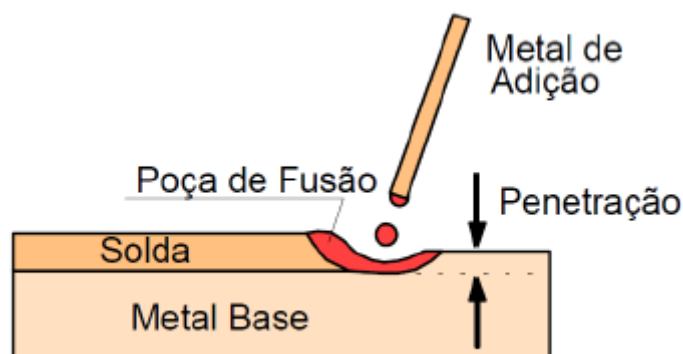
- Analisar e comparar as características econômicas das soldas realizadas pelo processo de soldagem GMAW nos parâmetros de operação das diferentes soldas respectivamente.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 União de materiais

De acordo com a Apostila Inspetor de Soldagem (2012), é um processo utilizado para unir materiais pelo seu aquecimento a temperaturas adequadas, com ou sem aplicação de pressão, ou apenas pela aplicação de pressão, com ou sem a participação de metal de adição. Distância que a fusão atinge no metal de base ou no passe anterior, a partir da superfície fundida durante a soldagem.

Figura 1 - Exemplo de um processo de soldagem por fusão



Fonte: MARQUES, MODENESI e BRACARENSE (2005)

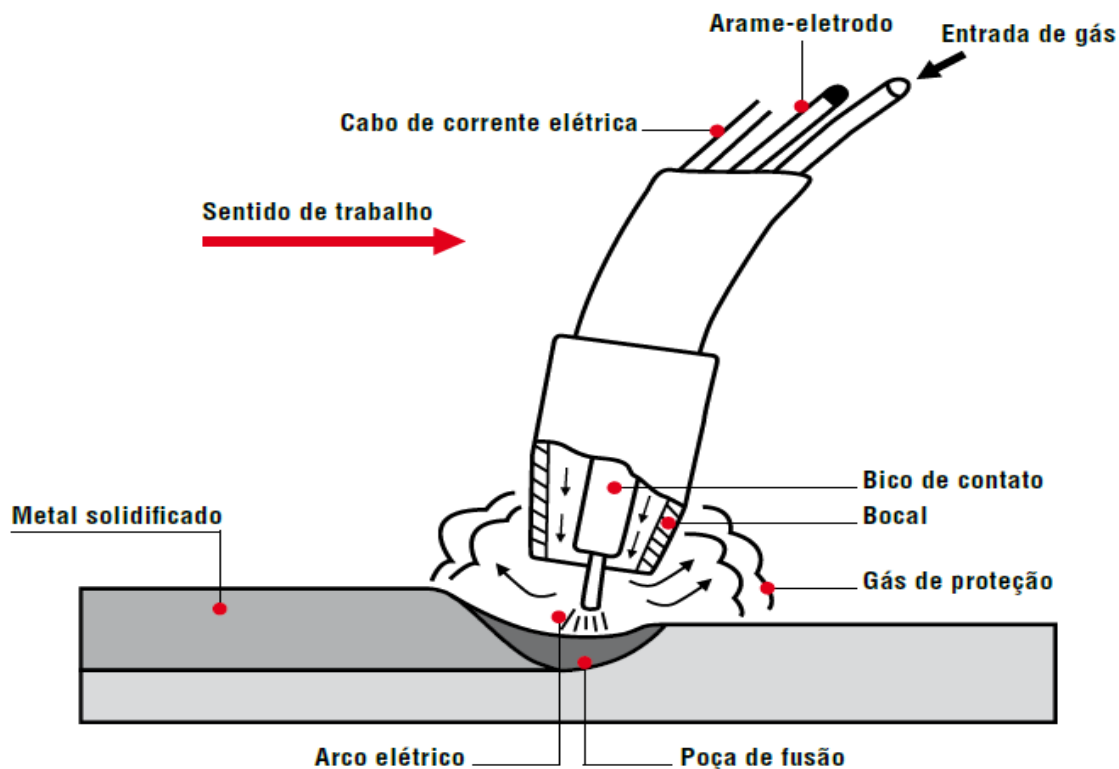
Técnica de reunir duas ou mais partes que passam a constituir um todo, assegurando a continuidade do material, assim como, as suas características mecânicas e químicas (MAGRINI, 1999).

3.1.1 Soldagem MIG/MAG (GMAW)

Soldagem a Arco Gás-Metal (Gás Metal Arc Welding - GMAW) é um processo de soldagem a arco que produz a união dos metais pelo seu aquecimento com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico contínuo (e consumível) e a peça (figura 2). A proteção do arco e poça de fusão é obtida por um gás ou mistura de gases. Se este gás é inerte (Ar/He), o processo é também chamado MIG (Metal Inert Gás). Por outro lado, se o gás for ativo (CO₂ ou misturas Ar/O₂/CO₂), o processo é chamado MAG (Metal Active Gás). Gases inertes puros são, em geral, usados na

soldagem de metais e ligas não ferrosas, misturas de gases inertes com pequenas quantidades de gases ativos são usadas, em geral, com aços ligados, enquanto misturas mais ricas em gases ativos ou CO₂ puro são usados na soldagem de aços carbono. SOLDAGEM UFMG (2001).

Figura 2 - Processo de soldagem GMAW



Fonte: SENAI – BA – CIMATEC (2012)

3.2 Equipamentos da soldagem GMAW

O equipamento para soldagem MIG/MAG consiste em uma pistola de soldagem, uma fonte de energia, um sistema de refrigeração da pistola, um dispositivo (cabeçote) controlador do arame, um sistema de injeção de gases.

- A pistola contém um cabo de passagem de corrente elétrica, um cabo guia de arame, mangueira para levar o gás de proteção até a área de soldagem e mangueira de água para refrigeração da pistola.
- O motor de alimentação de arame e o controle de soldagem são frequentemente fornecidos em um único módulo o alimentador de arame.

- Sua principal função é puxar o arame do carretel e alimentá-lo ao arco. O controle mantém a velocidade predeterminada do arame a um valor adequado à aplicação.

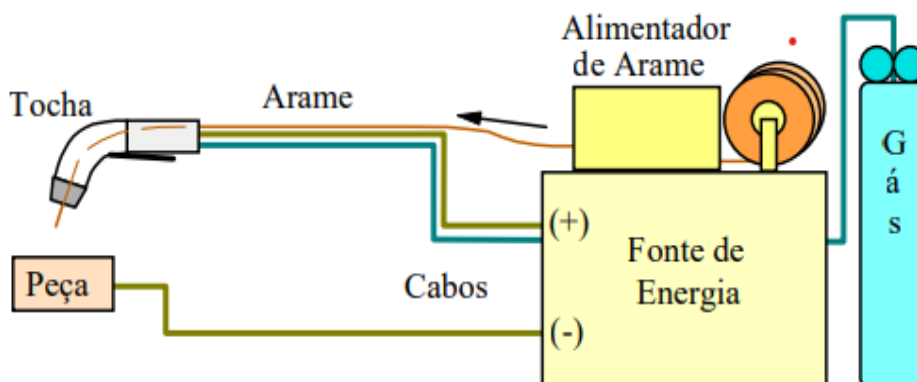
O gás de proteção, a água e a fonte de soldagem são normalmente enviadas à tocha pela caixa de controle. Pelo uso de válvulas solenoides os fluxos de gases e de água são coordenados com o fluxo da corrente de soldagem. O controle determina a sequência de fluxo de gás e energização do contator da fonte. Ele também permite o Pré e pós-fluxo de gás. (FORTES; 2005).

3.2.1 Fonte de soldagem GMAW

Quase todas as soldas com o processo MIG/MAG são executadas com polaridade reversa (CC+). O polo positivo é conectado à tocha, enquanto o negativo (massa) é conectado à peça. Já que a velocidade de alimentação do arame e, portanto, a corrente, é regulada pelo controle de soldagem, o ajuste básico feito pela fonte de soldagem é no comprimento do arco, que é ajustado pela tensão de soldagem. A fonte de soldagem também pode ter um ou dois ajustes adicionais para uso com outras aplicações de soldagem (FORTES; 2005).

Segundo Fortes (2005), a tocha possui um contato elétrico deslizante (bico de contato), que transmite a corrente elétrica ao arame, orifícios para passagem de gás de proteção no difusor, que fica entre o bico e o bocal para dirigir o fluxo de gás e interruptor para acionamento do processo. O alimentador de arame é composto basicamente de um motor, sistema de controle da velocidade do motor e rolos para impulsão do arame (Figura 3).

Figura 3 - Fonte de soldagem GMAW



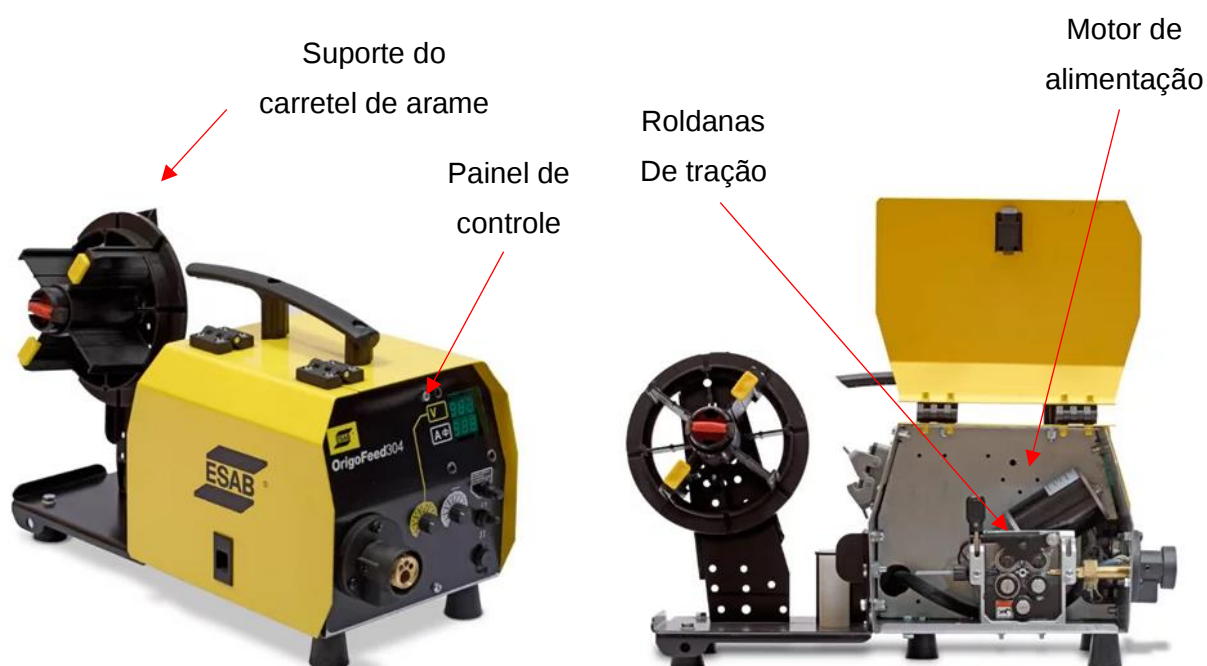
Fonte: MODENESI (2005)

3.2.2 Sistema de alimentação

Alimentador de arame tem como função, alimentar o arame consumível através dos guias e conduítes, devendo fornecer uma velocidade de alimentação sempre constante a fim de evitar oscilações no processo (FORTES; 2005).

O alimentador de arame pode ser utilizado tanto para aplicações semiautomáticas, quanto para aplicações automáticas, existindo ainda alimentadores de arame específicos para soldagem robotizada (FORTES; 2005).

Figura 4 - Equipamento de soldagem GMAW



Fonte: Adaptado da ESAB (2005)

3.3 Consumíveis do processo GMAW

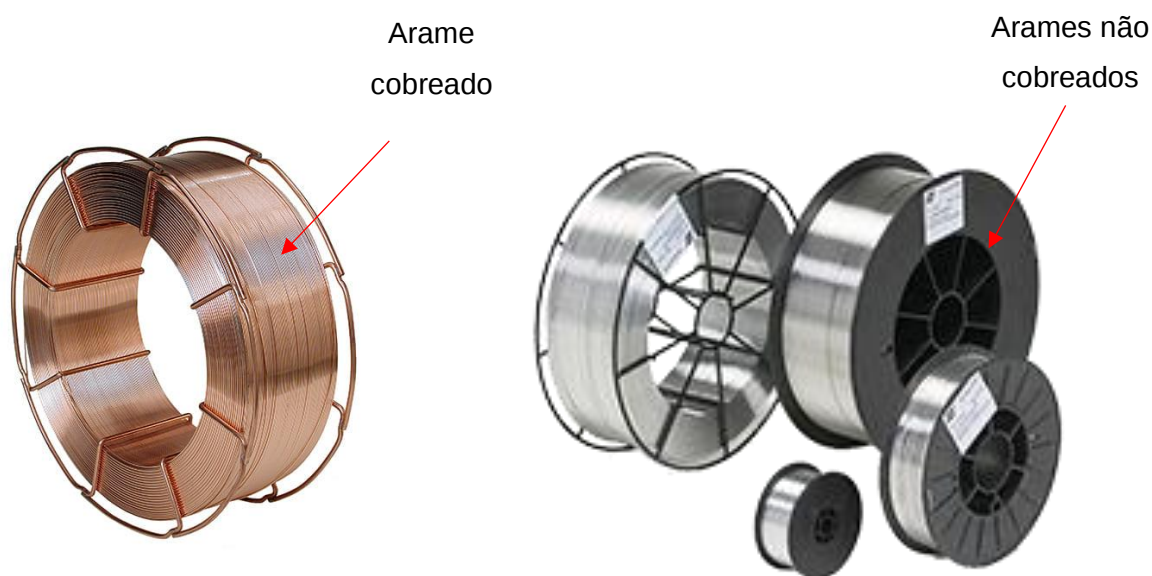
Consumíveis de soldagem são todos os materiais utilizados na deposição ou na proteção da solda. Portanto, além de eletrodos, varetas e arames, são considerados também como consumíveis de soldagem, os gases de proteção, fluxos e anéis consumíveis, os mesmos devem atender a normas específicas que estabelecem esses padrões. (SENAI – BA – CIMATEC; 2012).

3.3.1 Arames maciço

Segundo DUTRA (2020), os arames maciços e contínuos destinados ao processo de soldagem GMAW nas variações MIG/MAG, podem ser protegidos por uma fina camada de cobre (Figura 5) com o objetivo de evitar a oxidação e melhorar a condutibilidade elétrica através da passagem pelo bico de contato.

Os arames maciços podem ser utilizados para soldar diversos materiais, como: aços carbono e aços ligados em geral, alumínio e cobre. (BARBEDO; 2011).

Figura 5 - Tipos de arames maciços



Fonte: Adaptado da ESAB (2005)

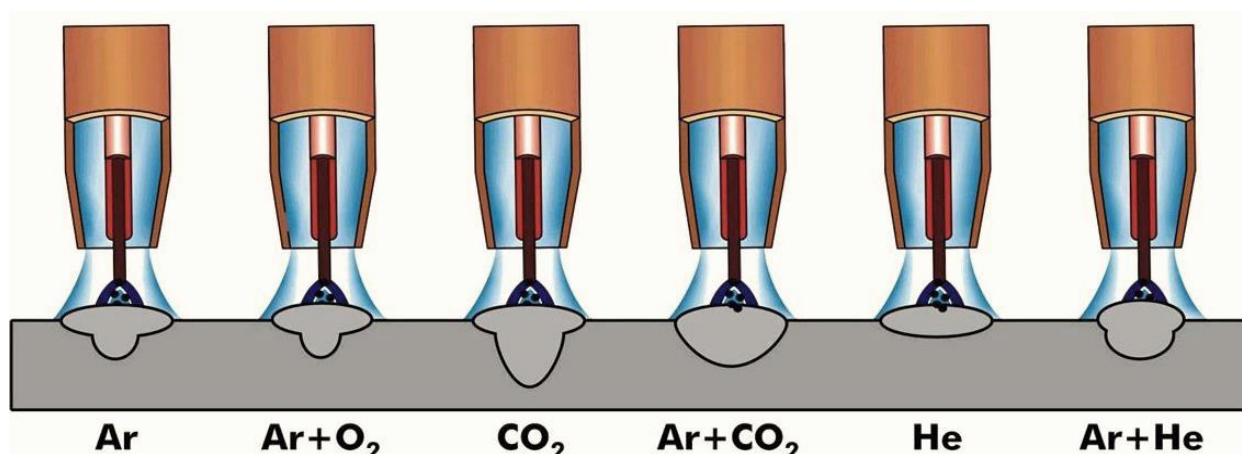
Conforme estudos de Fortes (2005), para as comparações efetuadas, foi utilizado o gás de proteção denominado comercialmente como PIPE, que possui em sua composição 90% argônio e 10% de CO_2 . Um metal de adição utilizado foi o arame sólido cobreado conforme norma AWS 5.18, classificação ER70S-6 de $\varnothing$ 0,8 e 1,0mm.

3.3.2 Gás de proteção (MIG/MAG)

O tipo de gás utilizado na soldagem GMAW influencia as características do processo, como a transferência metálica, a penetração, a largura e o formato do cordão de solda e as características do arco. As diferentes proporções das misturas

de gases, tanto ativos quanto inertes, conferem melhores características ao cordão de solda em determinadas condições como mostra a figura 6 (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011).

Figura 6 - Influências dos gases na penetração da solda



Fonte: Soldagem MIG – Básico – ORTIZ e PEZATO; (2004)

3.4 Variáveis do processo GMAW

Segundo Barbedo (2017), existe a necessidade de verificar a influência das variáveis (tensão, corrente e velocidade de soldagem), visando obter as propriedades mecânicas e metalúrgicas no cordão de solda, tempo como preocupação as seguintes necessidades:

- Investigar a diluição do metal de solda no processo de soldagem GMAW
- Analisar o perfil de microdureza entre as zonas afetadas pelo calor (ZAC), metal de base e zona fundida.
- Verificar a interação da tensão, corrente e velocidade de soldagem nas características geométricas do cordão, ou seja, penetração, largura e altura.

Essas variáveis também podem influenciar na estabilidade do arco e a penetração da solda, sabendo-se que os parâmetros de soldagem, podem ser controlados separadamente, no entanto, o efeito de um está diretamente ligado à atuação do outro.

3.4.1 Tensão de arco

Analisando os estudos de Barbedo (2011), nota-se que a tensão de arco é uma variável significativa ao perfil do cordão de solda, pois afeta o modo de transferência metálica.

A tensão influencia diretamente o comprimento do arco que controla o perfil do cordão, a profundidade da penetração e a quantidade de respingos.

3.4.2 Corrente de soldagem

A corrente está diretamente relacionada a velocidade de alimentação de arame, e essa influência diretamente à taxa de deposição, o modo de transferência metálica e as características geométricas do cordão (BARBEDO; 2011).

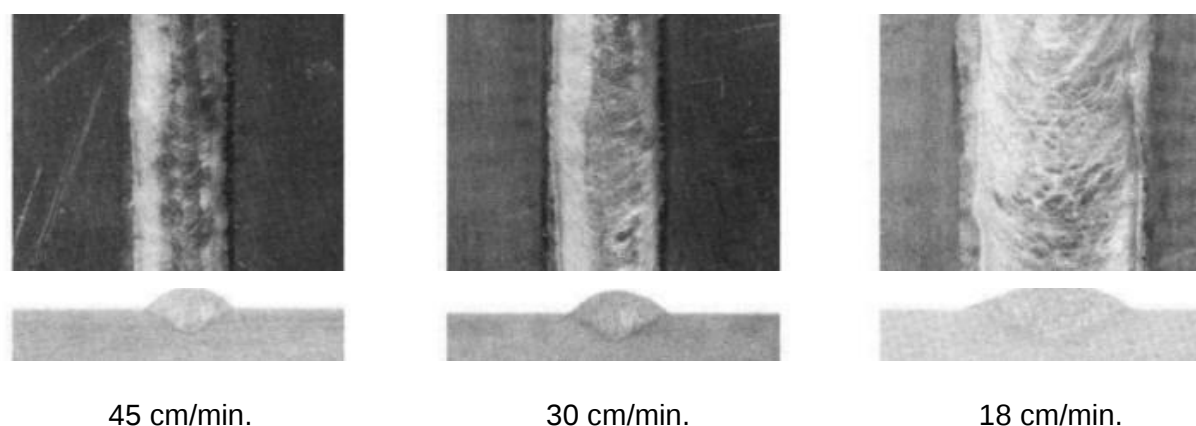
Segundo Souza (2011). Tanto a corrente como a velocidade de alimentação do arame têm relação direta com a taxa de fusão, ou seja, quanto maior for a velocidade de alimentação maior será a corrente fornecida pela fonte de modo a fundir o arame e alimentando a poça de fusão.

3.4.3 Velocidade de soldagem

De acordo com Fortes (2005), a velocidade de avanço (velocidade de soldagem) é uma variável que influencia a penetração da solda. Para uma velocidade muito alta de soldagem, o arco não permite tempo suficiente na região de solda para proporcionar uma boa fusão e penetração do cordão. Já para uma velocidade baixa, a penetração aumenta, mas, para uma velocidade excessivamente baixa de soldagem, o próprio metal fundido na poça funciona como isolante térmico para a transferência de calor do arco para a metal base.

Outra situação que pode afetar a qualidade da junta soldada, é o aporte de energia, podendo interferir basicamente na geometria do cordão e até mesmo no número de passes conforme pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 - Efeito da velocidade de soldagem na penetração da solda



Fonte: Adaptado de FORTES (2005)

3.4.4 Velocidade de alimentação do arame

Segundo as observações de BARBEDO (2011), as mesmas demonstram que a velocidade de alimentação do arame é um parâmetro análogo a corrente de soldagem, relatando que quanto maior a velocidade de arame, maior a taxa de deposição.

3.4.5 Distância do bico à peça

A distância entre o bico de contato e a peça (extensão do eletrodo) afeta a corrente de soldagem necessária para fundir o arame a uma dada velocidade de alimentação de arame (FORTES; 2005).

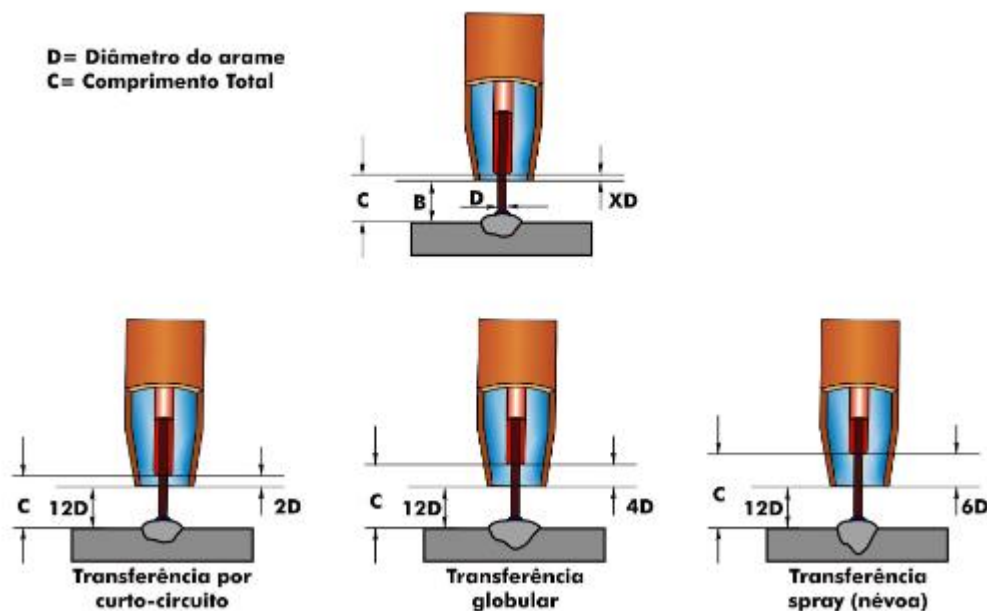
Segundo Santos (2010), aumentando-se a extensão do eletrodo temos uma redução da corrente elétrica, refletindo em uma menor corrente necessária para fundir o arame devido ao aquecimento do mesmo pelo aumento da resistência elétrica proveniente do efeito Joule.

3.4.6 Comprimento de arame livre (*stick-out*)

Influência da distância do bico de contato e a peça. Comprimento do arame livre (Stick-Out) ao se aumentar o comprimento livre do arame (C) e a distância da peça ao bico de contato, sem alteração dos demais parâmetros, haverá um aumento

da tensão e uma queda na intensidade de corrente (Figura 8): Soldagem MIG – Básico – ORTIZ e PEZATO (2004).

Figura 8 - Comprimento de arame livre (Stick-out)



Fonte: Soldagem MIG – Básico – ORTIZ e PEZATO; (2004)

Quanto maior for o comprimento livre do arame (*Stick-Out*), menor será a corrente de saída. Desse modo, o arame pode vir a ser fundido por um arco de potência insuficiente. Nessas condições, a zona de solda recebe pouco calor, podendo vir a ocorrer pontos frios na soldagem. Em geral, longos arames livres reduzem a frequência das gotas e aumenta a perda de deposição por maior ocorrência de respingos. Soldagem MIG – Básico – ORTIZ e PEZATO; (2004).

3.4.7 Tipos de transferências

Para a soldagem que utiliza metal de adição, a forma como se dá a transferência metálica do metal para a peça constitui um fator de elevada importância para o processo, pois está diretamente ligada ao nível de respingos e fumos, a capacidade de utilização do processo fora da posição plana, o formato dos cordões e a estabilidade do processo (MODENESI, 2009).

- A transferência metálica se processa em qualquer polaridade, com corrente contínua ou alternada e até mesmo contra a ação da gravidade, como é o caso da soldagem sobre cabeça (MODENESI, 2009)
- Os principais modos de transferência de metal são: Curto-circuito, globular, spray. A Tabela 1 apresenta as principais características dos modos de transferência aplicadas ao processo GMAW (ACESITA, 2011).

Tabela 1 - Características dos modos de transferência metálica na soldagem GMAW

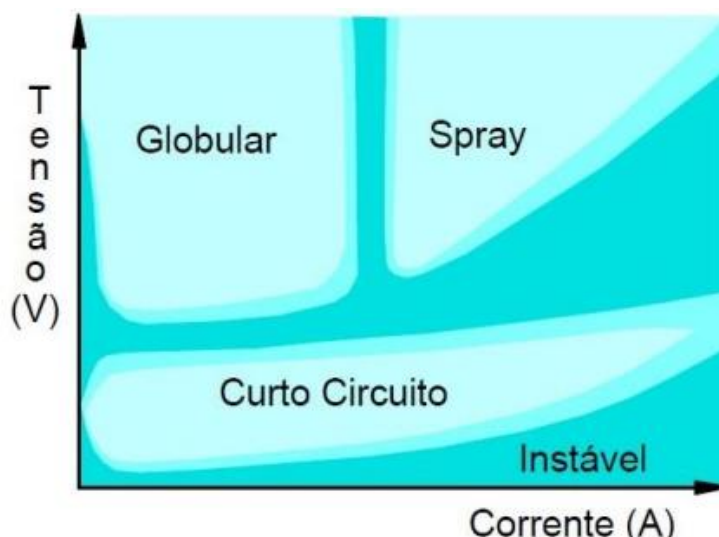
Modo de transferência	Tensão no arco	Densidade de corrente	Energia de soldagem	Soldagem fora da posição	Penetração
Curto-circuito	Baixa	Baixa	Baixa	Sim	Pequena
Globular	Média	Baixa	Média	Não	Média
Spray	Alta	Alta	Alta	Depende	Grande

Fonte: SENAI (2003)

De acordo com os escritos de Fortes (2005), basicamente o processo MIG/MAG inclui três técnicas distintas de modo de transferência de metal: curto-circuito (*short arc*), globular (globular) e aerossol (*spray arc*). Essas técnicas descrevem a maneira pela qual o metal é transferido do arame para a poça de fusão. Na transferência por curto-circuito — *short arc*, ocorre quando um curto-circuito elétrico é estabelecido. Isso acontece quando o metal fundido na ponta do arame toca a poça de fusão. Na transferência por aerossol — *spray arc* — pequenas gotas de metal fundido são desprendidas da ponta do arame e projetadas por forças eletromagnéticas em direção à poça de fusão.

A transferência globular — ocorre quando as gotas de metal fundido são muito grandes e movem-se em direção à poça de fusão sob a influência da gravidade. Os fatores que determinam o modo de transferência de metal são a corrente de soldagem, o diâmetro do arame, o comprimento do arco (tensão), as características da fonte e o gás de proteção (FORTES; 2005).

Figura 9 - Condições de corrente e tensão para os tipos de transferência



Fonte: MODENESI E BRACARENSE (2007).

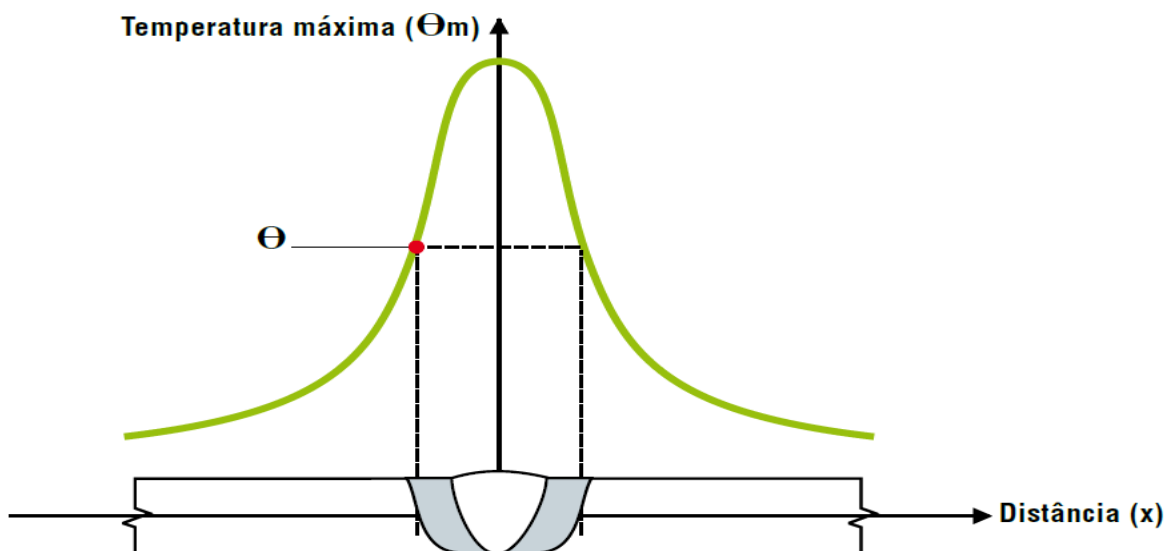
3.5 Metalurgia da soldagem

Os processos de soldagem quase na sua totalidade utilizam o calor como principal fonte de energia, fornecendo-o em quantidade e intensidade suficiente à poça de fusão; entretanto, esse elemento essencial à execução de uniões soldadas representa também uma potencial fonte de problemas devido à sua influência direta nas transformações metalúrgicas e nos fenômenos mecânicos que ocorrem na zona de solda, como consequência dos ciclos térmicos e das altas temperaturas impostas durante as operações de soldagem (SENAI CIMATEC BA – 2012).

3.5.1 Repartição térmica

Segundo Modenesi (2002) os ciclos térmicos que decrescem à medida que se afasta do centro da junta, coexistindo três macroestruturas básicas, onde estas são constituídas de metal de base (MB), zona fundida (ZF) e zona afetada pelo calor (ZAC)

Segundo Fortes (2005), se considerarmos o ciclo térmico de cada ponto próximo à junta, pode-se dizer que a temperatura de pico (T_p) de cada ponto, varia conforme sua distância ao centro do cordão de solda. Demonstrando-se através de uma forma gráfica as temperaturas de pico em relação à distância ao cordão de solda, obtemos uma curva esquemática semelhante à exibida na Figura 10

Figura 10 - Repartição térmica

Fonte: Adaptado de SENAI – BA – CIMATEC (2012)

Segundo Fortes (2005), a curva demonstrada na figura 10 é conhecida como repartição térmica e reflete a necessidade das seguintes considerações:

- Tipo de metal de base, relativamente a sua condutividade térmica, pois quanto maior a condutividade térmica do metal, maior sua velocidade de resfriamento;
- Geometria de uma junta em T possui três direções para o escoamento de calor, enquanto uma junta de topo possui apenas duas, por isso juntas em T resfriam-se mais rapidamente que juntas de topo para as mesmas condições de soldagem;
- A espessura da junta aumenta com a velocidade de resfriamento até uma espessura limite; acima desse limite, a velocidade de resfriamento independe da espessura;
- A velocidade de resfriamento diminui com o aumento do aporte térmico e da temperatura inicial da peça e consequentemente a repartição térmica torna-se mais larga.

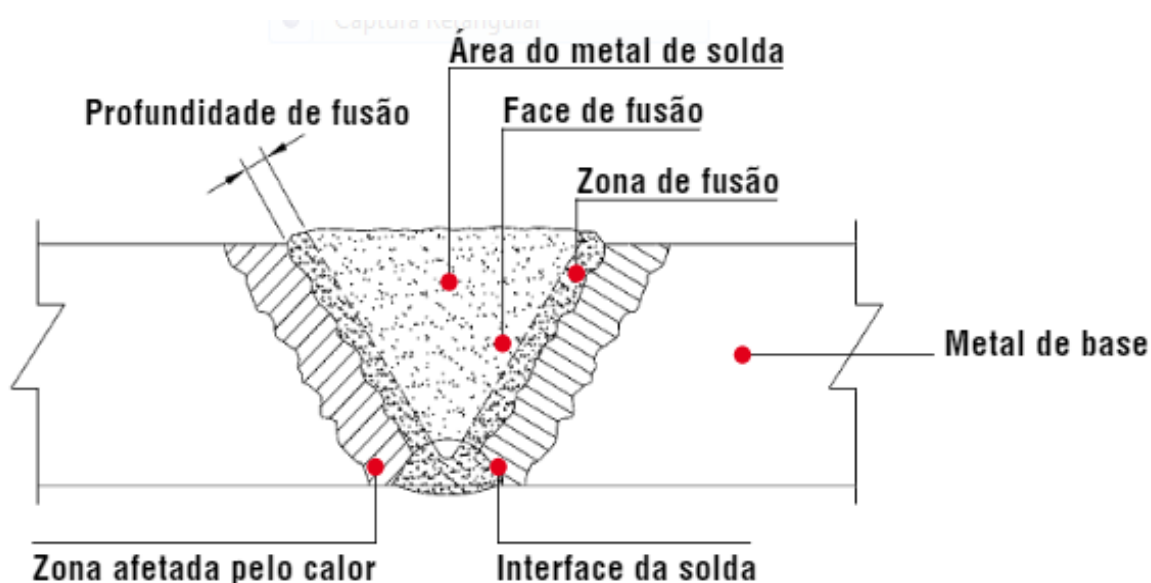
3.5.2 Macroestruturas e microestruturas da junta soldada

Em cordões de solda de aços-carbono e carbono manganês os grãos colunares são circundados pela ferrita e frequentemente existem plaquetas de ferrita crescendo

a partir dos contornos de grão. Esse tipo de microestrutura apresenta baixa tenacidade, e se for necessário modificá-la, o método usual é o tratamento térmico de normalização. (FORTES; 2005).

Segundo Dutra (2020), o aumento da energia de soldagem e da temperatura dos interpassos, causam um crescimento da região reaquecida, acarretando-se no refinamento da microestrutura, afetando benéficamente a tenacidade do metal de solda (Figura 11).

Figura 11 - Macroestrutura de uma solda de aço ao carbono



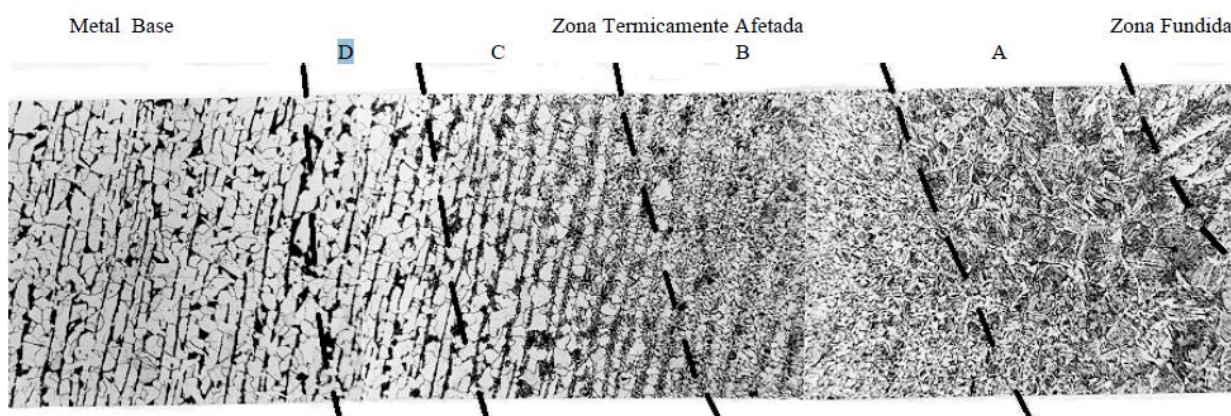
Fonte: Apostilha Inspetor de soldagem (2012)

- Metal de base (MB): região mais afastada do cordão de solda e que não foi afetada pelo processo de soldagem. As suas temperaturas de pico são inferiores à temperatura crítica do material.
- Zona fundida (ZF): região onde o material fundiu-se e solidificou-se durante a operação de soldagem. As temperaturas de pico desta região foram superiores à temperatura de fusão do metal de base; (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE; 2005)
- Zona afetada pelo calor (ZAC).

Segundo DUTRA (2020), a *American Welding Society* (AWS) define a zona afetada pelo calor (ZAC) como a porção do metal de base que tenha sofrido alteração em suas propriedades mecânicas ou macroestruturais, causada pelo calor gerado num processo de soldagem, brasagem ou corte térmico.

A ZAC, corresponde à região não fundida do material de base que teve sua microestrutura e/ou propriedades alteradas pelo ciclo térmico de soldagem conforme a figura 12 (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE; 2005)

Figura 12 - Estrutura da ZAC de um aço de baixo carbono.



Fonte: MODENESI (2002)

As divisões aproximadas correspondem a: A - Região de Granulação Grosseira, B - Região de Normalização, C - Região Inter crítica e D - Região Subcrítica. Ataque: vital + picral. Aumento original: 100X

3.5.3 Energia imposta

A energia imposta, é a medida relativa da energia transferida por unidade de comprimento da solda (Tabela 2). Expressa-se como uma característica importante devido ao pré-aquecimento e a temperatura de interpassos, influenciando a taxa de resfriamento, a qual pode afetar as propriedades mecânicas e metalúrgicas da solda na zona afetada pelo calor (PEREZ; 2007).

A Equação 1 representa a energia imposta (Heat Input) da seguinte forma de acordo com a ASME IX (2019):

$$E = \frac{U.I.60}{v} \quad (1)$$

Tabela 2 - Variáveis da equação de energia de soldagem

Energia Imposta (E)	Tensão de soldagem (U)	Corrente (I)	Velocidade (V)
(J/mm)	(V)	(A)	(mm/min.)

Fonte: Adaptado de MACHADO (1996)

3.6 Qualidade na soldagem

Sistema da Qualidade é um conjunto de ações e documentos que definem o funcionamento de determinada atividade (serviço ou produto), de maneira a fazer com que todas as suas etapas do processo produtivo e consequentemente o produto final apresentem-se conforme os requisitos estabelecidos, dentro de um custo previsto pelo fornecedor e aceito pelo cliente (SENAI – BA – CIMATEC; 2012).

3.6.1 RQPS

É o documento que registra todos os diversos elementos que envolvem a qualificação de um procedimento de soldagem. O RQPS é uma “fotografia” da confecção do procedimento de soldagem, apresentando todos os processos, materiais (base e adição), parâmetros e técnicas utilizados na soldagem da peça de teste, assim como os resultados dos ensaios realizados para avaliar a conformidade do procedimento em comparação com os requisitos estabelecidos pela norma de qualificação (SENAI – BA – CIMATEC; 2012).

3.6.2 EPS

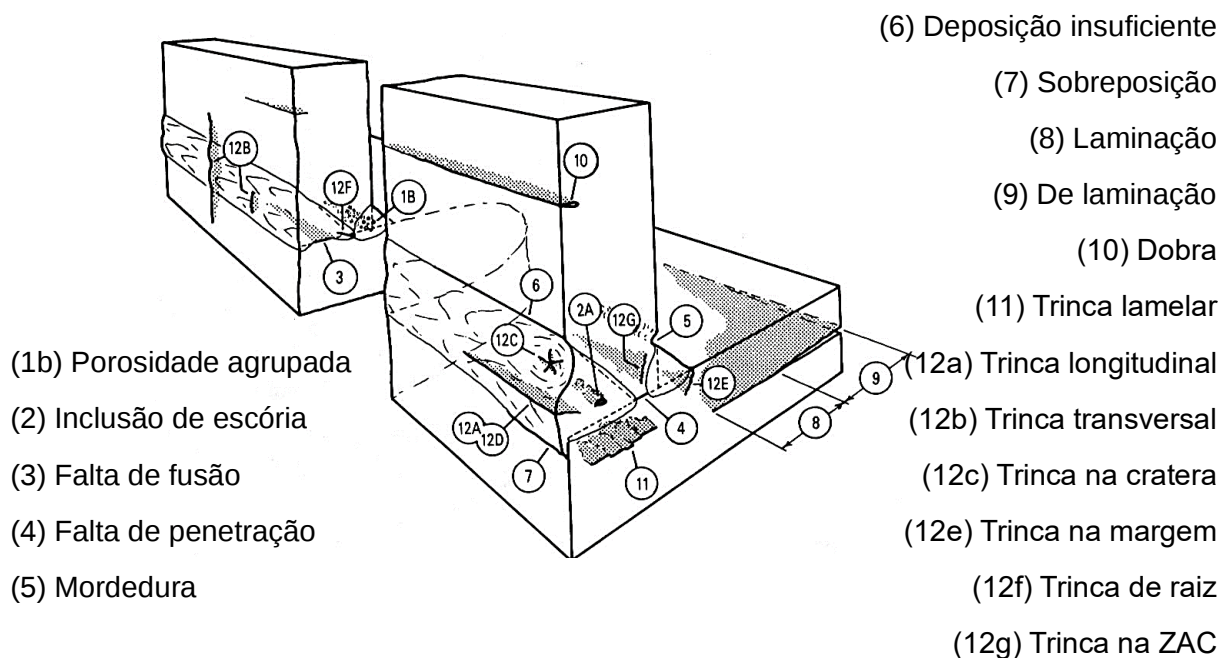
Os principais documentos de um Sistema da Qualidade aplicáveis à soldagem devem ser conhecidos por encarregados, inspetores, supervisores e engenheiros de soldagem. A Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS), é o documento que determina todas as variáveis que devem ser seguidas para a realização de um serviço

específico de soldagem. Toda EPS se baseia em um (ou mais) RQPS. (SENAI – BA – CIMATEC; 2012)

3.6.3 Descontinuidades do processo GMAW na junta de ângulo

Descontinuidade é a falta de homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas do material ou da solda (Figura 13). A existência de descontinuidades em uma junta não significa necessariamente que a mesma seja defeituosa. Esta condição depende da aplicação a que se destina o componente e é, em geral, caracterizada pela comparação das observações ou propriedades medidas com níveis estabelecidos em um código (MODENESI; 2021).

Figura 13 - Descontinuidades de uma junta de ângulo



Fonte: FBTS (2012)

3.7 Ensaios não destrutivos

Os Ensaios Não Destrutivos (END) são técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos sem danificá-los e são definidos como testes para o controle

da qualidade, realizados sobre peças acabadas ou semiacabadas, para a detecção de defeitos ou falta de homogeneidade, através de princípios físicos definidos, sem prejudicar a posterior utilização dos produtos inspecionados (MARQUES; 2006).

O ensaio visual é um dos mais utilizados na soldagem e os critérios de aceitação podem ser estabelecidos por normas como o AWS D1.1 (Tabela 3).

Tabela 3 - Ensaio visual

Descontinuidades	Critério de aceitação
Trincas	Inexistente
Falta de fusão	Inexistente
Falta de penetração	Inexistente
Alinhamento da junta	10%* da espessura ou 3mm*
Porosidades	Ø até 1mm não excedendo 10mm para um 300 mm de solda
Reforço máximo da solda	Até 2,5 mm
Redução de espessura / Mordeduras	5%* da espessura ou 1mm*

Fonte: Adaptado do AWS D1.1 (2010)

3.8 Custos de soldagem

A previsão dos gastos para fabricação de um produto soldado no processo (GMAW) pode ser realizada através da estimativa dos custos conforme Equação 2, onde uma análise inicial se realizada de forma correta, pode garantir que as empresas não tenham perdas econômicas após a captação de um projeto ou ofertar preços muito altos inviabilizando novos projetos e desenvolvimentos (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE; 2005).

3.8.1 Custos totais

$$\text{Custo total da soldagem} = C = C1 + C2 + C3 + C4 \quad (2)$$

A Tabela 4 apresenta equações utilizadas para simplificar o cálculo de um processo de soldagem.

Tabela 4 - Composição de custos de soldagem

Custo	Equação	Var.	Descrição	Unidade
Metal de adição (C1)	$C_e = \frac{m_s}{\phi} C_{eU}$	MS	Massa de metal depositado	(Kg)
		ϕ	Eficiência de deposição conforme pesagem dos corpos de prova	(Kg)
		CeU	Preço por peso do eletrodo	(R\$/Kg)
Energia elétrica a ser consumida (C2)	$C_{el} = \frac{P t_{ARC}}{\phi_{el}} (C_{elU})$	CeU	Preço da energia elétrica;	(R\$/kWh)
		P	Potência elétrica média despreendida durante a soldagem	(kW)
		tARC	Tempo de arco aberto	(h)
		ϕ_{el}	Eficiência elétrica da fonte de soldagem	(%)
Mão de obra, processo robotizado e custos fixos (C3)	$Cl = \frac{t_{ARC}}{\phi} (L + O)$	tARC	Tempo de arco aberto	(h)
		ϕ	Fator de operação	(%)
		L	Custos por unidade de tempo com mão de obra	(R\$/h)
		O	Gastos fixos	(R\$)
Gás (Ar 75% + CO2 25%) (C4)	$C_g = V_G t_{ARC} C_{GU}$	VG	Vazão de gás utilizada	(l/min)
		tARC	Tempo de arco aberto	(min)
		CGU	Preço por volume de gás	(R\$/kg)

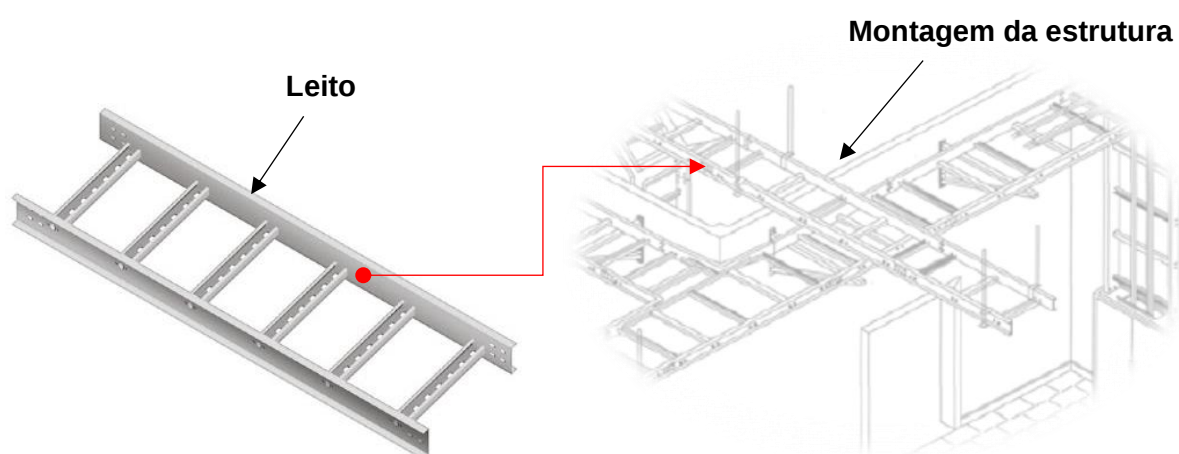
Fonte: Adaptado de MARCELO, ITALO E WILLIAM (2021)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

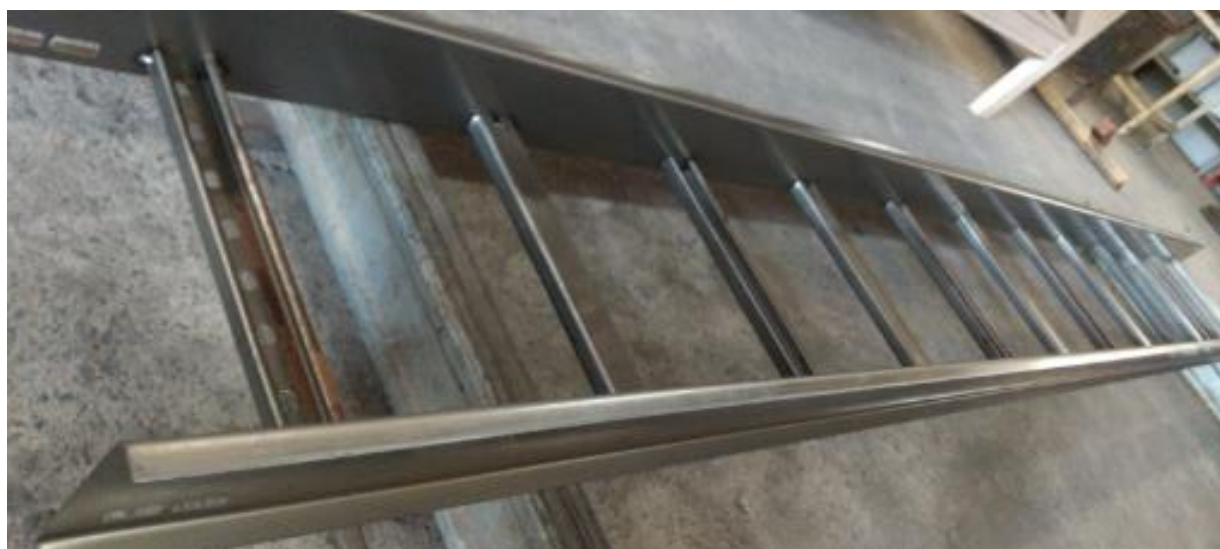
Os aços com baixos teor carbono são os mais utilizados na fabricação de leitos pesados de passagem (Figura 14). Esse leito específico (Figura 15), tem uma aplicação em ambientes industriais. Portanto, com uma necessidade de característica de maior resistência mecânica que as exigidas normalmente em outros equipamentos do ramo.

Figura 14 - Leito de passagem e exemplo de montagem



Fonte: Adaptado de ELECON (2021)

Figura 15 - Peça teste - Leito pesado de passagem



Fonte: Autor (2021)

4.1.1 Metal de base (Produto)

Os aços com baixos teor carbono são os mais utilizados na fabricação de leitos pesado de passagem e eletrocalhas. Para o projeto em questão, serão utilizadas chapas conformadas em aço ao carbono (SAE1020) para serem soldadas com as especificações estabelecidas pela AWS D1.1, nas espessuras de 2,00 mm a 2,65 mm para longarinas. A composição química está demonstrada na Tabela 5 e suas propriedades mecânicas na Tabela 6.

Tabela 5 - Composição química da base do material SAE1020

C (%)	Mn	P	S (%)	Fe
0,18-0,23	0,30-0,60	0,040 máx.	0,05 máx.	O que sobra

Fonte: Adaptado de SAE1020 (2015).

Tabela 6 - Propriedades mecânicas do material SAE1020

LE (MPa)	LR (MPa)	Al (%)
250	400 - 550.	18

Fonte: Adaptado de SAE1020 (2015).

4.1.2 Consumíveis - Arame maciço

Para realizar a soldagem do produto fabricado com o aço SAE1020, tendo em vista sua resistência mecânica de 400 a 550 MPa, definiu-se o arame maciço ER70S-6 no processo de soldagem GMAW, com o diâmetro de 0,8mm e 1.0 mm com especificação ASME II Parte C SFA 5.18 e classificação ER 70S-6 (Figura 16).

Figura 16 - Arame maciço ER 70S-6



Fonte: BELGO (2021)

A composição química e propriedades mecânicas estão apresentadas nas Tabelas 7 e 8, respectivamente.

Tabela 7 - Composição química do arame ER70S-6

	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	V
ER70-S6	0,06	1,4	0,8	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,5	0,03
	0,15	1,85	1,15	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de ASME II Parte C SFA 5.18 (2019)

Tabela 8 - Propriedades mecânicas do arame ER70S-6

ER70S-6	LR (MPa)	LE (MPa)	AI (%)	RI (J)
	Min. 480	Min. 400	Min.22 %	27J – 30° C

Fonte: Adaptado de ASME II Parte C SFA 5.18 (2019)

Será utilizada uma mistura gasosa de argônio (75%) e CO₂ (25%), sabendo-se que o comportamento do arco e o perfil do cordão de solda, em função da redução da tensão superficial das gotas provocada pela ação do primeiro gás, obtêm-se um melhor preenchimento dos cantos deixando o cordão de solda com uma melhor performance (SENAI, 2003).

4.2 Métodos

4.2.1 Equipamentos

O equipamento para soldagem MIG/MAG consiste em uma pistola de soldagem, uma fonte de energia, um sistema de refrigeração da pistola, um dispositivo (cabeçote) controlador do arame, um sistema de injeção de gases. (SENAI, 2003)

4.2.2 Fonte de soldagem e alimentador de arame

O projeto utilizará a mesma fonte de soldagem e alimentador de arame interno, conforme demonstrado na Figura 17, para ambos os modos de operação.

A fonte de soldagem a ser utilizada será uma Lincoln Powertec 305C Lincoln.

- Fonte compacta e de fácil manipulação;
- Equipada com carrinho para cilindro;
- Soldagens no processo GMAW;
- Painel simples e de fácil parametrização;
- Soldagem Mig-Spot (ponto)
- Ventilação sob demanda;
- Alimentador de arame interno (Carretel até 18 kg);

Figura 17 - Fonte e cabeçote alimentador de arame interno



Fonte: Autores (2022)

4.2.3 Gás de proteção

Para realizar a soldagem de todos os produtos, apresentados neste estudo foi utilizado para proteger a poça de fusão a mistura gasosa (Figura 18) com porcentagens de 75% de Argônio e 25 % de CO₂, porcentagens estas utilizadas principalmente para soldagem de aços com baixo teor de carbono conforme visto na Tabela 9.

Figura 18 - Mistura de gases de proteção



Fonte: Adaptado de WHITE MARTINS (2013)

4.2.4 Fluxômetro / Bibimetro

Para verificação e aferição do fluxo dos gases Ar e CO₂ utilizados durante o processo de soldagem foi utilizado um Fluxômetro (Bibimetro), manual da marca Carbografite com selo de calibração, modelo 012122912, com escala de 3 a 25 l/min com divisão em subdivisões de 1litro por minuto, conforme a Figura 19.

Figura 19 - Fluxômetro (Bibimetro)

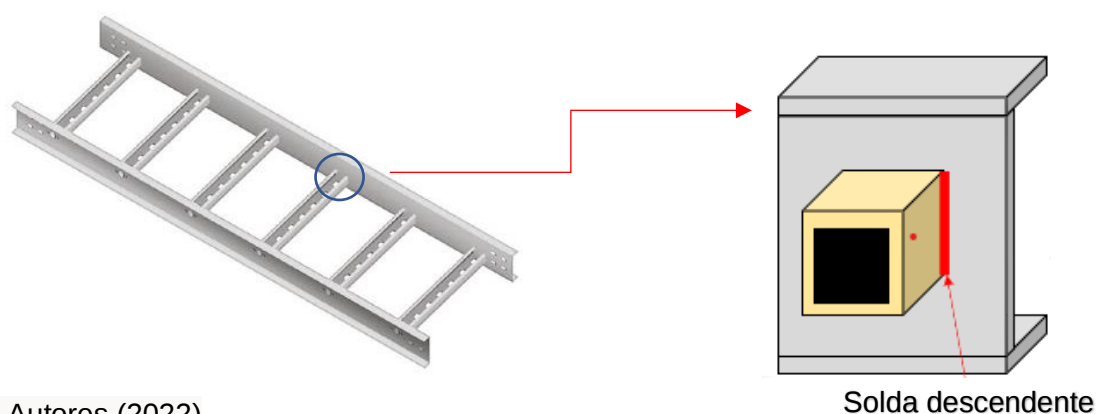


Fonte: Autores (2022)

4.2.5 Preparação dos corpos das peças

Foi determinada de acordo com desenho do produto fornecido pelo cliente, a fabricação do produto, e a mesma utilizou o processo de soldagem GMAW Semiautomático conforme apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Preparações dos corpos das peças



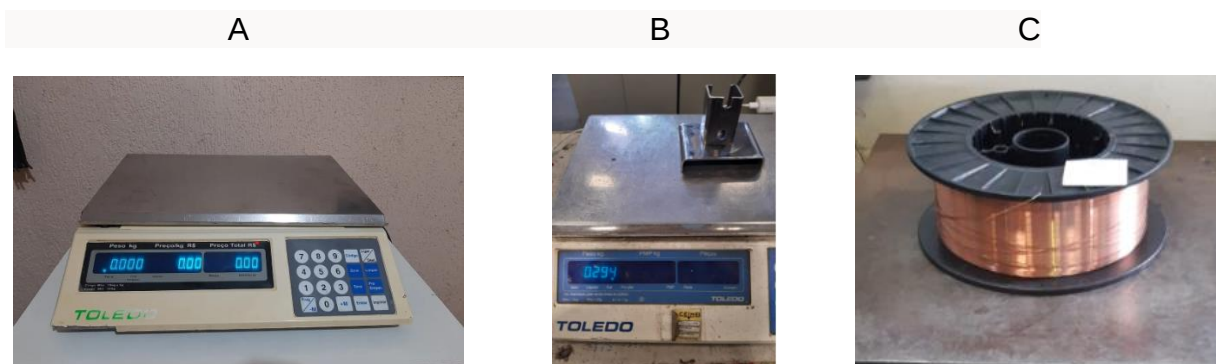
Fonte: Autores (2022)

5 Balança

5.1 Balança (peso anterior e posterior à soldagem)

Todas as peças utilizadas durante os testes foram pesadas antes e depois de forma individual em uma balança com precisão de 1 g com capacidade de 50kg conforme a Figura 21-A e Figura 21- B. Os carretéis de arames, foram pesados da mesma forma que corpo de prova visando as análises econômicos (Figura 21-C).

Figura 21 - Balança de precisão



Fonte: Autores (2022)

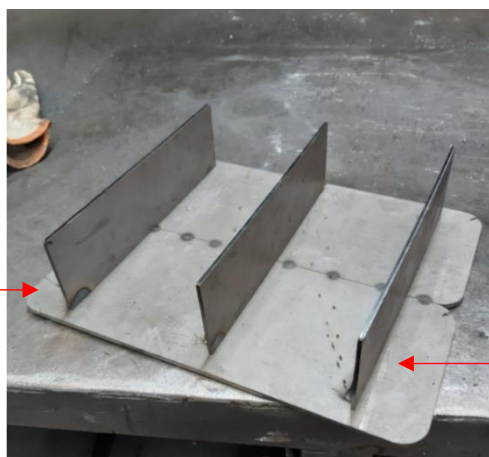
6 Método comparativo

6.1 Teste de parametrização

Foi utilizada uma chapa teste para parametrização do processo utilizando os arames com diâmetros 0,8 mm e 1,0 mm (Figura 22).

Figura 22 - Teste de parametrização

Lado esquerdo
Arame 0,8 mm



Lado esquerdo
Arame 1,0 mm

Fonte: Autores (2022)

6.1.2 Preparação das peças

Foi utilizado um corpo de prova, simulando com condições real nas dimensões na base 100 mm x 100 mm e no centro temos um perfilado de 38 mm x 38 mm com altura de 56 mm conforme a Figura 23.

Figura 23 - Corpo de prova

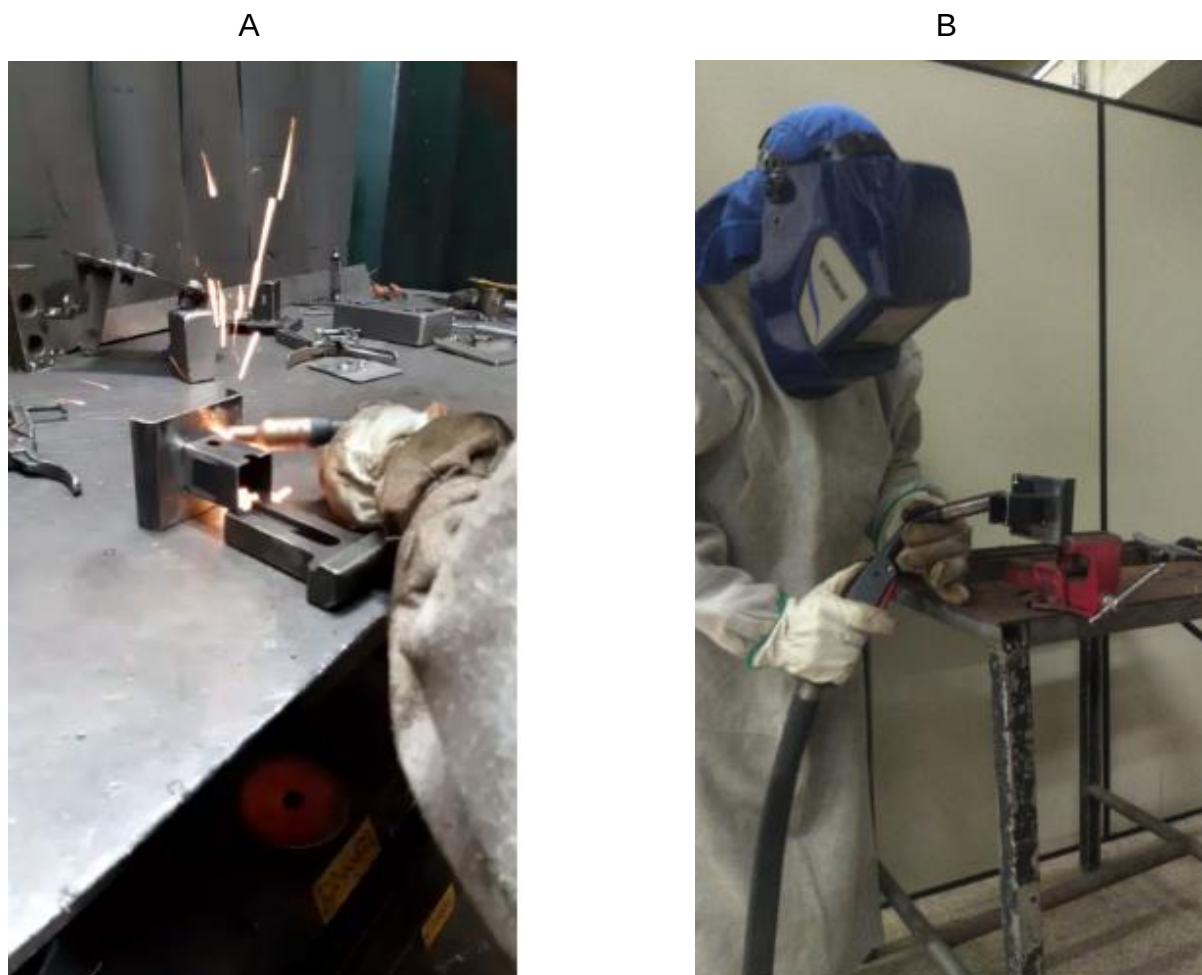


Fonte: Autores (2022)

6.2 Execução da soldagem

Para execução da solda na junta em ângulo na vertical descendente com diâmetro de arames diferentes 0,8 mm (Figura 24 A) e 1,0 mm (Figura 24 B).

Figura 24 - Execução da solda



Fonte: Autores (2022)

6.2.1 Inspeção visual (critério de aceitação AWS D1.1)

Todas as amostras foram analisadas após a soldagem (Figura 25 A-B) conforme os critérios de aceitação da AWS D1.1 em cada cordão, utilizando calibre e gabarito de solda.

Figura 25 - Inspeção visual com calibre e gabarito



Fonte: Autores (2022)

6.2.2 Cálculo da taxa de deposição

A massa do material depositado dividida pelo tempo de arco aberto determina a taxa de deposição conforme a Equação 3.

$$\text{Taxa de deposição} = \frac{(\text{Peso final da peça} - \text{peso inicial da peça}) \text{ (kg)}}{\text{Tempo de arco aberto (h)}} \quad (3)$$

6.2.3 Cálculos de energia imposta

O cálculo da energia imposta foi efetuado conforme a Equação 1, nos seguintes procedimentos determinados nas bases de tensão e corrente.

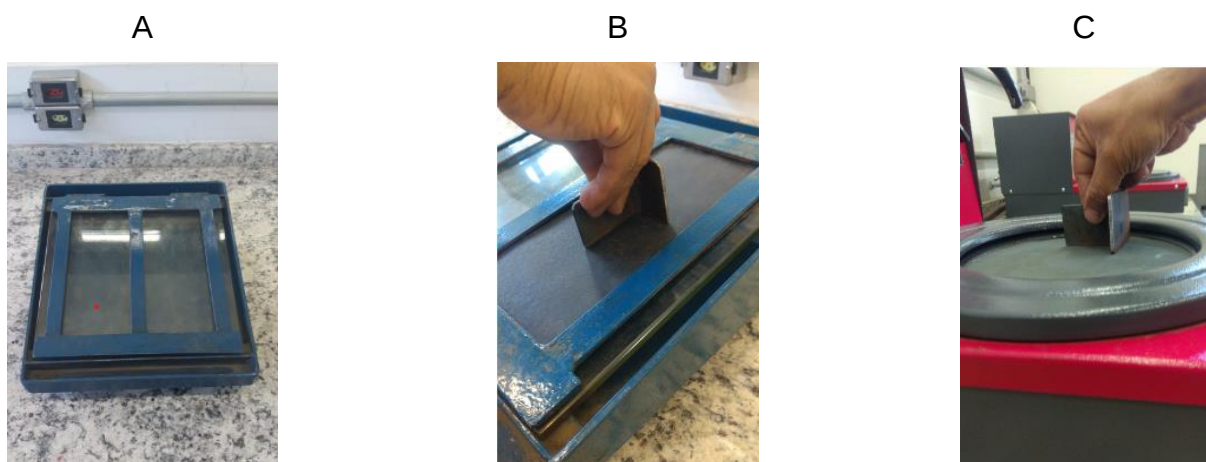
6.2.4 Caracterização macrográfica

Os cortes realizados nas amostras foram efetuados no laboratório de Tecnologia em Soldagem da FATEC Itaquera, utilizando uma serra de fita horizontal com avanço hidráulico da marca Franho – FMG 500 (Figura 26).

Figura 26 - Serra de fita horizontal

Fonte: Autores (2022)

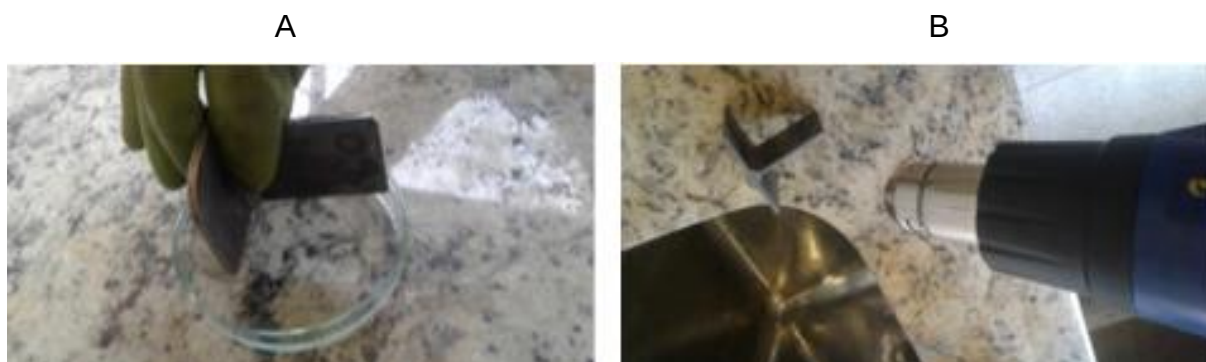
O lixamento efetuado durante a preparação das amostras, foi executado de forma manual, utilizando-se de lixas a seco com faixas de granulometria alternadas do menor valor para o maior tendo início em 100 e finalizado em 1200, em ângulos de (90 °) conforme as Figuras 27-A e B no sentido horário, o que possibilitou eliminar os riscos profundos e marcas presentes na superfície. O polimento aplicado nas faces das secções lixadas foi realizado utilizando pasta de diamante lubrificada com álcool o que resultou em um polimento de alta qualidade (Figura 27-C).

Figura 27 - Lixamento da peça

Fonte: Autores (2022)

Para evidenciar e destacar a macroestrutura das amostras (Figuras 28-A, B) foi utilizado um ataque químico com a solução Nital 5 % e utilizado um soprador térmico da marca Bosch para obter uma identificação da penetração dos cordões de solda conforme apresentado na sequência das Figuras 28 -A e B.

Figura 28 - Ataque químico



Fonte: Autores (2022)

Para analisar as macrografias foi utilizado um estereoscópio com ampliação de 40x conectado via usb em uma CPU conforme apresentado na Figura 29, as medições efetuadas nas amostras foram realizadas através do software Top View 64 versão 2.0.

Figura 29 - Estereoscópio e computador



Fonte: Autores (2022)

6.2.5 Custos de soldagem

Para a realização da análise econômica, utilizou-se das equações dados anteriores ou posteriores à fabricação, caracterizando-se respectivamente, como estimativa de custos ou custo real, conforme Equação 2 (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE; 2005)

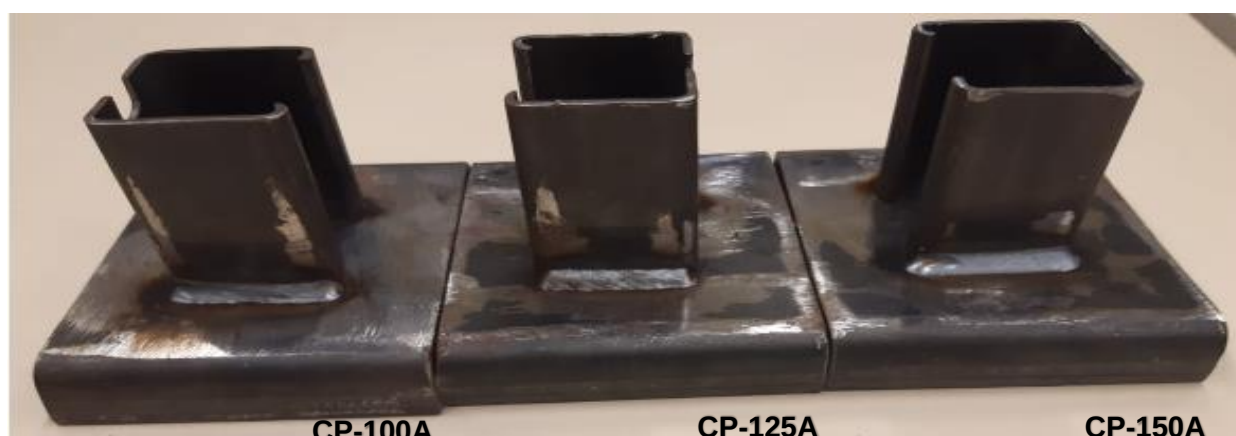
7 RESULTADOS

Através das informações iniciais coletadas, compreende-se a possibilidade da existência de diferenças dos custos e da produtividade, verificando os diâmetros de arame utilizados, confirmando o melhor processo de fabricação de união.

7.1 Resultado corpo de prova

Foram executados três tipos de soldagem com arame Ø 0,8 diferentes parâmetros, na Figura 30 (CP-100A - CP125A e CP150A).

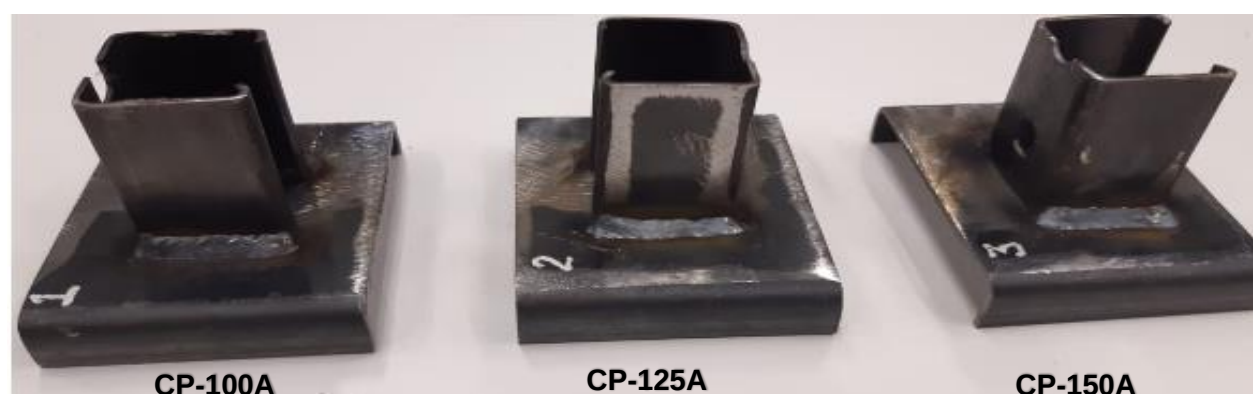
Figura 30 - Amostras soldadas com arame Ø 0,8 mm



Fonte: Autores (2022)

Já na segunda amostra, foram executadas também três tipos de soldagem com arame Ø 1,0 mm com diferentes parâmetros na Figura 31-CP-100A CP-125A CP-150A.

Figura 31 – Amostras soldadas com arame Ø 1,0 mm



Fonte: Autores (2022)

A soldagem executada no processo semiautomático apresentou a inexistência para mordeduras, porosidades, falta de fusão e trincas em toda extensão do cordão.

7.1.2 Inspeção visual

Os critérios de qualidade utilizados para verificação e análise das soldas estão de acordo com as informações descritas na Tabela 9, para as verificações de inspeção visual e dimensional

A inspeção visual foi realizada após a soldagem dos modos semiautomáticos, todas as amostras foram analisadas conforme critérios de aceitação AWD D.1.1.

De acordo com os critérios de aceitação da AWS D1.1, não existe evidência de reprovação conforme demonstrado na Tabela 9.

Tabela 9 – Inspeção visual

Descontinuidades	Critério de aceitação	Arame Ø 0,8 mm	Arame Ø 1,0 mm
Trincas	Inexistente	Inexistente	Inexistente
Falta de fusão	Inexistente	Inexistente	Inexistente
Falta de penetração	Inexistente	Inexistente	Inexistente
Alinhamento da junta	10%* da espessura ou 3mm*	Inexistente	Inexistente
Porosidades	Ø até 1mm não excedendo 10mm para um 300 mm de solda	Inexistente	Inexistente
Reforço máximo da solda	Até 2,5 mm	2	2,5
Redução de espessura / Mordeduras	5%* da espessura ou 1mm*	0	0,1

Fonte: Adaptado do AWS D1.1 (2022)

7.1.3 Rendimento de deposição

Para chegar nos resultados obtidos rendimento de deposição conforme mostra tabela 10, antes e após a soldagem das amostras foram pesados inicialmente os rolos de arame e peças. O cálculo utilizado para análise do rendimento de posição das amostra soldadas nos modos semiautomático De acordo com a Equação 4.

$$\text{Rendimento de deposição} = \frac{\text{Massa do metal depositado (kg)}}{\text{Massa do arame consumido (kg)}} \quad (4)$$

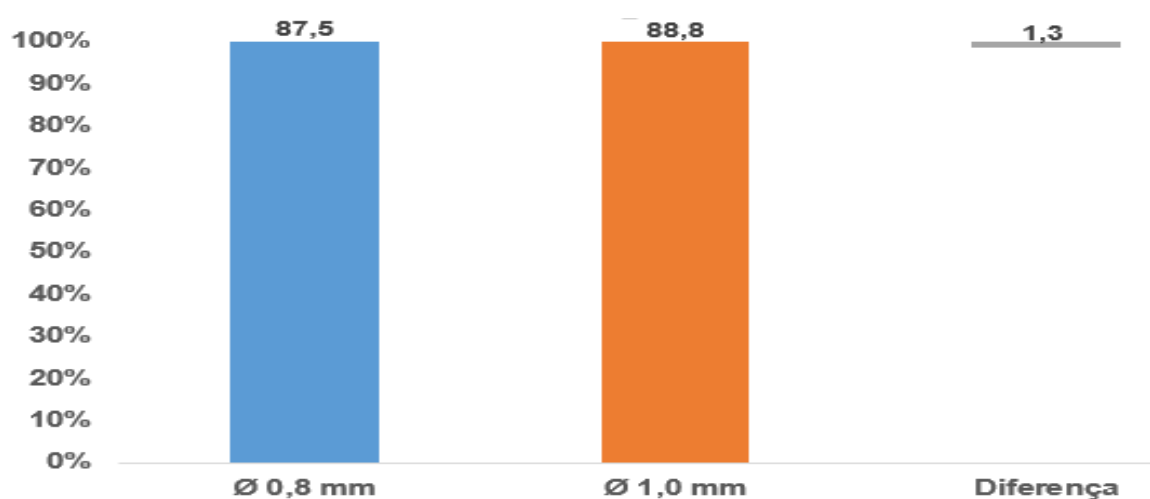
Tabela 10 - Rendimento de deposição

Fatores	Arame Ø 0,8 mm	Arame Ø 1,0 mm
Peso inicial de arame consumido (kg)	0,008	0,009
Peso de metal depositado (kg)	0,007	0,008
Rendimento (%)	87,5%	88,8%

Fonte: Autores (2022)

O rendimento de deposição obtido após a soldagem das amostras comparadas apresentou uma diferença de 1,3 % demonstrando superioridade para o arame com diâmetro 1,0 mm (Figura 32).

Figura 32 - Rendimento de deposição (%)



Fonte: Autores (2022)

7.1.4 Taxa de deposição

Após os registros do peso do material depositado em função do tempo de arco aberto, ficou constatada uma maior taxa de deposição para o arame com diâmetro 0,8 mm conforme a Tabela 11.

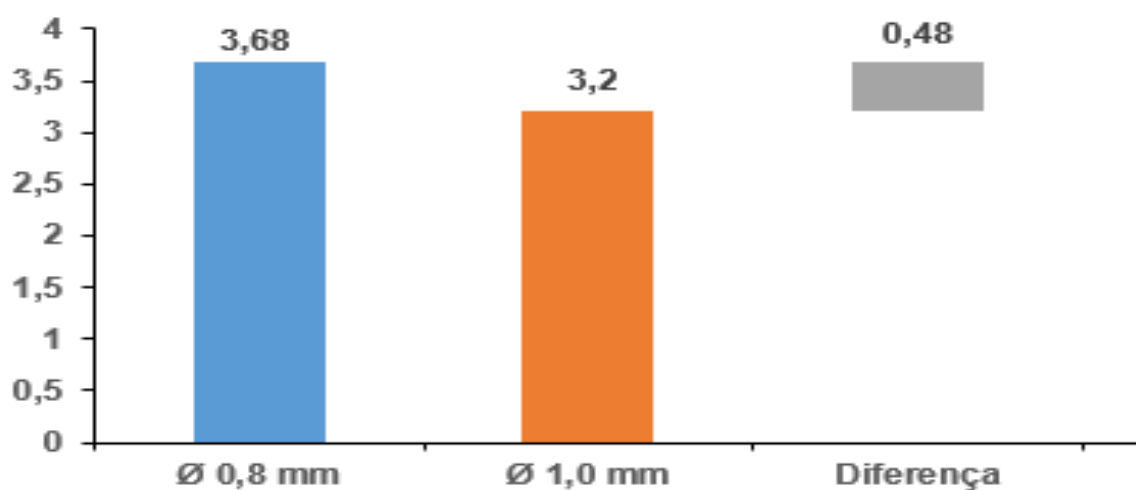
Tabela 11 - Taxa de deposição

Descrições das informações	Arame 0,8mm	Arame 1,0mm
Diferença de peso das amostras(kg)	0,007	0,008
Tempo de arco aberto	0,0019	0,0025
Taxa de deposição (Kg/h)	3,68	3,2

Fonte: Autores (2022)

Conforme dados obtidos nos testes realizados, o arame de diâmetro 0,8 mm obteve uma taxa de deposição de 3,68 kg/h, refletindo uma diferença de 0,48 comparando-se ao arame com diâmetro de 1,0 mm (Figura 33).

Figura 33 - Comparativo de taxa de deposição



Fonte: Autores (2022)

7.1.5 Energia imposta

A Tabela 12 apresenta os parâmetros que foram utilizados na soldagem, os mesmos foram aplicados na Equação (1).

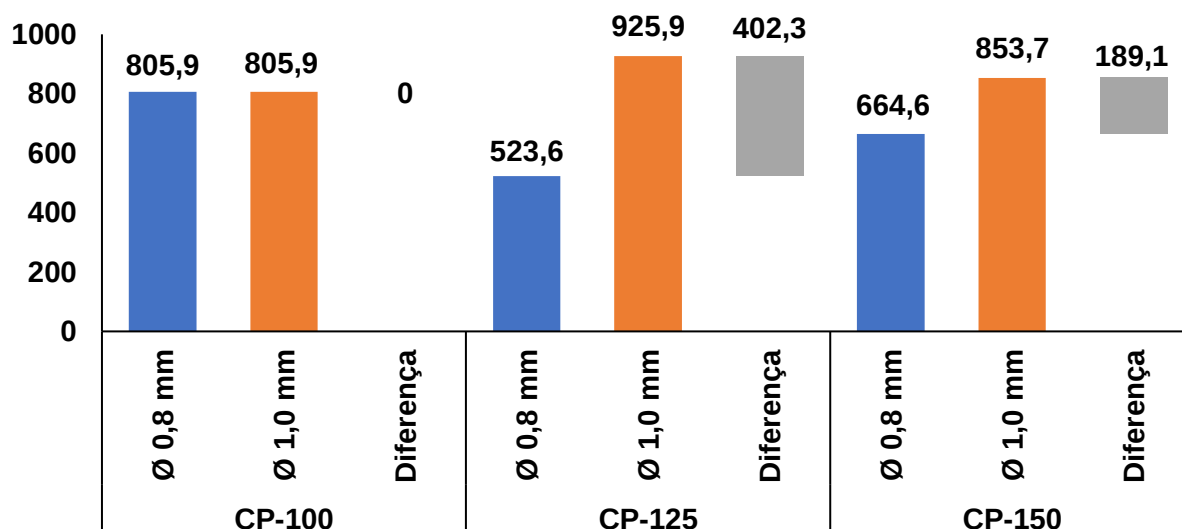
Para calcular a Energia imposta durante a execução da soldagem, segundo NASCIMENTO;(2006), a potência elétrica aplicada em um processo de soldagem pode ser determinada como a razão entre a tensão e a corrente, determinando na energia imposta do processo,

Tabela 12 - Energia Imposta

Corpo de prova	Parâmetros	Arame 0,8mm	Arame 1,0mm
CP 1 (100A)	Tensão (V)	18	18
	Corrente (A)	100	100
	Velocidade de soldagem	134mm/min	134mm/min
	Energia imposta (J/mm)	805,9	805,9
CP 2 (125A)	Tensão (V)	20	20
	Corrente (A)	125	125
	Velocidade de soldagem	285mm/min	162mm/min
	Energia imposta (J/mm)	526,3	925,9
CP 3 (150A)	Tensão (V)	24	24
	Corrente (A)	150	150
	Velocidade de soldagem	325mm/min	253mm/min
	Energia imposta (J/mm)	664,6	853,7

Fonte: Autores (2022)

Conforme demonstrado na Figura 34 resultado se deve a alta velocidade de soldagem empregada no processo, por não haver interferência e quanto maior o aporte térmico na sua extensão maior será a região transformada.

Figura 34 - Energia imposta

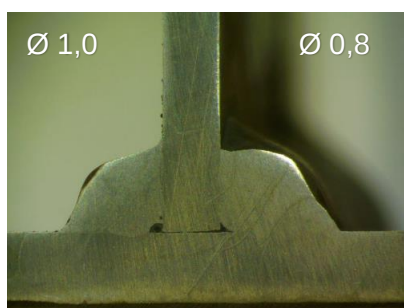
Fonte: Autores (2022)

7.1.6 Caracterizações das macrografias

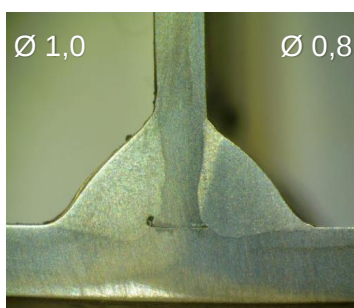
A avaliação comparativa das macrografias das amostras obtidas nos modos de soldagem tem como objetivo analisar as diferenças de parâmetros de soldagem com os diâmetros de 0,8 mm e 1,0 mm conforme a Figura 35 - A - B - C.

Figura 35 - Macrografias (Arame Ø 0,8mm x Arame Ø 1,0mm)

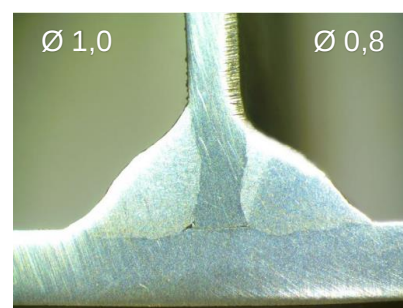
A - CP1-100A -40X



B - CP2 - 125A- 40X

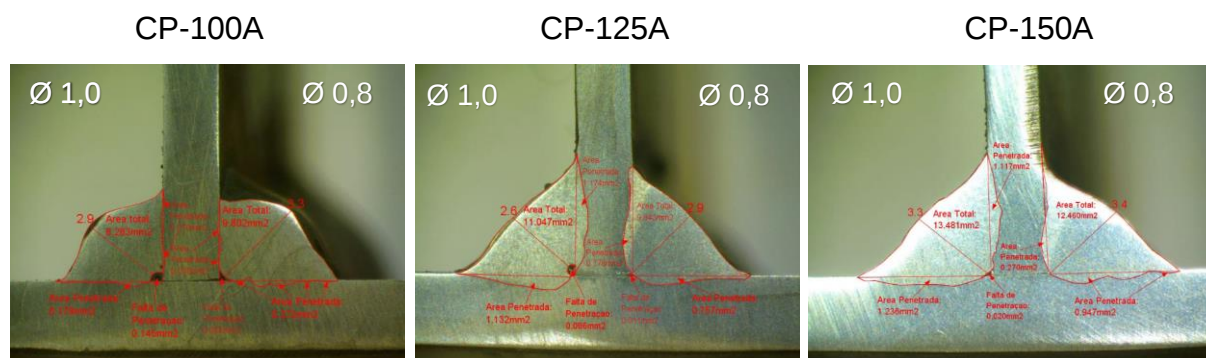


C - CP3 -150A - 40X



Fonte: Autores (2022)

Observamos na macrografia que o arame Ø 0,8 é mais eficiente nas condições de soldagem com parâmetros de 125 A e 150 A, figura 29 B e C. Na mesma forma evidencia-se que a Figura 36 A, tem uma maior descontinuidade no que se refere a falta de penetração e excesso de reforço.

Figura 36 - Macrografias – Perfil de penetração (Arame Ø 0,8mm x Arame Ø 1,0mm)

Fonte: Autores (2022)

Foi realizado o perfil de penetração na “Image J”, demonstrando que a mesma foi maior no CP-125A e CP-150A para os arames Ø 0,8 mm e 1,0 mm, reprovando CP-100A (Tabela 13).

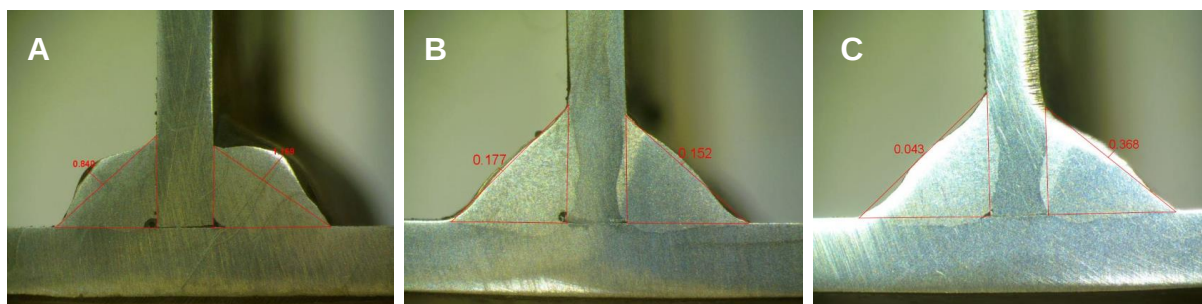
Tabela 13 - Ensaio visual

Descontinuidade	Critério de aceitação	Arame Ø 0,8 mm	Arame Ø 1,0 mm
Trincas	Inexistente	Inexistente	Inexistente
Falta de fusão	Inexistente	Inexistente	0,2 mm
Falta de penetração	Inexistente	Inexistente	0,2 mm – 0,6 mm
Alinhamento da junta	10%* da espessura ou 3mm*	Inexistente	Inexistente
Porosidades	Ø até 1mm não excedendo 10mm para um 300 mm de solda	Inexistente	Inexistente
Reforço máximo da solda	Até 2,5 mm	2 mm	2,5 mm
Redução de espessura / Mordeduras	5%* da espessura ou 1mm*	0	0,1 mm

Fonte: Adaptado do AWS D1.1 (2022)

De acordo com as macrografias, todas as soldas efetuadas com o arame Ø 1,0 mm, foram reprovadas no requisito de penetração (Figura 37).

Figura 37 - Macrografias – Dimensional de solda (Ø 0,8mm x Arame Ø 1,0mm)



Fonte: Autores (2022)

As verificações efetuadas nas amostras em relação ao aspecto visual normativo apresentaram aprovações quanto aos perfis das soldas realizadas conforme demonstrado na Tabela 14.

Tabela 14 - Resultados das amostras

Descrição das características cp-100	Critério de aceitação	Diâmetro 0,8	Diâmetro 1.0
Garganta (mm)	Mín. 2,1 mm	2,9	3,3
Largura do cordão(mm)	Mín. 3 mm	3,652	4,037
Altura do reforço(mm)	Máx. 2,5 mm	1,169	0,840
Descrição das características cp-125	Critério de aceitação	Diâmetro 0,8	Diâmetro 1.0
Garganta (mm)	Mín. 2,1 mm	2,6	2,9
Largura do cordão(mm)	Mín. 3 mm	4,240	4,481
Altura do reforço(mm)	Máx. 2,5 mm	0,152	0,177
Descrição das características cp-150	Critério de aceitação	Diâmetro 0,8	Diâmetro 1.0
Garganta (mm)	Mín. 2,1 mm	3,3	3,4
Largura do cordão(mm)	Mín. 3 mm	4,835	4,938
Altura do reforço(mm)	Máx. 2,5 mm	0,368	0,043

Fonte: Autores (2022)

7.1.7 Resultados econômicos

As análises realizadas entre os modos estudados de forma comparativa visa, verificar os custos de soldagem em relação a capacidade produtiva e eficiência econômica de cada processo, de modo a comprovar qual o modo é o mais rentável em relação aos aspectos técnicos e econômicos para a execução das juntas soldadas em uma indústria eletrocalhas.

7.1.7.1 Custo do metal de adição depositado

As variáveis que compõem a Equação 1 descrita por MODENESI (2001), e utilizadas na resolução envolvem o custo do material depositado por amostra em (Kg), o custo do peso do consumível arame (R\$/Kg), o rendimento de deposição (%), a comparação entre as análises do custo do metal de adição apresentados na Tabela 15

Utilizando Equação 1 observa custo de R\$0,23 para junta soldado com o diâmetro Ø 0,8 mm e R\$ 0,18 para junta soldada com arame Ø 1,0 mm com forme a Tabela 15, evidenciando o menor custo no arame Ø 1,0 mm.

Tabela 15 - Custo do metal de adição depositado conforme Equação (1)

Avaliações	Diâmetro 0,8 mm	Diâmetro 1.0 mm
Massa de metal depositado (Kg)	0,008	0,009
Rendimento de deposição (%)	87,5%	88,8%
Preço dos arames (R\$/Kg)	25	18
Resultado C1 (R\$)	0,23	0,18

Fonte: Autores (2022)

7.1.7.2 Custo de energia elétrica

Foi utilizado a Equação (2), para se obter os custos relacionados ao consumo de energia elétrica, os dados apresentados na Tabela 16.

Utilizando Equação 2 observa custo de R\$ 1,39 para junta soldada com o diâmetro Ø 0,8 mm e R\$ 2,14 para junta soldada com arame Ø 1,0 mm conforme a Tabela 16, evidenciando o menor custo no arame Ø 0,8 mm.

Tabela 16 - Custo da energia elétrica Equação (2)

Avaliações	Diâmetro 0,8 mm			Diâmetro 1.0 mm		
	CP-1	CP-2	CP-3	CP-1	CP-2	CP-3
Preço da energia (R\$/kWh)	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
Potência elétrica média (kW)	1,8	2,5	3,6	1,8	2,5	3,6
Tempo de arco aberto (h)	0,0047	0,0022	0,0019	0,0047	0,0038	0,0025
Eficiência elétrica (%)	75	75	75	75	75	75
Resultado C2 (R\$)	2,14	1,39	1,73	2,14	2,41	2,28
Resultado médio (R\$)	1,75			2,27		

Fonte: Autores (2022)

7.1.7.3 Custo de mão de obra

Os custos relacionados ao processo foram obtidos utilizando a Equação (3), para cada modo de soldagem, foram utilizadas informações descritas na Tabela 17 sobre o custo da mão de obra, custo da hora máquina e os custos fixos, ambos fornecidos pela empresa. Utilizando Equação 3 observa custo de R\$ 0,075 para junta soldada com o diâmetro Ø 0,8 mm e R\$ 0,099 para junta soldada com arame Ø 1,0 mm conforme a Tabela 17, evidenciando o menor custo no arame Ø 0,8 mm.

Tabela 17 - Custo da mão de obra Equação (3)

Avaliações	Diâmetro 0,8 mm			Diâmetro 1.0 mm		
	CP-1	CP-2	CP-3	CP-1	CP-2	CP-3
Tempo de operação (h)	0,0047	0,0022	0,0019	0,0047	0,0038	0,0025
Fator de operação (%)	0,75	0,58	0,53	0,65	0,73	0,66
Custo do tempo fixo (R\$/h)	11,8	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88
Resultado C3 (R\$)	1,82	0,045	0,043	0,086	0,062	0,045
Resultado médio (R\$)	0,636			0,0643		

Fonte: Autores (2022)

7.1.7.4 Custo do gás

Os custos referentes a mistura gasosas com porcentagens de 75 % de Argônio e 25 % de CO₂ utilizada nos modos estudados foram obtidos utilizando a Equação (4), para composição dos cálculos, foram utilizados os dados referentes a vazão em l/min, e o tempo de arco em minutos, conforme demonstrados na Tabela 18

Utilizando Equação 4, observa-se o custo de R\$ 0,0042 do CP-3 para junta soldada com o diâmetro Ø 0,8 mm e R\$ 0,0056 do CP-3 para junta soldada com arame Ø 1,0 mm conforme a Tabela 18, evidenciando o menor custo no arame Ø 0,8 mm.

Tabela 18 - Custo do gás conforme Equação (4)

Avaliações	Diâmetro 0,8 mm			Diâmetro 1,0 mm		
	CP-1	CP-2	CP-3	CP-1	CP-2	CP-3
Vazão do gás (l/min)	16	16	16	16	16	16
Tempo de arco (min)	0,0047	0,0022	0,019	0,0047	0,0038	0,0025
Preço do gás (R\$/Kg)	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25	8.25
Resultado C4 (R\$)	0,010	0,0049	0,0042	0,010	0,0084	0,0056
Resultado médio (R\$)	0,00636			0,008		

Fonte: Autores (2022)

7.1.7.5 Custo total

O custo total de soldagem (C), foi calculado conforme Equação 2, considerando os dados adquiridos, somando-se os custos do metal de adição (C1), consumo de energia elétrica (C2), processo semiautomático (C3) e o custo do gás (C4) e seus dados constam na Tabela 5.

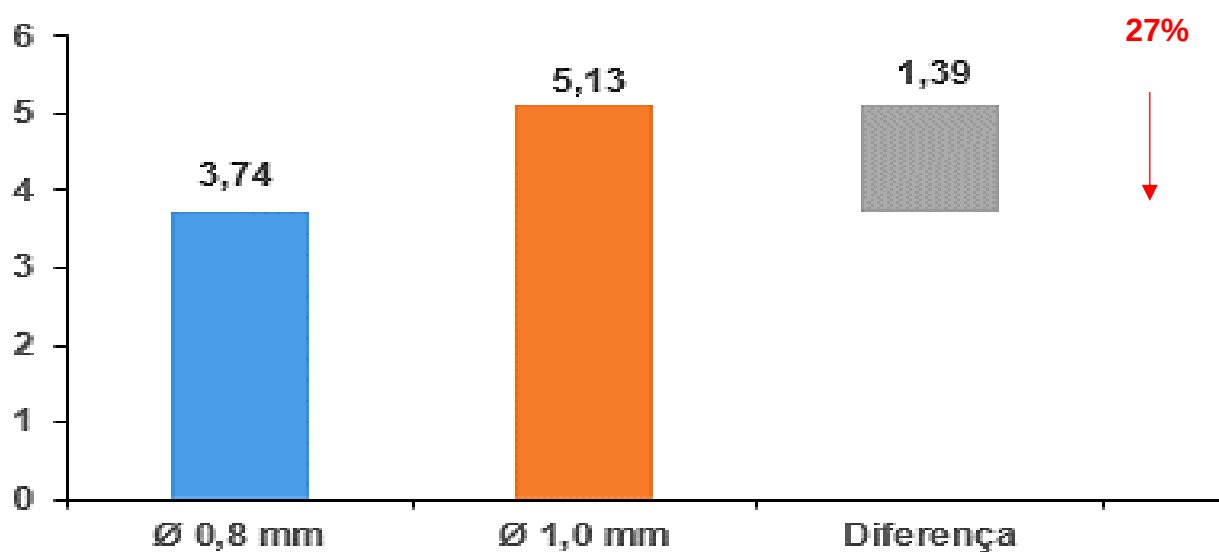
Utilizando Equação 2, observa custo de R\$ 3,74 para junta soldada com o diâmetro Ø 0,8 mm e R\$ 5,13 para junta soldada com arame Ø 1,0 mm com forme a Tabela 19, evidenciando o menor custo no arame Ø 0,8 mm

Tabela 19 - Custo total da soldagem Equação 2

Avaliações	Diâmetro 0,8	Diâmetro 1.0
Custo do metal de adição C1 (R\$)	0,23	0,18
Custo da energia elétrica C2 (R\$)	1,23	2,27
Custo do processo C3 (R\$)	0,636	0,0643
Custo do gás C4 (R\$)	0,0063	0,008
Resultado C4 (R\$)	1,59	2,61
Resultado médio total (R\$)	3,74	5,13

Fonte: Autores (2022)

Para uma melhor compreensão dos valores obtidos que compõe a composição econômica do processo, nota-se uma redução de 27% nos custos soldando-se com o arame Ø 0,8 mm se comparado ao arame Ø 1,0 mm, conforme demonstrado na Figura 38.

Figura 38 - Custo total da soldagem

Fonte: Autores (2022)

8 CONCLUSÃO

De acordo com a definição do método de pesquisa, que consistiu na comparação técnica e econômica, mediante a visão da análise dos procedimentos de soldagem semiautomáticos, os resultados dos ensaios visuais demonstraram-se aprovados conforme critérios de aceitação da AWS D1.1.

Os ensaios macrográficos realizados nas amostras soldadas no modo semiautomático na posição descendente, indicaram a falta de penetração nos corpos de prova soldados com 100A com ambos os arames estudados. Com 125A, obteve-se a aprovação apenas da solda efetuada com o arame Ø 0,8 mm. Para a corrente de 150A, ambos os arames foram aprovados nas condições testadas. As macrografias também demonstraram que todas as soldas realizadas com o arame Ø 0,8 mm foram aprovadas quanto ao requisito de perfil dos cordões.

O rendimento de deposição obtido durante a execução de soldagem, apresentou uma pequena diferença entre ambos de 1,3 % a favor do arame com diâmetro de 1,0 mm.

A taxa de deposição na soldagem com arame de Ø 0,8 mm foi de 3,68 kg/h, apresentando 15% maior se comparado ao arame de Ø 1,0.

A energia imposta no processo foi menor utilizando o arame Ø 0,8 mm.

A análise final comparativa da composição dos custos, constata que o custo da soldagem com o arame Ø 0,8 mm é menor 27% se comparado ao arame Ø 1,0 mm.

Conclui-se que o arame Ø 0,8 mm é o mais indicado para a soldagem de leitos de passagem, utilizando corrente de 125A à 150A na posição vertical desce, sob uma proteção gasosa de Ar (75%) e CO₂ (25%).

REFERÊNCIAS

ACESITA, S. A. **Soldagem dos Aços Inoxidáveis - Acesita S.A. Associada à USINOR.** 2011

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

ARAÚJO, W. R.; **Comparação entre a soldagem robotizada com arame sólido e metal cored – A ocorrência do “finger”.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2004.

ASTM A36 / 36M. **Standard Specification for Carbon Structural Steel: Annual Book of ASTM Standards.** USA: [s.n.]. 2008

BARBEDO, N. D. D.; **Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando o aço ASTM A36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Itajubá – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica – Itajubá. 2011

BELGO BEKAERT ARAMES. **Arame MIG Belgo.** Disponível em: <https://belgobekaert.com.br/produtos/mig-mag-belgo/>. Acesso em: 18/11/2021
Belo Horizonte, novembro de 2001

CBECiMat – 22º **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais** 06 a 10 de novembro de 2016, Natal, RN, Brasil

CIG SOLDAS; **Soldagem automatizada: Posicionador com Bancada para Solda Circunferencial.** Disponível em: <http://cigsoldas.com.br/posicionadores-com-bancada-para-solda-circunferencial/> Acessado em: 11 de novembro de 2021.

DALLAN, C. B.; DAMKROGER, B. K. Characterization of welds. In: DAVIS, J.R. et al. (Ed.). **ASM handbook: Welding, Brazing, and Soldering**. Metals Park; American Society for Metals, 1993.p.202-209.

ELECON; **Leito de passagem**; Disponível em: <http://elecon.com.br/produto/leito-para-cabo-pesado/> . Acessado em: 12 de novembro de 2021.

ESAB. **Apostila de Soldagem MIG/MAG, 2005**. Disponível em: <https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0_apostilasoldagemMAGmag_low.pdf>. Acessado em: 28 de agosto 2021.

FORTES, C.; **Apostila de Metalurgia da Soldagem** – Desenvolvimento e Pesquisa – ESAB BR – 2005, 48p.

JUNIOR, Silvério Ferreira da Silva; MARQUES, Paulo Villani. **Ensaio Não Destrutivos**. Belo Horizonte, 2006.

MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem e técnicas conexas: Processos**, p. 2, 1996

MACHADO, I. G. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**, Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas, UFRGS, Porto Alegre 1996, 477p.

MAGRINI, Rui de Oliveira. **Segurança do Trabalho na Soldagem Oxiacetilênica**. 2ª. Ed. São Paulo (FUNDACENTRO), 72 p., 1999.

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

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009.

MARQUES, P.V., MODENESI, P.J., BRACARENSE, A.Q., **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte, Editora UFMG, 2009.

MODENESI, P. J. **Introdução à física do arco elétrico**. Belo Horizonte: Editora DEMM-UFMG, 2001.

MODENESI, P. J., Bracarense, A. Q., **Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais**. Belo Horizonte – 2007.

MODENESI, P. J.; **Introdução à Física do Arco Elétrico e sua Aplicação na Soldagem dos Metais**. Belo Horizonte – MG, 153p.; 2009.

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

NASCIMENTO, A, S. **Avaliação dos métodos de cálculo de potência em soldagem a aço**. (Artigo) -Universidade Federal de Uberlândia-MG 16° POSMEC. FEMEC/UFU 7p, Uberlândia-MG, 2006.

PEREZ, F. R. C.; **A influência da temperatura de pré-aquecimento e tectimento na microestrutura e propriedades mecânicas na soldagem MIG/MAG robotizada de aços SAE 8620 com ABNT LN28**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP – Bauru – 2007.

PROF. PAULO.J. MODENESI; **Descontinuidades e inspeção em juntas soldadas** SANTOS, HORTENCIA NORONHA DOS; **Avaliação e Desempenho de Juntas Soldadas pelo processo GMAW**, Eng. Mecânica. TCC, Univ. Federal do Pampa (2017).

SENAI BA - CIMAT; **Apostila de Inspetor de Soldagem**. SENAI-BA/SENAI - MG/SENAI - RJ - Rio de Janeiro: 2012. 440 p.: il.

TREMONTI, M. A. **Requisitos organizacionais à introdução da robótica: o caso do processo de soldagem ao arco elétrico sob proteção gasosa**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – São Paulo. 1999.

WAINER, E., BRANDI, S.D., MELLO, F.D.H., **Soldagem Processos e Metalurgia**. São Paulo, Editora EDGAR BLUCHER LTDA, 2004.