



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

MARCOS VINICIUS RODRIGUES PINTO

**ESTUDO DA GEOMETRIA DE CORDÕES DE SOLDA POR PROCESSOS GMAW E
CW-GMAW**

Ananindeua, PA

2022

MARCOS VINICIUS RODRIGUES PINTO

**ESTUDO DA GEOMETRIA DE CORDOES DE SOLDA POR PROCESSOS GMAW E
CW-GMAW**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Materiais, do Campus de Ananindeua, da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Me. Pedro Paulo Guimarães Ribeiro.

Ananindeua, PA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P659e Pinto, Marcos Vinicius Rodrigues.
Estudo da geometria de cordões de solda por processos GMAW
e CW-GMAW / Marcos Vinicius Rodrigues Pinto. — 2022.
64 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Me. Pedro Paulo Guimarães Ribeiro
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal do Pará, Campus Universitário de Ananindeua, Curso de
Engenharia de Materiais, Ananindeua, 2022.

1. Soldagem. 2. Largura. 3. Reforço. 4. Taxa de
alimentação. 5. Penetração. I. Título.

CDD 671.52

MARCOS VINICIUS RODRIGUES PINTO

**ESTUDO DA GEOMETRIA DE CORDOES DE SOLDA POR PROCESSOS GMAW E
CW-GMAW**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a Faculdade de Engenharia de Materiais, do Campus Universitário de Ananindeua, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

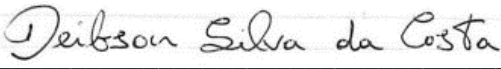
Data da defesa: 05/07/2022

CONCEITO: EXCELENTE


BANCA EXAMINADORA



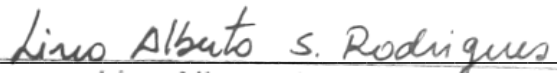
Prof. Me. Pedro Paulo Guimarães Ribeiro
(FEMat/CANAN/UFPA – Orientador)



Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
(FEMat/CANAN/UFPA – Examinador Interno)



Prof. Dr. Ednelson da Silva Costa
(FEI/CABAE/UFPA – Examinador Externo)



Eng. Dr. Lino Alberto Soares Rodrigues
(Eng. Químico - Convidado)

Ananindeua, PA

2022

*"Este trabalho é dedicado à minha família, pelo
incentivo, motivação e suporte"*

AGRADECIMENTOS

Primeiro gostaria de agradecer a cada pessoa que separou um pouco do seu tempo para ler isso, vejo esse trabalho como um fim de um ciclo, ciclo este que se iniciou lá em 2016 quando resolvi entrar na graduação de Engenharia de Materiais. Ao decorrer desses anos na universidade muitas pessoas foram de suma importância nessa caminhada, meus colegas de turma do ano de 2016 que sempre me deram suporte ao decorrer do curso, as pessoas que me receberam na turma de 2017, os membros e diretores da atlética mercúrio no qual fundamos e trilhamos um caminho vitorioso, dentre todas essas pessoas gostaria de agradecer em especial o meu orientador Prof. Pedro Paulo, que sem dúvida nenhuma foi uma das peças mais importantes nessa conquista, gostaria de agradecer também a Ju, Helô e Tati, que mesmo não sendo do “grupo” de vocês sempre me trataram com enorme carinho, a Hamy e Lalor que sempre estiveram dispostas toda vez que precisei de algo, Ao Marlon, Esaú e Jonathan, que pela maior parte do tempo fizeram parte do meu grupo de trabalho. Ao displicente do Washington que me fez passar raiva em todo trabalho em dupla, não posso deixar de citar nesses agradecimentos a Olívia que virou uma grande amiga no período em que fiz estágio no laboratório dos professores Alisson e Veronica, gostaria de agradecer a oportunidade que me foi dada, ao Lucas, Willian e Mathaus e os demais do time de futsal, também a Rafaela com os auxílios prestados durante o tempo que estava no Centro Acadêmico, além das pessoas fora do curso como a Gabriela, que durante boa parte da graduação foi uma espécie de refúgio.

Dedico um parágrafo desse texto para agradecer a Minha família, principal pilar da minha vida. Meus maiores amores, minhas três irmãs. Meus exemplos de força, que são meus pais, meus tios e primos, além da minha vó, e por último e não menos importante, agradecer a Deus.

RESUMO

O processo de soldagem CW-GMAW (*Cold Wire-Gás Metal Arc Welding*) é uma variante do processo GMAW (*Gás Metal Arc Welding*) que utiliza arame frio extra alimentado na poça de fusão, gerando maiores taxas de deposição e melhorando a produtividade do processo. O objetivo deste estudo é avaliar o efeito da adição do arame frio na poça, seu efeito na junta soldada e comparar os resultados com aqueles obtidos no processo GMAW convencional. As superfícies de análise foram obtidas por simples deposição de cordões de solda em substrato de aço AISI 1020, na posição plana, com arames classe ER70S-6. Para a execução dos cordões de solda o arame eletrodo foi alimentado com uma velocidade de 10 m/min, enquanto o arame frio com uma taxa alimentação de 40 %, 80 % e 120 % da velocidade do arame eletrodo. Os resultados mostram que a diluição para o processo GMAW foi em média de 52,97 % e com a adição de arame frio de 40 %, 80 % e 120% a diluição média foi de 47.62 %, 37.03 % e 25.65 %, ou seja, menor quando comparado com o processo GMAW convencional. Além disso, o arame frio reduziu em até 50 % a profundidade de penetração. Contudo, as medidas de largura, reforço e a taxa de deposição apresentam valores maiores, quando comparados ao processo GMAW convencional.

Palavras-chave: Soldagem, Largura, Reforço, Taxa de Alimentação e Penetração.

ABSTRACT

The CW-GMAW (Cold Wire-Gas Metal Arc Welding) welding process is a variant of the GMAW (Gas Metal Arc Welding) process that uses extra cold wire feed into the weld pool, generating higher deposition rates and improving process productivity. The purpose of this study is to evaluate the effect of adding the cold wire to the pool, its effect on the welded joint and to compare the results with those obtained in the conventional GMAW process. The analysis surfaces were obtained by simple deposition of weld beads in AISI 1020 steel substrate, in the flat position, with ER70S-6 class wires. For the execution of the weld beads, the electrode wire was fed at a speed of 10 m/min, while the cold wire with a feed rate of 40 %, 80 % and 120 % of the electrode wire speed. The results show that the dilution for the GMAW process was on average 52.97% and with the addition of cold wire of 40 %, 80 % and 120 % the mean dilution was 47.62 %, 37.03 % and 25.65 %, that is, lower when compared to the conventional GMAW process. In addition, cold wire reduced the penetration depth by up to 50 %. However, the measures of width, reinforcement and deposition rate present higher values when compared to the conventional GMAW process.

Keywords: Welding, Width, Reinforcement, Feed Rate and Penetration.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Esquema do processo de soldagem GMAW..... | 16 |
| Figura 2 - Esquema representativo dos equipamentos de soldagem GMAW..... | 17 |
| Figura 3 - Efeito da corrente sobre a velocidade de fusão do arame eletrodo..... | 18 |
| Figura 4 - Característica do arco elétrico em corrente contínua com a polaridade..... | 19 |
| Figura 5 - Geometria do cordão de solda e transferência de metal com os diferentes gases de proteção, A (Argônio), B (Hélio + Argônio), C (Hélio) e D (Dióxido de carbono)..... | 22 |
| Figura 6 - Ilustração do DBCP..... | 23 |
| Figura 7 - Influência do DBCP na soldagem..... | 24 |
| Figura 8 - Influência da DBCP na geometria do cordão de solda..... | 24 |
| Figura 9 - Evolução dos injetores de arame frio (a) 2005; (b) 2007, (c) 2008 e (d) Protótipo atual instalado em uma tocha automatizada em 2009..... | 25 |
| Figura 10 - Esquema do processo CW-GMAW..... | 26 |
| Figura 11 - Influência da adição de arame frio no arco do cátodo: GMAW convencional; b e c, a taxa de adição do arame em 60% e 140%, respectivamente, relativo à taxa de alimentação do eletrodo..... | 27 |
| Figura 12 - Sequência fotográfica do modo de transferência curto-circuito e seu oscilograma típico..... | 29 |
| Figura 13 - Sequência fotográfica do modo de transferência globular e seu oscilograma típico..... | 30 |
| Figura 14 - Sequência fotográfica do modo de transferência goticular e seu oscilograma típico..... | 30 |
| Figura 15 - Princípio da transferência pulsada: I_p – corrente de pico, I_b – corrente de base, t_p – tempo de pico, t_b – tempo de base e I_c – corrente transição..... | 31 |
| Figura 16 - Oscilograma típico de uma transferência com arco pulsado..... | 32 |
| Figura 17 - Forças Atuantes em uma gota..... | 33 |
| Figura 18 - Ilustração das magnitudes da força de arraste dos gases atuando sobre a gota: a) transferência globular, b) transferência goticular..... | 34 |
| Figura 19 - Forças eletromagnéticas (Lorentz) atuando na gota de metal fundido na ponta de um eletrodo de soldagem consumível..... | 35 |

| | |
|--|-----------|
| Figura 20 - Ilustração da magnitude da tensão superficial atuando sobre a gota. a) transferência globular, b) transferência goticular..... | 36 |
| Figura 21 - Ilustração da magnitude da força de expansão gasosa atuando sobre a gota: a) transferência globular, b) transferência goticular..... | 37 |
| Figura 22 - Esquema representativo das grandezas geométricas do cordão de solda..... | 37 |
| Figura 23 - Ilustração da seção transversal de um cordão de solda mostrando as áreas para obtenção da diluição..... | 38 |
| Figura 24 - Tocha adaptada para soldagem com o processo CW-GMAW..... | 42 |
| Figura 25 - Representação esquemática do processo CW-GMAW..... | 44 |
| Figura 26 - Organograma de execução da soldagem. | 46 |
| Figura 27 - Esquema de seccionamento do cordão para obtenção das amostras..... | 47 |
| Figura 28 - Ilustração das áreas das medidas nos corpos de prova seccionados..... | 47 |
| Figura 29 - Macrografias dos processos de soldagem: a) GMAW, b) CW-GMAW (40 %), c) CW-GMA (80 %) e d) CW-GMAW (120 %). | 50 |
| Figura 30 - Gráfico da Penetração versus Adição de arame..... | 51 |
| Figura 31 - Gráfico Área Penetrada versus Adição de arame..... | 52 |
| Figura 32 - Gráfico Diluição versus Adição de arame..... | 53 |
| Figura 33 - Largura versus Adição de arame. | 55 |
| Figura 34 - Gráfico Reforço versus Adição de arame. | 56 |
| Figura 35 - Taxa de deposição versus Adição de arame..... | 57 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----------|
| Tabela 1 -Composição química (%) do arame ER 70S-6..... | 39 |
| Tabela 2 -Composições químicas nominais do metal de base, em peso%..... | 40 |
| Tabela 3 - Dados técnicos da fonte de soldagem utilizada..... | 41 |
| Tabela 4 - Parâmetros de Soldagem..... | 45 |
| Tabela 5 - Resultados das medidas obtidas..... | 49 |

SUMARIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 14 |
| 1.1 Objetivos..... | 14 |
| 1.1.1. Objetivo geral..... | 14 |
| 1.1.2. Objetivos Específicos..... | 15 |
| 1.2. Justificativa..... | 15 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA..... | 16 |
| 2.1. Processo de soldagem GMAW..... | 16 |
| 2.1.1. Variáveis básicas do processo GMAW..... | 17 |
| 2.1.1.1. Corrente de soldagem..... | 17 |
| 2.1.1.2. Polaridade..... | 18 |
| 2.1.1.3. Tensão de soldagem..... | 19 |
| 2.1.1.4. Velocidade de soldagem..... | 20 |
| 2.1.1.5 Gás de Proteção..... | 20 |
| a) Argônio (Ar)..... | 21 |
| b) Hélio (He)..... | 21 |
| c) Dióxido de carbono..... | 22 |
| 2.1.1.6. Distância Bico de Contato Peça (DBCP) | 23 |
| 2.2. Processo de soldagem GMAW-CW..... | 24 |
| 2.2.1. Caracterização do processo..... | 25 |
| 2.2.2. Vantagens em relação ao processo GMAW convencional..... | 27 |
| 2.2.3. Influência das variáveis do processo..... | 28 |
| 2.3. Transferência Metálica no Processo GMAW..... | 28 |
| 2.3.1. Transferência por Curto-circuito..... | 28 |

| | |
|--|-----------|
| 2.3.2. Transferência Globular..... | 29 |
| 2.3.3. Transferência goticular ou por spray..... | 30 |
| 2.3.4. Transferência pulsada..... | 31 |
| 2.4. Forças atuantes na transferência da gota..... | 32 |
| 2.4.1. Força Gravitacional (F_g) | 33 |
| 2.4.2. Força de arraste de gases (F_a) | 33 |
| 2.4.3. Força eletromagnética (F_{em}) | 34 |
| 2.4.4. Tensão Superficial (F_y) | 35 |
| 2.4.5. Força de expansão gasosa (F_v) | 36 |
| 2.5. Características geométricas..... | 37 |
| 3. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS..... | 39 |
| 3.1. Materiais..... | 39 |
| 3.1.1. Consumíveis..... | 39 |
| 3.1.1.1. Arame Eletrodo e Arame Auxiliar..... | 39 |
| 3.1.1.2. Metal de base..... | 39 |
| 3.1.1.3 Gás de proteção..... | 40 |
| 3.1.2. Fontes de soldagem..... | 40 |
| 3.1.2.1. Fonte de soldagem e alimentador de arame principal..... | 40 |
| 3.1.2.2 Cabeçote auxiliar para alimentação adicional..... | 41 |
| 3.1.3. Tocha de Soldagem..... | 41 |
| 3.1.4. Sistema de aquisição de dado (SAP-V4) | 42 |
| 3.1.5. Equipamentos para Ensaio Metalográficos..... | 42 |
| 3.1.5.1. Máquina de serrar de fita..... | 42 |
| 3.1.5.2. Lixadeira/lixas..... | 42 |
| 3.1.5.3. Ataque químico..... | 43 |

| | |
|---|-----------|
| 3.1.5.4. Microscopia..... | 43 |
| 3.1.6 Bancada de soldagem..... | 43 |
| 3.2. Procedimentos experimentais..... | 44 |
| 3.2.1 Processo de confecção dos corpos de prova de soldagem e ensaios preliminares..... | 44 |
| 3.2.2 Soldagem definitiva e obtenção dos corpos de prova..... | 45 |
| 3.2.3 Preparação metalográfica e obtenção dos parâmetros geométricos..... | 47 |
| 3.2.4 Análise dos parâmetros geométricos dos corpos de prova..... | 48 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 49 |
| 4.1. Análise da geometria das soldas GMAW, CW-GMAW(40%), CW-GMAW(80%) e CW-GMAW(120%)..... | 49 |
| 4.1.1 Penetração, Área penetrada e Diluição..... | 50 |
| 4.1.1.1 Penetração versus taxa de deposição..... | 51 |
| 4.1.1.2 Área penetrada versus taxa de deposição..... | 52 |
| 4.1.1.3 Diluição versus taxa de deposição..... | 52 |
| 4.1.2 Largura, Reforço e Taxa de deposição. | 53 |
| 4.1.2.1 Largura do cordão versus taxa de deposição..... | 54 |
| 4.1.2.2 Reforço do cordão versus taxa de deposição. | 55 |
| 4.1.2.3 Taxa de deposição versus taxa de deposição..... | 56 |
| 5. CONCLUSÃO..... | 58 |
| REFERENCIAS..... | 59 |

1. INTRODUÇÃO

Na indústria metalmeccânica existe a utilização de uma grande diversidade de processos de soldagem, os que empregam o arco elétrico são os mais utilizados por reunirem em um só evento uma alta concentração de energia para fusão localizada e custos relativamente baixos (MONDENESI, 2012). Neste cenário, processo GMAW apresentou-se como protagonista para atender as exigências impostas por esta indústria. O GMAW também conhecido como MIG/MAG, é um processo de soldagem com grande eficiência na união metálica e consiste na aplicação do arco elétrico com eletrodo consumível sob proteção gasosa. Tal eletrodo é um arame maciço e a proteção gasosa um gás inerte para o MIG e gás ativo para o MAG, ou então uma mistura de gases (MOZZER, 2021).

Esse cenário de protagonismo do GMAW vem diminuindo devido ao aumento das exigências do mercado que se torna cada vez mais competitivo. Em resposta à busca em atender às demandas por produtividade nos processos de soldagem, surgem inovações dos processos já utilizados que não atendem essa requisição de demanda (COSTA, 2017).

Como proposta de inovação técnica, econômica e metalúrgica em relação ao processo GMAW convencional, sem aumentar a entrada de calor no substrato foi desenvolvido o processo CW-GMAW (*Cold Wire-Gas Metal Arc Welding*). Essa variante do processo GMAW tem como característica principal a inserção de um arame frio na atmosfera do arco ou na poça de fusão, aproveitando o calor do arco para aumentar a taxa de deposição e aumentar a produtividade. O arranjo físico para utilização dessa técnica é de fácil execução, pois utiliza apenas um equipamento convencional com um cabeçote extra a fim de auxiliar na alimentação do arame frio conjugado à tocha de soldagem (SILVA, 2014).

1.1. Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a influência da adição do arame frio na geometria solda por simples deposição no processo GMAW.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar a geometria do cordão de solda do processo GMAW e do processo CW-GMAW com taxas de deposição de 40 %, 80 % e 120 % de adição do arame frio;
- Analisar comparativamente os parâmetros geométricos dos processos.

1.2 Justificativa

A indústria naval vem experimentando um crescimento significativo no Estado do Pará em função de sua geografia propícia. A busca por produtividade nesta indústria vem impulsionando as pesquisas de inovação tecnológica no processo de soldagem GMAW que é o mais utilizado neste segmento.

Atualmente a robotização vem experimentando níveis cada vez mais elevados de utilização nas indústrias de ponta e, as indústrias regionais, entre elas a naval, vem sentindo a necessidade de acompanhar esta tendência. Isso faz com que haja um especial interesse em novos desenvolvimentos que visem melhorar o desempenho do processo GMAW orientados a aplicações automatizadas, especialmente no que diz respeito a aumento de produtividade.

Como proposta de inovação, os pesquisadores do Laboratório de Caracterização de Materiais Metálicos (LCAM) da Universidade Federal criaram o processo CW-GMAW que, devido vantagens incorporadas no que diz respeito ao aumento da taxa de fusão pela inserção de um arame frio na poça de fusão, contribuiu para elevar a produtividade operacional, eliminando o retrabalho dos componentes soldados por permitir o controle da entrada de calor na peça obra.

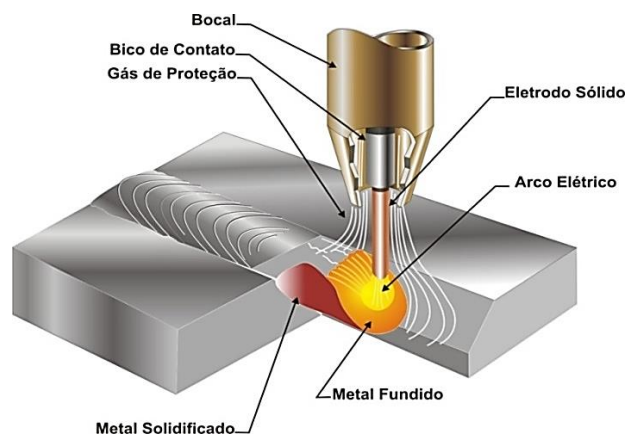
A fácil automação e alta produtividade gerada pela flexibilidade de uso de arames com diferentes diâmetros, aliada ao controle de suas composições químicas, permitem juntas soldadas para atender as mais variadas solicitações mecânicas exigidas pelas indústrias.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Processo de soldagem GMAW

O processo de soldagem GMAW (*Gas Shielded Metal Arc Welding*) com blindagem a gás é realizado por um arco elétrico criado entre a peça e um arame nu alimentado continuamente. A proteção da poça é fornecida pelo gás que flui através do bocal, concêntrico com o eletrodo. O tamanho, a forma e a frequência dessas gotas depositadas caracterizam algum tipo de transferência metálica (SOUZA, 2013). A Figura 1 mostra uma construção comum do processo e detalhes do funcionamento da tocha.

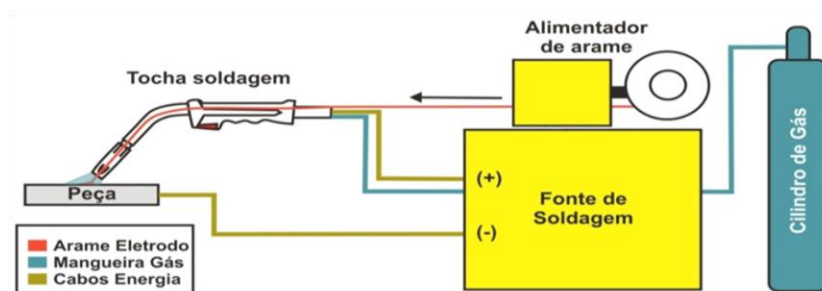
Figura 1 – Esquema do processo de soldagem GMAW.



Fonte: (CRUZ JR, 2009).

Na Figura 2 estão ilustrados os principais componentes do processo de soldagem GMAW: A fonte de energia, condutores elétricos, tocha de soldagem, cilindro de gás de proteção e um cabeçote alimentador com arame eletrodo.

Figura 2 - Esquema representativo dos equipamentos de soldagem GMAW.



Fonte: (CRUZ Jr. e CABRAL, 2008).

Preferido por sua versatilidade, produtividade, velocidade e relativa facilidade de adaptação a automação robótica, atualmente é o processo de soldagem industrialmente mais usado em processo de fabricação, manutenção de equipamentos e peças metálicas, assim como no revestimento e recuperação de peças desgastadas, na indústria automotiva e de autopeças, estaleiros, caldeirarias, implementos agrícolas, entre tantas outras (SCOTTI; PONOMAREV, 2014); (EMILIO; BRANDI; DE MELLO, 2015); (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2017).

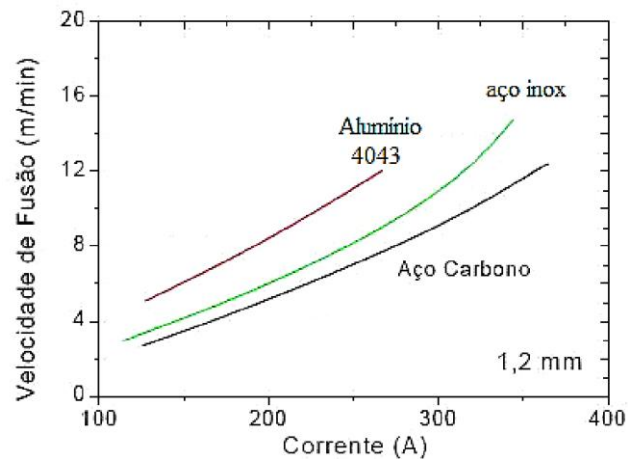
2.1.1. Variáveis básicas do processo GMAW

No processo GMAW existem algumas variáveis básicas que afetam a transferência metálica, a estabilidade, a geometria e as propriedades mecânicas e metalúrgicas do cordão de solda. Tais variáveis apresentam uma forte relação de acoplamento, o que significa que elas se influenciam mutuamente (O'BRIEN, 2019); (SOUZA; RESENDE; SCOTTI, 2009).

2.1.1.1. Corrente de soldagem

Este parâmetro de soldagem tem influência no comportamento do arco, no modo de transferência, na penetração e na qualidade da solda. Além disso, a corrente de soldagem pode influenciar também no volume da poça fundida, na taxa de deposição, no reforço, na geometria do cordão de solda, no tamanho da zona termicamente afetada (ZTA) e no aporte térmico, podendo gerar modificações na microestrutura do metal de solda (BARBOZA FILHO, 2011). A Figura 3 ilustra o efeito da corrente sobre a velocidade de fusão do arame eletrodo.

Figura 3 - Efeito da corrente sobre a velocidade de fusão do arame eletrodo.



Fonte: (CARY, 1998).

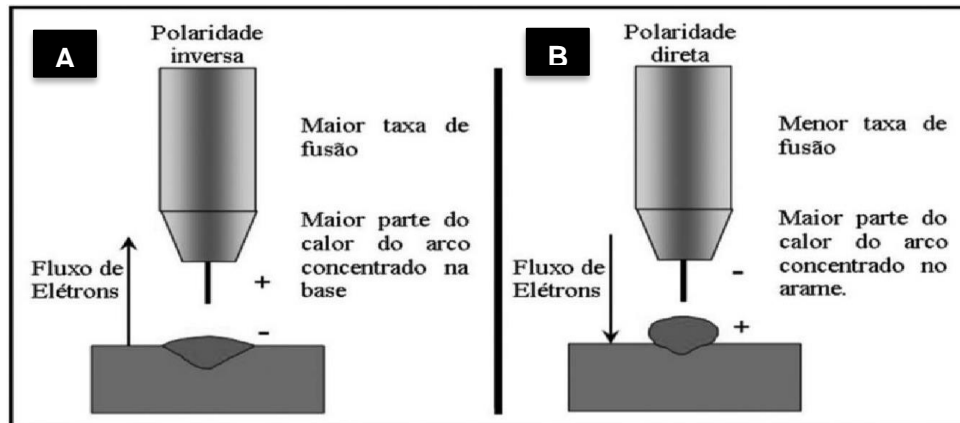
Segundo estudos realizados por HU, J; TSAI, (2006) para utilização de correntes mais elevadas na operação de soldagem é gerada uma força eletromagnética maior no eletrodo, reduzindo o diâmetro das gotas e, por conseguinte, aumentar a sua taxa de transferência para a poça, alterando o modo de transferência metálica. Por isso, se esse parâmetro for utilizado adequadamente, há um aumento na taxa de fusão do arame e na variação do modo de transferência, o que pode resultar em uma alta produtividade, boa aparência do cordão, gerando uma solda de boa qualidade. Entretanto, para aumentar a produtividade do processo, valores de corrente cada vez maiores foram usados elevando a entrada de calor no metal de base gerando distorções e tensões residuais obrigando o produto final passar por trabalho de correção estrutural, aumentando os custos do processo (LI K.H, 2008); (COSTA et al., 2017); (ZHANG; JIANG; LU, 2004); (LI, K.H., CHEN, J.S. e ZHANG, 2007).

(BARRA, 2003) sugere em seus estudos que quanto menor a corrente média, menor a quantidade de calor transferido para a peça, gerando menos distorções e tensões residuais.

2.1.1.2. Polaridade

A polaridade é uma variável importante no processo GMAW. A Figura 4 mostra as características de cada polaridade. Normalmente o processo usa polaridade inversa (CC +), onde o eletrodo é ligado ao polo positivo da fonte e a peça ao polo negativo, conforme Figura 4a.

Figura 4 - Característica do arco elétrico em corrente contínua com a polaridade.



Fonte: (TALKINGTON, B. S., 1998).

Segundo (SOUZA; RESENDE; SCOTTI, 2009); (ALTHOUSE, 2013) neste modo, consegue-se uma maior penetração, boa estabilidade do arco e da transferência, menor quantidade de respingo, além da possibilidade de soldar com os diferentes modos de transferência metálica, como curto-circuito, globular e goticular. Já quando se utiliza polaridade direta (CC-) onde o eletrodo é ligado ao polo negativo e a peça ao polo positivo, conforme Figura 4b, se obtém uma transferência bastante instável, com baixa penetração, alta taxa de fusão de arame para uma dada corrente em comparação soldagem com CC+, sendo mais indicada para soldagem de revestimento, a qual leva a uma menor quantidade de calor transferido à peça, porém gera uma quantidade de respingo relativamente alta. De maneira geral, a instabilidade na transferência metálica compromete o resultado final da maioria das aplicações. A transferência metálica é usualmente limitada à condição globular e as gotas tendem a serem expelidas em uma direção diferente da poça causando respingos grosseiros em grande quantidade. (LANCASTER, 1986) atribui este fenômeno a uma força catódica repulsiva bastante instável que empurra a gota para longe da poça.

2.1.1.3. Tensão de soldagem

Segundo WAINER, (1992) a tensão utilizada durante o processo de soldagem está associada ao comprimento do arco e também do tipo e diâmetro do eletrodo, do gás de proteção e do modo de transferência; uma tensão baixa provoca um menor comprimento de arco. A

tensão pode influenciar na geometria do cordão de solda (largura do cordão) e no modo de transferência, desde que mantenha a corrente constante (BARROS, 1976).

O valor de tensão deve ser adequado para não gerar defeitos no cordão de solda, pois ao soldar com uma voltagem elevada, além de contribuir para o alargamento e achatamento do cordão de solda pode gerar excesso de respingos, porosidade, mordeduras e redução da penetração, por outro lado valores baixos de tensões tenderiam a estreitar o cordão de solda, aumentar a altura do reforço do cordão, falta de fusão e gerar cordões muito convexos (ASM, 1978); (FORTES, 2004); (GOMES, 2006).

2.1.1.4. Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem é a velocidade de deslocamento do arco elétrico ao longo da junta. A velocidade de soldagem é diretamente proporcional à quantidade de energia cedida à peça; quanto maior a velocidade, menor a quantidade de calor cedida por unidade de área. A redução da largura e penetração do cordão com a velocidade de soldagem está associada à diminuição da quantidade de energia fornecida por unidade de comprimento da junta. A influência no reforço do cordão está associada à redução da quantidade de material de adição que é fornecida à solda, com o aumento da velocidade de soldagem (MODENESI, 2012). Além disso, velocidades muito baixas resultarão em cordões muito largos e além de elevar o custo da operação, podem causar alterações metalúrgicas na estrutura do material devido à concentração térmica. Por outro lado, velocidades excessivas provocam menor penetração e menor largura do cordão, possíveis mordeduras e falta de fusão, além de falta de penetração (VARGAS, 2011).

2.1.1.5 Gás de proteção

Para proteger a poça de fusão de contaminação pelo ar atmosférico, pois o nitrogênio, oxigênio e hidrogênio presente na atmosfera possui ação danosa na poça de fusão, evitando a formação de óxidos e de nitretos, que resultam em juntas soldadas de má qualidade, com retenção de escória, porosidades e fragilização do cordão. Se utiliza um gás de proteção, ao escolher o gás deve-se ter consciência que ele tem influência em algumas propriedades e na qualidade final da solda, assim como a escolha da transferência metálica a escolha do gás deve

ser feita de acordo com suas propriedades e o local onde será aplicado (HURTADO MENESES, 2013).

No processo GMAW existem 2 tipos de gases de proteção que podem ser utilizados, gases inertes, esse tipo de gás não reage quimicamente e para ser utilizado como um gás condutor precisa ser ionizado, e gases ativos, contrapondo a característica do gás inerte gases ativos reagem quimicamente com o elemento do material de base, encontra-se também a mistura dos dois, mas a partir do momento que essa mistura promove alteração química no metal de solda, a mistura é considerada ativa (HURTADO MENESES, 2013).

a) Argônio (Ar)

O argônio apresenta características principais como: Ser inerte, ser monoatômico, possuir pureza exigida para soldagem 99,99%, ter uma penetração reduzida, favorecer a limpeza, possuir um menor custo, sua facilidade no uso além do baixo potencial de ionização (em torno de 15,7 V) e a da sua baixa condutividade térmica, tornando ideal para soldagem de chapas finas, quando se trata do arco elétrico ele facilita a abertura do arco, deixa o arco estável, e faz com que tenha uma baixa quantidade de respingos e por fim tende a formar uma cobertura protetora sobre a poça (MOREIRA, 2008).

Estudos mostram que com a adição de O₂ ou CO₂ no gás de proteção a base de Argônio é causado uma oxidação, levando a perda de alguns elementos de liga e gerando inclusões. Em geral, a presença de inclusões é maléfica às propriedades do cordão. No entanto, para certas inclusões de óxidos promovem a formação de Ferrita Acicular, a qual contribui para aumentar a tenacidade do metal de solda. (LESNEWICH, 1990, KLUKEN, 1989).

b) Hélio (He)

O Hélio apresenta como propriedades principais: Ser inerte, monoatômico; pureza exigida para soldagem 99,99%, arco de maior temperatura se comparado ao argônio para determinadas amperagem e comprimento de arco, arco estável, tende a deixar rapidamente a área sobre a poça, assim, a vazão de He deverá ser 2 a 3 vezes a de Argônio para garantir a mesma proteção e potencial de ionização 24,5V (MOREIRA, 2008).

Estudando o hélio percebemos que ao utilizá-lo em uma mistura ternária base de Ar-He-CO² e Ar-He-O² surge alguns efeitos nos aspectos macro e micrográfico do cordão de solda, na soldagem MAG de arco pulsado se constatou que a adição de Hélio aumentou a largura e penetração do cordão (DALPIAZ, 1999).

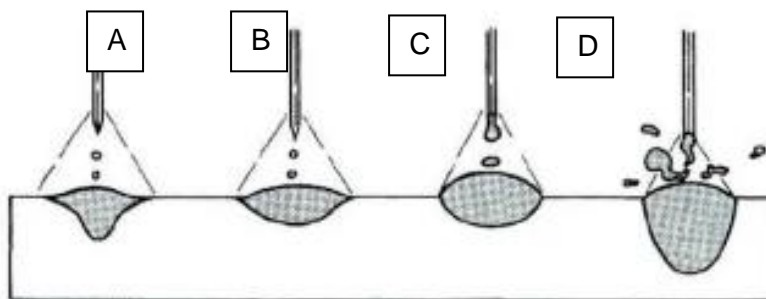
c) Dióxido de carbono

Possuindo características como uma boa velocidade de soldagem, uma alta energia de ionização e alta condutividade térmica, o que o faz ideal para soldagem de chapas grossas pois possui excelente penetração, porém possui um arco instável e uma grande quantidade de respingos. Os processos de difusão de carbono e de oxidação se desenvolvem à medida que os elementos químicos presentes no metal de solda reagem com o oxigênio monoatômico, formando óxidos, ou com o próprio carbono, promovendo sua entrada ou saída do metal de solda, o que dependerá de sua concentração (MOREIRA, 2008).

Quando se trata de atmosferas de proteção ricas em gás carbônico, pode-se observar que elas apresentam uma tendência a transferência ou a retirada de carbono da poça de fusão, e isso depende do carbono no metal de solda (MACHADO, 1996).

Na Figura 5 podemos ver a influencia de cada gás de proteção na geometria do cordão de solda.

Figura 5 - Geometria do cordão de solda e transferência de metal com os diferentes gases de proteção, A (Argônio), B (Hélio + Argônio), C (Hélio) e D (Dióxido de carbono)

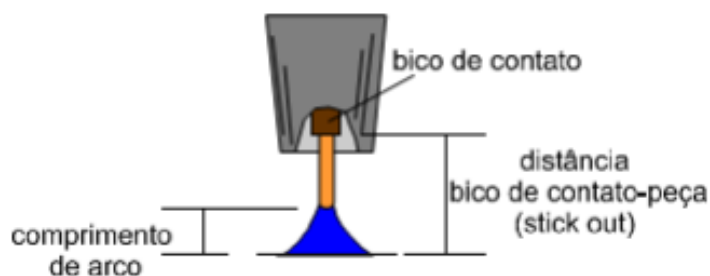


Fonte: (ALVES, 2009).

2.1.1.6 Distância Bico de Contato Peça (DBCP)

O Distância Bico de Contato Peça pode ser definido como a extensão do eletrodo, a distância da extremidade do bico de contato a peça obra, incluindo a altura do arco elétrico, podemos ver essa medida na Figura 5.

Figura 6 - Ilustração do DBCP.

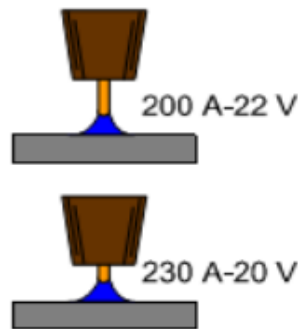


Fonte: (SOLCI, 2015).

Aumentar a extensão do eletrodo resulta em uma queda na amperagem e um aumento na voltagem. Como o arame é aquecido pela resistência do circuito, uma quantidade menor de corrente é necessária para derreter o arame. Portanto, aumentar o stick-out aumenta a taxa de fusão do fio e vice-versa.

A distância do bico de contato à peça deve ser sempre controlada, pois quando essas distâncias (DBCP) são grandes, produzem menos calor do arco, resultando em baixa penetração e geometria do cordão desfavorável podemos ver uma ilustração da influência da distância do DBCP na Figura 7. Durante a soldagem do mesmo cordão, a extensão do eletrodo deve permanecer constante, pois à medida que essa distância aumenta, o calor gerado pelo efeito Joule aumenta e a corrente de soldagem necessária para fundir o arame diminui e vice-versa (FORTES, 2005, KUNTZ, 2008).

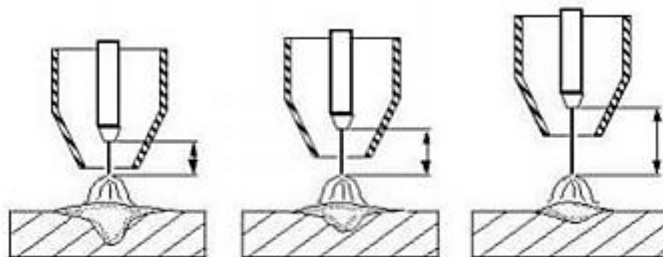
Figura 7 - Influência do DBCP na soldagem.



Fonte: (SOLCI, 2015).

A Figura 8 mostra como a DBCP influencia na geometria e no aspecto visual do cordão de solda, a DBCP ainda possui uma ligação direta com a penetração e a diluição do cordão de solda.

Figura 8 - Influência da DBCP na geometria do cordão de solda.



Fonte: (BARBEDO, 2011).

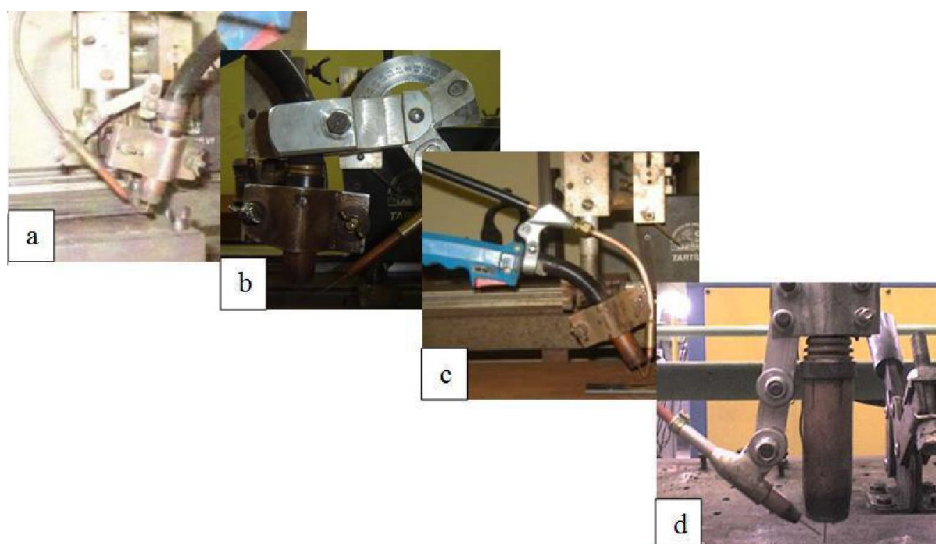
2.2. Processo de soldagem CW-GMAW

Com o aumento da produtividade na indústria, o processo GMAW convencional começa a perder competitividade; procuram-se então por processos com taxas de deposição mais elevadas (semelhantes às do processo arco submerso), possibilitando a redução do tempo de soldagem e, conseqüentemente, custos globais e a necessidade de inovações tecnológicas aos processos já consolidados nas linhas de produção (GROETELAARS, 2005).

Em uma linha de pesquisa a partir de uma variante do processo GMAW, com a adição de arame não energizado, como uma alternativa para aumentar a produtividade, sem aumentar a entrada de calor no metal base, o Laboratório de Caracterização de Materiais Metálicos (LCAM) da Universidade Federal do Pará (UFPA) desenvolveu o processo CW-GMAW (*Cold Wire- Gas Metal Arc*).

Para a realização dessas pesquisas, foi necessário o desenvolvimento do injetor que permitiria a condução do arame não energizado à região da poça de fusão, que vem sendo inovado com as necessidades de adaptação ao processo, conforme apresentado também por (SÁBIO, 2007); (SILVA, 2010). Tal evolução é mostrada na Figura 9(a, b e c), culminando no protótipo atual, Figura 9(d), com mais graus de liberdade, agregando as vantagens dos anteriormente construídos.

Figura 9 – Evolução dos injetores de arame frio (a) 2005; (b) 2007, (c) 2008 e (d) Protótipo atual instalado em uma tocha automatizada em 2009.



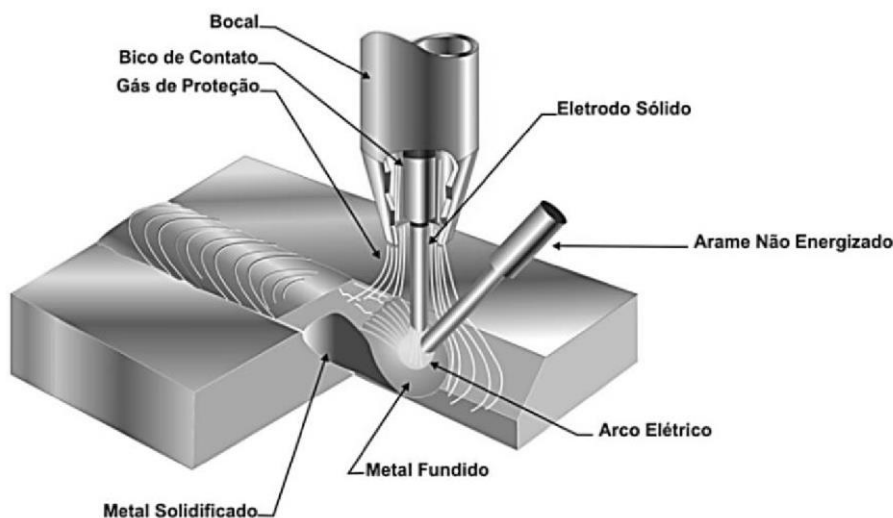
Fonte: (CABRAL, 2011).

2.2.1. Caracterização do processo

O processo apresenta como característica principal a introdução de um arame frio na atmosfera do sistema arco voltaico/poça utilizando-se de um alimentador independente e um injetor conectado a tocha de soldagem. Neste sistema, o arame frio funde-se, aproveitando o calor do arco para formar o metal de adição (CABRAL et al., 2015).

O processo CW-GMAW foi originalmente proposto para fornecer maior deposição em aplicações de construção naval (SILVA, 2010), onde a diminuição da distorção induzida pelo calor pode ser obtida simplesmente usando um alimentador de arame adicional para alimentar o arame frio para a poça de fusão. Na Figura 10 é apresentado esquematicamente o processo.

Figura 10 – Esquema do processo CW-GMAW.



Fonte: (SILVA, 2010)

A relação da taxa de alimentação do arame frio é uma porcentagem da taxa de alimentação do eletrodo, e é denominada taxa de alimentação do não-eletrodo (%), definida da seguinte forma pela equação (1): onde W_s é a taxa de alimentação do arame frio em m/min, E é a taxa de alimentação do eletrodo em m/min e R a taxa de alimentação.

$$R = \frac{W_s}{E} \times 100 \quad (1)$$

Vale ressaltar que os arames podem ter diâmetros diferentes. Como o arame frio é fundido pelo calor que de outro modo seria perdido e / ou transmitido ao metal de base, acredita-se que ter um diâmetro menor melhoraria a fusão (RIBEIRO et al., 2015).

O processo CW-GMAW não necessita de aparatos de alto valor, complexos e treinamento especializado para realização das soldagens, mostrando-se versátil em soldagens automatizadas e semiautomatizadas, conforme estudos de (SÁBIO, 2007) e (CABRAL, 2011).

O processo também apresenta algumas limitações, como a capacidade mecânica do dispositivo guia do arame frio, a combinação das velocidades de alimentação do arame eletrodo com a do arame frio limitando as taxas de fusão e de deposição (SILVA, 2010).

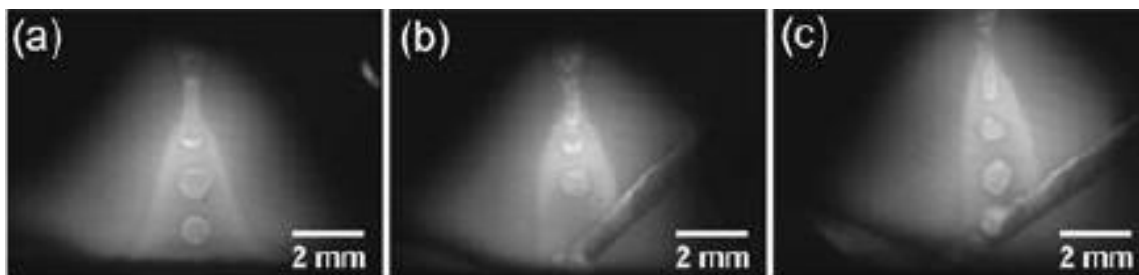
2.2.2. Vantagens em relação ao processo GMAW convencional

Estudos iniciais desenvolvidos por (BACELAR; FERRAZ, 2005), utilizando o processo GMAW com adição de arame frio, apresentaram uma produção média maior em relação à soldagem *MAG* convencional, com bons níveis de estabilidade e qualidade superficial da união. Posteriormente, em seus estudos, SÁBIO (2007) demonstra uma supremacia na produção alcançada com o processo CW-GMAW em relação ao GMAW.

De acordo com os estudos de (ASSUNÇÃO, 2013), as principais vantagens do CW-GMAW são que ele apresenta todas as vantagens do GMAW, além de um conjunto de solda mais frio, pode ser utilizado em todas as posições de soldagem, o arame adicional pode ser convencional ou fluxado e pode alcançar boa qualidade de cordão de solda e altas taxas de deposição. Esta proposta por apresentar maior taxa de deposição comparada com o processo GMAW sugere sua aplicação na soldagem de componentes de pequena espessura, conforme os estudos desenvolvidos por (COSTA et al., 2017) e (CABRAL et al., 2015).

O processo de soldagem CW-GMAW pode realizar soldas com quantidades crescentes de arame frio, conforme Figura 11.

Figura 11 - Influência da adição de arame frio no arco do cátodo: GMAW convencional; b e c, a taxa de adição do arame em 60% e 140%, respectivamente, relativo à taxa de alimentação do eletrodo.



Fonte: (ASSUNÇÃO et al, 2017).

De uma forma geral, o processo CW-GMAW consegue agregar uma boa estabilidade ao arco, aumentando a taxa de fusão e deposição, possui uma boa qualidade superficial da junta soldada, maior versatilidade do processo e maior produtividade se comparado com o processo GMAW convencional. Porém, esse processo gera uma redução da penetração em relação ao GMAW, surgindo a necessidade de buscar uma alternativa para que seja possível aumentar a taxa de deposição, sem reduzir a penetração.

2.2.3. Influência das variáveis do processo

Na medida em que a aplicação de um processo de soldagem se torna cada vez mais consolidada, mais fácil se torna prever o efeito esperado da ação de variáveis sobre o cordão de solda resultante. Atualmente, muitas pesquisas referentes ao processo CW-GMAW têm sido realizadas para um melhor aproveitamento na indústria, principalmente relacionadas a características geométricas e econômicas e comportamento da resistência mecânica da junta soldada. Uma melhor aplicação do processo passa pelo conhecimento dos efeitos de suas variáveis operacionais (REIS, 2019).

2.3. Transferência metálica no processo GMAW

A transferência metálica no processo GMAW é caracterizada pela transferência de metal do eletrodo para a poça de fusão através do arco. Essa transferência possui muitas variáveis operacionais que são influenciadas pela corrente de soldagem, a composição do gás de proteção. Ainda que existam na literatura várias classificações para os tipos de transferência metálica, especificamente para o processo GMAW podemos considerar quatro tipos principais: curto-circuito, globular, goticular, e por arco pulsado (EMILIO; BRANDI; DE MELLO, 2015).

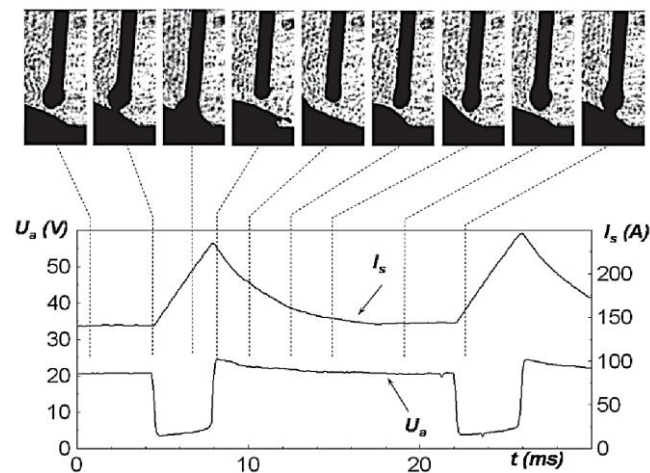
A seguir estes modos de transferência metálica serão apresentados de forma simplificada.

2.3.1. Transferência por curto-circuito

Esse tipo de transferência acontece com um comprimento do arco pequeno pois essa transferência é caracterizada por baixa corrente e baixa tensão. Ela consiste no processo da

ponta do eletrodo atingir de forma periódica a poça de fusão, ocasionando um curto circuito. Com o curto circuito, a corrente eleva-se rapidamente, aquecendo o eletrodo por efeito Joule e aumentando a sua fusão. O metal líquido em formas de gota com diâmetro menor do que do arame eletrodo, tende a se transferir para a poça de fusão por ação da tensão superficial e de forças de origem magnética. Podemos ver as características do modo de transferência citado acima na Figura 12 (MODENESI, 2012).

Figura 12 - Sequência fotográfica do modo de transferência curto-circuito e seu oscilograma típico.

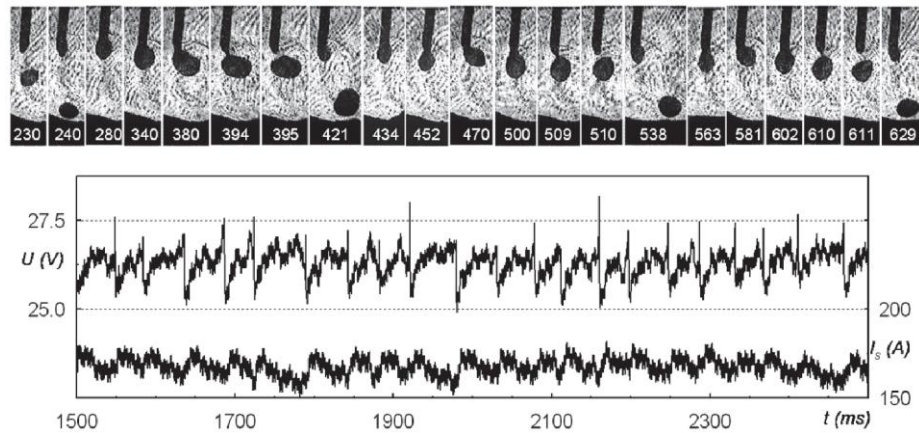


Fonte: (SCOTTI; PONOMAREV, 2014).

2.3.2. Transferência globular

A transferência globular se assemelha a uma torneira gotejando, existe a formação de metal líquido na ponta do arame eletrodo, essas gotas são formadas com diâmetros maiores que do arame e com o aumento do peso dessa gota, ela cai em direção à poça de fusão por ação da gravidade, e a essa transferência ocorre com uma frequência baixa. Podemos ver uma sequência fotográfica e seu oscilograma na Figura 13 (MODENESI, 2012).

Figura 13 – Sequência fotográfica do modo de transferência globular e seu oscilograma típico.

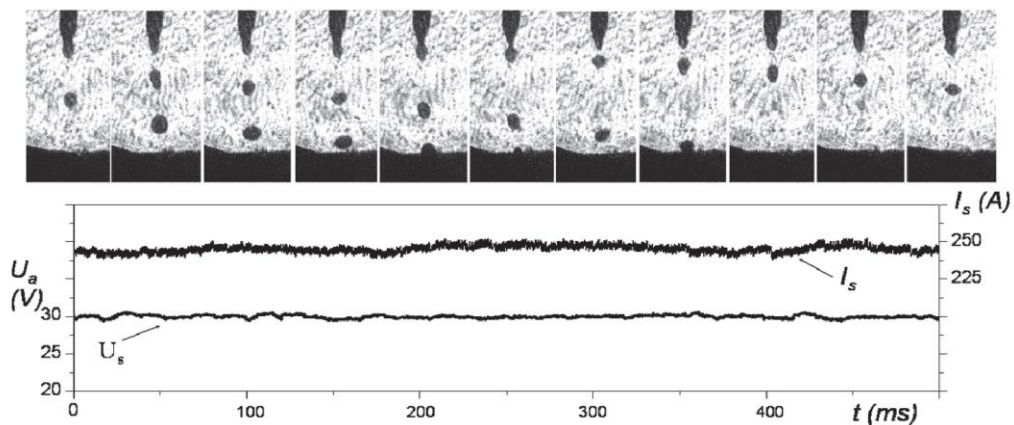


Fonte: (SCOTTI; PONOMAREV, 2014).

2.3.3. Transferência goticular ou por spray

Transferência por spray é caracterizada pelo destacamento de gotas metálicas com diâmetro menor do que do arame e em grande quantidade, transferidas em alta velocidade e com baixo volume de respingos. Outra característica desse modo de transferência é a poça de fusão bastante fluida, pois é utilizado alta corrente e alta tensão, o que limita as posições de soldagem somente a posição plana e horizontal. A Figura 14 mostra uma sequência fotográfica do processo junto com seu oscilograma (BRACARENSE, 2007).

Figura 14 -Sequência fotográfica do modo de transferência goticular e seu oscilograma típico.



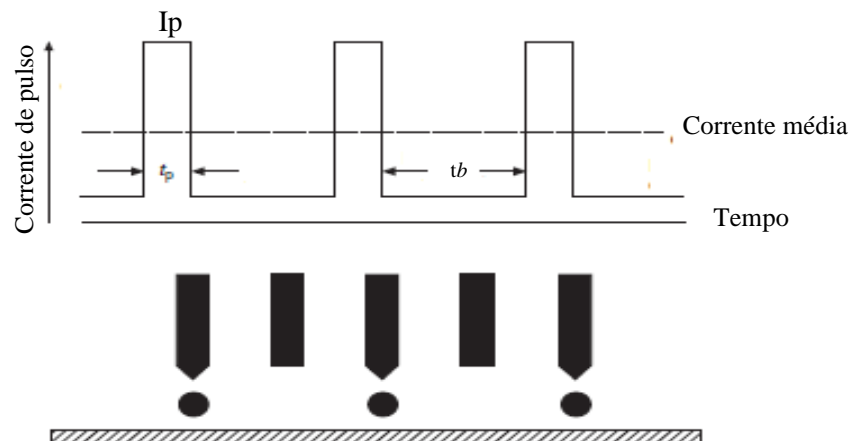
Fonte: (SCOTTI; PONOMAREV, 2014).

Este modo de transferência apresenta alta produtividade, boa estabilidade e um bom aspecto do cordão de solda com pouquíssimos respingos. (A.M QUITES, 1979) (NORRISH, J. & RICHARDSON, 1988) (AWS, 1991).

2.3.4. Transferência pulsada

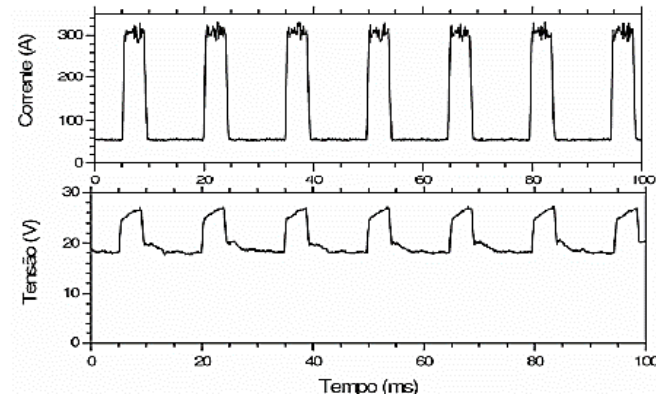
A qualidade da transferência pulsada é controlada por vários fatores entre os quais, a composição, bitola e velocidade de alimentação do arame, gás de proteção, e manutenção do comprimento de arco adequado e estável, que só é possível através do uso de fontes eletrônicas. Assim é possível se obter uma transferência similar à transferência goticular, porém utilizando valores de corrente média inferior a corrente de transição. Devido à redução na energia média do arco e na taxa de fusão ela é indicada para soldagens de chapas mais finas e, ainda, para soldagens fora da posição plana (SCOTTI; PONOMAREV, 2014) (WAINER, 1992). A Figura 15 ilustra o princípio da transferência pulsada e a Figura 16 mostra os oscilogramas de corrente e tensão modo de transferência pulsado.

Figura 15 - Princípio da transferência pulsada: I_p – corrente de pico, I_b – corrente de base, t_p – tempo de pico, t_b – tempo de base e I_c – corrente transição.



Fonte: (Adaptado de NORRISH, 2006)

Figura 16 - Oscilograma típico de uma transferência com arco pulsado.



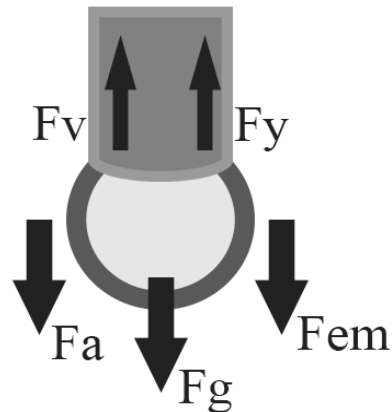
Fonte: (MODENESI, 2012).

2.4. Forças atuantes na transferência da gota

A dinâmica de transferência de metal através do arco elétrico é o resultado de um equilíbrio de forças atuando na gota metálica (NORRISH, 2006). As forças que influenciam na formação da geometria da poça de fusão são principalmente: força gravitacional (F_g); força de arraste dos gases (F_a); força de Lorentz (F_{em}); força de tensão superficial (F_y) e força gasosa (vaporização (F_v)).

Essas forças podem atuar a favor ou contra o destacamento da gota na extremidade do arame eletrodo como pode ser visto na Figura 17, e sua influência na transferência metálica dependem de condições operacionais específicas (corrente de solda, tensão do arco, composição do material, diâmetro do arame, gases de proteção e pressão ambiente) (SCOTTI; PONOMAREV, 2014) (NAIDU; OZCELIK, SELAHATTIN; MOORE, 2003).

Figura 17 - Forças Atuantes em uma gota.



Fonte: (Adaptado de SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

2.4.1. Força gravitacional (Fg)

A força gravitacional é influenciada diretamente pela posição de soldagem, podendo fazer a poça de fusão escorrer, cair ou até mesmo influenciar na penetração, a força gravitacional é dependente da massa; é administrada pela densidade e dimensão do material da poça (TOKAR, 2011).

Pode-se quantificar essa força usando a equação (2) onde (dg) é o diâmetro da gota, (ρ) é densidade do material líquido da gota e (g) a componente vertical da aceleração da gravidade.

$$Fg = \frac{\pi}{6} \cdot dg^3 \cdot \rho \cdot g \quad (2)$$

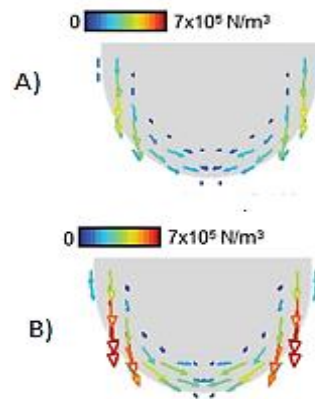
Uma vez destacadas, essas grandes gotas (com diâmetros maiores que o diâmetro do eletrodo) caem lentamente (conforme determinado pela gravidade) através da coluna de arco e entram na poça de solda derretida para serem absorvidas pelas forças de tensão superficial (MESSLER, 2008).

2.4.2. Força de arraste de gases (Fa)

Esta força é gerada pela ação do jato de plasma sobre a superfície das gotas livres e atua sempre no sentido de favorecer seu destacamento. De modo semelhante à força gravitacional,

sua ação é contínua mesmo após o destacamento da gota. A força de arraste é potencializada pelo aparecimento de vórtex gerado por ações aerodinâmicas na superfície da gota criando, sob a sua base, uma depressão que irá sugá-la e arrastá-la em meio ao fluxo. A Figura 18 mostra uma simulação de dois diferentes tipos de transferência metálica e como a força de arraste de gases atua em cada uma.

Figura 18 - Ilustração das magnitudes da força de arraste dos gases atuando sobre a gota: a) transferência globular, b) transferência goticular.



Autor:(Adaptado de CAMARGO, 2016).

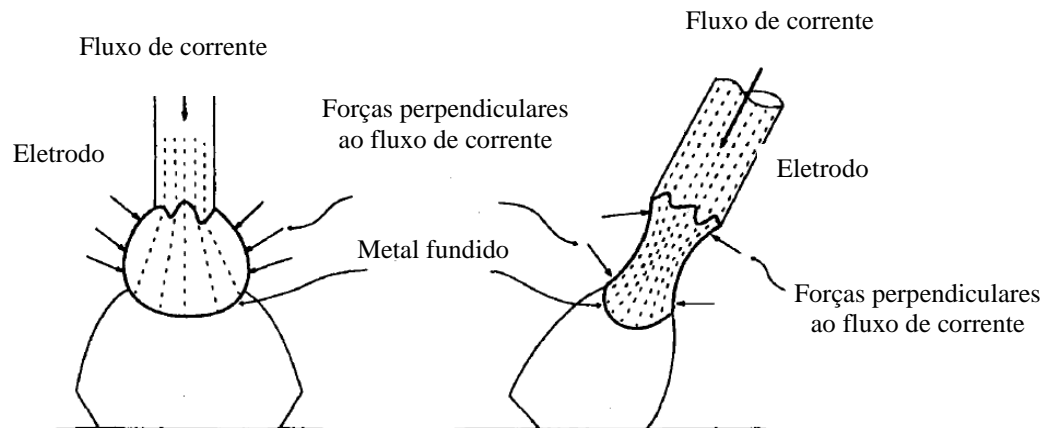
A expressão que a quantifica é dada pela Equação (3), onde v é a velocidade da gota, ρ é a densidade do gás, Rd é o raio da gota, Cd o coeficiente de arraste e Fa a força de arraste. Esta força é maior com maior raio de gotas e velocidade do gás. (SCOTTI; PONOMAREV, 2014) (MIRANDA, 2002) (NORRISH, 2006).

$$Fa = 0,5 \cdot \pi \cdot v \cdot \rho \cdot Rd \cdot Cd \quad (3)$$

2.4.3. Força eletromagnética (Fem)

É bem conhecido que um condutor que transporta corrente estabelece um campo magnético em torno de si, que por sua vez, induz ao aparecimento de forças radiais direcionadas ao seu centro (NAIDU; OZCELIK, SELAHATTIN; MOORE, 2003). Este efeito está representado na Figura 19.

Figura 19 - Forças eletromagnéticas (Lorentz) atuando na gota de metal fundido na ponta de um eletrodo de soldagem consumível.



Fonte: (Adaptado de MESSLER, 2004).

Esta força só terá efeitos significativos sobre condutor líquido, ou seja, no destacamento da gota atuando em cada unidade de volume na forma de compressão direcionada para o seu interior, deixando de atuar supostamente, após o seu destacamento (SCOTTI; PONOMAREV, 2014).

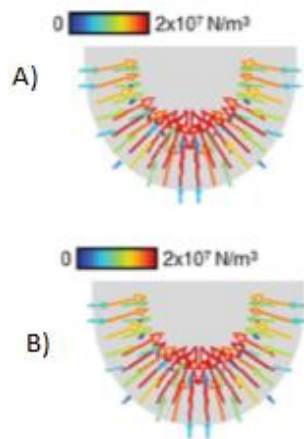
Devido à corrente de soldagem, a força eletromagnética ou de Lorentz é dada pela Equação (4), onde (μ) é a permeabilidade magnética do material e (J) a densidade de corrente (SCOTTI; PONOMAREV, 2014)

$$F_{em} = \mu(J \times B) \quad (4)$$

2.4.4. Força de tensão superficial (F_y)

A tensão superficial tende segurar a poça de fusão, e impedir que ela caia ou esorra, além de ter ação sobre a geometria da poça, e ela é dependente da composição química do metal líquido e do gradiente de temperatura, no centro da poça de fusão é o local onde a temperatura está mais elevada, e tende a ser o local onde a tensão superficial é menor isso faz com que o metal superaquecido do centro da poça seja encaminhado para as laterais, aumentando a largura do cordão e diminuindo sua altura (TOKAR, 2011). A Figura 20 ilustra a ação dessa força na transferência de gota.

Figura 20 - Ilustração da magnitude da tensão superficial atuando sobre a gota. a) transferência globular, b) transferência goticular.



Autor:(Adaptado de CAMARGO, 2016).

A Equação (5) expressa a magnitude da força de tensão superficial (F_y), onde (d_g) é o diâmetro da gota e (γ) é o termo que representa a energia livre de superfície (obtido experimentalmente) (SCOTTI; PONOMAREV, 2014).

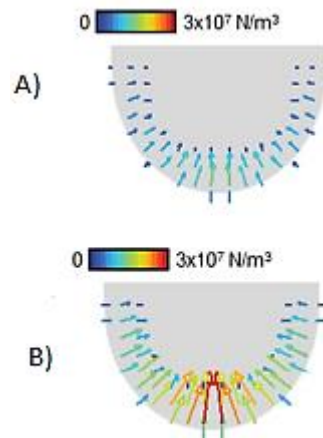
$$F_y = \pi \cdot d_g \cdot \gamma \quad (5)$$

2.4.5. Força de expansão gasosa (F_v)

Esta força tem origem na interface eletrodo-gota devido à micro explosões motivadas pela presença elementos de elevada pressão de vapor que, a elevadas temperaturas reagem gerando jato de vapores metálicos facilitando a soldagem fora de posição como também a geração de respingos (WAINER, 1992) (SCOTTI; PONOMAREV, 2014).

Segundo (SCOTTI; PONOMAREV, 2014) na polaridade inversa a ação dessa força é de quatro a cinco vezes menor do que na polaridade direta, haja vista que, a área de mancha catódica por ser maior possui menor densidade de corrente gerando intensidade de vaporização menor comparado com a mancha catódica. A Figura 21 ilustra a direção da força quando atua sobre a gota.

Figura 21 - Ilustração da magnitude da força de expansão gasosa atuando sobre a gota: a) transferência globular, b) transferência goticular.

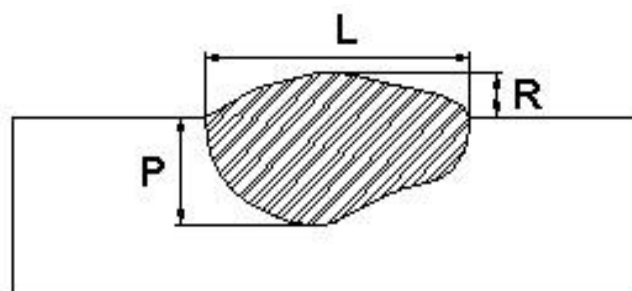


Autor:(Adaptado de CAMARGO, 2016).

2.5. Características geométricas

A avaliação da geometria da superfície plana do cordão de solda é realizada pela análise dimensional de sua seção transversal. Segundo BRAGA (1997) e MOTA (1998) para o mesmo material e tipo de junta, a natureza do consumível, a corrente de soldagem, o comprimento do eletrodo, a tensão e a velocidade de soldagem interferem na geometria da solda. A geometria do cordão de solda tem influência básica na resistência mecânica da junta soldada. O esquema representativo do perfil geométrico do cordão de solda está presente na Figura 22 e nela estão indicadas as principais grandezas que caracterizam a geometria do cordão de solda: a penetração (P), o reforço (R) e a largura (L).

Figura 22 – Esquema representativo das grandezas geométricas do cordão de solda.



Fonte: Arquivo Pessoal.

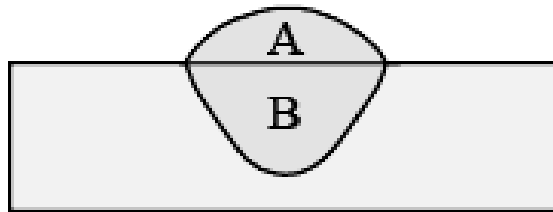
A análise da geometria da solda é realizada pela avaliação dimensional da seção transversal da Figura 23. As medidas de largura (L), reforço (R) e penetração (P), definem tais características geométricas do cordão de solda depositado na superfície do chanfro das peças metálica. A composição química final da zona fundida depende da intensidade nas interações das composições químicas do metal de base e de adição e da participação relativa destes na formação da zona fundida. Esta participação relativa é conhecida como “coeficiente de diluição”, que pode ser representado pela Equação 6.

Em que (δ) é representa a diluição, A e B são as áreas formadas na junta soldada:

$$\delta = \frac{B}{B+A} \cdot 100\% \quad (6)$$

A diluição pode ser medida em macrografias da seção transversal de soldas, como mostra a Figura 23.

Figura 23 – Ilustração da seção transversal de um cordão de solda mostrando as áreas para obtenção da diluição.



Fonte: Arquivo Pessoal.

3. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste tópico se apresenta a especificação e descrição dos materiais, equipamentos e métodos experimentais utilizados para realizar este trabalho. Todas as etapas foram desenvolvidas no Laboratório de Caracterização de Materiais Metálicos - LCAM da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará, Campus Belém.

3.1. Materiais

Para o desenvolvimento deste trabalho foram necessários os seguintes materiais e equipamentos:

3.1.1. Consumíveis

3.1.1.1. Arame Eletrodo e Arame Auxiliar

O arame eletrodo e o auxiliar utilizados no processo de soldagem foi o de classe AWS ER 70S-6, norma A 5.18, sendo o arame eletrodo de diâmetro 1,2 mm e o ara frio de 1,0 mm. A Tabela 1 a seguir mostra a composição química do arame, conforme a AWS A 5.18.

Tabela 1 - Composição química (%) do arame ER 70S-6

| Classificação | C | Mn | Si | P | S | Cu | Ti | Zr | Al |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| ER70S-6 | 0,07 a 0,15 | 0,80 a 1,15 | 1,40 a 1,85 | 0,025 | 0,035 | 0,025 | 0,035 | 0,035 | 0,05 a 0,15 |

Fonte: (AWS.A5.18/A5.18M, 2005).

3.1.1.2. Metal de base

Para execução do experimento em função do seu baixo custo de aquisição utilizou-se o aço carbono do tipo SAE 1020. O material de base empregado foi na forma de barra chata com dimensões de 9,5 x 56,0 x 225,0 mm (espessura x largura x comprimento), com revestimentos depositados sobre o metal de base paralelo ao sentido de laminação do material. A Tabela 2 apresenta a composição química padrão do metal de base.

Tabela 2 - Composições químicas nominais do metal de base, em peso%

| Número SAE | C | Mn | P max | S max | Correspondente Número AISI |
|------------|-------------|-------------|-------|-------|-------------------------------|
| 1020 | 0,18 – 0,23 | 0,30 – 0,60 | 0,04 | 0,05 | 1020 |

Fonte: American Iron and Steel Institute (AISI)

3.1.1.3 Gás de proteção

Para a proteção do sistema do arco/poça de fusão foi utilizado uma mistura de gases com 75 % de Argônio(Ar) e 25 % de Dióxido de Carbono (CO₂), com vazão de 18 l/min. Seus fatores determinantes são o seu baixo custo em relação a outros gases de proteção e com características físico-químicas que proporcionam vantagens operacionais em aplicações ligadas à soldagem de estruturas em aço tais como: baixa incidência de respingos, elevadas velocidades de soldagem, excelente acabamento visual e excelente estabilidade do arco.

3.1.2. Fontes de soldagem

3.1.2.1. Fonte de soldagem e alimentador de arame principal

Foi utilizado o modelo DIGIPlus A7 com processador ARM7 de 32 bits para a fonte de soldagem, e um alimentador de arame modelo STA 20-2, com velocidade na faixa de 1,1 m/min a 20 m/min., fabricante IMC – Soldagem. A Tabela 3 apresenta os dados técnicos da fonte de soldagem.

Tabela 3 - Dados técnicos da fonte de soldagem utilizada.

| Características | Capacidade de Corrente |
|---|-------------------------------|
| Tensão de alimentação trifásica | 220/380/440 |
| Tensão em vazio (Configuração de fábrica) | 50/68/85 V |
| Corrente a 100% de fator de carga | 350 A |
| Potência nominal | 12 kVA |
| Faixa de corrente | 5-600 A |
| Corrente nominal por fase (220/380/440) | 32/18/16 A |
| Fator de Potência | 0,94 |

Fonte: (IMC soldagem, 2011).

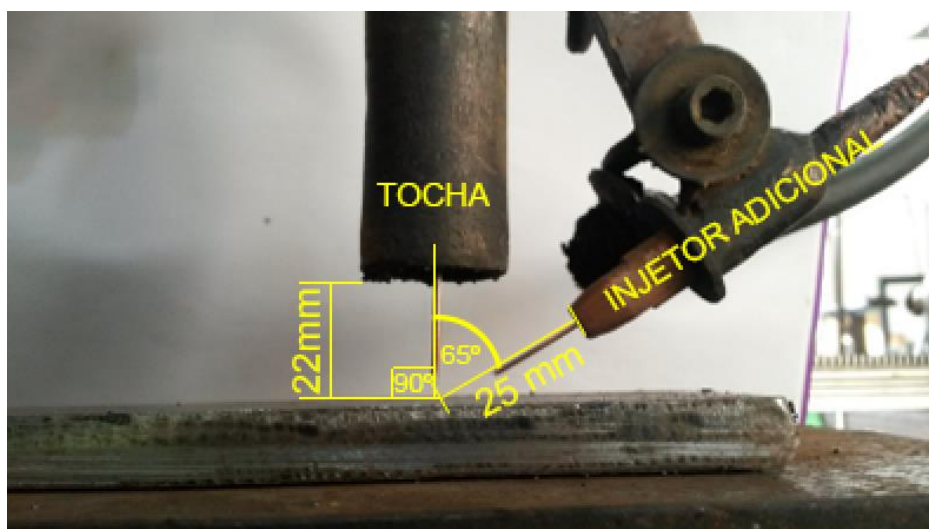
3.1.2.2 Cabeçote auxiliar para alimentação adicional

Foi utilizado um cabeçote auxiliar STA da IMC Soldagem, cujo diferencial é a possibilidade da sua alimentação ser feita através da rede normal de fornecimento de energia elétrica, proporcionado agilidade e versatilidade na implantação da bancada de soldagem.

3.1.3. Tocha de soldagem

Uma tocha GMAW com ângulo de ataque de 90° é utilizada para adicionar o arame do eletrodo, e o sistema auxiliar de alimentação do arame para ângulo de 65° consiste em um cabeçote auxiliar, um bico de contato e um cabo de guia para guiar o arame ao arco, conforme mostrado na Figura 24.

Figura 24 - Tocha adaptada para soldagem com o processo CW-GMAW.



Fonte: Autoria Própria.

3.1.4. Sistema de aquisição de dado (SAP-V4)

Este sistema da IMC - Soldagem possui frequência de aquisição de 10 kHz, sendo conectado a um computador. Foi utilizado para aquisição e aferição de dados, tais como, vazão de gás, tensão, corrente e velocidade de alimentação de arame.

3.1.5. Equipamentos para ensaios metalográficos

3.1.5.1. Máquina de serrar de fita

A máquina de serra foi modelo BS-912B da POWERMAQ, este equipamento foi utilizado para seccionar os corpos de prova após a soldagem para a realização do ensaio metalográfico.

3.1.5.2. Lixadeira/lixas

Para o processo de lixamento foi utilizada a lixadeira modelo PL01 de fabricação TECLAGO acoplada à tubulação para circulação de água. Foi utilizada a seguinte sequência de lixas com as granulometrias de : 80, 120, 220, 320, 400, 600 e 1200.

3.1.5.3. Ataque químico

Foi realizado o ataque químico com Nital 4 %, solução com 96 % álcool etílico e 4 % ácido nítrico concentrado, para revelar a macroestrutura presente nas amostras soldadas.

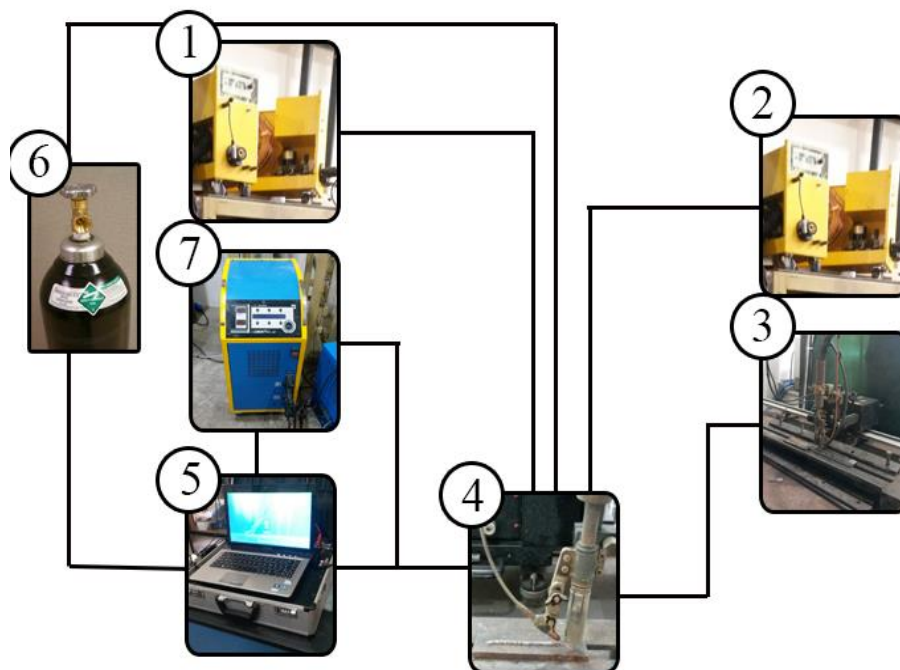
3.1.5.4. Microscopia

O microscópio óptico de fabricação ZEISS, modelo Axio Lab. A1 foi utilizado para visualizar e capturar as imagens da macroestrutura do cordão de solda.

3.1.6 Bancada de soldagem

Para a realização dos experimentos foi montada uma bancada de soldagem ilustrada na Figura 25. Essa bancada foi composta por dois cabeçotes alimentadores (1-principal) e (2-auxiliar), um sistema de posicionamento da tocha (3), uma tocha de soldagem (4), sistema de monitoramento e aquisição dos dados instantâneos de corrente e tensão (5) um sistema de gás de proteção (6) e uma fonte de soldagem (7). Com auxílio desses equipamentos foi possível obter a medição dos diversos parâmetros de soldagem.

Figura 25 - Representação esquemática do processo CW-GMAW.



Fonte: Autoria Própria.

3.2. Procedimentos experimentais

O procedimento experimental deste trabalho está dividido em quatro fases, a saber: na primeira fase foram realizados os processos de confecção dos corpos de prova de soldagem e ensaios preliminares; a segunda fase, a realização das soldagens definitivas e obtenção dos corpos de prova; a terceira fase compreende a preparação metalográfica das amostras e obtenção dos parâmetros geométricos; na quarta fase, a análise dos parâmetros geométricos dos corpos de prova. A seguir será feita uma descrição de cada fase realizada.

3.2.1 Processo de confecção dos corpos de prova de soldagem e ensaios preliminares

Para a investigação dos parâmetros de soldagem, foi realizada soldagem em três amostras de aço SAE 1020 utilizando o processo de soldagem GMAW com velocidade de alimentação do arame eletrodo de 8 m/min, velocidade de soldagem de 50 cm/min, com uma DBCP de 22 mm e uma vazão de gás de proteção de 15 l/min, com uma mistura de 75 % argônio + 25 % CO₂. A seguir foram soldadas cinco amostras utilizando o processo CW-GMAW com

a mesma DBCP, uma DCEP de 28 mm, taxa de alimentação de arame frio de 80% e vazão de gás de proteção de 18 l/min com a mesma mistura e proporções, para verificar as condições ideais de comportamento do arco e regularidade da transferência metálica, além de análise visual para verificar a presença de cordões de bom acabamento superficial. Os melhores resultados foram obtidos para os parâmetros registrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros de Soldagem.

| Parâmetros de soldagem | Valores |
|---------------------------------------|--------------------------------|
| Polaridade | Inversa |
| Gás de proteção | 75 % Ar + 25 % CO ₂ |
| Vazão do gás de proteção | 18 l/min |
| DBCP (Tocha de soldagem) | 22 mm |
| DCEP (Arame Auxiliar) | 25 mm |
| Vel. De alimentação do arame eletrodo | 10 m/min |
| Velocidade de Soldagem | 60 cm/min |

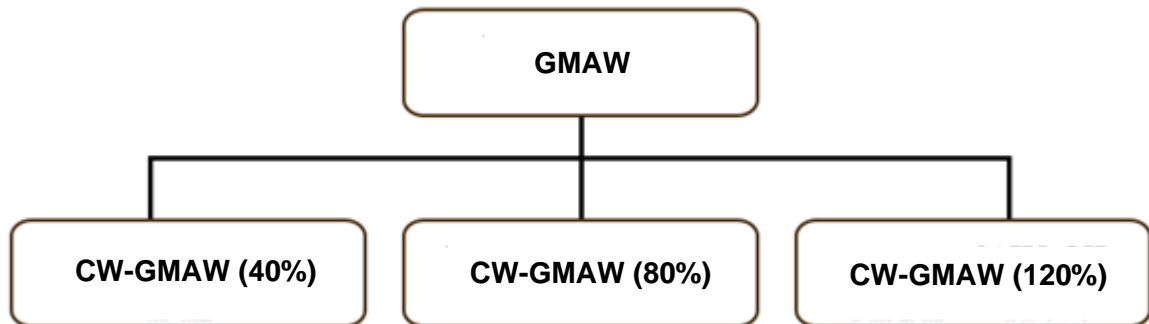
Fonte: Autoria Própria.

3.2.2 Soldagem definitiva e obtenção dos corpos de prova

Todos os passes de solda foram feitos em aço SAE 1020 na posição plana, por simples deposição, utilizando-se um arame eletrodo com 1,2 mm de diâmetro e um arame auxiliar com 1,0 mm de diâmetro, ambos da classe A 5.18-ER 70S-6. O gás de proteção utilizado foi uma mistura de 75% Ar+25% CO₂, a vazão foi de 18 l/min, a DBCP foi de 22 mm para o arame eletrodo, o arame frio teve uma DCEP de 25 mm, a velocidade de soldagem foi ajustada para 60 cm/minuto, com deslocamento automático da tocha. A Tabela 4 mostra os parâmetros operacionais utilizados nos processos de soldagem. Esses parâmetros foram fixos em todo o experimento.

A primeira solda foi executada pelo processo GMAW convencional, em seguida a bancada foi organizada para soldar usando o processo CW-GMAW variando a taxa em 40 %, 80 % e 120 %. Durante a soldagem todos os parâmetros operacionais foram mantidos constantes. A Figura 26 mostra o organograma de execução do processo de soldagem.

Figura 26 – Organograma de execução da soldagem.



Fonte: (Autoria Própria).

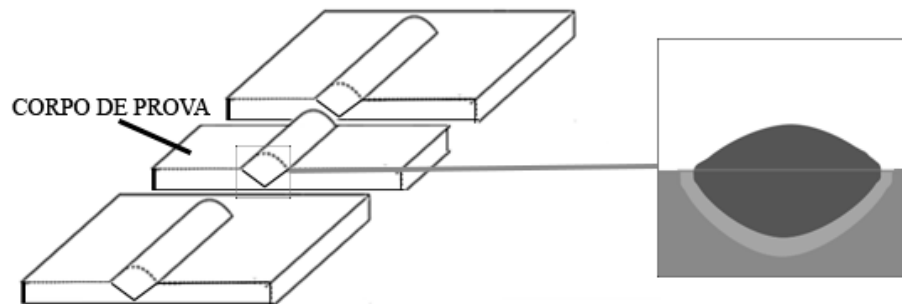
As amostras soldadas foram cortadas com o auxílio de uma serra fita em seção transversal para medições de penetração. A Figura 27 mostra os cortes dos corpos de prova e a Figura 28 faz uma ilustração da seção estudada. O critério utilizado para a localização do corte da amostra foi cortá-la na área central, que é considerada a área do cordão onde o arco e a transferência de metal são mais estáveis. Em seguida, para reduzir o tamanho da amostra e obter uma superfície mais plana e com menos rugosidade para facilitar as operações metalográfica subsequentes, foi realizado um segundo corte com uma serra tipo *cut-off*.

Figura 27 - Esquema de seccionamento do cordão para obtenção das amostras.



Fonte: (Autoria Própria).

Figura 28 - Ilustração das áreas das medidas nos corpos de prova seccionados.



Fonte: (Autoria Própria).

3.2.3 Preparação metalográfica e obtenção dos parâmetros geométricos

Após o embutimento, as amostras foram lixadas usando uma sequência de lixas variando de 80 até 1200 de granulometria. Em seguida, foi realizado o ataque químico com Nital 4 % para destacar e capturar uma imagem das macroestruturas do cordão de solda.

3.2.4 Análise dos parâmetros geométricos dos corpos de prova

Após o ataque químico foi realizada as medições e capturas dos parâmetros geométricos das macroestruturas do cordão de solda com o auxílio de um microscópio ótico (já especificado) e analisado o comportamento da magnitude de cada parâmetro obtido em relação aos do processo GMAW convencional conforme mostrado no capítulo a seguir.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise da geometria das soldas GMAW, CW-GMAW(40 %), CW-GMAW(80 %) e CW-GMAW(120 %)

A Tabela 5 mostra os valores das análises geométricas obtidas nas juntas soldadas referentes aos processos GMAW e GMAW-CW. Entre os resultados estão: largura, reforço, penetração, área da zona termicamente afetada(ZTA) e área de penetração. Além disso, mostra-se também os resultados de diluição e taxa de deposição dos processos de soldagem.

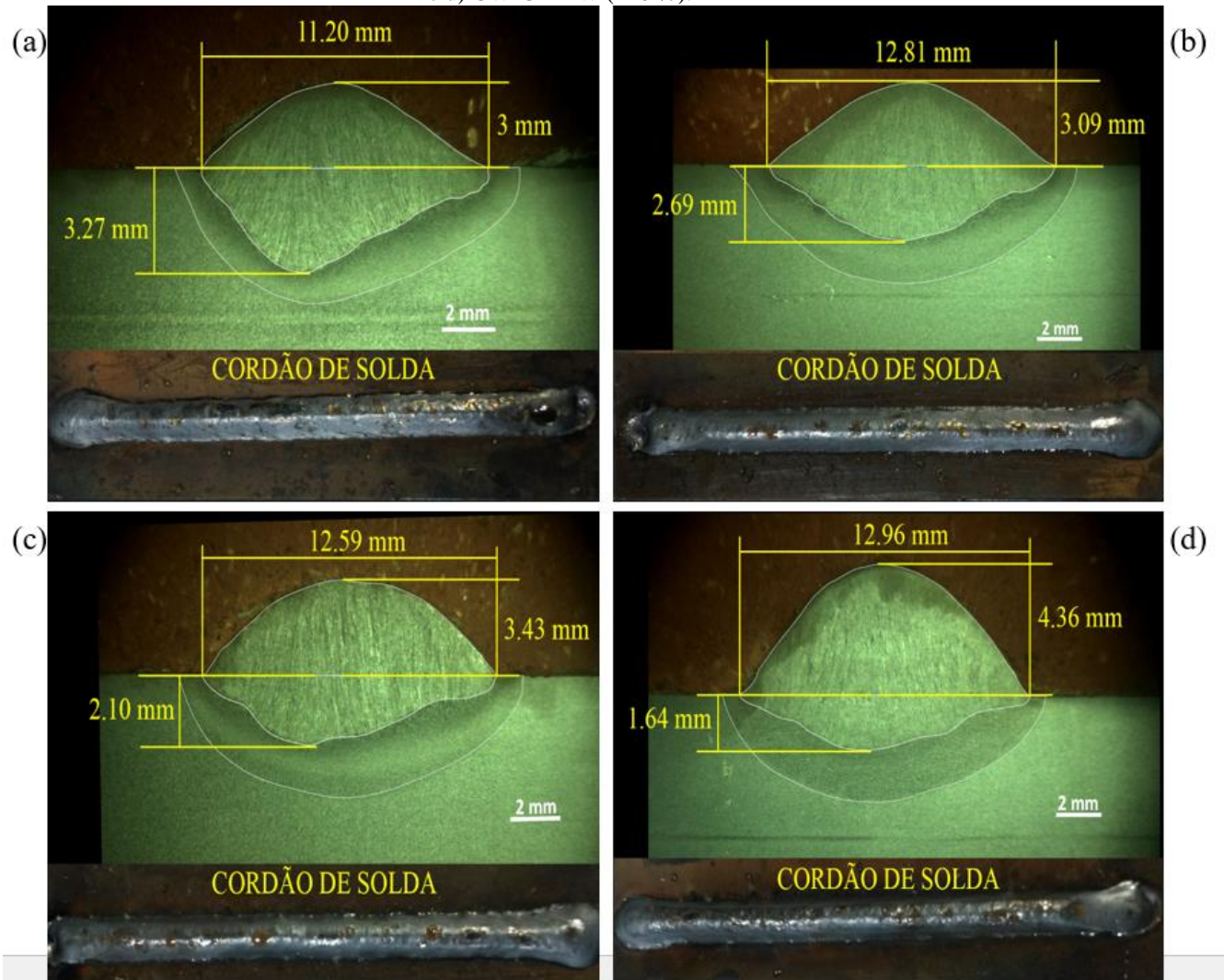
Tabela 5 - Resultados das medidas obtidas

| PROCESSO SOLDAGEM | TAXA DEPOSIÇÃO O (%) | LARGURA (mm) | REFORÇO O (mm) | PENETRAÇÃO O (mm) | ÁREA PENETRAÇÃO O (mm ²) | ÁREA ZTA (mm ²) | DILUIÇÃO O (%) | TAXA DE DEPOSIÇÃO O (kg/h) |
|----------------------|----------------------|--------------|----------------|-------------------|--------------------------------------|-----------------------------|----------------|----------------------------|
| GMAW | 0 | 11,72 | 2,74 | 3,23 | 23,33 | 18,63 | 54,37 | 4,83 |
| | | 11,94 | 3,00 | 3,39 | 23,75 | 26,44 | 52,49 | |
| | | 9,95 | 3,25 | 3,20 | 22,00 | 20,68 | 52,06 | |
| | <i>Média</i> | 11,20 | 3,00 | 3,27 | 23,03 | 21,92 | 52,97 | 4,83 |
| <i>Desvio Padrão</i> | 1,09 | 0,26 | 0,10 | 0,91 | 4,05 | 1,23 | - | |
| CW-GMAW | 40 | 13,33 | 3,01 | 2,73 | 22,58 | 27,08 | 48,21 | 6,56 |
| | | 12,45 | 3,09 | 2,67 | 22,39 | 26,02 | 47,78 | |
| | | 12,64 | 3,18 | 2,67 | 22,49 | 24,42 | 46,87 | |
| | <i>Média</i> | 12,81 | 3,09 | 2,69 | 22,49 | 25,84 | 47,62 | 6,56 |
| <i>Desvio Padrão</i> | 0,46 | 0,08 | 0,04 | 0,10 | 1,34 | 0,68 | - | |
| CW-GMAW | 80 | 12,30 | 3,02 | 2,22 | 16,28 | 25,21 | 39,33 | 7,9 |
| | | 13,12 | 3,75 | 1,93 | 17,29 | 25,95 | 34,76 | |
| | | 12,35 | 3,51 | 2,14 | 16,32 | 28,20 | 37,01 | |
| | <i>Média</i> | 12,59 | 3,43 | 2,10 | 16,63 | 26,45 | 37,03 | 7,9 |
| <i>Desvio Padrão</i> | 0,46 | 0,37 | 0,15 | 0,57 | 1,56 | 2,28 | - | |
| CW-GMAW | 120 | 12,88 | 4,45 | 1,88 | 14,07 | 24,29 | 27,92 | 9,58 |
| | | 12,94 | 4,34 | 1,70 | 14,00 | 25,33 | 26,91 | |
| | | 13,05 | 4,29 | 1,34 | 10,76 | 30,17 | 22,13 | |
| | <i>Média</i> | 12,96 | 4,36 | 1,64 | 12,94 | 26,60 | 25,65 | 9,58 |
| <i>Desvio Padrão</i> | 0,09 | 0,08 | 0,27 | 1,89 | 3,14 | 3,10 | - | |

Fonte: (Próprio Autor)

Afim corroborar com os dados da Tabela 5, a Figura 29(a, b, c, d) mostra o perfil da seção transversal do cordão de solda referente a cada condição de soldagem.

Figura 29 - Macrografias dos processos de soldagem: a) GMAW, b) CW-GMAW (40 %), c) CW-GMA (80 %) e d) CW-GMAW (120 %).



Fonte: Autoria própria.

4.1.1 Penetração, área penetrada e diluição.

Os gráficos apresentados nas figuras 30 e 31 mostram os valores médios e desvio padrão da penetração e área penetrada da seção transversal dos cordões de solda gerados pelos processos GMAW e CW-GMAW. As linhas tracejadas mostram a faixa de penetração para o processo GMAW convencional. Pode-se constatar pelos resultados obtidos na Tabela 5 que a que a profundidade de penetração e a área penetrada foram diretamente proporcionais reduzidas com o aumento taxa de adição em comparação com o processo GMAW convencional. Portanto, acredita-se que a introdução do arame frio retira o calor da poça de fusão, reduzindo assim esses níveis de penetração, no entanto os valores obtidos da área da ZTA mostraram-se de forma dispersa, não apresentando uma tendência em relação a recomendação da literatura

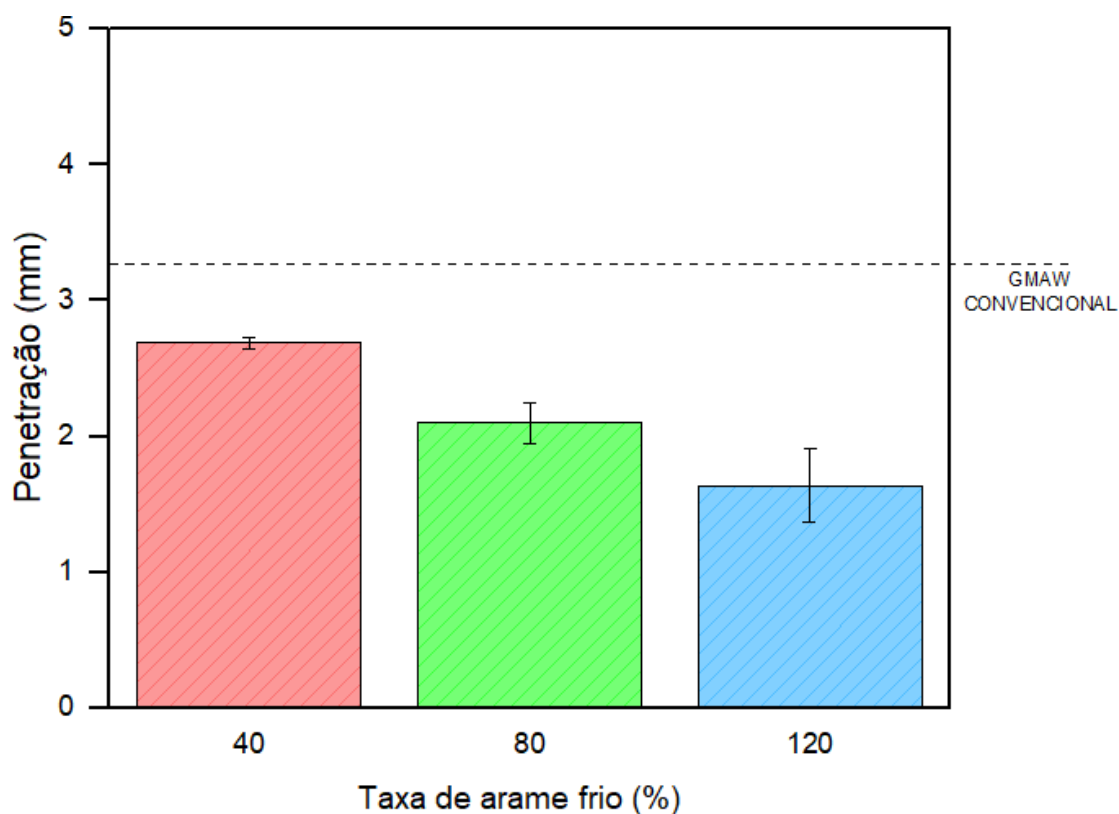
pertinente justificando uma análise mais detalhada desse parâmetro em trabalhos futuros. Os resultados obtidos mostram que o processo CW-GMAW apresenta um grande potencial na aplicação de revestimentos de ambientes críticos. Essa retirada de calor do sistema é justificada pela introdução de uma massa adicional de arame em taxas crescentes diminuindo as tensões residuais do cordão depositado pelo processo GMAW bem como o valor da força motriz responsável pela escavação da poça de fusão . conforme foi observado por Ribeiro *et al* (2019), Assunção *et al* (2017), Costa *et al* (2017) e Sábio (2007).

A seguir são apresentados os gráficos dos parâmetros geométricos supracitados com a taxa de deposição de arame frio.

4.1.1.1 Penetração *versus* taxa de deposição

Ao adicionar 40 %, 80 % e 120 % de arame, a redução na penetração foi de aproximadamente 0,58 mm, 1,17 mm e 1,63 mm, correspondendo a 18 %, 36 % e 50 %, respectivamente.

Figura 30 – Gráfico da Penetração *versus* Adição de arame

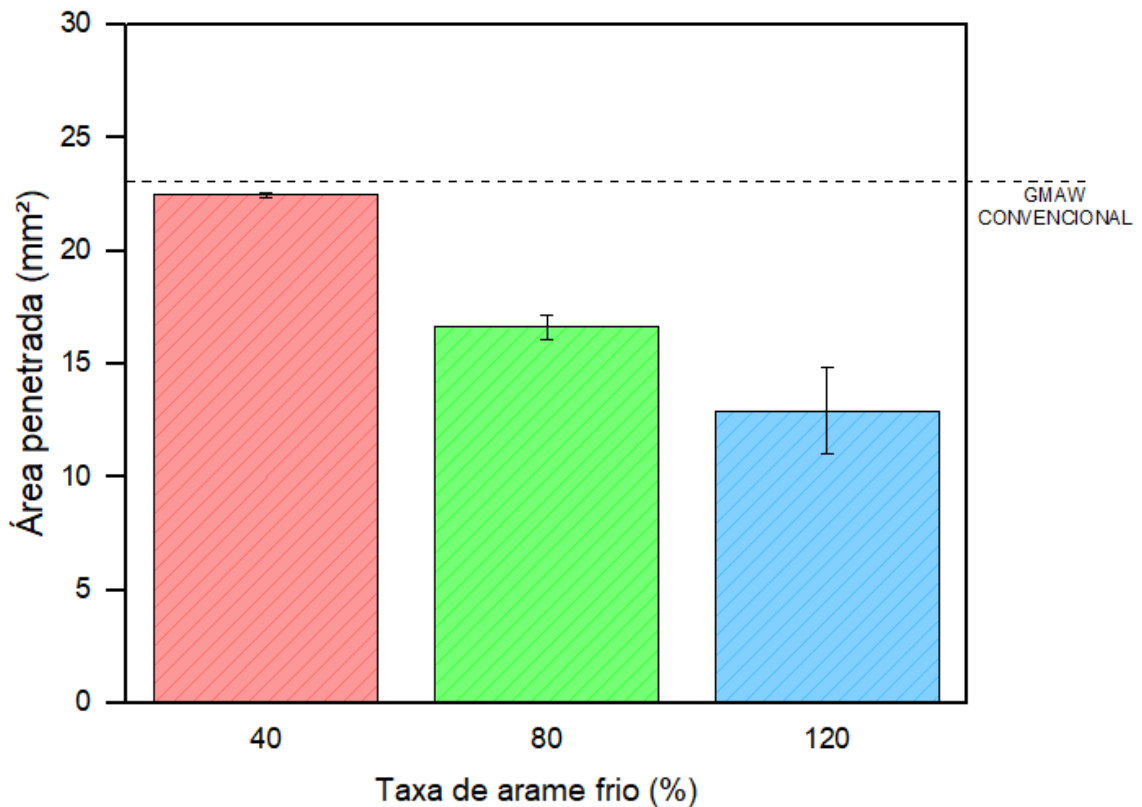


Fonte: Autoria própria.

4.1.1.2 Área penetrada *versus* taxa de deposição

A figura 31 mostra que a área de penetração, que é significativamente reduzida à medida que a taxa de adição de arame frio aumenta em comparação com o processo GMAW convencional, em 0.54 mm² com adição de 40 %, 6.4 mm² com 80 % e 10.09 mm² com 120 %, correspondendo a uma redução da adição de 2,3 % para 40 %, enquanto as de 80 % e 120 % foram de 27.8 % e 43.8 % respectivamente os valores das áreas penetradas.

Figura 31- Gráfico Área Penetrada versus Adição de arame



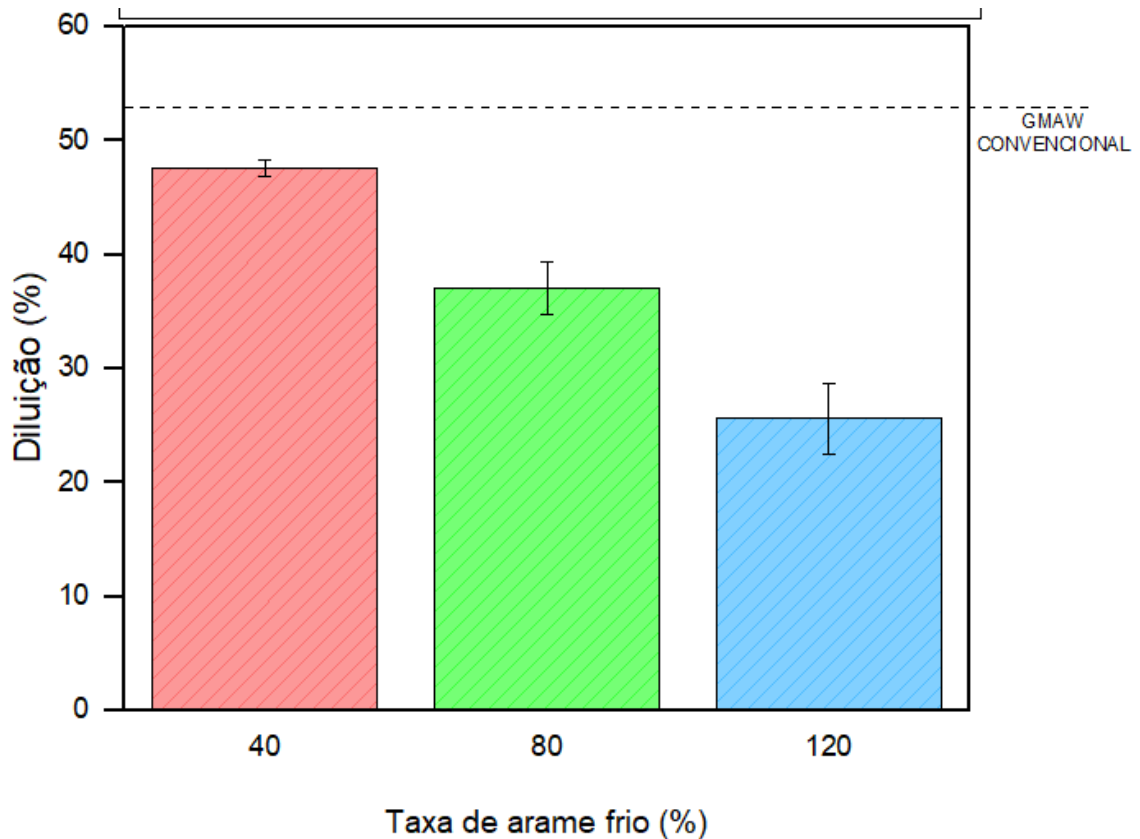
Fonte: Autoria própria.

4.1.1.3 Diluição *versus* taxa de deposição

Diluição é um parâmetro de soldagem crítico para as sobreposições de solda; em princípio, as sobreposições devem apresentar menor diluição possível principalmente na deposição de revestimentos nobres. A figura 32 mostra os valores médios e desvio padrão das

adições de arame no processo CW-GMAW e o GMAW convencional é apresentado em linhas tracejadas.

Figura 32 – Gráfico Diluição versus Adição de arame



Fonte: Autoria própria.

Dessa análise é possível constatar, para todas as condições avaliadas nas execuções experimentais, que a diluição diminuiu em comparação com a condição padrão de GMAW, a introdução do arame frio diminuiu a diluição e com base nos dados do gráfico pode-se mensurar uma redução de 10 %, 30 % e 51.5 % para os valores de 40 %, 80 % e 120 % respectivamente de adição de arame.

4.1.2 Largura, reforço e taxa de deposição.

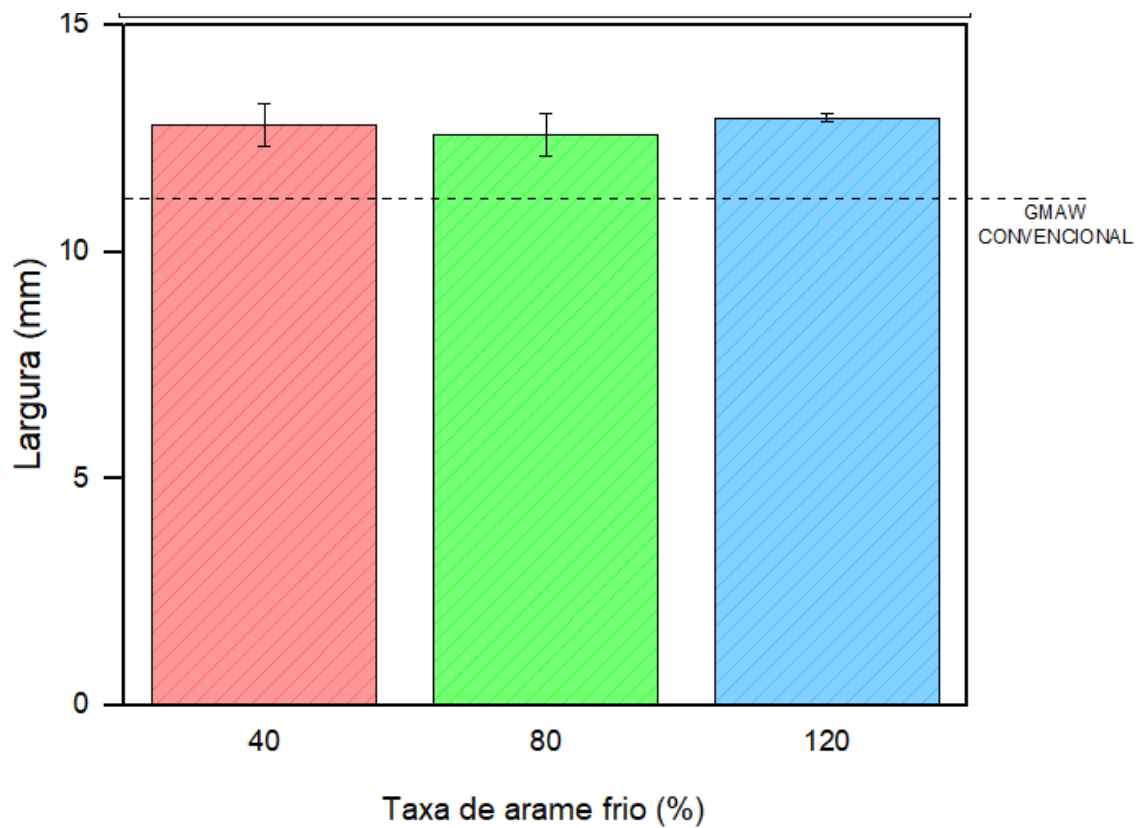
As medidas de largura, reforço e taxa de deposição obtidas no processo CW-GMAW apresentaram valores maiores que do processo GMAW convencional, como essas medidas dependem da massa inserida na poça de fusão, já era de se esperar que o processo com

arame frio aumentasse esses parâmetros geométricos. Os processos de soldagem GMAW com mais de um arame tem o objetivo aumentar essa massa inserida, essa massa além de aumentar as medidas citadas nesse tópico, também diminuem problemas como mordeduras e porosidade. As medidas de largura apesar de apresentar valores maiores no CW-GMAW não teve alterações pois o principal fator de mudança dessa medida é a tensão, e medidas constantes de largura podem ser um fator importante na produtividade nas aplicações de revestimento. Com tudo valores muito altos de reforços são considerados às vezes como defeitos na soldagem, pois as áreas de reforço excessivo na geometria da junta soldada podem ser concentradores de tensão de acordo com a aplicação que a peça soldada terá. Além do mais, o reforço se não for devidamente controlado pode comprometer a produtividade do processo pelo retrabalho gerado para deixar a superfície revestida de acordo com as dimensões de projeto. Apesar do controle do reforço um potencial uso do CW-GMAW devido a sua produtividade é indicado, um dos fatores que sustentam isso é sua alta taxa de deposição. Como visto em Modenesi (2007), Mogrovejo (2011) e Costa (2017)

As figuras 33, 34 e 35 mostram os gráficos obtidos dos valores da média, junto com o desvio padrão das medidas citadas acima.

4.1.2.1 Largura do cordão *versus* taxa de arame frio

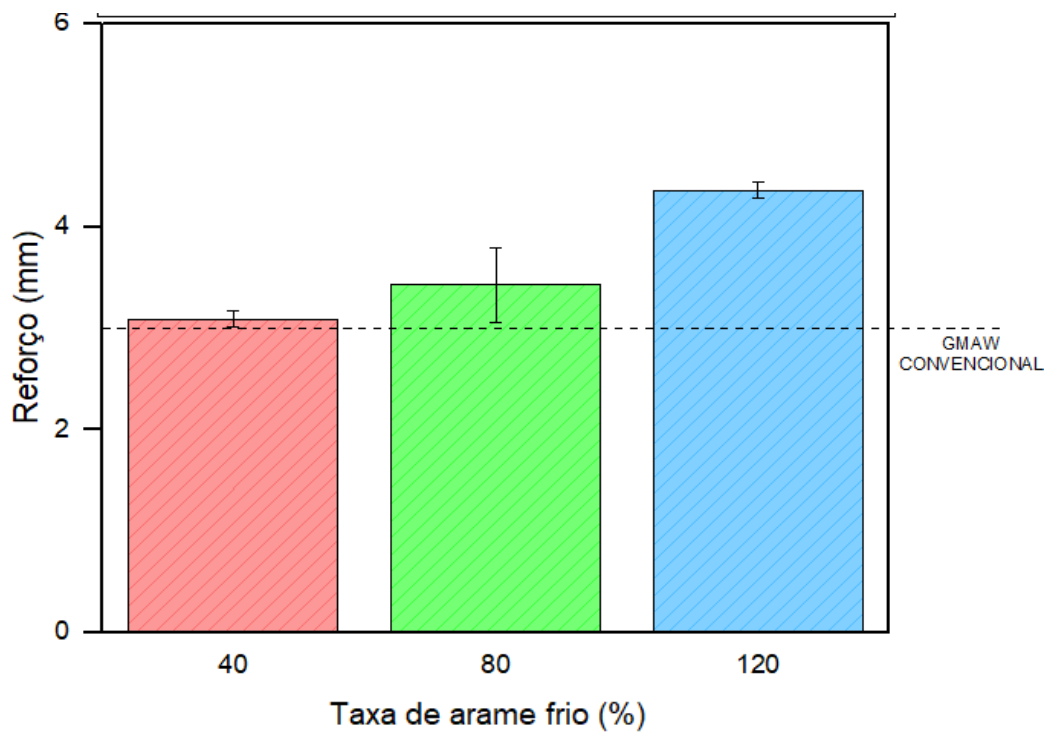
A Figura 33 mostra o comportamento da largura da junta soldada com o aumento da taxa de arame frio. Este parâmetro geométrico teve um aumento de 1.61 mm, 1.39 mm e 1.76 mm para valores de 40 %, 80 % e 120 % de taxa de adição de arame; esses valores correspondem a um aumento de 14.4 % para a taxa de adição de 40 %, 12.4 % para a taxa de adição de 80 % e 15.7 % para a taxa de adição de 120 %.

Figura 33 - Largura versus Adição de arame.

Fonte: Autoria própria.

4.1.2.2 Reforço do cordão *versus* taxa de arame frio.

Reforço também apresentou valores maiores que do GMAW convencional, como mostrado na Figura 34, as porcentagens dos valores de reforço obtidos para taxas de 40 % tiveram um aumento de 3 %, se comparado ao GMAW convencional, para a taxa de 80 % de adição de arame foi de 14.3 % e para a taxa de 120% de adição de arame foi de 45.3 %.

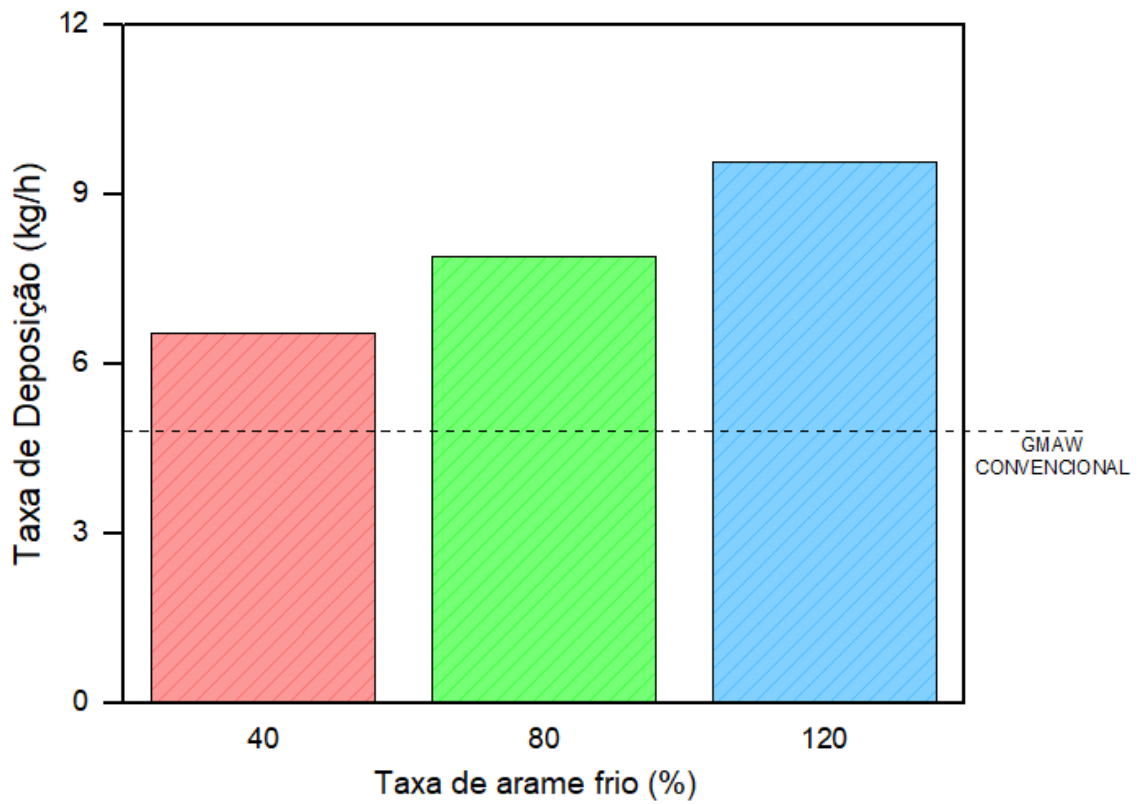
Figura 34 – Gráfico Reforço versus Adição de arame.

Fonte: Autoria própria.

4.1.2.3 Taxa de deposição *versus* taxa de arame frio

Por fim, os dados da taxa de deposição de material na poça de soldagem apresentam o gráfico ilustrado na figura 35 onde pode-se analisar a média e o desvio padrão dos valores obtidos para taxas crescentes de arame frio.

Figura 35 - Taxa de deposição versus Adição de arame.



Fonte: Autoria própria.

Chegando até 98.3% de aumento na adição de 120% de arame, todos os valores de taxa de deposição apresentaram índices de aumento maiores que um terço do processo convencional, onde em 40% de adição de arame encontramos 35.8% e em 80% 63.5%.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho que teve como objetivo analisar a influência da adição do arame frio na geometria do cordão de solda no processo GMAW, apresenta as seguintes conclusões:

Com o aumento da taxa de adição de arame frio ocorreu um resfriamento maior da poça de fusão, ocasionando uma menor penetração e área penetrada, mas um aumento na medida de reforço do cordão de solda.

- ✓ As medidas de largura do cordão de solda no processo CW-GMAW não apresentaram variações significativas com a alteração da taxa de arame, mas em relação ao processo GMAW convencional seus valores foram maiores.
- ✓ As amostras do processo CW-GMAW não apresentaram defeitos como mordeduras, trincas ou porosidades, demonstrando assim que o processo CW-GMAW mantém as características e propriedades dos passes de solda mesmo com adição maior material na poça de fusão.
- ✓ O processo CW-GMAW se mostra promissor para aplicações em revestimentos, visto que apresentou baixos níveis de diluição diretamente proporcionais ao aumento da taxa de deposição de arame.
- ✓ Os valores obtidos do processo CW-GMAW mostraram uma melhora significativa da performance na taxa de deposição de material, devido a uma eficiente taxa de fusão justificada pela ausência de respingos durante a operação.

REFERÊNCIAS

- ALTHOUSE, A. D. ET AL. **Modern welding**. 11th ed. [s.l.] Goodheart-Willcox, 2013.
- ALVES, Valtair de Jesus. Desenvolvimento de envelopes operacionais para processo MIG/MAG robotizado com diferentes gases de proteção. 2009.
- A.M QUITES, J. C. D. **Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico. Florianópolis,SC EDEME, 1979, 248 p.** Primeira ed. Florianópolis: EDEME, 1979.
- American Society for Testing and Materials. ASTM A131/A131M-19: Standard specification for structural steel for ships. West Conshohocken: ASTM International; 2013.
- ASM. **Welding Handbook**. vol. 2, 7 ed. [s.l: s.n.].
- ASSUNÇÃO, P. D. C. et al. Comparing CW-GMAW in direct current electrode positive (DCEP) and direct current electrode negative (DCEN). **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 104, n. 5, p. 2899-2910, 2019.
- ASSUNÇÃO, Paulo D'Angelo; RIBEIRO, R. A.; SANTOS, Emanuel B. F.; GERLICH, Adrian P.; BRAGA, Eduardo de Magalhães. **Feasibility of narrow gap welding using the cold-wire gas metal arc welding (CW-GMAW) process**. Resear chpaper. 2017.
- ASSUNÇÃO, P. D. C. Estudo da Viabilidade do Processo de Soldagem GMAW-DCW (double cold wire). **Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.**
- AWS. **Welding Handbook, Welding Processes**. 8. Ed ed. USA: American Welding Society, 1991.
- AWS, A5. 18: Carbon steel electrodes and rods for gas shielded arc welding. **American Welding Society, Miami, 2005.**
- BACELAR, A. R. C.; FERRAZ, A. C. **Estudo da Viabilidade Operacional do Processo de Soldagem MAG com Alimentação Adicional de um Arame Frio** Belém Universidade Federal do Pará, 2005.
- BARBEDO, Nancy Del Ducca. 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. 2011.
- BARBOZA FILHO, Lúcio da Silva et al. Estudo da técnica de enchimento de chanfro do aço naval pelo processo GMAW-CW. 2011.
- BARRA, Sérgio Rodrigues et al. Influência do processo mig/mag térmico sobre a microestrutura e a geometria da zona fundida. 2003.
- BARROS, S. M. **Processos de Soldagem**. [s.l.] PETROBRÁS, 1976.
- BRACARENSE, A. et al. A Soldagem GMAW (ou MIG-MAG). **Revista de Soldagem: Ensino ABC ABS**, a, v. 1, p. 6-17, 2007.
- BRAGA, E. M. **Soldagem a arame tubular auto protegido em corrente pulsada**. 1997. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado-Universidade Federal do Pará, dezembro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Belém.
- CABRAL, T. D. Influência dos Procedimentos e Processos de Soldagem MAG na redução de Deformações em Painéis de Estruturas Navais. 2011.

CABRAL, Tárccio dos santos et al. DESENVOLVIMENTO E ESTUDO DA VIABILIDADE DE UM INJETOR DE ARAME ADICIONAL PARA O PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG E FCAW. 2011.

CABRAL, Tárccio dos Santos et al. Influence of procedures and transfer modes in MAG welding in the reduction of deformations on marine structure panels. **Welding International**, v. 29, n. 12, p. 928-936, 2015.

CABRAL, Tárccio dos Santos et al. Influência dos procedimentos e modos de transferência no processo MAG na redução de deformações em painéis de estruturas navais. **Soldagem & Inspeção**, v. 18, n. 4, p. 339-348, 2013.

CABRAL, T. dos S.; JUNIOR, LP da SC. Especificação de procedimentos de soldagem MIG para o preenchimento de cavidades pela técnica de camadas sucessivas. **Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, 2008.**

CARY, H. B. **Modern welding technology**. 2. ed. ed. New Jersey: Prentice Hall: [s.n.].

CAMARGO, Lucas Gomes et al. Proposta e Análise de Dispositivo para Otimização do Destacamento da Gota na Soldagem MIG/MAG. **Soldagem & Inspeção**, v. 21, p. 83-91, 2016.

COSTA, E. S. et al. Residual stresses in cold-wire gas metal arc welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 22, n. 8, p. 706-713, 2017.

COSTA, EDNELSON DA SILVA. AVALIAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM SOLDAS GMAW E GMAW-CW POR BIRREFRINGÊNCIA ACÚSTICA E DIFRAÇÃO DE RAIOS X. 2017.

CRUZ JR, L. P. S.; FERRARESI, V. A.; BRAGA, E. M. Parâmetros otimizados para revestimento de chapas de aço carbono pelo processo MIG-DWOA com arame ER 308LSI. In: **Anais do XXXV Congresso Nacional de Soldagem (CONSOLDA)**. Moema: ABS, 2009. p. 26-29.

CRUZ, JR.; CABRAL, T. S. **Especificação de Procedimentos de Soldagem Mig para o Preenchimento de Cavidades pela Técnica de Camadas Sucessivas**. 2008. 78p. Trabalho de conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Pará, Belém. 2008.

DALPIAZ, G.; MACHADO, I. G. Efeito do Hélio em gases de proteção com Ar-CO² e Ar-O₂ na soldagem MAG com corrente pulsada. **Soldagem & Inspeção**, v. 5, n. 8, p. 7-16, 1999.

DOS REIS, J. R. **Análise do Comportamento do Arco Elétrico no Processo GMAW, CW-GMAW E EW-GMAW** Belém, Brasil Universidade Federal do Pará (Faculdade de Engenharia Mecânica), 2019.

DURAND, Richard Zacarías Sanz. Avaliação da Microestrutura e Propriedades Mecânicas da Soldagem Circunferencial do Aço API 5L X80 por Processos de Soldagem Semiautomática com Proteção Gasosa. **Diss. Mestre. -Puc Rio**, 2007.

EMILIO, W.; BRANDI, S. D.; DE MELLO, F. D. H. **Soldagem processos e metalurgia**. 10ª edição ed. São Paulo: [s.n.].

FORTES, C. **Soldagem MIG/MAG**. [s.l.] ESAB, 2004.

FORTES, C.; VAZ, C. T. Apostila de soldagem MIG/MAG. **ESAB, janeiro**, 2005.

GOMES, Enedina Beatriz. Análise do comportamento da soldagem por curto-circuito aplicado ao processo eletrodo tubular através da metodologia Taguchi. **Universidade Federal de Itajuba**, v. 99, 2006.

GROETELAARS, Peter Jan et al. Influência da variação de parâmetros de soldagem sobre a transferência metálica e perfil do cordão no processo MIG/MAG duplo arame. 2005.

- HU, J.; TSAI, Hai-Lung. Effects of current on droplet generation and arc plasma in gas metal arc welding. **Journal of applied physics**, v. 100, n. 5, p. 053304, 2006.
- HURTADO MENESES, Lissy Yojana. Modelagem e simulação da transferência metálica no processo GMAW-S em soldagem orbital. 2013.
- IMC- SOLDAGEM. DIGIOPlus A7-Manual de instruções.3ª Ed. Florianópolis, 2011.
- KLUKEN, A. O.; GRONG, Ø. Mechanisms of inclusion formation in Al- Ti- Si- Mn deoxidized steel weld metals. **Metallurgical Transactions A**, v. 20, n. 8, p. 1335-1349, 1989.
- KUNTZ, Maiquel Rodrigo Klhan. Análise comparativa entre a soldagem com arame sólido e metal CORED no processo multipasses. 2016.
- LANCASTER, J. F. **The Physics of Welding**. 2nd. ed. Oxford, UK: Pergamon Press, 1986.
- LESNEWICH, Alexander. An overview of arc welding processes and the joining of HSLA steels. **The Metallurgy, Welding, and Qualification of Microalloyed(HSLA) Steel Weldments**, p. 73-104, 1990.
- LI, K. H.; CHEN, J. S.; ZHANG, YuMing. Double-electrode GMAW process and control. **WELDING JOURNAL-NEW YORK-**, v. 86, n. 8, p. 231, 2007.
- LI, K. H.; , Y. M. Consumable Double-Electrode GMAW-Part 1: The Process Arc stability, bypass current, and metal transfer mode were studied to better understand the fundamental issues of the process. **Welding journal**, v. 87, n. 1, 2008.
- MACHADO, Ivan Guerra. Soldagem & técnicas conexas: processos. 1996.
- MARQUES, Cleber et al. Análise de técnicas e efeitos físicos da alimentação dinâmica do arame no processo de soldagem MIG/MAG com vistas ao desenvolvimento de um sistema flexível nacional. 2017.
- MARQUES, L. F. N. et al. Fatigue life assessment of weld joints manufactured by GMAW and CW-GMAW processes. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 22, n. 2, p. 87-96, 2017.
- MARQUES, Paulo Villani. **Soldagem-fundamentos e tecnologia**. Editora UFMG, 2005.
- MARQUES, P. . V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 4ª edição ed. Rio de janeiro: Elsevier, 2017.
- MESSLER JR, Robert W. **Principles of welding: processes, physics, chemistry, and metallurgy**. John Wiley & Sons, 2008.
- MESSLER, R. W. JR. What's Next for Hybrid Welding? *Welding Journal*, v. 83 no. 3, Março, 2004.
- MIRANDA, Hélio C. Reconhecimento e controle da transferência metálica no processo mig/mag pulsado. **Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia**, 2002.
- MODENESI, Paulo J. Introdução à Física do Arco Elétrico Soldagem I. **Belo Horizonte: UFMG**, 2001.
- MODENESI, Paulo J.; BRACARENSE, A. Q. Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais. **Belo Horizonte: UFMG**, 2007.
- MODENESI, Paulo J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. Fontes de energia para a soldagem a arco. **Departamento de engenharia**, 2009.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B. Introdução à metalurgia da soldagem. **Belo Horizonte: UFMG**, 2012.

MOGROVEJO, Miguel Guayasamin. **Estudo do processo MIG/MAG com dois arames e único arco**. 2011. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA.

MOREIRA, Alcindo Fernando. Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obtido através dos processos de soldagem GMAW e FCAW. 2008.

MOTA, Carlos Alberto Mendes da et al. Níquel e manganês como controladores da tenacidade na soldagem com arames tubulares autoprotetidos. 1998.

MOTA, Carlos Alberto Mendes da et al. Revestimento de níquel depositado pela soldagem MIG e MIG com arame frio. **Soldagem & Inspeção**, v. 21, p. 483-496, 2017.

MOZZER, Bernardo Cesar Erler. Estudo da correlação entre dureza e tensão residual de juntas soldadas pelo processo de soldagem MIG/MAG em um aço ABNT 1020 com variação do tipo de chanfro. 2021.

NAIDU, D. S.; OZCELIK, SELAHATTIN; MOORE, K. L. **Modeling, Sensing and Control of Gas Metal Arc Welding**. [s.l.] Elsevier, 2003.

NORRISH, John. Advance welding processes—technology and process control. **Woodhead & Maney Publishing, Cambridge**, 2006.

NORRISH, J. & RICHARDSON, I. F. (1988). “Metal Transfer Mechanisms”, *Welding & Metal Fabrication*, janeiro e fevereiro de 1988, pp 17 - 22.

O'BRIEN, R. **JEFFERSON'S WELDING ENCYCLOPEDIA**. 8 ed. ed. [s.l.] American Welding Society, 1977.

REIS, J. R. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO ARCO ELÉTRICO E PENETRAÇÃO DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM GMAW, CW-GMAW E EW-GMAW. **Universidade Federal do Pará, Belém**, 2019.

RIBEIRO, R. A. et al. Cold wire gas metal arc welding: droplet transfer and geometry. **Weld J**, v. 98, p. 135S-149S, 2019.

RIBEIRO, R. A. et al. Predicting weld bead geometry in the novel CW-GMAW process. **Welding Journal**, v. 94, n. 9, p. 301-311, 2015.

SÁBIO, Alberto Dias et al. Estudo da viabilidade operacional do processo de soldagem MAG com alimentação adicional de arame frio. 2007.

SCOTTI, Américo; PONOMAREV, Vladimir. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. Artliber, 2014.

SCOTTI, Américo; PONOMAREV, Vladimir; LUCAS, William. Interchangeable metal transfer phenomenon in GMA welding: features, mechanisms, classification. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 214, n. 11, p. 2488-2496, 2014.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**. São Paulo: Artliber Editora, 2008.

SILVA, F. G. Estudo da viabilidade do processo de soldagem FCAW com adição de arame frio aplicado à indústria naval. **Universidade Federal do Pará, Belém**, 2010.

SILVA, Fábio Gonçalves da et al. Resistência ao desgaste por cavitação de diferentes ligas aplicadas pelo processo GMAW com e sem adição de arame frio. 2014.

SOLCI, A. M. Soldagem ao arco elétrico sob proteção gasosa. **White Martins Gases Industriais S/A, Bauru**, 2015.

SOUZA, Claudio Ivanei de; FERRARESI, Valtair Antonio. Análise comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW com transferência metálica por curto-circuito na posição horizontal. **Soldagem & Inspeção**, v. 18, p. 268-280, 2013.

SOUZA, Daniel; RESENDE, André Alves de; SCOTTI, Américo. Um modelo qualitativo para explicar a influência da polaridade na taxa de fusão no processo MIG/MAG. **Soldagem & Inspeção**, v. 14, n. 3, p. 192-198, 2009.

SOUZA, Sérgio Augusto de. Composição química dos aços. **São Paulo, Edgard Blücher**, 1989.

TALKINGTON, John Eric. **Variable polarity gas metal arc welding**. 1998. Tese de Doutorado. The Ohio State University.

TOKAR, Anna et al. Efeito dos parâmetros de pulsação no processo TIG sobre a formação da poça de fusão. 2011.

VARGAS, ET. A. **Métodos práticos para determinar a espessura do nariz na soldagem a topo em chanfro estreito e sem cobre-junta**. Natal, RN: CONSOLDA, 2011.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; DE MELLO, Fabio Decourt Homem. **Soldagem: processos e metalurgia**. Editora Blucher, 1992.

ZHANG, Y. M.; JIANG, M.; LU, W. Double electrodes improve GMAW heat input control. **Welding Journal**, v. 83, n. 11, p. 39-41, 2004.