



Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
de Recursos Naturais da Amazônia

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS**  
**NATURAIS DA AMAZÔNIA**

**VIABILIDADE OPERACIONAL DE EMPREGO DO PROCESSO**  
**HW-GMAW EM AÇOS**

**Pedro Paulo Guimarães Ribeiro**

**2023**



Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
de Recursos Naturais da Amazônia

## **VIABILIDADE OPERACIONAL DE EMPREGO DO PROCESSO HW-GMAW EM AÇOS**

**Pedro Paulo Guimarães Ribeiro**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo de Magalhães Braga

**Belém  
Maio/2023**

**VIABILIDADE OPERACIONAL DE EMPREGO DO PROCESSO HW-GMAW  
EM AÇOS**

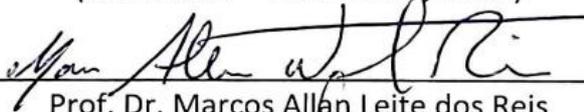
**Pedro Paulo Guimarães Ribeiro**

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA (PRODERNA/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS.

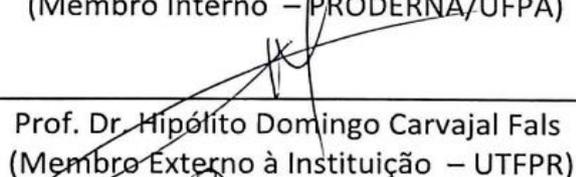
**Aprovada por:**



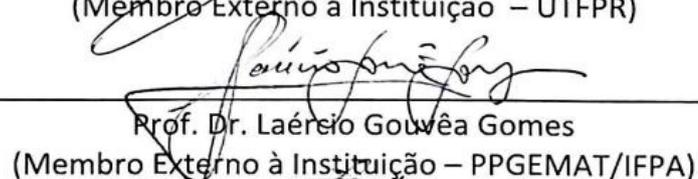
Prof. Dr. Eduardo de Magalhães Braga  
(Orientador – PRODERNA/UFPA)



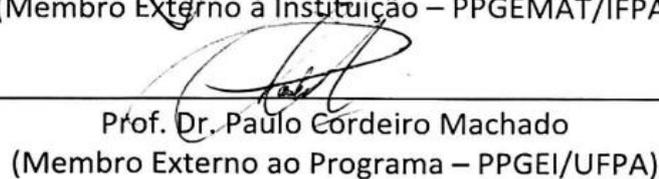
Prof. Dr. Marcos Allan Leite dos Reis  
(Membro Interno – PRODERNA/UFPA)



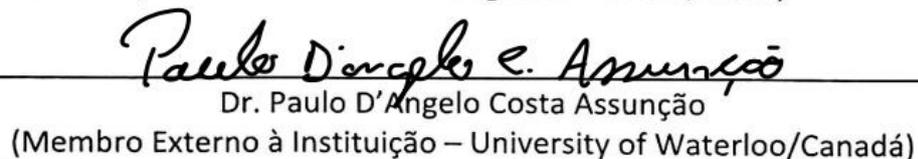
Prof. Dr. Hipólito Domingo Carvajal Fals  
(Membro Externo à Instituição – UTFPR)



Prof. Dr. Laércio Gouvêa Gomes  
(Membro Externo à Instituição – PPGEMAT/IFPA)



Prof. Dr. Paulo Cordeiro Machado  
(Membro Externo ao Programa – PPGEI/UFPA)



Dr. Paulo D'Angelo Costa Assunção  
(Membro Externo à Instituição – University of Waterloo/Canadá)

**BELÉM, PA - BRASIL  
MAIO DE 2023**

**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)**

---

G963v    Guimarães Ribeiro, Pedro Paulo.  
Viabilidade Operacional de Emprego do Processo HW-GMAW  
em Aços / Pedro Paulo Guimarães Ribeiro. — 2023.  
132 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Eduardo de Magalhães Braga  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de  
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de  
Recursos Naturais na Amazônia, Belém, 2023.

1. GMAW. 2. CW-GMAW. 3. HW-GMAW. 4.  
Polaridade. 5. Diluição. I. Título.

CDD 620.1

---

*“Quem segue a justiça e a lealdade encontra vida, justiça e honra”.*  
*(Provérbios 21:21)*

## AGRADECIMENTOS

Ao Senhor Jesus Cristo, ao Pai Todo Poderoso que, por intermédio do Espírito Santo, me deram capacidades intelectuais, físicas e espirituais para alcançar meus objetivos, dentre eles o de apresentar esta Tese.

Ao professor Dr. Eduardo de Magalhães Braga, pelos ensinamentos, orientações e incentivos.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia do Instituto de Tecnologia da UFPA (PRODERNA), pelos conhecimentos transmitidos ao longo do curso.

Ao Drs. Paulo D'Angelo Costa Assunção e Rafael Ribeiro, pela ajuda, incentivo e compromisso nas realizações dos ensaios utilizados neste Tese.

Aos Drs. Ednelson Costa, Fábio Setúbal, Lino Alberto Rodrigues, e Tarcio Cabral pelas contribuições na revisão final desta Tese.

Aos amigos do Laboratório de Caracterização de Materiais Metálicos da UFPA (LCAM), pela convivência, companheirismo, sugestões e pela permanente disponibilidade em compartilhar conhecimentos e experiências adquiridas.

Aos meus pais, exemplos de força, caráter, dedicação e fonte de inspiração para uma busca constante em alcançar os meus objetivos de vida.

Enfim, a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para o sucesso deste trabalho, meu muito obrigado.

Dedico este trabalho a Deus, o criador de tudo, aos meus pais, Sr. Pedro Ribeiro e Sra. Raimunda Ribeiro (*in memoriam*), a minha esposa e filhos, pelo incentivo e confiança.

Resumo da Proposta de Tese apresentada ao PRODERNA/UFPA como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais (Dr. Eng.)

## **VIABILIDADE OPERACIONAL DE EMPREGO DO PROCESSO HW-GMAW EM AÇOS**

**Pedro Paulo Guimarães Ribeiro**

Maio/2023

Orientador: Prof. Dr. Eduardo de Magalhães Braga

Área de Concentração: Uso e Transformação de Recursos Naturais

Este estudo investigou a viabilidade operacional da variante HW-GMAW do processo GMAW na soldagem em aço comparativamente aos processos CW-GMAW e GMAW. O estudo foi realizado em duas fases. Na fase I foi usado um aço de classificação ASTM -131 Grau A, variando a taxa de alimentação do arame adicional em 40%, 80% e 120% para o CW e HW e a corrente em 40 A e 80 A. Na fase II, um aço de classificação AISI 1020, variando a taxa de arame adicional em 20% e 100% de HW e a corrente em 70 A. As ferramentas estatísticas usadas consideraram que os resultados foram afetados pela corrente e taxa de alimentação de arame (fase I) e pela polaridade, taxa de alimentação de arame e orientação de deslocamento da tocha (fase II). Os resultados da fase I mostraram que o processo aumentou a profundidade de penetração em 27% em relação ao processo CW-GMAW com níveis de diluição até 32% menores em relação ao GMAW quando a taxa de alimentação foi de 120%. Na fase II, a captura de imagens em alta velocidade no estudo da dinâmica do arco elétrico sugerem que houve instabilidade de arco ao se modificar o sentido de soldagem (puxando e empurrando) e que a polaridade do HW foi responsável por atrair ou repelir o arco e, juntamente com a taxa de alimentação, pode alterar a geometria do cordão na profundidade de penetração em 45% e a diluição em até 25% em comparação com GMAW quando a taxa de alimentação foi de 100%.

Palavras-chave: GMAW; CW-GMAW; HW-GMAW; Polaridade; Diluição.

Abstract of Thesis presented to PRODERNA/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Natural Resources Engineering (D.Eng.)

## **OPERATIONAL FEASIBILITY OF EMPLOYING THE HW-GMAW PROCESS IN STEEL**

**Pedro Paulo Guimarães Ribeiro**

May/2023

Advisor: Prof. Dr. Eduardo de Magalhães Braga, D. Eng.

Research Area: Use and Transformation of Natural Resources.

This study investigated the operational viability of the HW-GMAW variant of the GMAW process in steels welding compared to the CW-GMAW and GMAW processes. This study has been conducted in the two phases. In the phase I beads on plate welding were performed on ASTM -131 grade A rating steel, varying the additional wire feed rate by 40%, 80% and 120% for CW and HW and current at 40 A and 80 A. In phase II an AISI 1020 classification steel were used, varying the additional wire rate by 20% and 100% HW and the current in 70 A. The statistical tools used considered that results were affected by current and wire feed rate (phase I) and the polarity, feed rate of wire and torch displacement orientation (phase II). Phase I results showed that the HW-GMAW process increased depth of penetration by 27% over the CW-GMAW process at up to 32% lower dilution levels over the GMAW when the feed rate was 120%. In the phase II, the capture of high-speed image in the study of electric arc dynamics suggest that the arc instability when modifying the direction of welding (pulling and pushing) and that the polarity of HW was responsible for attracting or repelling the arc and, along with the feed rate, it can change cord geometry at a depth of penetration by 45% and dilution up to 25% compared to GMAW when the feed rate was 100%.

Keywords: GMAW; CW-GMAW; HW-GMAW; Polarity; Dilution.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO</b> .....	18
1.1 CONTEXTO GERAL.....	18
1.2 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO.....	19
1.3 OBJETIVOS .....	20
<b>1.3.1 Objetivo Geral</b> .....	20
<b>1.3.2 Objetivos Específicos</b> .....	20
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	20
<b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	22
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	22
2.2 O PROCESSO GTAW COM ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA DE ARAME EM TEMPERATURA AMBIENTE (CW-GTAW) .....	22
2.3 O PROCESSO GTAW COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME QUENTE (HW-GTAW) .....	25
a) Aquecimento por resistência .....	27
b) Aquecimento por indução eletromagnética .....	32
c) Aquecimento por arco elétrico .....	34
2.4 O PROCESSO CW-GMAW ( <i>Cold Wire – Gas Metal Arc Welding</i> ) .....	35
2.5 O PROCESSO HW-GMAW ( <i>Hot Wire - Gas Metal Arc Welding</i> ) .....	40
2.6 CAMPOS MAGNÉTICOS VERSUS ARCOS DE SOLDAGEM .....	47
<b>2.6.1 Forças motrizes para um fluxo fluido na poça de soldagem</b> .....	51
a) Força de empuxo .....	52
b) Força de Lorentz .....	52
c) Tensão de cisalhamento induzida pelo gradiente de tensão superficial - Efeito Marangoni .....	53
d) Tensão de cisalhamento induzida pelo jato de plasma .....	54
<b>CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA</b> .....	55
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	55
3.2 EXPERIMENTO I – INFORMAÇÕES PRELIMINARES .....	55
<b>3.2.1 Consumíveis, equipamentos e metodologias utilizados nos processos de soldagem</b> .....	56
<b>3.2.2 Resultados e discussões</b> .....	60

3.2.2.1 Sinais de corrente e tensão .....	60
a) Oscilogramas .....	60
b) Ciclogramas .....	65
3.2.2.2 Influência da corrente de aquecimento (HW) e taxa de alimentação de arame adicional na geometria do cordão de solda .....	68
a) Largura e reforço .....	71
b) Penetração e área penetrada .....	72
c) Área da Zona Termicamente Afeta (ZTA) e diluição .....	73
d) Taxa de deposição .....	74
<b>3.2.3 Conclusões .....</b>	<b>76</b>
<b>3.3 EXPERIMENTO II – UMA NOVA ABORDAGEM .....</b>	<b>76</b>
<b>3.3.1 Consumíveis, equipamentos e metodologias utilizados nos processos de soldagem .....</b>	<b>77</b>
<b>3.3.2 Resultados e discussões .....</b>	<b>82</b>
3.3.2.1 Sinais de corrente e tensão .....	82
3.3.2.2 Mecanismos de transferência metálica .....	87
3.3.2.3 Influência da polaridade, taxa de alimentação do arame aquecido (HW) e sentido de soldagem na geometria do cordão de solda .....	90
a) Largura e reforço .....	93
b) Penetração e área penetrada .....	94
c) Zona Termicamente Afetada (ZTA) e diluição .....	95
d) Taxa de deposição .....	96
<b>3.3.3 Conclusões.....</b>	<b>101</b>
<b>CAPÍTULO 4 – CONCLUSÃO GERAL.....</b>	<b>102</b>
<b>CAPÍTULO 5 – PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>103</b>
REFERÊNCIAS.....	104
APÊNDICE – ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	112

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1</b> – Ilustração do sistema de alimentação do arame no processo CW-GTAW e seus componentes.....	23
<b>Figura 2.2</b> – Resultados obtidos por câmera térmica com alimentação autógena e automática de arame.....	24
<b>Figura 2.3</b> – Transferência metálica no processo CW-GTAW: a) Por gota b) Por ponte.....	25
<b>Figura 2.4</b> – Ilustração do sistema de alimentação de arame para o processo HW-GTAW e seus componentes.....	26
<b>Figura 2.5</b> – Comparação das taxas de deposição para o processo GTAW com alimentação de arame frio e quente.....	27
<b>Figura 2.6</b> – Equipamento para a soldagem CW-GTAW: (a) Tocha de soldagem e aquecedor de arame, (b) Controlador de temperatura.....	28
<b>Figura 2.7</b> – Gráficos para obtenção da temperatura de aquecimento de arame: (a) Temperatura do arame pela velocidade de alimentação e (b) Temperatura do aquecedor pela velocidade de alimentação.....	28
<b>Figura 2.8</b> – Ilustração de exemplos de modos de transferência nas soldagens pelo processo HW-GTAW: (a) Transferência por ponte, (b) Transferência por ponte interrompida e (c) Transferência por vôo livre.....	29
<b>Figura 2.9</b> – Esquema experimental para tomada dos valores de temperatura do arame de soldagem.....	29
<b>Figura 2.10</b> – Diagrama esquemático do método para estimativa de distribuição de temperatura do arame de soldagem.....	30
<b>Figura 2.11</b> – Estimativa da distribuição de temperatura de arames de soldagem.....	31
<b>Figura 2.12</b> – Diagrama esquemático da disposição das fontes de soldagem utilizadas para o aquecimento do arame.....	32
<b>Figura 2.13</b> – Diagrama esquemático da disposição das fontes de soldagem utilizadas para o aquecimento do arame com preaquecimento.....	32
<b>Figura 2.14</b> – Equipamento para soldagem e aquecimento do arame: (a) Tocha e dispositivo de alimentação de arame e (b) Bobina de indução de uma camada recoberta com fita de politetrafluoreteno (PTFE) .....	33
<b>Figura 2.15</b> – Velocidades de alimentação de arame obtidas em função do tipo de processo, corrente, tipo da bobina (C1 ou C2): (a) Relação entre correntes de soldagem e a frequência de indução de 20 kHz e (b) Relação entre correntes de soldagem e a frequência de indução de 40 Hz.....	34
<b>Figura 2.16</b> – Sistema de aquecimento com arco assistido: (a) Esquema de aquecimento de arame e (b) Sistema real.....	35
<b>Figura 2.17</b> – Efeitos dos parâmetros de soldagem na temperatura de aquecimento do arame: (a) Corrente de aquecimento e (b) Taxa da velocidade de alimentação do arame.....	35

<b>Figura 2.18</b> – Esquema do processo CW-GMAW.....	36
<b>Figura 2.19</b> – Aparência e seção transversal dos cordões de solda: (a), (b), (c), (d) CW-GMAW; (e), (f), (g) e (h) GMAW.....	37
<b>Figura 2.20</b> – Influência do arame adicional no ponto catódico do arco: (a) Processo GMAW, (b) e (c) Processo CW-GMAW com a adição de 60% e 140% de arame adicional, respectivamente.....	38
<b>Figura 2.21</b> – Exemplos de oscilogramas dos modos de transferência metálica: (A) e (B) Modo curto-circuito, (C) e (D) Modo globular e (E) e (F) Modo spray.....	39
<b>Figura 2.22</b> – Posições do arco em relação ao arame adicional com diferentes taxas de alimentação: (A) Eletrodo para fusão na poça, (B) Transição de arco e (C) Arco para arame adicional.....	40
<b>Figura 2.23</b> – Esquema do processo HW-GMAW.....	40
<b>Figura 2.24</b> – Esquema do laser de preaquecimento para o processo HW-GMAW	41
<b>Figura 2.25</b> – Influência da potência do laser na corrente e tensão de soldagem....	42
<b>Figura 2.26</b> – Influência da potência do laser no comprimento de arco.....	42
<b>Figura 2.27</b> – A potência do laser no comprimento de arco.....	43
<b>Figura 2.28</b> – Características elétricas de uma fonte tipo tensão constante.....	44
<b>Figura 2.29</b> – Influência da potência do laser na diluição.....	44
<b>Figura 2.30</b> – Exemplo do processo de soldagem HW-GMAW: a) Esquema para o revestimento da placa teste e b) Arranjo da tocha de soldagem, injetor de arame HW e consumíveis.....	45
<b>Figura 2.31</b> – Comparação do volume de carbetos gerados entre os processos GMAW e HW-GMAW.....	46
<b>Figura 2.32</b> – Comparação da diluição entre os processos: (a) GMAW e (b) HW-GMAW para uma taxa total da velocidade de alimentação de 10 m/min.....	46
<b>Figura 2.33</b> – Modificação do fluxo de fusão devido a uma aplicação de um arame adicional aquecido.....	47
<b>Figura 2.34</b> – Diferentes configurações de osciladores magnéticos.....	48
<b>Figura 2.35</b> – Múltiplas condições de arco obtidas pelo uso da oscilação magnética.....	48
<b>Figura 2.36</b> – Interação do campo magnético entre dois fios condutores paralelos entre si com fluxo de corrente no mesmo sentido.....	49
<b>Figura 2.37</b> – Esquema de como ocorre a deflexão de dois arcos paralelos com uma corrente fluindo na mesma direção (mesma polaridade) .....	50
<b>Figura 2.38</b> – Influência dos campos magnéticos sobre a posição do arco em diferentes polaridades.....	51
<b>Figura 2.39</b> – Esquema da atuação das forças de flutuação.....	52
<b>Figura 2.40</b> – Esquema da atuação da força Lorentz.....	52
<b>Figura 2.41</b> – Esquema da atuação da tensão de cisalhamento causada pelo gradiente de tensão superficial.....	53

<b>Figura 2.42</b> – Esquema da atuação do mecanismo do efeito Marangoni para $\partial\gamma/\partial T > 0$ .....	54
<b>Figura 2.43</b> – Esquema da atuação da tensão de cisalhamento causada pelo plasma do arco.....	54
<b>Figura 3.1</b> – Etapas de execução do experimento I.....	56
<b>Figura 3.2</b> – Organograma de execução da soldagem.....	57
<b>Figura 3.3</b> – Configuração pictórica dos equipamentos utilizados no experimento: 1 - Fonte principal; 2 - Fonte auxiliar; 3 - Alimentador principal; 4 - Alimentador auxiliar; 5 - Gás de proteção; 6 - Tocha de soldagem; 7 - Injetor CW-HW GMAW; 8 – Microcomputador; 9 - Sensor Hall; 10 - Sinal de corrente; 11 - Sinal de velocidade de alimentação e 12 - Sinal de tensão.....	58
<b>Figura 3.4</b> – Desenho da configuração da célula de trabalho CW e HW-GMAW.....	58
<b>Figura 3.5</b> – Detalhe da tocha GMAW e do injetor CW-HW indicando a Distância Bico de Contato Peça (DBCP), Distância Contato Elétrico Poça (DCEP) e o ângulo do injetor de arame adicional.....	59
<b>Figura 3.6</b> - Oscilograma do processo GMAW.....	62
<b>Figura 3.7</b> – Oscilogramas do processo CW-GMAW.....	63
<b>Figura 3.8</b> - Oscilogramas do processo HW-GMAW (40 A) .....	64
<b>Figura 3.9</b> - Oscilograma do processo HW-GMAW (80 A) .....	65
<b>Figura 3.10</b> - Ciclograma do processo GMAW.....	66
<b>Figura 3.11</b> - Ciclogramas do processo CW-GMAW.....	66
<b>Figura 3.12</b> - Ciclogramas do processo HW-GMAW (40 A) .....	67
<b>Figura 3.13</b> - Ciclogramas do processo HW-GMAW (80 A) .....	68
<b>Figura 3.14</b> – Valores médios de largura: GMAW, CW-GMAW e HW-GMAW.	71
<b>Figura 3.15</b> – Valores médios de reforço: GMAW, CW-GMAW e HW-GMAW.	71
<b>Figura 3.16</b> – Valores médios de penetração: GMAW, CW-GMAW e HW-GMAW.....	73
<b>Figura 3.17</b> – Valores médios de área penetrada: GMAW, CW-GMAW e HW-GMAW.....	73
<b>Figura 3.18</b> – Valores médios de área da ZTA: GMAW, CW-GMAW e HW-GMAW.....	74
<b>Figura 3.19</b> – Valores médios de diluição: GMAW, CW-GMAW e HW-GMAW	74
<b>Figura 3.20</b> – Valores médios de taxa de deposição: GMAW, CW-GMAW e HW-GMAW.....	74
<b>Figura 3.21</b> – Exemplos da seção transversal das amostras soldadas pelos processos GMAW, CW-GMAW e HW-GMAW (40 A e 80 A) .....	75
<b>Figura 3.22</b> – Etapas de execução do experimento II .....	77
<b>Figura 3.23</b> – Organograma de execução da soldagem .....	78

<b>Figura 3.24</b> – Configuração da célula de trabalho: A-Vista geral; B-Detalhe mostrando o injetor de HW; C- Detalhe mostrando distância bico de contato peça (DBCP) e ângulo do HW; D-Distância do contato elétrico do arame adicional à poça (DCEP).....	79
<b>Figura 3.25</b> – Esquema da configuração do HW-GMAW indicando as direções de soldagem, empurrando (HW seguindo o arco) e puxando (HW guiando o arco)	80
<b>Figura 3.26</b> – Esquema para cálculo da diluição .....	82
<b>Figura 3.27</b> - Sinais de corrente/tensão da fonte principal e fonte auxiliar comparando duas amostras diferentes: A-B: Amostra-23 (Execução nº 1, polaridade direta, puxando, 20%); C-D: Amostra-15 (Execução nº 3, polaridade direta, puxando, 100%) .....	85
<b>Figura 3.28</b> - Sinais de corrente/tensão da fonte principal e fonte auxiliar comparando duas amostras diferentes: A-B: Amostra-1 (Execução nº 2, polaridade inversa, puxando, 20%); C-D: Amostra-17 (Execução nº 4, polaridade inversa, puxando, 100%) .....	85
<b>Figura 3.29</b> – Sinais de corrente/tensão da fonte principal e fonte auxiliara comparando duas amostras diferentes: A-B: Amostra-7 (Execução nº 5, polaridade direta, empurrando, 20%); C-D: Amostra-10 (Execução nº 7, polaridade direta, empurrando, 100%) .....	86
<b>Figura 3.30</b> – Sinais de corrente/tensão da fonte principal e fonte auxiliar comparando duas amostras diferentes: A-B: Amostra-6 (Execução nº 6, polaridade inversa, empurrando, 20%); C-D: Amostra-21 (Execução nº 8, polaridade inversa, empurrando, 100%) .....	87
<b>Figura 3.31</b> - Transferência metálica no processo HW-GMAW: A-amostra 23 (polaridade direta, puxando, 20%); B-amostra 15 (polaridade direta, puxando, 100%) .....	88
<b>Figura 3.32</b> - Transferência metálica no processo HW-GMAW: A-amostra 1 (polaridade inversa, puxando, 20%); B-amostra 17 (polaridade inversa, puxando, 100%) .....	89
<b>Figura 3.33</b> - Transferência metálica no processo HW-GMAW: A-amostra 8 (polaridade direta, empurrando, 20%); B-amostra 11 (polaridade direta, empurrando, 100%) .....	89
<b>Figura 3.34</b> - Transferência de metal no processo HW-GMAW: A-amostra 4 (polaridade inversa, empurrando, 20%); B- amostra 21 (polaridade inversa, empurrando, 100%) .....	90
<b>Figura 3.35</b> – Esquema representativo das grandezas geométricas do cordão de solda .....	91
<b>Figura 3.36</b> – Largura e reforço para os processos GMAW, HW-GMAW (CC <sup>-</sup> )	93
<b>Figura 3.37</b> – Largura e reforço processos para os GMAW, HW-GMAW (CC <sup>+</sup> )	94
<b>Figura 3.38</b> – Penetração e área penetrada para os processos GMAW, HW-GMAW (CC <sup>-</sup> ) .....	94
<b>Figura 3.39</b> – Penetração e área penetrada para os processos GMAW, HW-GMAW (CC <sup>+</sup> ) .....	95

<b>Figura 3.40</b> – Área da ZTA e diluição para os processos GMAW, HW-GMAW (CC <sup>-</sup> ) .....	96
<b>Figura 3.41</b> – Área da ZTA e diluição para os processos GMAW, HW-GMAW (CC <sup>+</sup> ) .....	96
<b>Figura 3.42</b> – Taxa de deposição para os processos GMAW, HW-GMAW(CC <sup>-</sup> )	97
<b>Figura 3.43</b> – Taxa de deposição para os processos GMAW, HW-GMAW (CC <sup>+</sup> )	97
<b>Figura 3.44</b> - Aspectos representativos do cordão para as amostras soldadas: GMAW (A) e HW-GMAW (B-I) .....	98
<b>Figura 3.45</b> - Seções representativas das soldas fabricadas processos GMAW (A) e HW-GMAW (B-I) .....	99

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 3.1</b> - Composição química (% em peso) do metal base e dos arames de solda - Experimento I .....	56
<b>Tabela 3.2</b> – Parâmetros de soldagem - Experimento I .....	59
<b>Tabela 3.3</b> - Parâmetros elétricos de soldagem - Experimento I .....	61
<b>Tabela 3.4</b> – Parâmetros das amostras soldadas – Experimento I .....	70
<b>Tabela 3.5</b> - Composição química (% em peso) do metal base e dos arames de solda - Experimento II .....	77
<b>Tabela 3.6</b> – Parâmetros de soldagem - Experimento II .....	81
<b>Tabela 3.7</b> – Parâmetros elétricos de soldagem - Experimento II .....	83
<b>Tabela 3.8</b> - Parâmetros elétricos obtidos para a execução nº 9 (GMAW) .....	88
<b>Tabela 3.9</b> – Parâmetros das amostras soldadas - Experimento II .....	92

**LISTA DE SÍMBOLOS OU NOMENCLATURAS**

**ANOVA** (Análise de Variância)

**CME** (Campos Magnéticos Externos)

**CP** (Corpo de prova)

**CW-GMAW** (Cold Wire - Gas Metal Arc Welding)

**DBCP** (Distância Bico de Contato Peça)

**DCEP** (Distância Contato Elétrico Peça)

**DE-GMAW** (Double Electrode - Gas Metal Arc Welding)

**FCAW** (Flux-Cored Arc Welding)

**GMAW** (Gas Metal Arc Welding)

**GTAW** (Gas Tungsten Arc Welding)

**HW-GMAW** (Hot Wire - Gas Metal Arc Welding)

**HW-GTAW** (Hot Wire – Gas Tungsten Arc Welding)

**IHW-GTAW** (Induction Hot Wire – Gas Tungsten Arc Welding )

**LBW-MIG** (Laser beam Welding - Metal Inert Gas)

**NGW** (Narrow Gap Welding)

**PTA** (Plasma Transferred Arc)

**PTAW** (Plasma Transferred Arc Welding)

**SAW** (Submerged Arc Welding)

**SMAW** (Shielded Metal Arc Welding)

**SPHC** (Aço hipoeutetóide até 0,15% C e 0,6% Mn)

**ZTA** (Zona Termicamente Afetada)

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTO GERAL

Em diversos segmentos da indústria, a soldagem é indispensável como processo de fabricação e no reparo de componentes, por isso, os fabricantes têm como desafio desenvolver equipamentos com novas tecnologia que possam impactar na produtividade e na melhoria do controle dos processos para obtenção de soldas com requerimentos para atender aplicações específicas.

Os processos de soldagem que utilizam o arco elétrico são preteridos por apresentarem maior produtividade, em comparação, por exemplo, aos processos de soldagem a laser, devido às suas taxas de deposição potencialmente altas, versatilidade no projeto da junta e facilidade de automação/robotização, com a diminuição de custos e melhoria na qualidade, particularidades que promoveram o impulso do uso de soldagem a arco elétrico em aplicações críticas, incluindo construção naval (LEZZI, COSTA, 2013), na diminuição do peso de transportes com aplicações na soldagem de materiais dissimilares (MVOLA, KAH, *et al.*, 2015) e revestimento duro contra erosão (BORLE, GALL, *et al.*, 2015).

Na aplicação de revestimentos duros, diversos processos de deposição são utilizados na indústria, tais como o GMAW (Gas Metal Arc Welding), FCAW (Flux-Cored Arc Welding), SMAW (Shielded Metal Arc Welding), SAW (Submerged Arc Welding), PTA (Plasma Transferred Arc) e os processos derivados como o Tandem-GMAW, LBW-MIG (Laser Beam Welding - Metal Inert Gas), CW-GMAW (Cold Wire - Gas Metal Arc Welding), HW-GMAW (Hot Wire - Gas Metal Arc Welding) e o DE-GMAW (Double Electrode - Gas Metal Arc Welding).

Entre os processos de soldagem citados, a soldagem a arco com proteção gasosa utilizando um arame quente (HW-GMAW), é uma tecnologia derivada do processo HW-GTAW, que possui uma maior taxa de deposição, em comparação com o processo GTAW - Gas Tungsten Arc Welding (PADMANABAN, NEELAKANDAN, *et al.*, 2017). A principal vantagem do processo HW-GMAW para revestimentos é a possibilidade de se obter menor entrada de calor nominal com maior deposição. Isto resulta da dissociação da entrada e da deposição de calor, pela introdução de um arame auxiliar aquecido, favorecendo o controle dos níveis de diluição (GÜNTHER, BERGMANN, *et al.*, 2018).

Outro processo, igualmente aplicável em revestimentos duros é o CW-GMAW, apresentando resultados promissores tanto para união como em revestimentos. Esta variante do GMAW propõe aumentar a taxa de deposição, reduzir a diluição, aumentar a velocidade de soldagem, dentre outros benefícios (CABRAL, BRAGA, *et al.*, 2015; RIBEIRO, R. A., SANTOS, *et al.*, 2015). Outros processos vêm sendo desenvolvidos utilizando uma variação semelhante, por exemplo, o DE-GMAW (LI, CHEN, *et al.*, 2007; LI, ZHANG, 2008a, b; LU, ZHANG, *et al.*, 2013; LU, CHEN, *et al.*, 2014).

Os parâmetros de soldagem ou pacote operacional são fatores preponderantes e que afetam sensivelmente a qualidade, a produtividade e o custo da junta soldada (GHAZVINLOO, HONARBAKHSR-RAOUF, *et al.*, 2010). Parâmetros como corrente, tensão e velocidade de soldagem e suas interações desempenham um papel significativo no processo de soldagem (MAHAPATRA, PATNAIK, *et al.*, 2007). As interações dos parâmetros de soldagem no processo HW-GMAW não são totalmente conhecidas, e o resultado dessa falta de informação é uma subutilização do processo HW-GMAW em várias aplicações estruturais, principalmente em reparos e correções.

## 1.2 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

O processo GMAW, apesar de sua introdução na indústria na década de 60 é utilizado amplamente por apresentar uma vantagem que conjuga produtividade, flexibilidade e facilidade de automação, mantendo-se na vanguarda da soldagem dos processos a arco, concorrendo com novas técnicas de soldagem, sobretudo os processos híbridos (SILVA, 2005).

Atualmente a automação vem experimentando níveis cada vez mais elevados de aplicação nas indústrias de ponta e, as indústrias regionais do Estado do Pará, principalmente a indústria naval, sinalizam para 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 com resposta no aumento de produtividade.

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

entanto, identificou-se no processo a necessidade de maior penetração da junta soldada para atender aplicações específicas, fazendo surgir o processo HW-GMAW. Nesta nova metodologia, através do aquecimento por efeito Joule do arame adicional tornou-se possível modificar a relação entre a quantidade de material depositado e a corrente nele inserida, além de potencializar a magnitude da força de Lorentz na poça, contribuindo para aumentar a penetração e manter em níveis favoráveis a taxa de deposição, habilitando-o na união de peças espessas e deposição de revestimentos, onde a exigência de alta produção e baixa diluição é um diferencial competitivo importante, justificando sua aplicação industrial.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Investigar a viabilidade operacional do processo HW-GMAW comparativamente aos processos GMAW e CW-GMAW na soldagem de aços.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

- Analisar a estabilidade do arco elétrico empregando oscilogramas e ciclogramas (fase I).
- Investigar a influência das condições operacionais puxando e empurrando a tocha de soldagem, a taxa e a polaridade do arame de adição no processo HW-GMAW (fase II).
- Avaliar as características geométricas e econômicas nos processos de soldagem utilizando as macrografias dos cordões de solda (fase I e II).
- Relacionar os resultados obtidos entre a fase I e II.

### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta tese está dividida em cinco capítulos. O Capítulo 1 apresenta as considerações iniciais, a motivação/justificativa, seus objetivos e a estrutura do trabalho. O Capítulo 2 apresenta uma revisão geral sobre as variantes do processo GMAW e atuação das forças motrizes que influenciam na formação da poça de fusão. No Capítulo 3 é apresentada a metodologia empregada, resultados e discussões, finalizando com conclusões de cada fase do

estudo. No Capítulo 4 é apresentada a conclusão geral das fases dos estudos realizados. No Capítulo 5 são apresentadas propostas para trabalhos futuros com o objetivo de aprimorar o estudo desenvolvido nesta tese. E por fim, as referências utilizadas no desenvolvimento deste trabalho e o Apêndice mostrando a análise estatística em cada fase.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

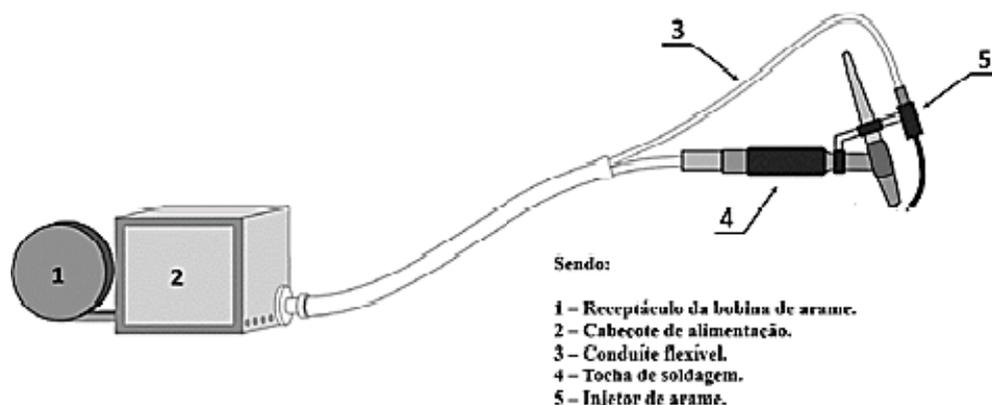
#### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo apresenta inicialmente uma breve revisão das variantes do processo de soldagem GTAW (CW e HW-GTAW), consideradas como precursoras dos processos CW e HW-GMAW. Em seguida são abordadas as variantes CW-GMAW e HW-GMAW com suas características, vantagens, aplicações e influência dos parâmetros de soldagem nas características geométricas do cordão de solda. E por fim, a ação das forças motrizes que agem na poça de fusão, suas influências nos padrões de convecção e seus reflexos na penetração.

#### 2.2 O PROCESSO GTAW COM ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA DE ARAME EM TEMPERATURA AMBIENTE (CW-GTAW)

Uma característica importante do processo CW-GTAW é sua capacidade de controlar a temperatura e o tamanho da poça de soldagem por meio da adição de um arame em temperatura ambiente por um alimentador independente. Devido a essa singularidade, é utilizado em operações de soldagem manual para controlar o perfil e a penetração da solda (NORRISH, 2015; OLIVARES, DÍAZ, 2017).

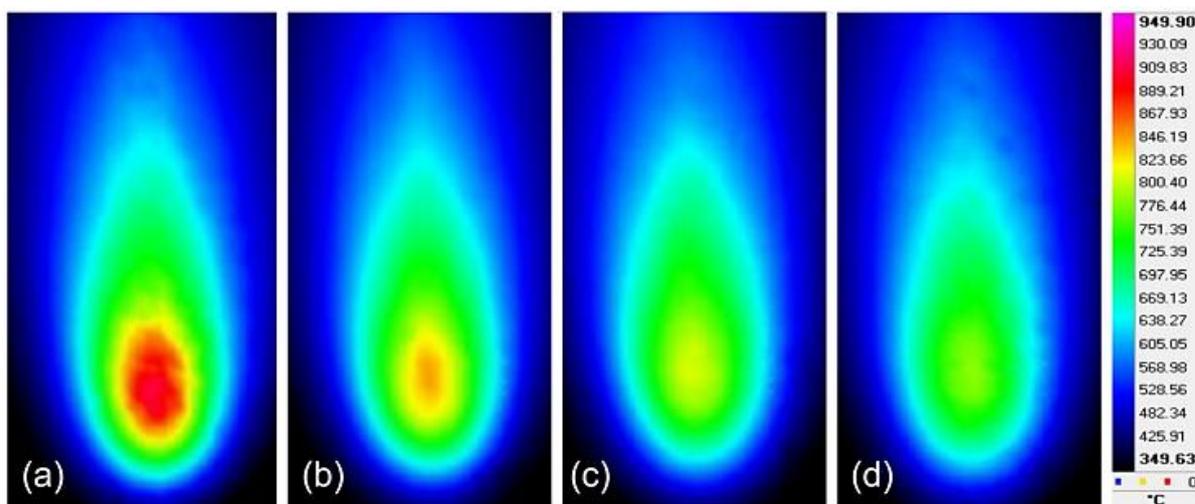
O arame é normalmente alimentado a uma taxa constante, definida pelo soldador, podendo ser contínua, pulsada ou intermitente (O'BRIEN, 2004). Já a frequência da adição de arame pode ser definida entre 2 a 10 Hz (NORRISH, 2006). A Figura 2.1 mostra a ilustração do sistema de alimentação de arame nesta variante.



**Figura 2.1** – Ilustração do sistema de alimentação do arame no processo CW-GTAW e seus componentes.  
**Fonte:** Adaptado de Cunha *et al.*, (2016).

Ainda existem lacunas sobre o processo CW-GTAW a serem esclarecidas, por este motivo, o tema vem sendo alvo da produção de pesquisas conduzidas por diversos investigadores. Dentre as vertentes desenvolvidas, de acordo com Silva *et al.*, (2018; 2019), em seus estudos foram realizadas análises comparativas sobre a influência da alimentação dinâmica de arame na forma contínua e pulsada.

Uma contribuição dada por Silva *et al.*, (2018) foi a pesquisa do gradiente térmico da poça de fusão de cordões entre os processos de alimentação autógenos, ou seja, sem metal de adição e automáticos, com os resultados exibidos na Figura 2.2. A Figura mostra que a temperatura autógena foi maior, portanto, a adição de material influencia a temperatura final. Com relação aos processos de alimentação automática, a temperatura da poça de fusão sofreu uma ligeira redução, proporcional ao aumento da frequência de alimentação. Esse fato pode ser associado ao deslocamento do arame até a poça de fusão: à medida que ele mergulha na poça, inicia-se o processo de extração de calor imediatamente até que a temperatura atinja o equilíbrio térmico. Contudo, apesar da existência de uma tendência, estatisticamente, os resultados não apontaram para uma redução significativa na temperatura da poça de fusão. Os valores encontrados foram: (a) Processo autógeno:  $951 \pm 14$  °C; (b) Processo de alimentação contínua:  $878 \pm 110$  °C; (c) Processo dinâmico a 1 Hz -  $858 \pm 62$  °C e (d) Processo dinâmico a 2 Hz -  $850 \pm 79$  °C.

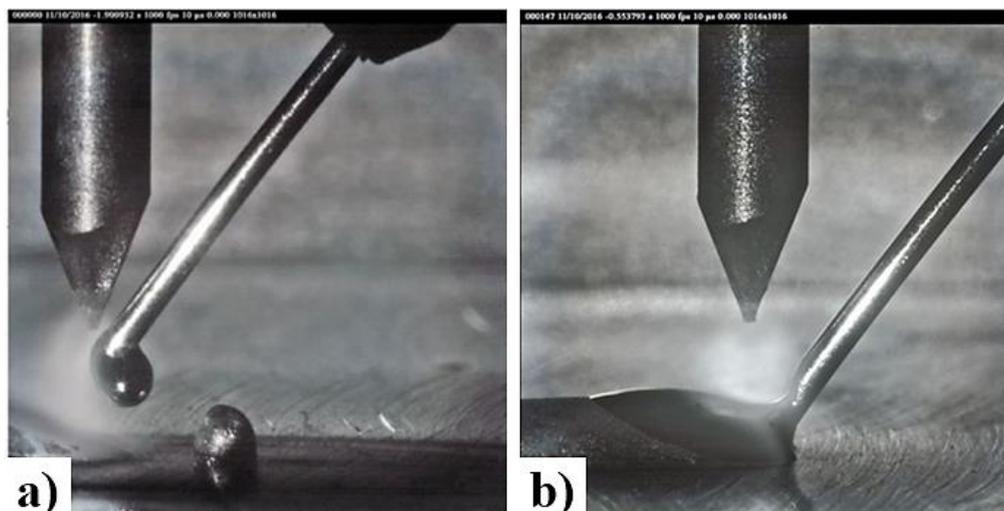


**Figura 2.2** – Resultados obtidos por câmera térmica com alimentação autógena e automática de arame. **Fonte:** Silva *et al.*, (2018).

Em seus estudos Silva *et al.*, (2019) apresentaram um panorama sobre a transferência metálica. Os autores utilizaram quatro casos distintos: Caso 1, Corrente constante - Alimentação contínua de arame; Caso 2, Corrente pulsada - Alimentação contínua de arame; Caso 3, Corrente constante - Alimentação dinâmica de arame e Caso 4, Corrente pulsada - Alimentação dinâmica de arame.

Para a análise foram comparadas quatro posições de soldagem: plana, vertical ascendente, vertical descendente e sobre cabeça. Assim como nos trabalhos de Yudodibroto *et al.* (2004) e Silva *et al.*, (2019) foram encontrados dois modos de transferência metálica similares. O primeiro modo é caracterizado pela formação de gotículas maiores que o diâmetro do arame, que ocorreu com alimentação contínua (casos 1 e 2) em todas as posições analisadas, conforme a Figura 2.3a, resultando em uma menor robustez na transferência e assimetria na superfície do cordão.

O segundo modo ocorreu com alimentação dinâmica de arame (casos 3 e 4) também em todas as posições analisadas, como se observa na Figura 2.3b, na qual a oscilação do arame garantiu a formação de uma película fundida na ponta do arame de pequenas dimensões, transferência na forma de ponte. Nesse modo de transferência, a alimentação dinâmica do arame produz cordões de solda mais simétricos e processos mais robustos.



**Figura 2.3** – Transferência metálica no processo CW-GTAW: a) Por gota b) Por ponte. **Fonte:** Adaptado de Silva *et al.*, (2019).

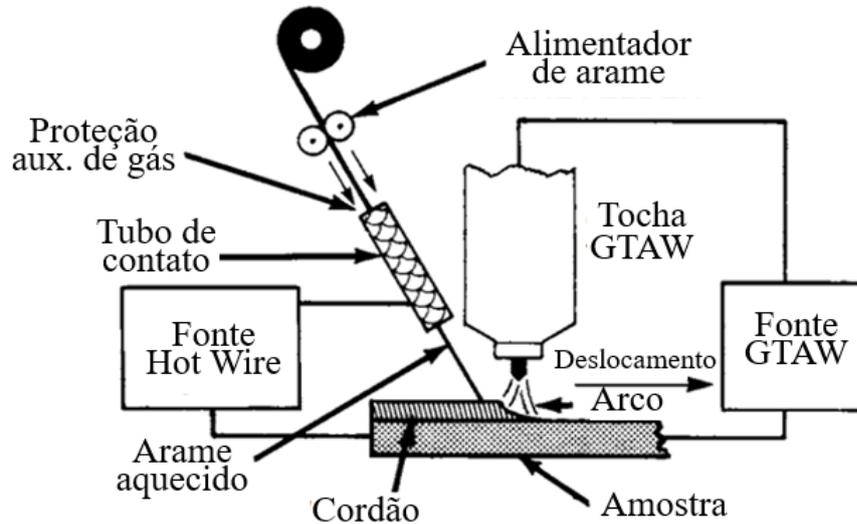
### 2.3 O PROCESSO GTAW COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME QUENTE (HW-GTAW)

O processo de adição com arame quente (HW) é semelhante ao processo com arame frio (CW), todavia, cumpre mencionar que o arame possui um sistema próprio de aquecimento (HORI *et al.*, 1986, 1990).

Atualmente, os três principais métodos para aquecimento do arame são: aquecimento por resistência elétrica; aquecimento por indução eletromagnética e aquecimento por arco elétrico (FUHAI, XUEMING, *et al.*, 2011). Vale ressaltar que na realização de uma análise dos conceitos sobre os processos de aquecimento por resistência elétrica e por indução eletromagnética – ambos os processos de aquecimento estão relacionados com a movimentação de carga elétrica, contudo, quando se utiliza o aquecimento por resistência elétrica, o princípio físico empregado é o efeito Joule, o qual atribui a geração de calor à movimentação das cargas elétricas no interior do condutor. Por sua vez, o processo indutivo é análogo ao funcionamento de um transformador, no qual o enrolamento primário é a bobina de indução e o enrolamento secundário é a peça de trabalho, já a corrente elétrica induzida no arame é chamada corrente de fuga ou corrente de Foucault.

O processo de alimentação com arame quente muitas vezes pode ser realizado com a blindagem de um gás inerte para protegê-lo da oxidação. O processo HW possibilita o aumento da energia disponível no arco para fundir o material base, portanto, além de aumentar a taxa de deposição, tal processo geralmente é executado em velocidades de soldagem mais altas que as do processo CW e, para compensar esse aumento na taxa de deposição, uma mistura de gases de proteção – como 75% de hélio e 25% de argônio – é utilizada para promover uma geometria

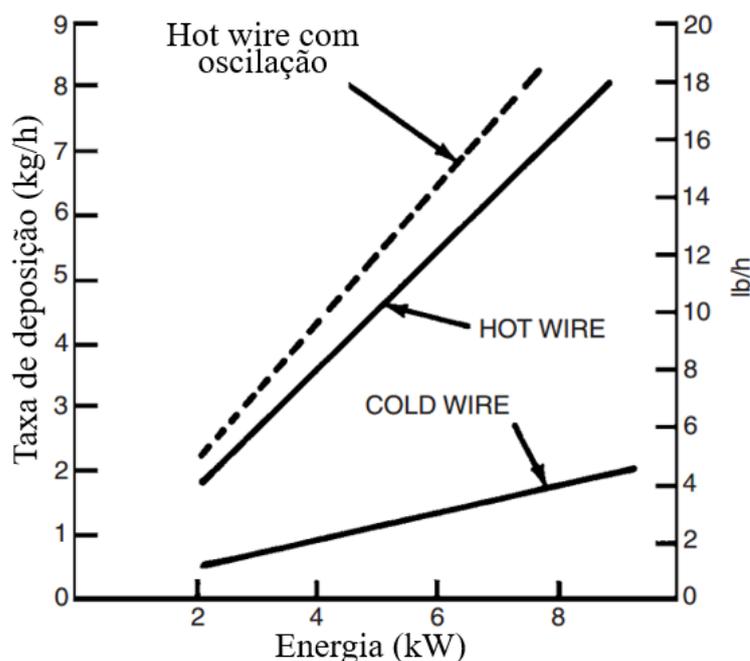
de solda mais desejável (O'BRIEN, 2004). A Figura 2.4 apresenta uma ilustração do sistema de alimentação de arame para o processo HW-GTAW.



**Figura 2.4** – Ilustração do sistema de alimentação de arame para o processo HW-GTAW e seus componentes.  
**Fonte:** Adaptado de O'Brien (2004).

Conforme mostra a Figura 2.5 a taxa de deposição é maior no processo HW que no CW, no entanto é importante destacar que essa taxa pode se aproximar da soldagem GMAW em altas correntes (O'BRIEN, 2004; OLIVARES e DÍAZ, 2017).

O'Brien (2004) também tece comentários acerca do fluxo de corrente no arame quente, iniciando-se quando ele entra em contato com a superfície da poça de soldagem, sendo que em muitos casos a corrente utilizada é alternada para aquecer o arame a fim de evitar o "sopro" magnético entre o arame e o eletrodo. Esclarecemos ainda que a corrente contínua também pode ser utilizada. Todavia, com os avanços tecnológicos foram desenvolvidas inúmeras formas de se realizar contatos elétricos entre o arame de soldagem e poça de fusão e/ou peça teste, que no decorrer deste estudo serão melhor apresentadas.



**Figura 2.5** – Comparação das taxas de deposição para processo GTAW com alimentação de arame frio e quente.  
**Fonte:** Adaptado de O'Brien (2004).

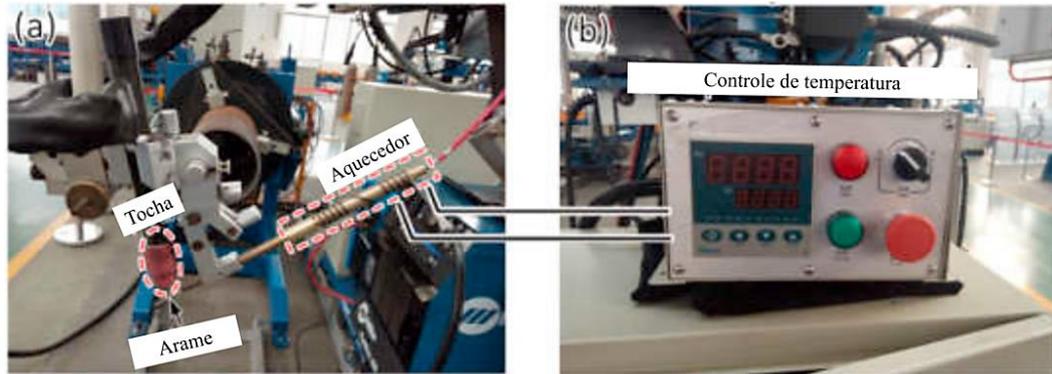
No processo HW-GMAW são utilizados os seguintes métodos para o aquecimento do arame:

a) Aquecimento por resistência elétrica

O aquecimento por resistência, comparado a outros métodos é considerado simples, de baixo custo e fácil configuração. No entanto, o método produz alterações no campo magnético durante a soldagem, além disso, os parâmetros ótimos de potência do arame quente também são complexos e difíceis de serem obtidos (CAO, CHEN, *et al.*, 2018).

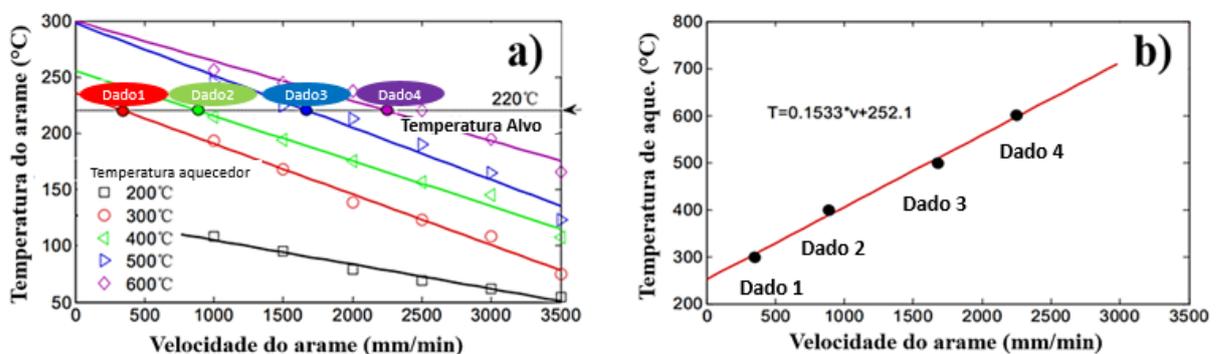
Para evitar os problemas inerentes ao aquecimento por resistência, Cao, Chen e Du (2018) utilizaram um tubo de contato para trocar calor gerado pela resistência instalada; este tubo é onde o arame desenvolve a sua movimentação até a poça de fusão, vide Figura 2.6. Os autores do referido estudo efetuaram a soldagem de tubos de aço carbono com três passes (raiz, enchimento e acabamento) com os processos CW-GTAW e HW-GTAW.

Uma consideração pode ser extraída do trabalho dos pesquisadores em questão: a utilização de uma resistência elétrica propriamente dita como pode ser visualizada na Figura 2.6a agregada com uma fonte externa de aquecimento.



**Figura 2.6** – Equipamento para a soldagem CW-GTAW: (a) Tocha de soldagem e aquecedor de arame, (b) Controlador de temperatura. **Fonte:** Adaptado de Cao, Chen e Du (2018).

Cao, Chen e Du (2018) estabeleceram uma relação entre a temperatura do arame de soldagem e a velocidade de alimentação, conforme se observa na Figura 2.7a. Na Figura 2.7b pode ser verificada a relação de temperatura do aquecedor pela velocidade de alimentação na temperatura de 220 °C. Com base no modelo matemático, a temperatura do aquecedor pode ser calculada configurando de antemão um valor de velocidade de alimentação, conforme dados apresentados na Figura 2.7b.

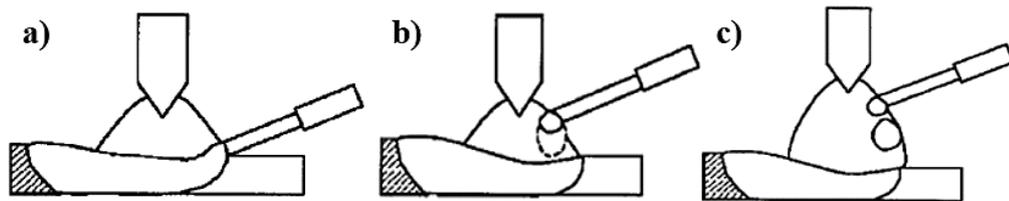


**Figura 2.7** – Gráficos para obtenção da temperatura de aquecimento de arame: (a) Temperatura do arame pela velocidade de alimentação e (b) Temperatura do aquecedor pela velocidade de alimentação. **Fonte:** Adaptado de Cao, Chen e Du (2018).

Como resultados, Cao, Chen e Du (2018) averiguaram a viabilidade da metodologia ser usada para se obter a temperatura do final do arame. Foi verificada também uma melhora no aspecto superficial, na velocidade de soldagem e no refino microestrutural dos cordões depositados pelo processo HW comparados aos depositados pelo processo CW, alcançando também bons resultados na resistência mecânica.

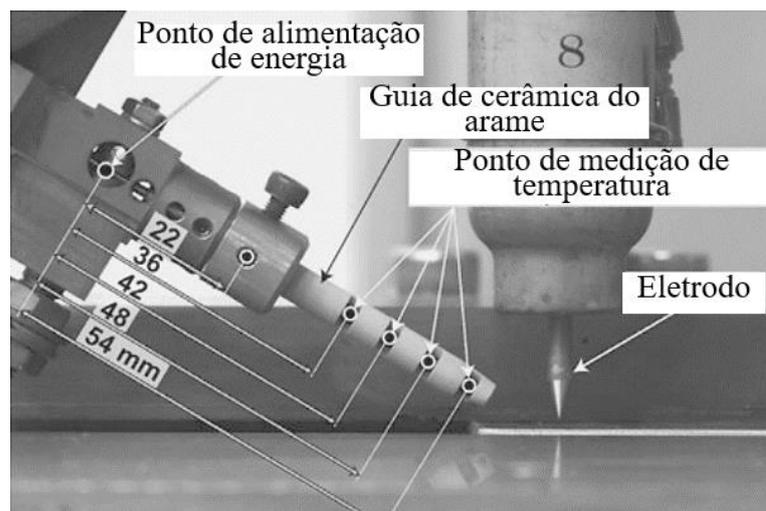
Outros trabalhos utilizam um comprimento de arame de soldagem conhecido como resistor. Nesse caso, o aquecimento externo só começa a agir quando a ponta do arame toca na poça de soldagem fechando o contato elétrico (transferência por ponte). Contudo, o movimento

do arame até a poça de fusão recebe uma parcela de calor oriunda do arco elétrico, realizando um preaquecimento, podendo até mesmo chegar à fusão do arame, vide a Figura 2.8. Normalmente, o processo de fusão do arame é dependente da velocidade de alimentação do arame e da sua posição de entrada na atmosfera arco/poça de fusão. Esse movimento gera modos de transferência metálica em soldagens GTAW com alimentação contínua (YUDODIBROTO, HERMANS, *et al.*, 2004).



**Figura 2.8** – Ilustração de exemplos de modos de transferência nas soldagens pelo processo HW-GTAW: (a) Transferência por ponte, (b) Transferência por ponte interrompida e (c) Transferência por vôo livre. **Fonte:** Adaptado de Yudodibroto *et al.*, (2004).

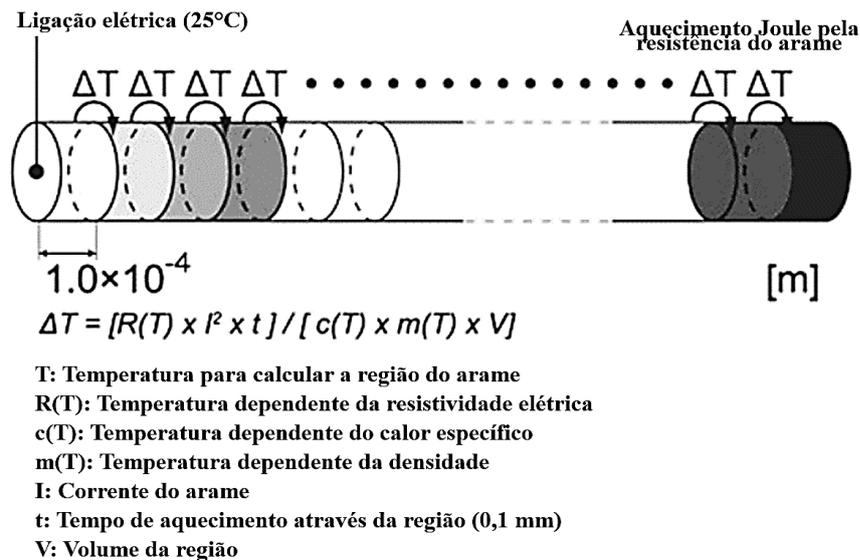
Shinozaki *et al.*, (2013) realizaram um estudo com o propósito de estimar a distribuição de temperatura no arame de soldagem pelo processo HW-GTAW com ultrarrápida velocidade de soldagem. Nele foi utilizada uma metodologia em que a temperatura de aquecimento do arame de soldagem é verificada durante a sua inserção no sistema arco/poça de fusão, conforme Figura 2.9 ilustra, utilizando arames de aço inoxidável, aço médio carbono e a base de titânio.



**Figura 2.9** – Esquema experimental para tomada dos valores de temperatura do arame de soldagem. **Fonte:** Adaptado de Shinozaki *et al.*, (2013)

A Figura 2.10 ilustra de forma esquemática o método de estimativa para a distribuição da temperatura do arame de soldagem durante alimentação constante. O incremento de

temperatura foi calculado por 0,1 mm no comprimento de aquecimento (64 mm – distância do ponto de contato elétrico até a poça de fusão), considerando que as propriedades dos materiais dependem da resistividade elétrica, capacidade específica de calor e densidade. Testes preliminares foram desenvolvidos para se determinar os valores finais de corrente para o aquecimento adequado do arame; a geometria do cordão e filmagens de alta velocidade foram utilizadas como parâmetro comparativo.

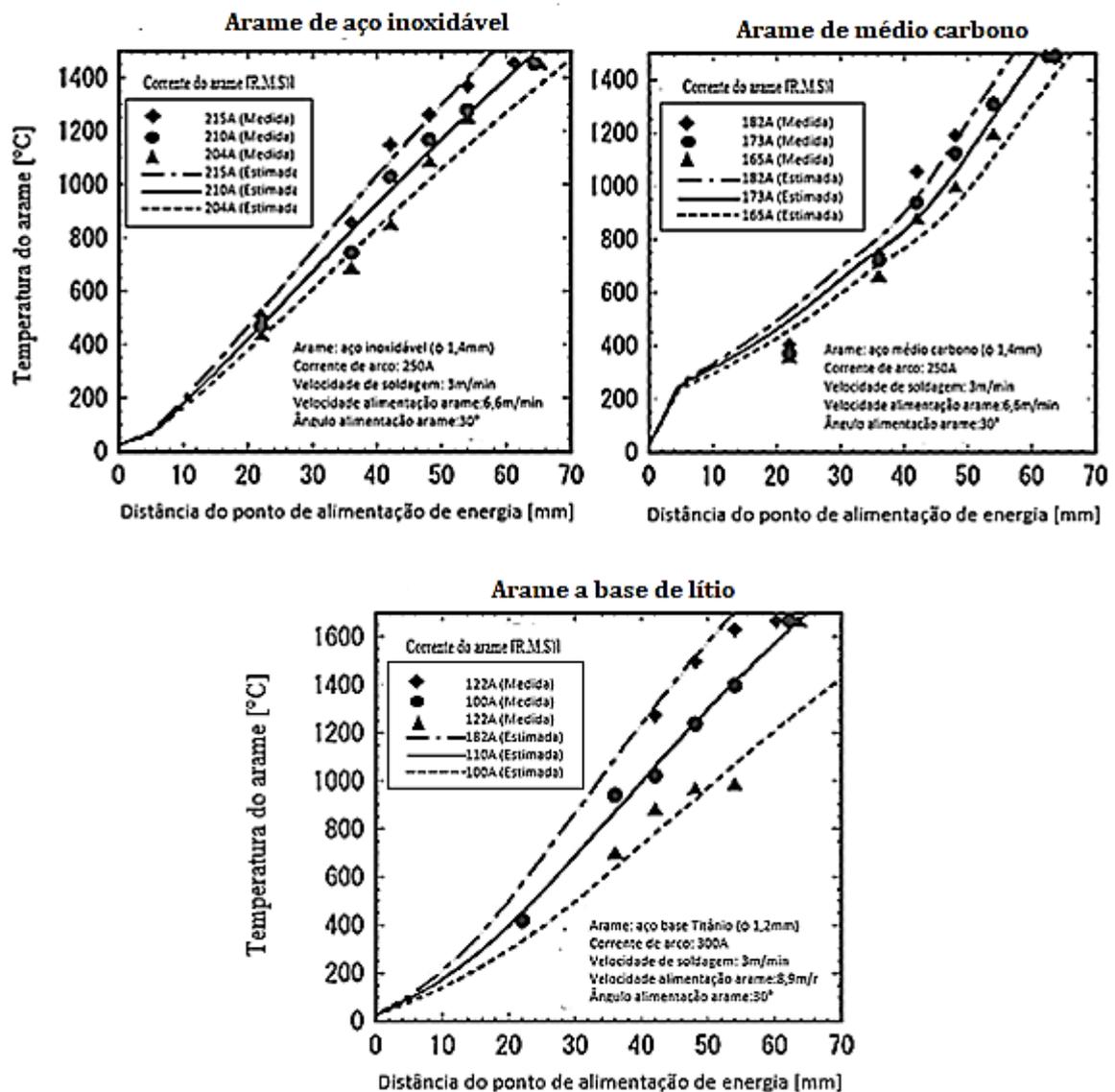


**Figura 2.10** – Diagrama esquemático do método para estimativa de distribuição de temperatura do arame de soldagem. **Fonte:** Adaptado de Shinozaki *et al.*, (2013).

Shinozaki *et al.*, (2013) observaram que à medida que o arame passa pelo ponto de contato elétrico até tocar a poça de fusão ocorre uma variação no valor de temperatura, conforme pode ser visualizado na Figura 2.11. Foi verificado também que a distribuição de temperatura possui um efeito decisivo na forma e na qualidade das soldagens GTAW com alta velocidade para todos os materiais utilizados, para isso, os arames de soldagem devem estar dentro de uma faixa adequada de aquecimento.

Foram encontradas três faixas de temperatura, variando entre muito baixa, adequada e muito alta, sendo que para as faixas de temperatura muito baixa e muito alta houve o surgimento de defeitos, fatos que inviabilizaram os cordões para esses parâmetros.

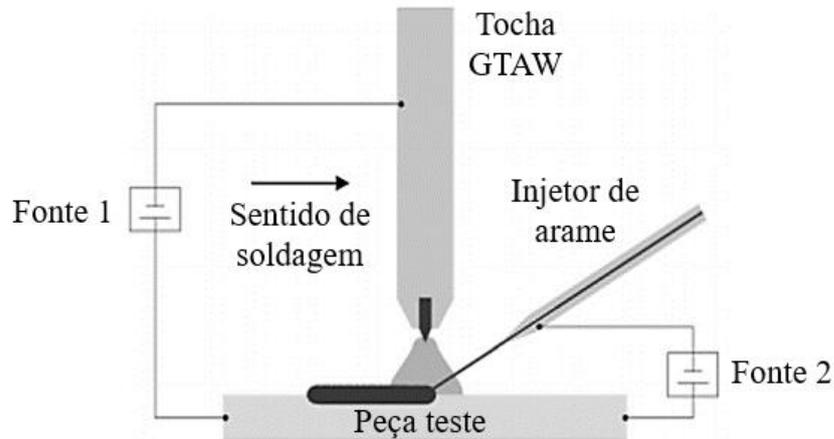
O método de estimativa simplificado proposto se apresentou eficiente e adequado para se obter as distribuições de temperatura para a soldagem de todos os materiais e condições de soldagem, resultando um pequeno desvio entre os valores calculados e os valores medidos.



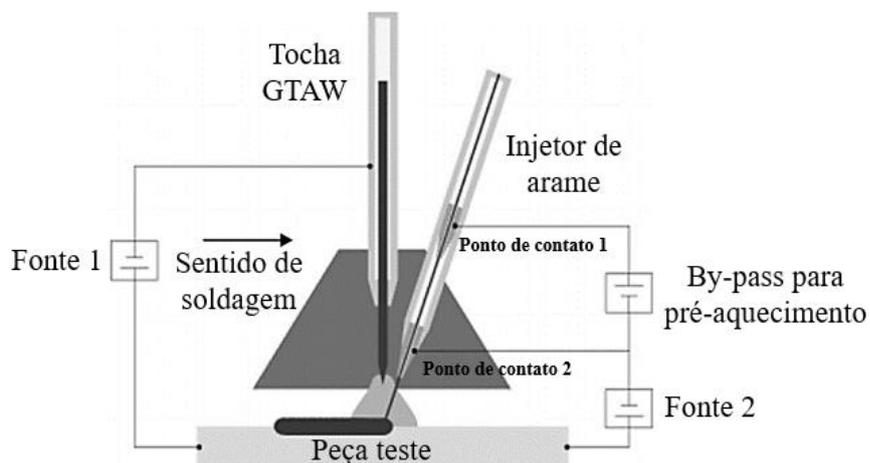
**Figura 2.11** – Estimativa da distribuição de temperatura de arames de soldagem. **Fonte:** Adaptado de Shinozaki *et al.*, (2013).

Outras formas de aquecimento por resistência foram pesquisadas por diversos autores, como Silwal e Santangelo (2018); Spaniol *et al.*, (2020a), bem como Spaniol *et al.*, (2020). Tais autores usaram duas fontes de soldagem, uma para o processo do arame, sendo que a fonte para o aquecimento do arame foi ligada entre a peça teste e o injetor de arame, como observado na Figura 2.12, forma igualmente utilizada por SHINOZAKI *et al.*, (2013).

Outro tipo de circuito empregado também usava duas fontes de soldagem, uma para o processo GTAW e a outra ligada entre a peça teste e o injetor de arame. O diferencial está no emprego de um “by-pass”. O objetivo dessa derivação é a realização de um preaquecimento no arame antes de ele passar pelo trecho principal do sistema de aquecimento, conforme demonstra a Figura 2.13.



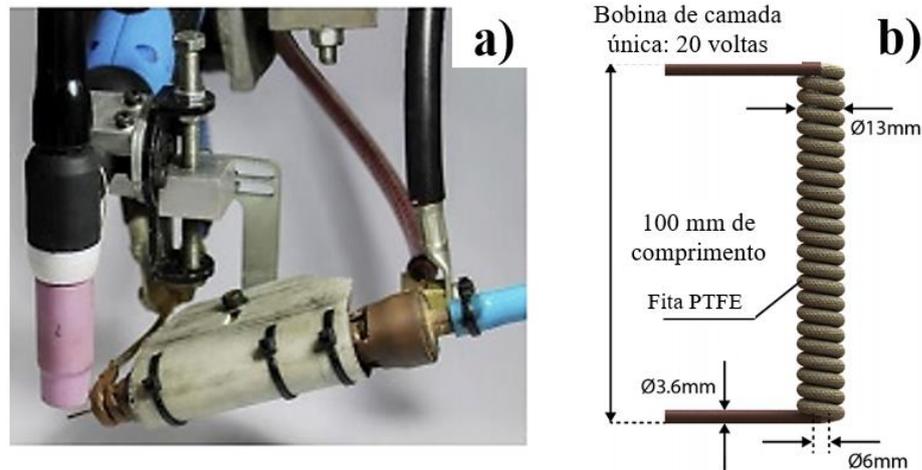
**Figura 2.12** – Diagrama esquemático da disposição das fontes de soldagem utilizadas para o aquecimento do arame. **Fonte:** Adaptado de Spaniol *et al.*, (2020).



**Figura 2.13** – Diagrama esquemático da disposição das fontes de soldagem utilizadas para o aquecimento do arame com pré-aquecimento. **Fonte:** Adaptado de Spaniol *et al.*, (2020).

#### b) Aquecimento por indução eletromagnética

Nesse mecanismo de aquecimento, o arame de soldagem é aquecido através da passagem de corrente induzida em um dado condutor, dessa forma, o efeito Joule é originado da circulação da corrente induzida no material. Quanto maior a frequência da corrente de indução, maior será a geração de calor por esse mecanismo. No entanto, devido à interação dos campos magnéticos gerados pelas correntes induzidas, ocorre a deflexão do arco por sopro magnético (VOIGT *et al.*, 2020). A Figura 2.14 apresenta o sistema composto pela tocha de soldagem GTAW, aparato de aquecimento do arame e a bobina de indução eletromagnética.

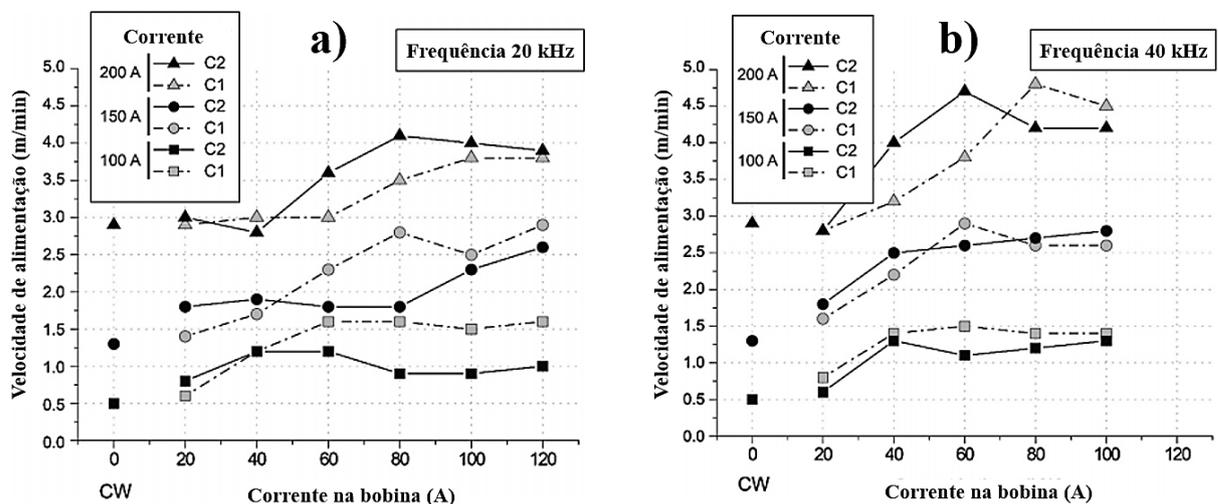


**Figura 2.14** – Equipamento para soldagem e aquecimento do arame: (a) Tocha e dispositivo de alimentação de arame e (b) Bobina de indução de uma camada recoberta com fita de politetrafluoreteno (PTFE). **Fonte:** Adaptado de Voigt *et al.*, (2020).

Para quantificar o aumento da taxa de deposição obtida pelo método de aquecimento por indução (IHW-GTAW), Voigt *et al.*, (2020) realizaram testes de referência utilizando o processo CW-GTAW nas mesmas condições de operação do processo com indução, em amostras de aço de SPHC. A taxa de alimentação do arame foi estabelecida experimentalmente na condição de transferência entre spray, quase atingindo o limiar da transferência contínua, por ponte. Foram avaliadas duas configurações da bobina de indução, uma composta por 20 voltas dispostas em camada única e outra com 35 voltas divididas em duas camadas. Com relação aos parâmetros de indução avaliados, foram realizados os testes com a corrente da bobina aumentando de 20 para 120 A, com incrementos de 20 A. Durante os testes, a velocidade de alimentação do arame foi aumentada com incrementos de 0,1 m/min até a condição de transferência estabelecida (gota a gota até o limite de transferência). Também foram utilizadas duas frequências de ressonâncias para as bobinas de indução: 20 kHz para a bobina de 20 voltas (C1) e 40 kHz para a bobina de 35 voltas (C2).

Voigt, Cunha *et al.*, (2020), ao usarem uma frequência de 20 kHz para a bobina de camada única, observaram que ela foi mais eficiente que a bobina de camada dupla, para a maioria das condições operacionais avaliadas, especialmente para correntes de soldagem de 100 e 150 A, como mostra a Figura 2.15a. Ao utilizarem a frequência de 40 kHz, os autores alcançaram um aumento na eficiência do aquecimento do arame para a bobina de camada dupla, conforme indica a Figura 2.15b. No entanto, isso foi útil apenas para altas velocidades de alimentação do arame, pois para as demais condições não houve aumento na taxa de deposição em relação às alcançadas na frequência de 20 kHz.

Nesse contexto, o uso da bobina de camada dupla não é recomendado porque, em termos da taxa de deposição, os mesmos ganhos são obtidos com a bobina de camada única para todas as condições operacionais avaliadas. Não foi observado o aparecimento de sopro magnético ao se usar o aquecimento por indução eletromagnética, diferente do que ocorre nos métodos de aquecimento com elemento resistivo, por exemplo. Ao contrário do método de aquecimento, no qual é necessária a transferência contínua de metal (por ponte), o método de aquecimento por indução também permite a transferência de gotículas sem a formação de arco secundário. Esses fatos observados destacam o potencial desse método de aquecimento junto com técnicas modernas, como a alimentação dinâmica de arame e métodos de alimentação de arame tangencial.

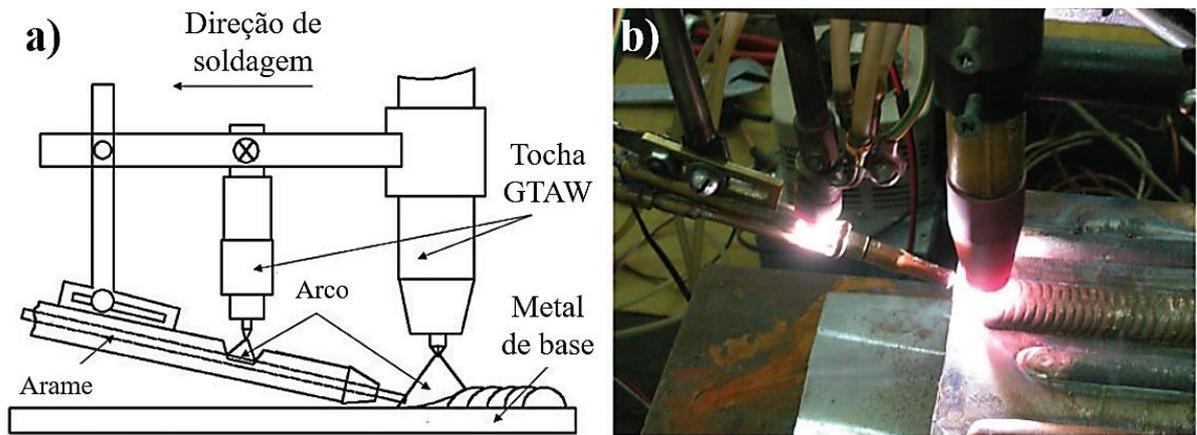


**Figura 2.15** – Velocidades de alimentação de arame obtidas em função do tipo de processo, corrente, tipo da bobina (C1 ou C2): (a) Relação entre correntes de soldagem e a frequência de indução de 20 kHz e (b) Relação entre correntes de soldagem e a frequência de indução de 40 kHz. **Fonte:** Adaptado de Voigt *et al.*, (2020).

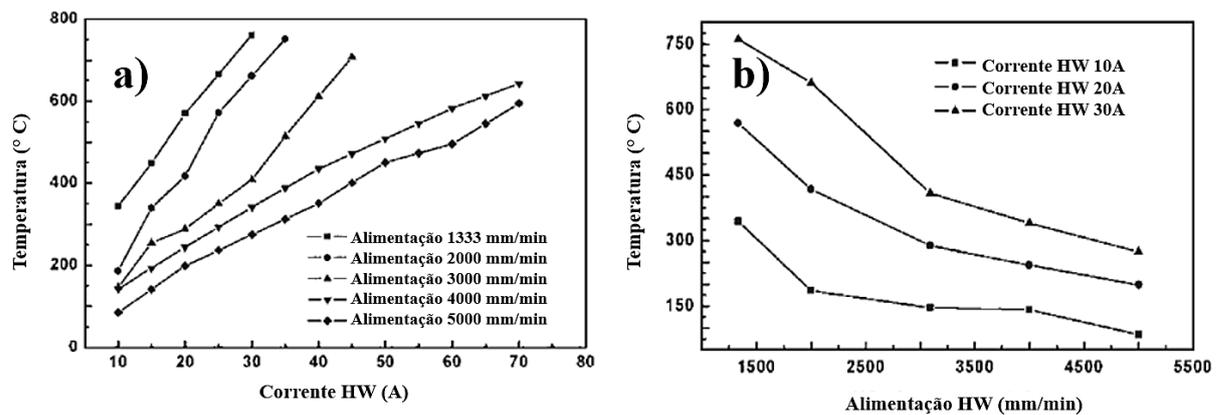
### c) Aquecimento por arco elétrico

Em suas pesquisas Lv *et al.*, (2007) utiliza esta modalidade de aquecimento, ao usar um arco auxiliar para pré-aquecer o arame de soldagem de uma liga de cobre, conforme mostra a Figura 2.16, com o objetivo de se evitar as desvantagens oriundas dos métodos tradicionais de preaquecimento. O método é indicado para materiais com baixa resistência térmica, como cobre e alumínio.

Os resultados experimentais apontaram que a temperatura do arame varia linearmente com a corrente de preaquecimento e hiperbolicamente com a velocidade de alimentação do arame, conforme mostra a Figura 2.17.



**Figura 2.16** – Sistema de aquecimento com arco assistido: (a) Esquema de aquecimento de arame e (b) Sistema real. **Fonte:** Adaptado de Lv *et al.*, (2007).



**Figura 2.17** – Efeitos dos parâmetros de soldagem na temperatura de aquecimento do arame: (a) Corrente de aquecimento e (b) Taxa da velocidade de alimentação do arame. **Fonte:** Adaptado de Lv *et al.*, (2007).

Lv *et al.*, (2007) observaram que a eficiência da deposição aumentou em torno de 96 %, enquanto as microestruturas da junta obtida são semelhantes às soldagens com o processo com alimentação CW. Com relação à resistência mecânica avaliada, ambas as soldagens (HW e CW) não apresentaram diferença nos valores de resistência, cerca de 120 MPa.

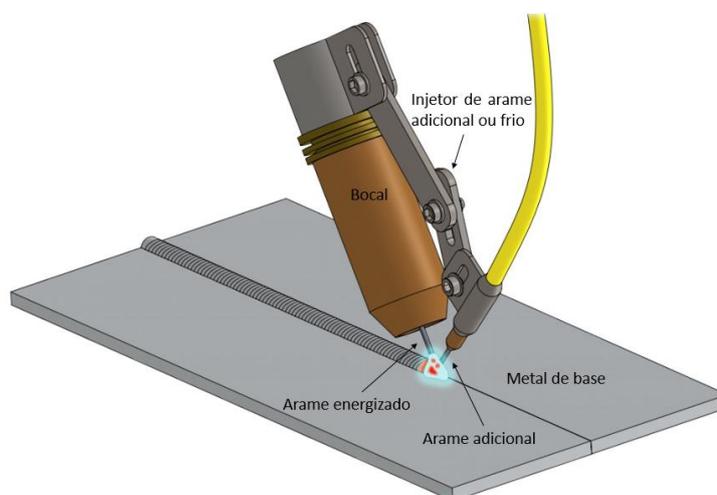
#### 2.4 O PROCESSO CW-GMAW (*Cold Wire – Gas Metal Arc Welding*)

O processo CW-GMAW utiliza os procedimentos de alimentação de arame de soldagem semelhantes aos do processo GTAW com alimentação automatizada. Este processo se apresenta como uma alternativa para o aumento da produtividade sem o aumento do aporte de calor no sistema arco/poça de fusão, como também adota a introdução de um arame adicional, em

temperatura ambiente, na atmosfera do arco voltaico, gerado pelo arame principal, através de um alimentador independente e um injetor conectado à tocha de soldagem. Neste sistema, o arame adicional funde-se juntamente ao arame principal, aproveitando o calor do arco gerado e/ou a energia térmica da poça de fusão, promovendo a coalescência dos consumíveis e o metal de base (CABRAL, BRAGA, *et al.*, 2015).

Diversas vantagens do processo CW-GMAW sobre os processos convencionais podem ser destacadas. Dentre elas a apresentada no trabalho de Cabral *et al.*, (2018), no qual foram utilizados arames adicionais com diferentes composições químicas. Esse implemento pode promover uma melhoria metalúrgica, resultando, por exemplo, em um aumento na dureza e resistência mecânica. Outra vantagem pode ser observada no trabalho de Ribeiro *et al.*, (2015), que ressaltou que o arame adicional pode ter diâmetro diferente do arame principal, e como o arame adicional 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, embora por outro lado, ter um diâmetro maior diminuísse a entrada de calor para a peça reduzindo o retrabalho. Pode ser citada ainda a utilização de arames maciços e tubulares, tanto como arame principal ou como arame adicional (ASSUNÇÃO, 2013).

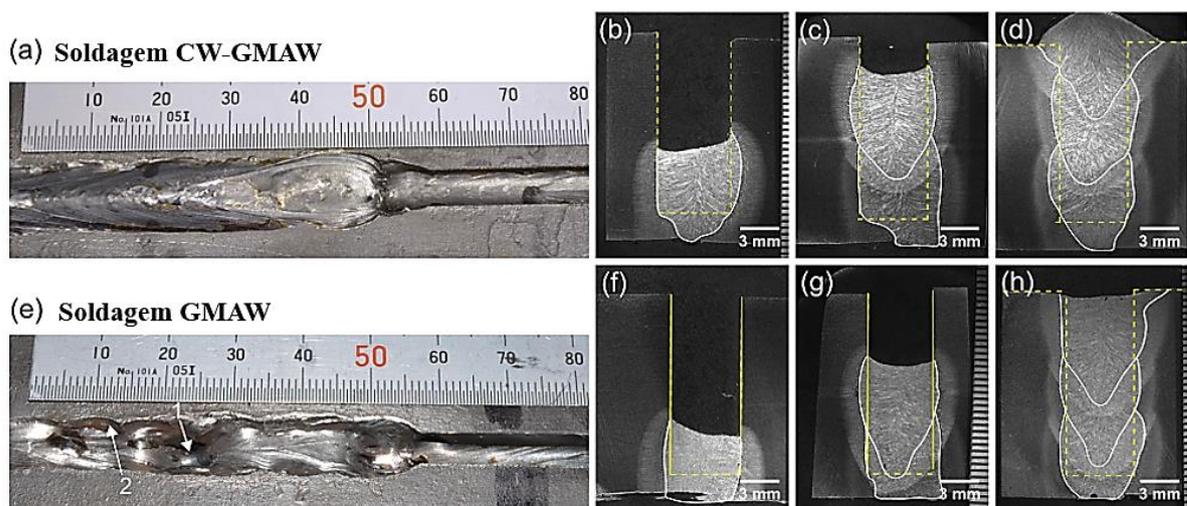
Ainda em termos de vantagens, os autores Costa *et al.*, (2017) e Marques *et al.*, (2017) apresentaram evidências em seus estudos que a utilização do processo CW-GMAW reduz a tensão residual e aumenta a resistência à fadiga, quando comparadas a amostras soldadas pelo processo GMAW e/ou FCAW. Em detalhe, a Figura 2.18 ilustra a entrada do arame não energizado na atmosfera do arco voltaico no processo CW-GMAW (CABRAL, 2019).



**Figura 2.18** – Esquema do processo CW-GMAW. **Fonte:** Adaptado de Cabral (2019).

A versatilidade e o baixo custo de aplicação do processo CW-GMAW são apresentados por Assunção *et al.*, (2017). Os autores desenvolveram estudo sobre a viabilidade da soldagem em chanfro estreito (Narrow Gap Welding - NGW) com a utilização de uma modificação com baixo custo para a realização das soldagens. A abertura de chanfro foi de 5,0 mm, contudo, compete esclarecer que já existem trabalhos que utilizaram o processo CW-GMAW com 4,0 mm de abertura (RIBEIRO, ASSUNÇÃO, *et al.*, 2019). Os materiais utilizados foram o metal de base ASTM 131 grau A, o arame AWS A5.18 ER70S-6 e o gás de proteção foi uma mistura de 85% de argônio e 15% de CO<sub>2</sub>; a soldagem foi realizada na posição 1G com alimentação adicional de arame.

Nos ensaios apresentados por Assunção *et al.*, (2017) foram observadas uma melhora na estabilidade com o processo CW em comparação ao processo GMAW, e um aumento na taxa de fusão, de 4,9 kg/h para 9,7 kg/h, promovendo um preenchimento completo com apenas três passes (raiz, enchimento e acabamento), como mostra a Figura 2.19.

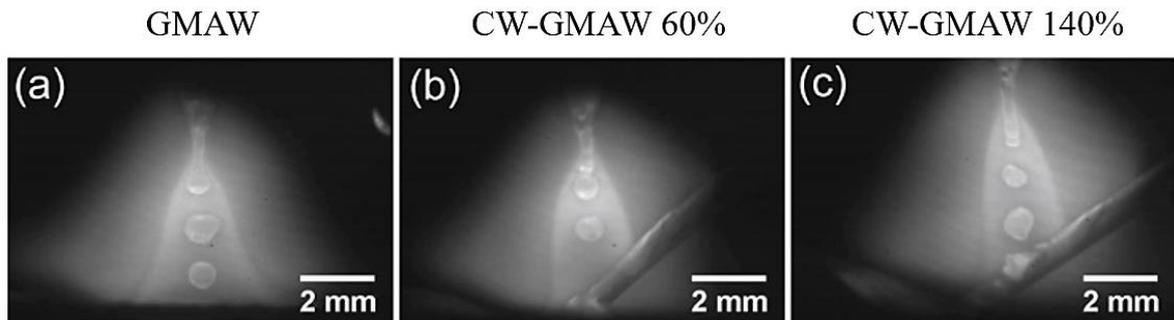


**Figura 2.19** – Aparência e seção transversal dos cordões de solda: (a), (b), (c), (d) CW-GMAW; (e), (f), (g) e (h) GMAW. **Fonte:** Adaptado de Assunção *et al.*, (2017).

Através da filmagem de alta velocidade Assunção *et al.*, (2017) constataram que, no processo GMAW, o arco se prende à parede lateral, causando erosão e levando a descontinuidades de solda mostradas na Figura 2.19e, enquanto para a soldagem CW-GMAW isso não é observado, como aponta a Figura 2.19a.

Para um maior entendimento do mecanismo de transferência metálica, Assunção *et al.*, (2017) depositaram cordões sobre uma chapa metálica com a adição de quantidades crescentes de arame adicional, conforme exibidos na Figura 2.20. Verificou-se que à medida que a quantidade de arame adicional aumenta, a posição de fixação do arco muda da poça de fusão

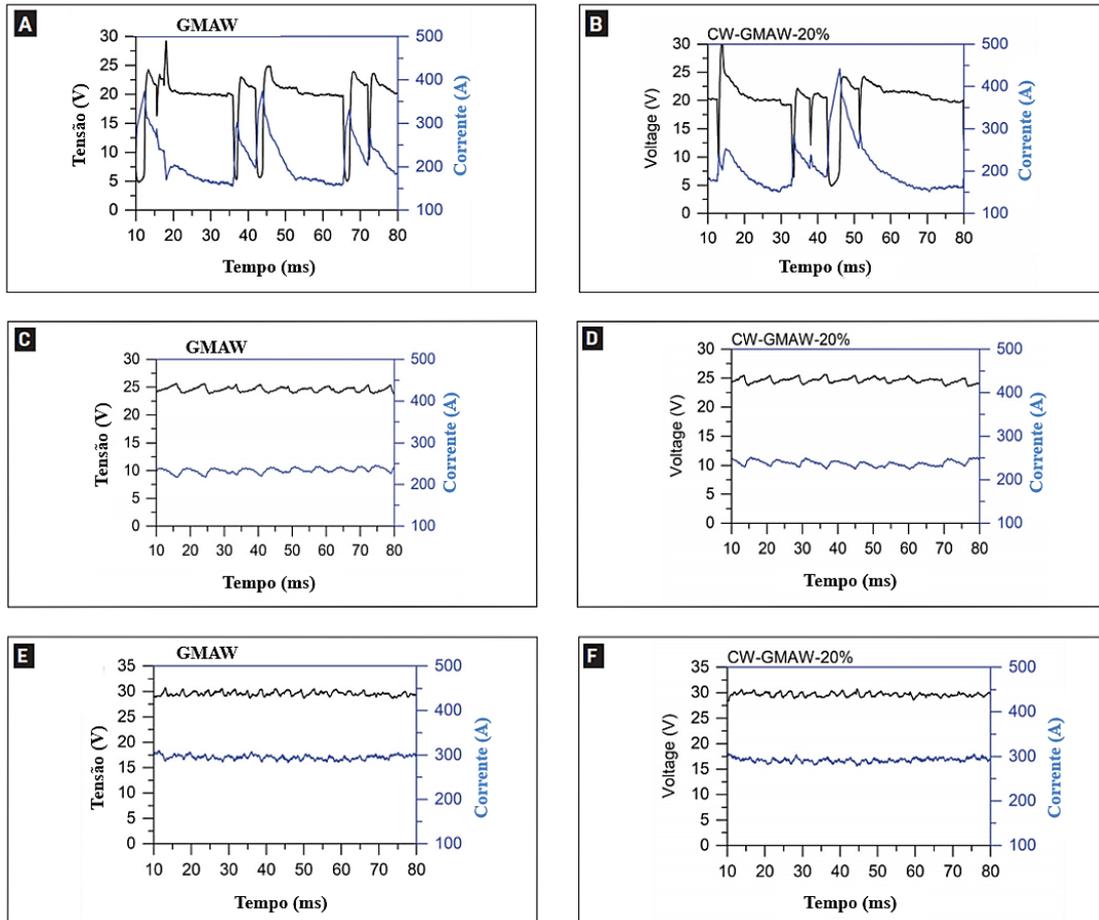
para o arame adicional promovendo maior estabilidade durante o processo de soldagem. Isto sugere que maiores taxas de arame adicional, 140% no sistema, os pontos catódicos (emissores de elétrons) se movem para o arame adicional, mostrado na Figura 2.20c. Essa mudança dos pontos de catódico possibilita uma soldagem mais estável e a introdução do arame adicional protege as paredes do chanfro da ação erosiva do arco elétrico.



**Figura 2.20** – Influência do arame adicional no ponto catódico do arco: (a) Processo GMAW, (b) e (c) Processo CW-GMAW com a adição de 60% e 140% de arame adicional, respectivamente. **Fonte:** Adaptado de Assunção *et al.*, (2017).

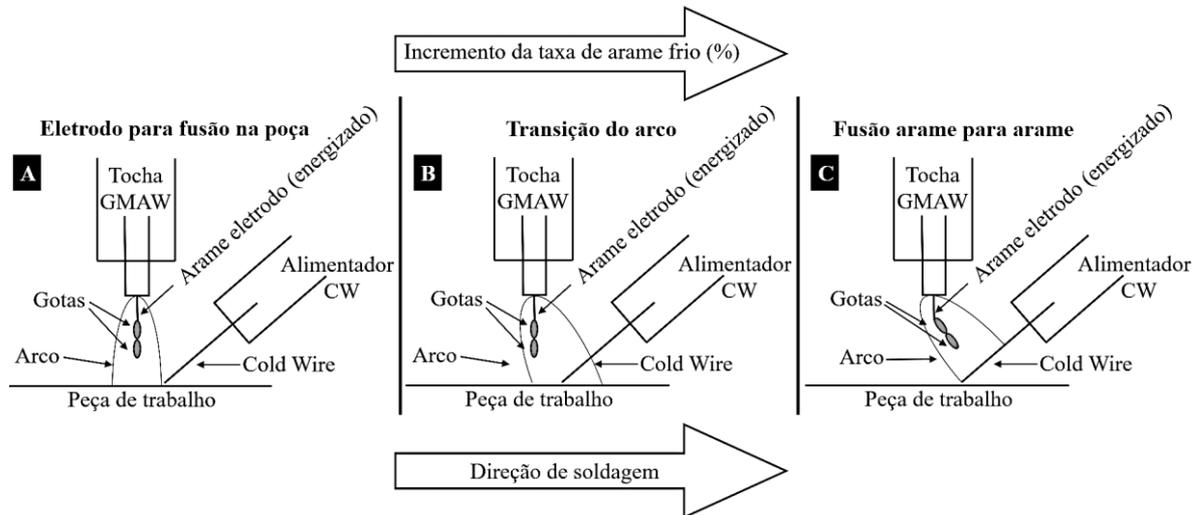
Outra proposta para o processo CW-GMAW é a apresentada por Ribeiro *et al.*, (2019b). Na referida pesquisa, os autores observaram as modificações inerentes ao processo de transferência metálica. O experimento abrangeu os modos de transferência curto-circuito, globular e spray, sendo que para os modos globular e spray foram observados níveis de energia mais altos e mais estáveis. Nesses modos houve a tendência a gerar uma poça de soldagem mais quente acomodando maiores taxas de alimentação de arame adicional; na Figura 2.21 são apresentados exemplos dos oscilogramas.

Já para o modo de transferência curto-circuito pode-se observar que, para alguns percentuais de alimentação adicional ocorreram transferências com a formação de gotículas até alcançar o curto-circuito. Esses fenômenos observados pelos autores foram atribuídos, provavelmente, à operação da fonte de energia, com base na regulação de tensão constante, sendo responsável pelo aumento da corrente com a velocidade de alimentação de arame e, conseqüentemente, um aumento na taxa de fusão do arame eletrodo para esses modos de transferência afim de manter o ponto de ajuste da tensão na fonte de energia.



**Figura 2.21** – Exemplos de oscilogramas dos modos de transferência metálica: (A) e (B) Modo curto-circuito, (C) e (D) Modo globular e (E) e (F) Modo spray. **Fonte:** Adaptado de Ribeiro *et al.*, (2019b).

Durante a soldagem, Ribeiro *et al.*, (2019b) observaram que o deslocamento do arco muda para o arame adicional, independentemente da condição de transferência metálica, conforme mostrado na Figura 2.22. Sobre as características geométricas dos cordões, foi observado que estão relacionadas à fixação do arco no arame adicional à medida que a taxa de alimentação aumenta. Isso resulta no *momentum* da gota e na pressão do arco a serem direcionados para o arame adicional semissólido que protege a poça de fusão, limitando a penetração. A esse processo denominamos *efeito de blindagem* do arame adicional.

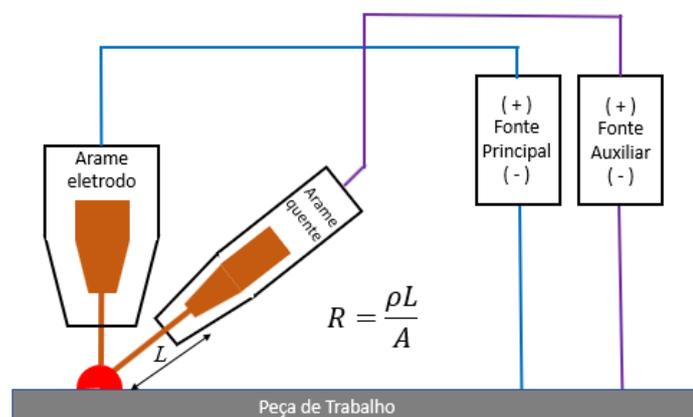


**Figura 2.22** – Posições do arco em relação ao arame adicional com diferentes taxas de alimentação: (A) Eletrodo para fusão na poça, (B) Transição de arco e (C) Arco para arame adicional. **Fonte:** Adaptado de Ribeiro *et al.*, (2019b).

## 2.5 O PROCESSO HW-GMAW (*Hot Wire - Gas Metal Arc Welding*)

O HW-GMAW é uma alternativa frequentemente utilizada para deposição de revestimento duro em estrutura sujeita a desgaste, devido a possibilidade de controle da diluição e elevada dureza do cordão depositado (GÜNTHER, 2018).

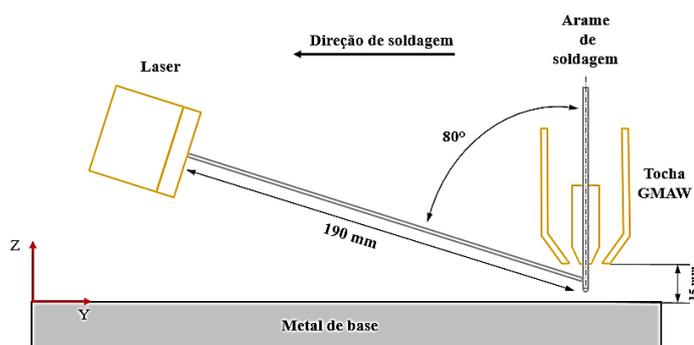
O processo é constituído de uma tocha GMAW padrão e uma fonte auxiliar que realiza o aquecimento resistivamente do fio de adição (*hot-wire*). A Figura 2.23 mostra o esquema do processo HW-GMAW, assumindo a polaridade inversa visto que, nesta condição, consegue-se maior penetração, boa estabilidade do arco, além da possibilidade de soldar com diferentes modos de transferência metálica (*curto-circuito, globular e spray*) (SOUZA *et al.*, 2009).



**Figura 2.23** – Esquema do processo HW-GMAW. **Fonte:** Adaptado de Ribeiro (2020).

O aquecimento do arame adicional tem como objetivo aumentar a taxa de deposição assim como proporcionar incrementos nos valores de diluição. O preaquecimento do arame adicional reduz a quantidade de energia necessária para fundir o arame, aumentando assim a eficiência do processo, permitindo maiores taxas de deposição com maiores velocidades de soldagem (ALI, GUENTHER, *et al.*, 2015). Dependendo da polaridade do arame aquecido, ele poderá atrair ou repelir o arco elétrico. Como de costume, assumindo o eletrodo na polaridade inversa, a polaridade direta do arame aquecido repelirá o arco, caso contrário, atrairá (GÜNTHER, 2018). Vale ressaltar que os parâmetros intrínsecos dos processos de soldagem possuem, cada um, sua importância e, se alteradas em conjunto ou individualmente, promovem resultados distintos, de forma que o efeito dos parâmetros sobre a morfologia dos cordões de solda pode gerar diversos resultados de acordo com a metodologia empregada para cada trabalho analisado.

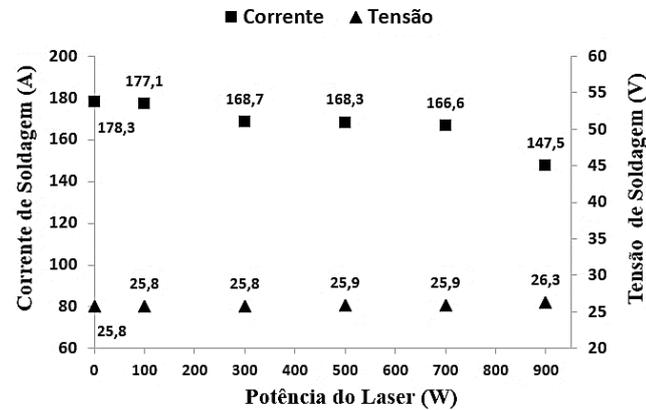
Os processos HW-GMAW e HW-GTAW possuem funcionamento semelhante quanto ao método usado no preaquecimento do arame adicional, mostrados no item 2.3, contudo, já existem pesquisas utilizando o laser como fonte de energia para fazer o preaquecimento do arame adicional no processo GMAW (ALI, GUENTHER, *et al.*, 2015), como mostra a Figura 2.24.



**Figura 2.24** – Esquema do laser de preaquecimento para o processo HW-GMAW. **Fonte:** Adaptado de Ali *et al.*, (2015).

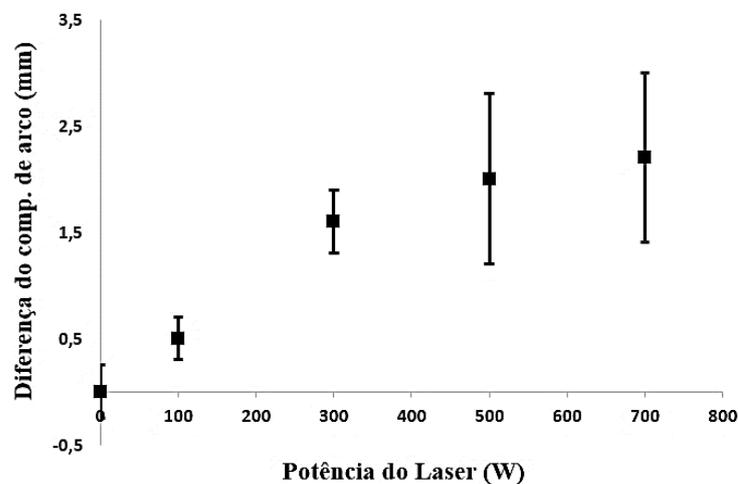
Em seus estudos Ali *et al.*, (2015) investigaram os efeitos do preaquecimento do arame de alimentação no processo GMAW sobre as características no cordão depositado, concentrando um feixe de laser diretamente no metal de adição, logo após o bico de contato. Esse preaquecimento reduziu a corrente de soldagem, como pode ser percebido na Figura 2.25, necessária para fundir o metal de adição, diminuindo a entrada de calor como também a diluição, tendendo a melhorar a eficiência do revestimento sem alterar a taxa de alimentação do

arame e mantendo a voltagem de forma constante. Com o preaquecimento foi obtida uma redução de 17% da entrada de calor, com 900 W de potência de laser.

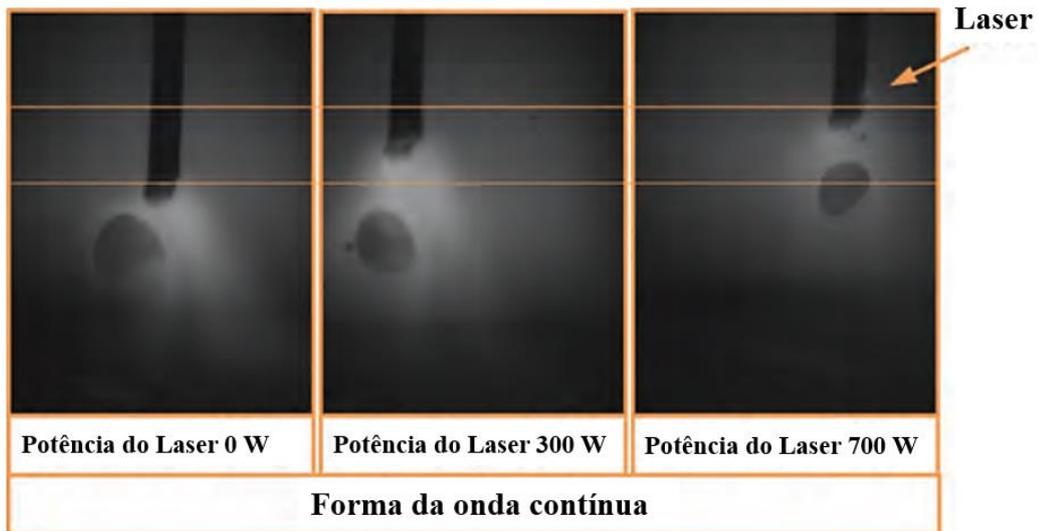


**Figura 2.25** – Influência da potência do laser na corrente e tensão de soldagem. **Fonte:** Adaptado de Ali *et al.*, (2015).

A diminuição da corrente de soldagem acompanha o aumento da tensão de soldagem, que aparece como um aumento no comprimento do arco, vide a Figura 2.26. Como resultado, a entrada de calor no substrato diminuiu, levando a uma diluição reduzida. Devido ao preaquecimento a laser do metal de adição, esse processo de controle é interrompido. A distância entre as duas linhas na Figura 2.27 representa o crescimento do comprimento do arco, mas também a redução da extremidade do arame livre. Dessa forma, o comprimento do arco não pode retornar à sua posição original, apesar da redução na corrente de soldagem e da alimentação constante do arame de soldagem.



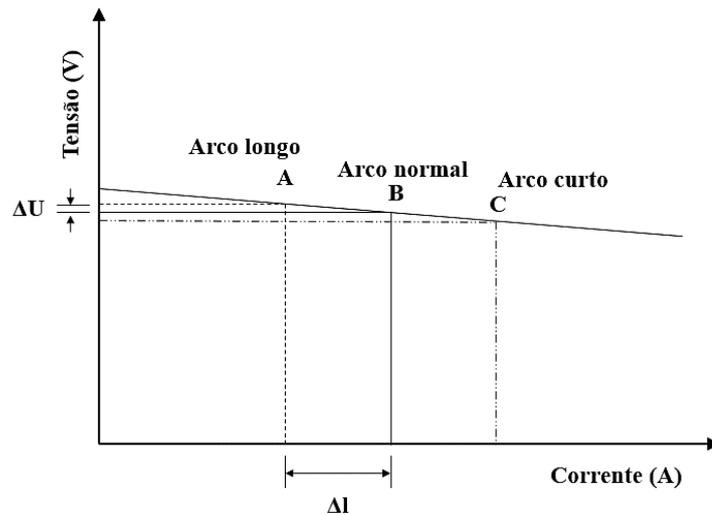
**Figura 2.26** – Influência da potência do laser no comprimento de arco. **Fonte:** Adaptado de Ali *et al.*, (2015).



**Figura 2.27** – A potência do laser no comprimento de arco. **Fonte:** Adaptado de Ali *et al.*, (2015).

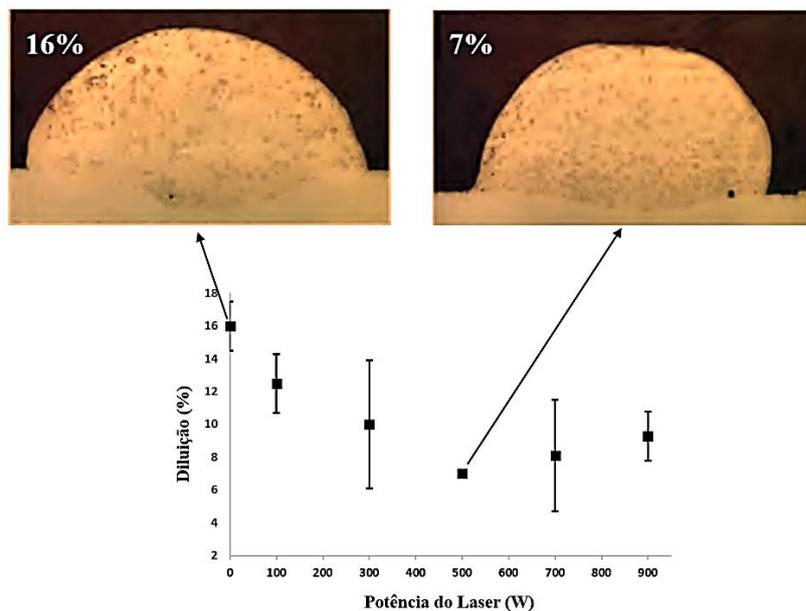
Ali *et al.*, (2015) exemplificam o entendimento do efeito do preaquecimento a laser no processo GMAW. Em primeiro lugar, deve-se saber que a fonte de energia de soldagem com características de tensão constante exerce controle na saída de tensão e corrente. A Figura 2.28 apresenta o comportamento entre a tensão e a corrente para uma fonte de energia de tensão constante.

A corrente de soldagem é determinada pela taxa de alimentação do arame, de modo que uma mudança espontânea na velocidade de alimentação alterará o comprimento do arco devido à taxa de fusão, que por sua vez altera o valor de corrente de soldagem. O feixe de laser focado no metal de adição facilita a fusão do arame e diminui a porção de energia do arco, usada para fundir o metal de adição. Como resultado houve um aumento no comprimento do arco e uma diminuição na corrente de soldagem. De acordo com o processo de controle da fonte de energia, um aumento do comprimento do arco, por exemplo, devido a alterações geométricas do cordão, deve levar a uma diminuição da corrente de soldagem, conforme visualizado na Figura 2.28. Essa redução do valor de corrente por uma taxa de alimentação constante do arame tende a diminuir a taxa de fusão para que o comprimento do arco retorne à sua posição normal.



**Figura 2.28** – Características elétricas de uma fonte tipo tensão constante. **Fonte:** Autor (2021).

O aumento na taxa de fusão aumenta o comprimento do arco e diminui a extremidade livre do eletrodo. Como resultado, a entrada total de calor no metal base diminui, o que leva a uma redução da diluição, como mostra a Figura 2.29. Essa redução na diluição não afetou a largura do cordão de solda como esperado, o que pode ser explicado pelo aumento do comprimento do arco, ampliando a distribuição do arco, conseqüentemente, o cordão de solda.

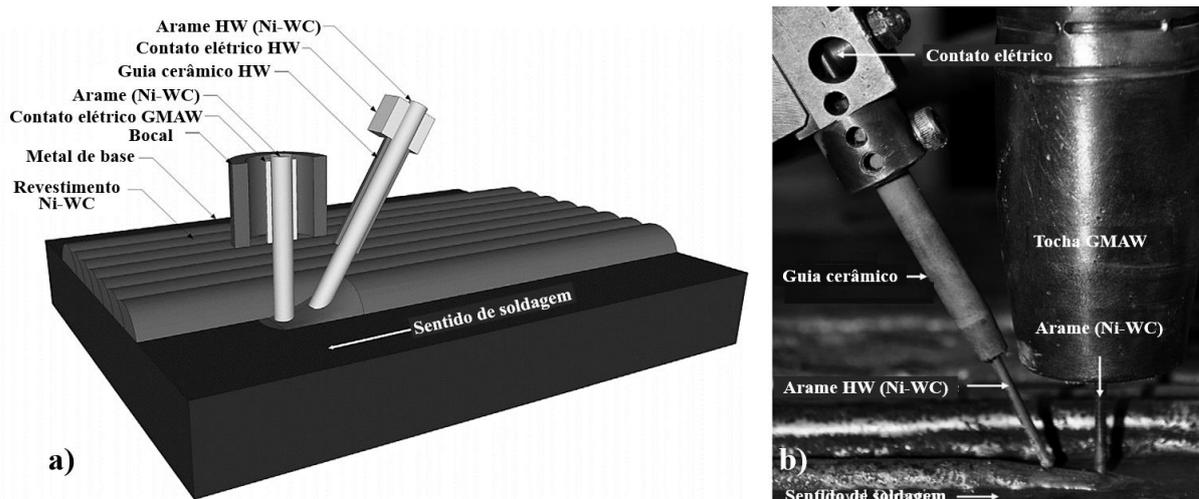


**Figura 2.29** – Influência da potência do laser na diluição. **Fonte:** Adaptado de Ali *et al.*, (2015).

Segundo estudos de Mendez *et al.*, (2014), o processo HW-GMAW tem se mostrado promissor para a soldagem em chanfro estreito ou no depósito de revestimentos resistentes à corrosão, sendo que, neste processo, o material de enchimento pré-aquecido reduz a energia do

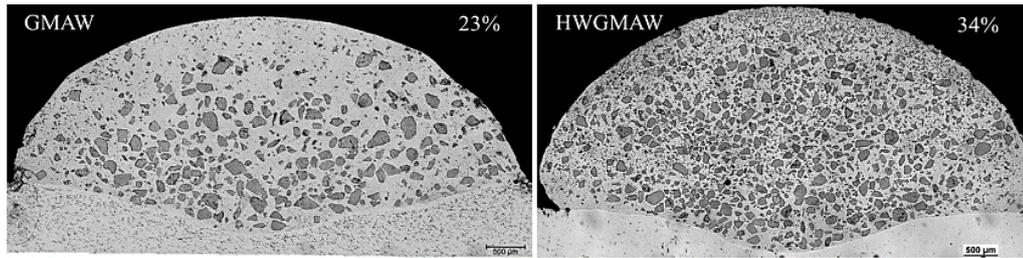
arco principal necessária para a fusão do eletrodo e a fusão da peça teste e, por sua vez, criando uma poça de fusão mais fria. Mendez *et al.*, (2014) consideram que o processo HW-GMAW com a utilização de arames de Ni-WC é um processo viável industrialmente, sendo utilizadas taxas que podem variar de 4,5 kg/h a 11,4 kg/h ou mais, dependendo da seleção dos consumíveis. Os referidos autores consideram que o avanço no desenvolvimento de fontes de soldagem inversoras, com manipulação avançada de formas de onda, permite a crescente utilização no processo HW.

Os aparatos e as fontes de soldagem usadas no processo HW-GMAW, conforme mostrado na Figura 2.30, exercem uma pequena fração sobre os gastos de capital em comparação com os sistemas de revestimento a laser ou PTAW, comumente utilizados no processo de revestimento duro ou para proteção contra corrosão. Essa alternativa de baixo custo pode permitir que pequenos e médios fabricantes produzam revestimentos de alto valor agregado.

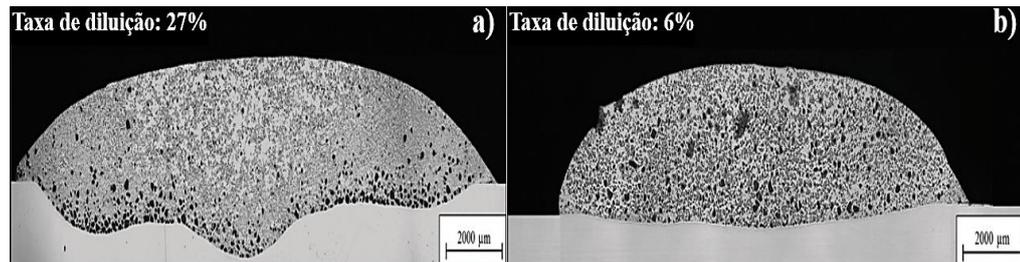


**Figura 2.30** – Exemplo do processo de soldagem HW-GMAW: a) Esquema para o revestimento da placa teste e b) Arranjo da tocha de soldagem, injetor de arame HW e consumíveis. **Fonte:** Adaptado de Mendez *et al.*, (2014).

Pesquisas realizadas por Mendez *et al.*, (2014), Gunther *et al.*, (2018) e Schreiber *et al.* (2018) para o processo HW-GMAW apresentaram revestimentos com baixa diluição, contudo, houve um aumento no volume de carbeto gerados, vide Figura 2.31, sem dissolução prejudicial de carboneto e diminuição da taxa de diluição, vide Figura 2.32. O preaquecimento do arame adicional diminuiu os valores de corrente de soldagem e penetração, entretanto, manteve as propriedades de resistência à corrosão do revestimento.

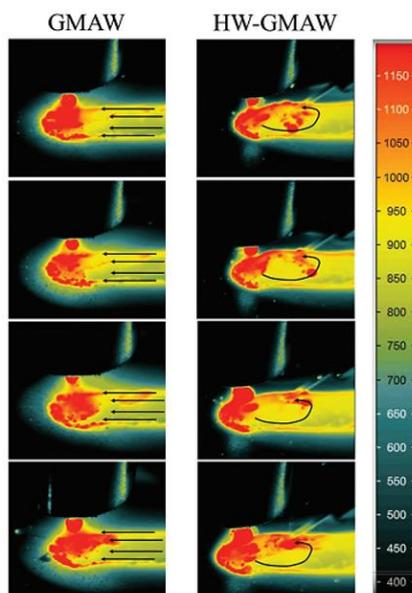


**Figura 2.31** – Comparação do volume de carbetos gerados entre os processos GMAW e HW-GMAW.  
**Fonte:** Mendez *et al.*, (2014).



**Figura 2.32** – Comparação da diluição entre os processos: (a) GMAW e (b) HW-GMAW para uma taxa total da velocidade de alimentação de 10 m/min. **Fonte:** Adaptado de Gunther *et al.*, (2018).

Gunther *et al.*, (2018) apresentam o gradiente térmico dos processos GMAW e HW-GMAW. Na Figura 2.33 é mostrado que a inserção do arame adicional aquecido provoca uma tendência de fluxo circular promovendo condições para que haja uma mistura homogênea na matriz metálica. No entanto, existem condicionantes para que haja uma completa distribuição de microconstituintes: um fluxo de fusão modificado, que promova a homogeneidade da mistura do material fundido; a existência de uma parcela de fase mais dura, suficientemente alta para servir de barreira contra uma segregação subsequente; e que os microconstituintes sejam inseridos tanto pelo arame principal quanto pelo arame adicional aquecido.



**Figura 2.33** – Modificação do fluxo de fusão devido a uma aplicação de um arame adicional aquecido. **Fonte:** Adaptado de Gunther *et al.*, (2018).

## 2.6 CAMPOS MAGNÉTICOS VERSUS ARCOS DE SOLDAGEM

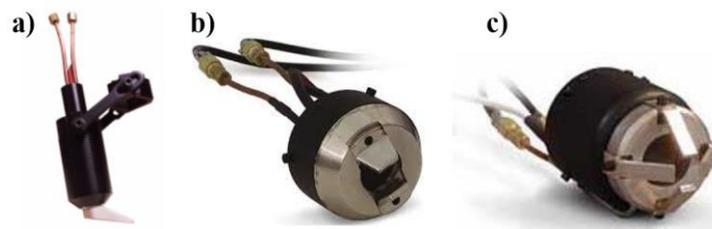
Os campos magnéticos gerados pelos arcos de soldagem são fenômenos muitas vezes ligados a problemas de desvio do arco, de tal forma que o arco tende a perder a sua conexão com a peça de trabalho, contudo ele pode ser utilizado de forma positiva. O campo magnético formado no arco de soldagem é um dos responsáveis pela formação de jato do plasma, que tem efeitos na penetração do cordão de solda.

A ideia de usar um campo magnético para oscilar o arco de soldagem foi patenteada na década de 60, sendo aprimorada até os dias atuais (MARQUES, 1984; JOSE, KUMAR, *et al.*, 2016). Além desse fato, Campos Magnéticos Externos (CME) têm sido usados para oscilar arcos de soldagem, substituindo dispositivos mecânicos em aplicações de revestimento, por exemplo.

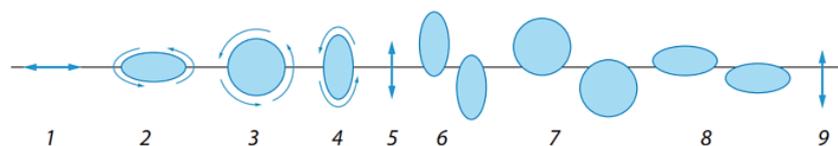
De acordo com Natividad *et al.*, (2017) a aplicação de CME durante o processo de soldagem melhora as propriedades mecânicas e de corrosão dos aços inoxidáveis, ligas de alumínio, outros aços e ligas.

Em princípio, um CME aplicado a poça de fusão, induz agitação eletromagnética e altera os padrões de convecção dentro da poça. Essa perturbação modifica o modo de solidificação e pode levar a um efeito de refinamento de grão no cordão de solda. Os mecanismos pelos quais essas mudanças ocorrem são dependentes da natureza química da liga.

Diferentes osciladores de CME são apresentados na Figura 2.34. Por meio da Figura 2.34a pode-se observar que uma sonda com uma única ponta funciona bem em espaços livres e é usada principalmente para tecer o arco ou para estabilizá-lo; a Figura 2.34b apresenta uma sonda de ponta dupla usada em tochas GTAW convencionais e a Figura 2.34c mostra uma sonda com quatro bobinas magnéticas controladas independentemente. Conforme ilustrado na Figura 2.35, este tipo de dispositivo permite que vários perfis de arco sejam produzidos.



**Figura 2.34** – Diferentes configurações de osciladores magnéticos. **Fonte:** ARCPRODUCTS (2011).



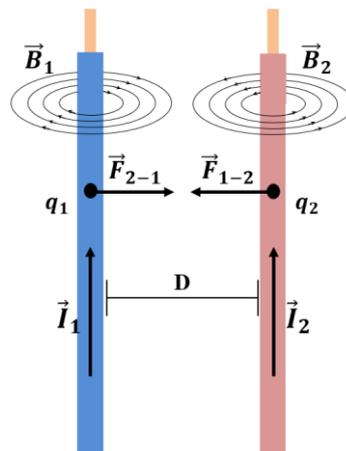
- |  |   |
|--|---|
| <p>1 Oscilação em linha reta ao longo do cordão.</p> <p>2 Padrão elíptico ao longo do cordão – simétrico.</p> <p>3 Padrão circular – simétrico.</p> <p>4 Padrão elíptico na transversal do cordão – simétrico.</p> <p>5 Oscilação em linha reta, na transversal do cordão.</p> | <p>6 Padrão elíptico de tecimento transversal em deslocamento.</p> <p>7 Padrão circular de tecimento em deslocamento.</p> <p>8 Padrão elíptico de tecimento ao longo do cordão em deslocamento.</p> <p>9 Oscilação linear transversal ao longo do cordão.</p> |
|--|---|

**Figura 2.35** – Múltiplas condições de arco obtidas pelo uso da oscilação magnética. **Fonte:** ARCPRODUCTS (2011).

Vários autores desenvolvem modelos de CME aplicados à soldagem (SUN, WANG, *et al.*, 2016; WU, CHANG, *et al.*, 2017; BASKORO, FAUZIAN, *et al.*, 2018; LIU, CHEN, *et al.*, 2018; LIU, LI, *et al.*, 2019; WEINGRILL, SCHWALD, *et al.*, 2019; SPANIOL, TRAUTMANN, *et al.*, 2020). Atualmente, as pesquisas têm enfoque nas influências da CME na forma do arco, transferência metálica, formação do cordão, microestrutura, propriedades do cordão de solda e da zona afetada pelo calor, aplicações em soldagem de chanfro estreito e soldagem de trilhos.

Para o melhor entendimento da natureza das forças eletromagnéticas geradas pelos arcos elétricos é importante considerar segundo definições encontradas na AWS (1987) que os arcos elétricos são condutores gasosos que transformam energia em calor. Para dois condutores

percorridos por um fluxo de corrente (Figura 2.36), as forças eletromagnéticas resultantes geram campos magnéticos cuja intensidade é dada pela equação 2.1, sendo  $\mu_0$  a permeabilidade magnética no meio,  $I$  é o valor de corrente correspondente a cada condutor e  $D$  é a distância entre os condutores (MARTINS, 1975; LANCASTER, 1994; HAYT, BUCK, 2013). Como resultado da interação entre os campos formados, quando o fluxo de corrente tiver o mesmo sentido, a força entre os condutores será de atração, porém quando o fluxo tiver sentido contrário, os condutores serão mutuamente repelidos.

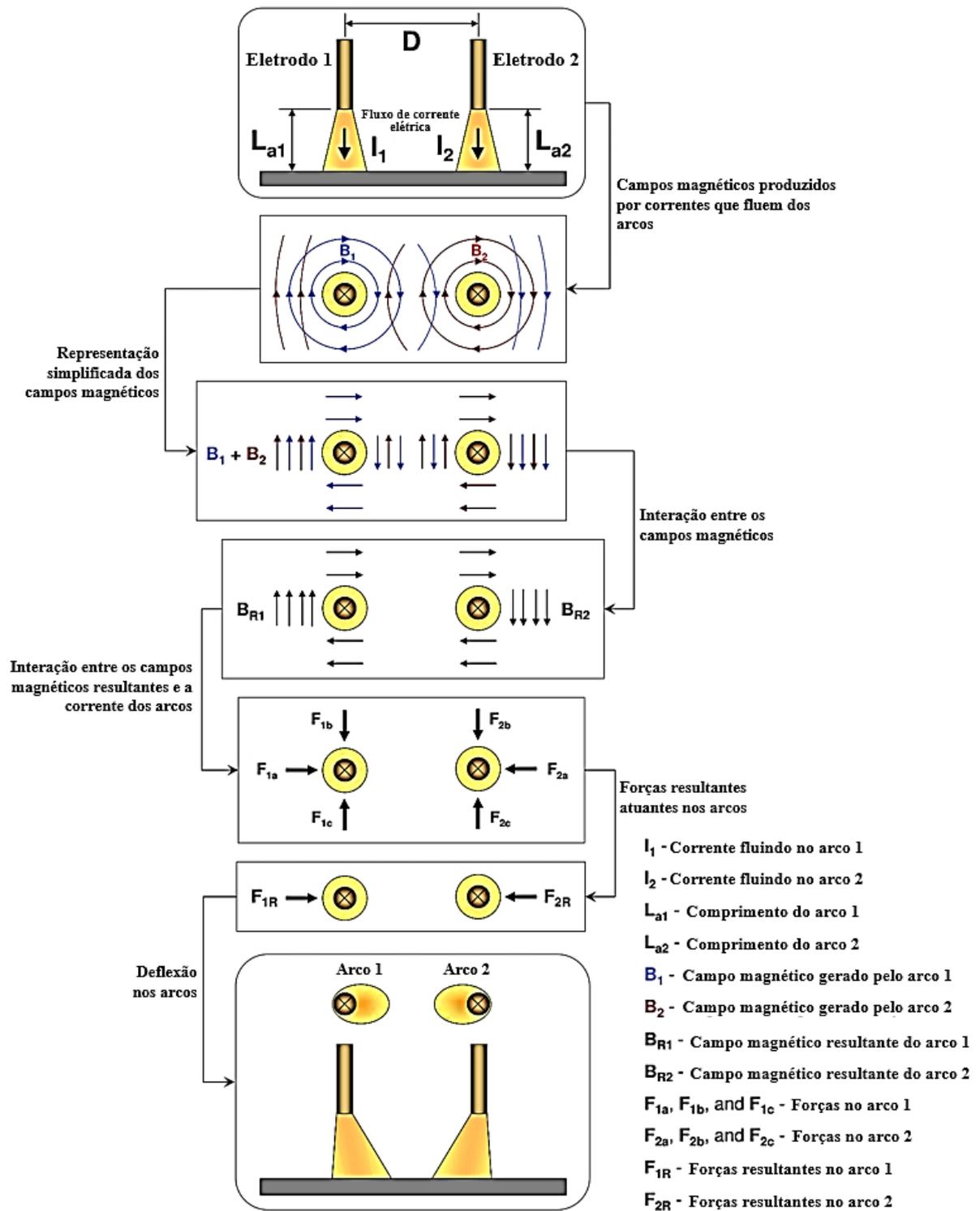


**Figura 2.36** – Interação do campo magnético entre dois fios condutores paralelos entre si com fluxo de corrente no mesmo sentido. **Fonte:** Autor (2022).

$$B = \frac{\mu_0 * I}{2\pi D} \quad (2.1)$$

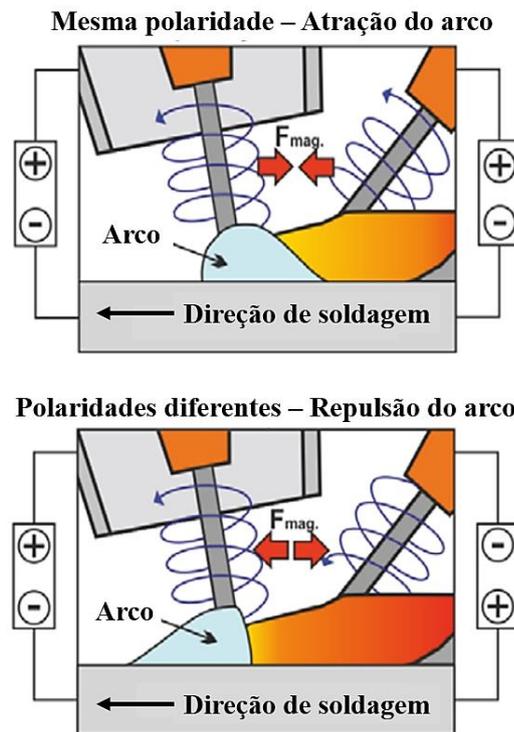
Neste contexto, para o processo HW-GMAW, objeto deste estudo, caracterizado pela inserção de um arame energizado por efeito Joule no sistema arco elétrico/poça, provavelmente haverá uma interação entre os campos magnéticos gerados pelo arco e pelo arame energizado pela passagem da corrente elétrica.

Analogamente, Reis (2009) apresenta em seu trabalho uma representação do efeito do campo magnético sobre os arcos do processo de soldagem. A interação de dois arcos de soldagem paralelos com corrente fluindo na mesma direção, ou seja, na mesma polaridade, é apresentada na Figura 2.37. O resultado dessa interação é a deflexão de ambos os arcos, ocorrendo a atração de um arco para o outro (os arcos se repeliriam se a corrente fluísse em direções opostas em cada um deles).



**Figura 2.37** – Esquema de como ocorre a deflexão de dois arcos paralelos com uma corrente fluindo na mesma direção (mesma polaridade). **Fonte:** Adaptado de Reis (2009).

Schreiber, Allebrodt e Erpel (2018) realizaram pesquisas sobre o processo HW-GMAW para revestimentos resistentes a desgaste e corrosão. Os autores observaram que o campo magnético produzido pelo arame HW pode prejudicar a estabilidade do processo se a distância dos arames for muito pequena, quando utilizado um comprimento de arco igualmente curto. Foi também observado alterações no arco imposto pelos campos magnéticos ao se utilizar diferentes sentidos de corrente no sistema, fato igualmente relatado por Reis (2009). A Figura 2.38 apresenta um esquema da influência dos campos magnéticos sobre a posição do arco em diferentes polaridades.



**Figura 2.38** – Influência dos campos magnéticos sobre a posição do arco em diferentes polaridades. **Fonte:** Adaptado de Schreiber, Allebrodt e Erpel (2018).

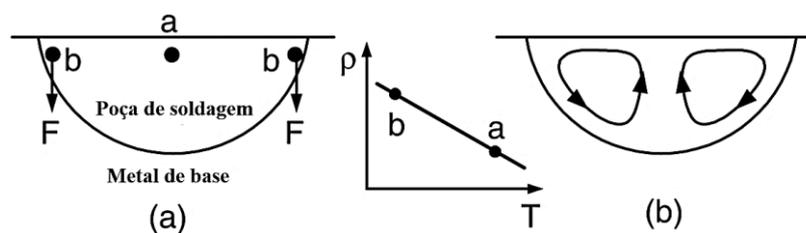
### 2.6.1 Forças motrizes para um fluxo fluido na poça de soldagem

Kou (2003) classificou as forças motrizes na poça de soldagem como força de flutuação, força de Lorentz, tensão de cisalhamento induzida pelo gradiente de tensão superficial na superfície da poça de soldagem e a tensão de cisalhamento que atua na superfície da poça pela ação do arco de plasma. Outra força considerada foi a força devido à pressão do arco, contudo, seu efeito sobre o fluxo fluido é pequeno. Essas forças motrizes são incluídas nas equações de governo ou como condições de contorno na modelagem computacional do fluxo de fluido na poça de soldagem. A seguir é apresentado esquematicamente o efeito de cada força sobre o

fluxo fluido existente na poça de fusão. As considerações são convenientemente realizadas com base em soldagens GTAW, todavia, a representação das forças pode ser realizada em processos em que ocorra a transferência metálica, fazendo as devidas considerações para cada processo.

a) Força de empuxo

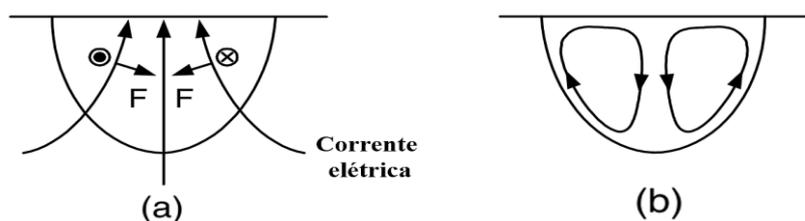
Considera-se que a densidade do metal líquido  $\rho$  diminui com o aumento da temperatura  $T$ . Como a fonte de calor está localizada acima do centro da superfície da poça, o metal líquido é mais quente no ponto **a** e mais frio no ponto **b**. O ponto **b** fica próximo ao limite da poça, onde a temperatura é mais baixa. Como observado na Figura 2.39a, a gravidade faz com que o metal líquido mais pesado no ponto **b** afunde. Conseqüentemente, o metal líquido desce ao longo do limite da poça e sobe ao longo do eixo central da poça, como mostra a Figura 2.39b.



**Figura 2.39** – Esquema da atuação das forças de flutuação. **Fonte:** Adaptado de Kou (2003).

b) Força de Lorentz

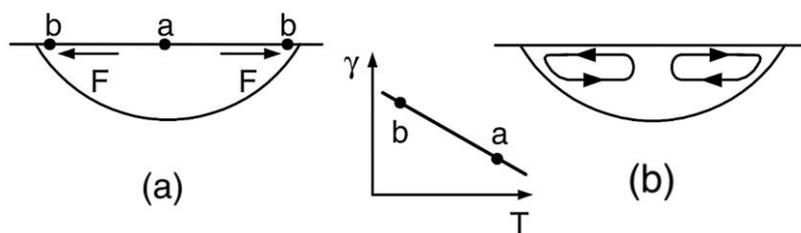
A corrente elétrica na peça de trabalho converge para o eletrodo (sentido convencional da corrente) e, portanto, próximo ao centro da superfície da poça de soldagem. Esse campo de corrente convergente, juntamente com o campo magnético que ele induz, gera a força de Lorentz para baixo e para dentro, como apresentado na Figura 2.40a. Dessa forma, o metal líquido é empurrado para baixo ao longo do eixo da poça e sobe ao longo do limite da poça, como mostra a Figura 2.40b. A área na superfície da poça onde a corrente elétrica passa é chamada de ponto do ânodo.



**Figura 2.40** – Esquema da atuação da força Lorentz. **Fonte:** Adaptado de Kou (2003).

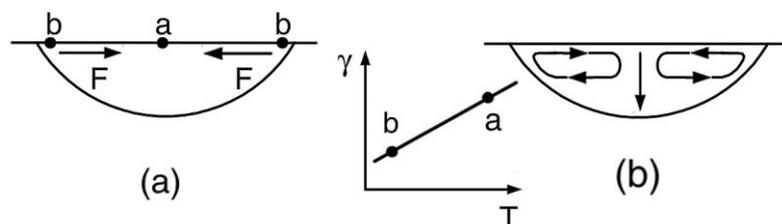
c) Tensão de cisalhamento induzida pelo gradiente de tensão superficial - Efeito Marangoni

Na ausência de um agente ativo de superfície, a tensão superficial ( $\gamma$ ) do metal líquido diminui com o aumento da temperatura ( $T$ ), ou seja,  $\partial\gamma/\partial T < 0$ . Como mostrado na Figura 2.41a o metal líquido mais quente com uma tensão superficial mais baixa no ponto **a** é puxado para fora pelo metal líquido mais frio com uma tensão superficial mais alta no ponto **b**. Em outras palavras, uma tensão de cisalhamento externa é induzida na superfície da poça pelo gradiente de tensão superficial ao longo da superfície da poça. Isso faz com que o metal líquido flua do centro da superfície da poça para a borda e retorne abaixo da superfície, como mostra a Figura 2.41b. A convecção acionada por tensão superficial também é chamada de convecção termocapilar ou convecção de Marangoni.



**Figura 2.41** – Esquema da atuação da tensão de cisalhamento causada pelo gradiente de tensão superficial. **Fonte:** Adaptado de Kou (2003).

Mills e Keene (1990) relatam que alterações na superfície da junta podem promover micro modificações na composição química da poça de fusão, causando a inversão do gradiente de tensão superficial, gerando a inversão do movimento de metal líquido, da região de menor para a de maior tensão superficial, ou seja,  $\partial\gamma/\partial T > 0$ , Figura 2.42a. Assim sendo, devido a convecção, o metal mais aquecido, no centro da poça de soldagem, é direcionado para o fundo da poça, ocasionando a redução da largura do cordão e aumento na penetração, conforme mostra a Figura 2.42b.



**Figura 2.42** – Esquema da atuação do mecanismo do efeito Marangoni para  $\partial\gamma/\partial T > 0$ . **Fonte:** Adaptado de Mills e Keene (1990).

d) Tensão de cisalhamento induzida pelo jato de plasma

A movimentação do fluxo do plasma do centro para as extremidades em alta velocidade ao longo da superfície da poça de soldagem tende a exercer uma tensão de cisalhamento externa, apresentada na Figura 2.43a. Essa tensão de cisalhamento faz com que o metal líquido flua do centro da superfície da poça para a borda da poça de fusão e retornando abaixo da superfície da poça, conforme mostrado na Figura 2.43b.



**Figura 2.43** – Esquema da atuação da tensão de cisalhamento causada pelo plasma do arco. **Fonte:** Adaptado de Kou (2003).

Pesquisas realizadas por Eisazadeh, Haines e Torabizadeh (2014) mostraram que vários autores consideram que a força de flutuação e a força eletromagnética não desempenham papéis importantes na determinação do padrão de movimentação do fluxo formado na poça de soldagem. Trabalhos baseados em simulação numérica determinaram que a movimentação de fluxo dominante da poça de soldagem devido à força da tensão superficial é mínima na gravidade da terra (KOU, SINDO, SUN, 1985). Já Goodarzi *et al.* (1998) descobriram que a flutuabilidade e as forças eletromagnéticas não são um fator na determinação do padrão de fluxo da poça de soldagem. No entanto, o padrão de fluxo na poça de soldagem foi determinado pela magnitude relativa da tensão de cisalhamento do gás, da tensão superficial e do sinal da tensão superficial.

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGIA

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em virtude da necessidade de instrumentos de aquisição de dados que possibilitassem a realização de um estudo mais detalhado da influência dos parâmetros de soldagem na dinâmica de transferência metálica através do arco elétrico na poça de fusão e seus reflexos no cordão de solda, a pesquisa foi desenvolvida em duas fases (Experimento I e II).

A primeira fase dos experimentos foi realizada nas dependências do *Laboratório de Caracterização de Materiais Metálicos* (LCAM-UFPA) que disponibilizou equipamentos para as análises das características intrínsecas dos cordões. O conhecimento limitado sobre a dinâmica do arco associado e sua influência na geometria do cordão são fatores importantes para o completo entendimento do processo HW-GMAW, dessa forma, uma nova bateria de experimentos foi realizada para sanar as dúvidas que surgiram ao longo do experimento I. Esta fase da pesquisa usando o processo HW-GMAW (Experimento II) teve o apoio do *Centre for Advanced Materials Joining* (CAMJ) da Universidade de Waterloo, cidade de Ontario, Canadá, que disponibilizou a utilização de diversos equipamentos, com destaque para a câmera de filmagem de alta velocidade, possibilitando a captura de imagens em alta velocidade durante o processo de soldagem sincronizadas com a aquisição de corrente e tensão para estudar a dinâmica do arco, essencial para obtenção de informações sobre a geometria do cordão de solda.

#### 3.2 EXPERIMENTO I – INFORMAÇÕES PRELIMINARES

Esta fase da pesquisa teve como objetivo o estudo do processo GMAW e suas variantes CW e HW-GMAW, inicialmente com o levantamento dos melhores parâmetros de soldagem usando o processo GMAW, tais como, velocidade de soldagem, sentido de deslocamento da tocha, e com os processos CW e HW-GMAW, a taxa de arame adicional, corrente de aquecimento e suas interações na formação de um cordão de solda aceitável em termos de sanidade superficial, com bom aspecto visual, regularidade geométrica e isento de discontinuidades. Posteriormente foram realizados cordões de solda em um substrato por simples deposição para investigação da influência da corrente de aquecimento e do arame adicional na geometria final do cordão de solda.

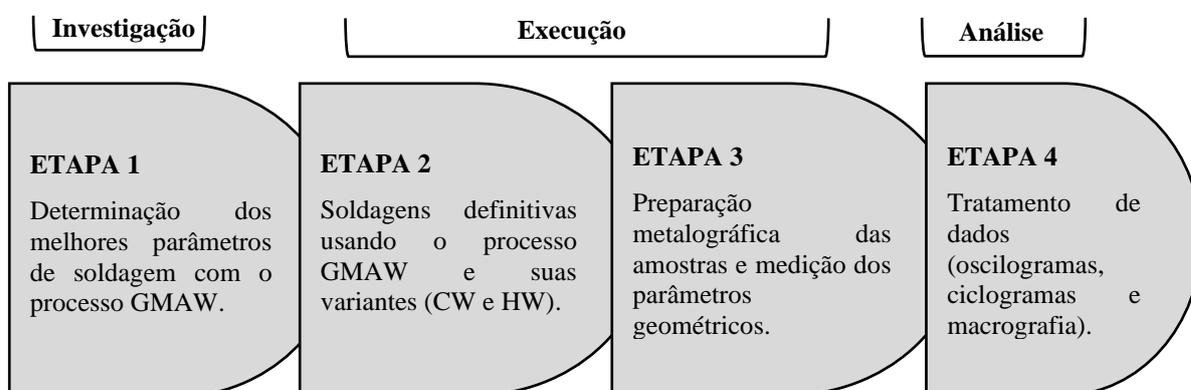
### 3.2.1 Consumíveis, equipamentos e metodologias utilizados nos processos de soldagem

Para levantamento de parâmetros de soldagem e realização final do experimento nesta fase, em função da grande aplicação na indústria naval da região, utilizou-se o aço ASTM 131 Grau A que apresenta alta resistência a tração e escoamento e boa soldabilidade. O metal de base usado foi na forma de barra chata, nas dimensões de 225,0 mm de comprimento por 56,0 mm de largura por 9,5 mm de espessura. Os arames empregados no experimento foram o de classe AWS ER70S-6, conforme classificação da norma AWS 5.18, nos diâmetros de 1,2 mm e 1,0 mm para o arame eletrodo e arame adicional, respectivamente. A seleção deste consumível está relacionada às suas características de elevada produção, facilidade de manutenção do arco e, em especial a sua adequação experimental ao processo de soldagem com alimentação de arame frio e quente. Além disso, trata-se de arame largamente utilizado em diversas aplicações na indústria metal-mecânica, na soldagem de aços de baixo carbono e por ser baixo custo de aquisição. A Tabela 3.1 fornece a composição química nominal do metal de base e dos arames eletrodo e de adição.

**Tabela 3.1** - Composição química (% em peso) do metal base e dos arames de solda - Experimento I. **Fonte:** AWS.A5.18/A5.18M (2005); ASTM A 131/A131M (2013).

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe
ASTM 134-A	0,126	0,215	0,779	0,015	0,005	0,018	Bal.
ER70S-6	0,15	1,15	1,85	0,025	0,035	0,05	Bal.

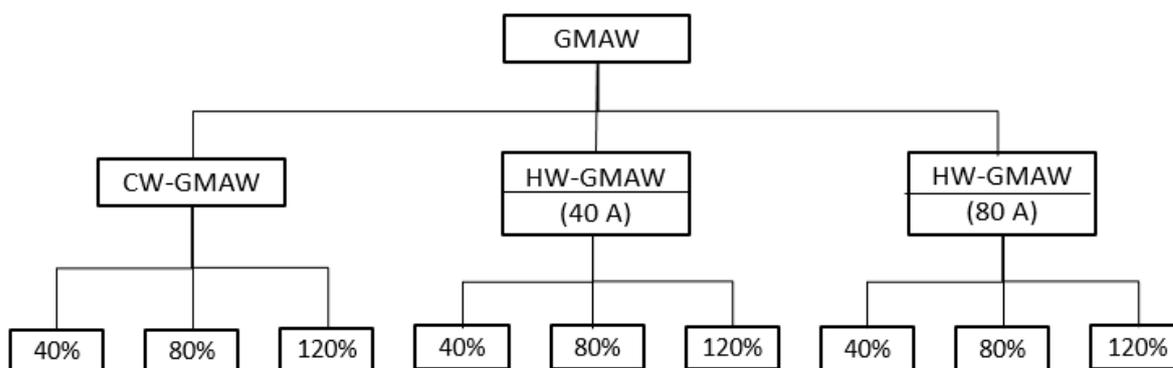
O procedimento para execução do experimento foi dividido em quatro etapas, conforme mostrada na Figura 3.1.



**Figura 3.1** – Etapas de execução do experimento I. **Fonte:** Autor (2022)

O experimento teve início com o processo GMAW convencional para identificar as melhores condições de comportamento do arco elétrico e regularidade na transferência metálica, além de análises visuais sobre o acabamento do cordão de solda, imperfeições e geração de salpicos. Em seguida, a célula de trabalho foi organizada para o processo CW-GMAW variando a taxa de adição de arame em 40%, 80% e 120% da velocidade ao arame eletrodo. Mantendo a taxa de adição de arame do processo anterior foi empregado o processo HW-GMAW com as correntes de 40 A e 80 A, conforme organograma mostrado na Figura 3.2.

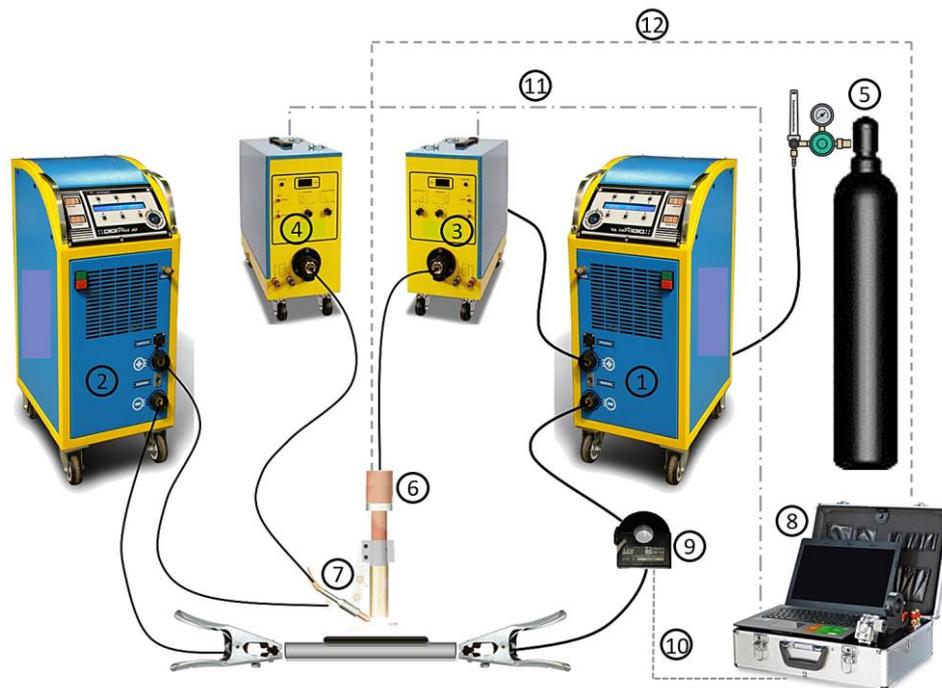
Para cada parâmetro estudado (Tabela 3.2) foram geradas três amostras, uma definitiva e duas réplicas, resultando em dez seções transversais que foram examinadas.



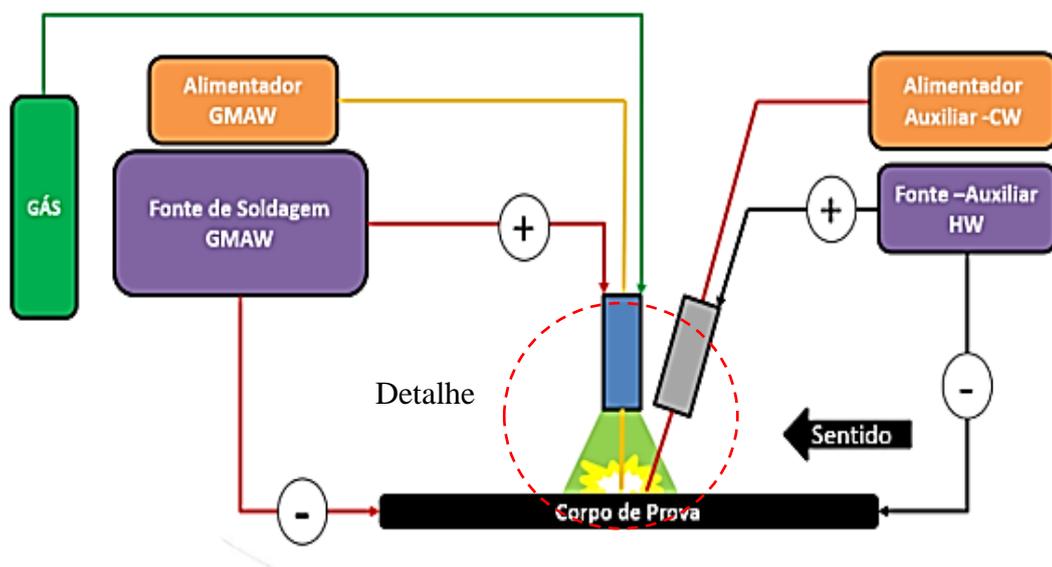
Obs: A taxa de alimentação adicional é um percentual do valor da alimentação do arame principal

**Figura 3.2** – Organograma de execução da soldagem. **Fonte:** Autor (2022).

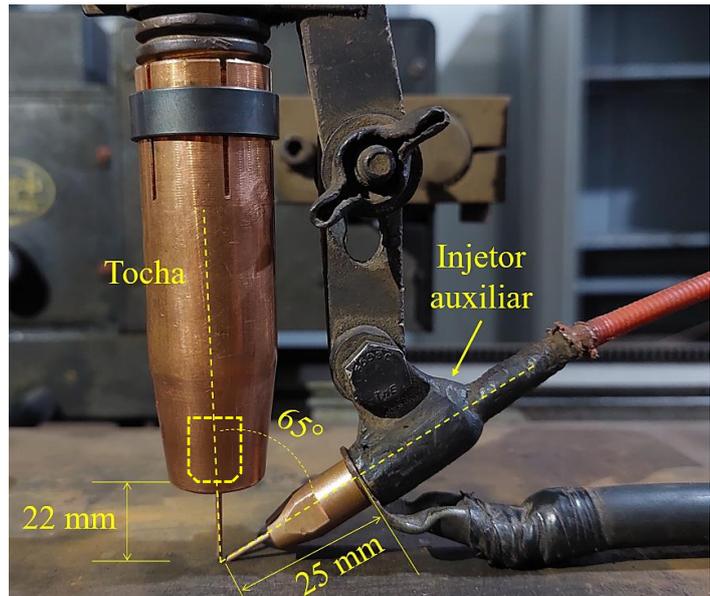
Os cordões de solda foram depositados na posição plana por simples deposição usando uma fonte multiprocessos como fonte principal. Para aquecer o arame adicional foi utilizado uma fonte auxiliar do tipo corrente constante. Durante os experimentos, a fonte principal foi operada no modo de tensão constante (UC). A fonte auxiliar empregada no aquecimento do arame adicional utilizou um sistema de aquecimento por efeito Joule similar aos equipamentos apresentados no item 2.3. As conexões de terra das fontes de energia principal e auxiliar foram conectadas ao substrato. A Figura 3.3 apresenta a configuração pictórica usada para o experimento e a Figura 3.4, o desenho da célula de trabalho usada nos processos CW e HW-GMAW, mostrando na Figura 3.5, o detalhamento da tocha GMAW e do injetor CW-HW. Durante todo o experimento foi mantido constante o ângulo entre o arame eletrodo e o arame adicional em 65°, a Distância Bico de Contato Peça (DBCP) em 22,0 mm e a distância entre o contato elétrico do arame adicional e a poça de fusão (DCEP) em 25,0 mm, todos selecionados através de soldagens que antecederam os procedimentos experimentais definitivos.



**Figura 3.3** – Configuração pictórica dos equipamentos utilizados no experimento: 1 - Fonte principal; 2 - Fonte auxiliar; 3 - Alimentador principal; 4 - Alimentador auxiliar; 5 - Gás de proteção; 6 - Tocha de soldagem; 7 - Injetor CW-HW GMAW; 8 - Microcomputador; 9 - Sensor Hall; 10 - Sinal de corrente; 11 - Sinal de velocidade de alimentação e 12 - Sinal de tensão. **Fonte:** Autor (2022).



**Figura 3.4** – Desenho da configuração da célula de trabalho CW e HW-GMAW. **Fonte:** Autor (2022).



**Figura 3.5** – Detalhe da tocha GMAW e do injetor CW-HW indicando a Distância Bico de Contato Peça (DBCP), Distância Contato Elétrico Peça (DCEP) e o ângulo do injetor de arame adicional. **Fonte:** Autor (2022).

A Tabela 3.2 apresenta os valores dos parâmetros de soldagem dos corpos de prova (CP's) nesta etapa, processos (GMAW, CW-GMAW e HW-GMAW), polaridade, taxa de alimentação do HW (uma porcentagem da taxa de alimentação do arame eletrodo) e o sentido de soldagem, enquanto outros valores foram mantidos constantes. Para todas as condições de soldagem, três repetições foram realizadas para garantir a reprodutibilidade dos fenômenos observados.

**Tabela 3.2** – Parâmetros de soldagem - Experimento I. **Fonte:** Autor (2020).

Processos	Vel. Alim. (m/min)	U (V)	Vel. de sold. (cm/min)	Corrente nominal (A)	Corrente nominal HW (A)	Polaridade HW	Taxa de alim. CW/HW* (%)	Sentido de soldagem
CW					-	-	40	
					-	-	80	
					-	-	120	
HW	10,0	33,0	60,0	300	40	(Inversa)	80	Empurrando
					80			
					40			
					80			
					40			
					80			
GMAW					-	-	-	
					-	-	-	
					-	-	-	

Obs: \* A taxa de alimentação adicional para o processo CW e HW é um percentual do valor da taxa de alimentação do arame eletrodo.

O gás de proteção utilizado foi uma mistura de argônio (Ar) e 25% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), com uma vazão de 18 l/min, conforme recomendado na norma AWS A5.18. Trata-se de um produto com larga aplicação na soldagem de aços carbonos de baixa liga pelo processo GMAW. Os fatores determinantes para sua seleção foram o seu baixo custo em relação a outros gases de proteção e suas características físico-químicas que proporcionam vantagens operacionais, entre as quais, baixa incidência de respingos, elevadas velocidades de soldagem, excelente acabamento superficial e estabilidade do arco. A polaridade do arame eletrodo e do adicional (HW) foi mantida constante na execução do experimento definitivo, na condição inversa. Segundo Souza *et al* (2009), nesta polaridade, consegue-se maior penetração, boa estabilidade do arco e da transferência metálica, menor quantidade de respingo, além da possibilidade de soldar com os diferentes modos de transferência metálica, como curto-circuito, globular e spray.

Após as soldagens, os CP`s foram adquiridas pelo seccionamento dos cordões de solda na região central por se julgar ser esta região do cordão gerada com o arco elétrico e a transferência metálica mais estáveis, e para cada parâmetro de estudo foram obtidas três réplicas, resultando em dez seções transversais que foram examinadas. Em seguida foram realizados procedimentos padrão de polimento metalográfico, e ataque químico utilizando Nital 2% para revelar as macroestruturas.

### **3.2.2 Resultados e discussões**

Este tópico apresenta os resultados obtidos nesta fase do experimento por meio de análises dos oscilogramas, ciclogramas e macrografias. Através da análise comparativa dos pontos de tensão e corrente nos oscilogramas e de dispersão nos ciclogramas da fonte principal dos processos de soldagem foi possível fazer uma análise sobre a estabilidade do arco elétrico e, por conseguinte, da regularidade do processo em termos de transferência metálica e seus reflexos na geometria do cordão depositado. As macrografias obtidas corroboraram para o entendimento da dinâmica dos processos de soldagem (Figura 3.21).

#### **3.2.2.1 Sinais de corrente e tensão**

##### **a) Oscilogramas**

Os oscilogramas representam através de curvas típicas o comportamento dos valores de tensão e corrente durante o tempo de soldagem, permitindo a avaliação da estabilidade na

transferência metálica do processo de soldagem. Pela facilidade de aquisição de tensão e corrente durante a soldagem tornou-se um dos métodos mais utilizados para esta análise; assim, quando há queda de tensão no arco sem a correspondente elevação de corrente, isso pode ser um forte indício de irregularidade no mecanismo de transferência metálica.

Na Tabela 3.3 mostra os valores médios de tensão e corrente (fonte principal) aquisitados na soldagem dos CP's e suas variações podem ser melhor estudadas através da análise dos oscilogramas das Figuras 3.6 a 3.9.

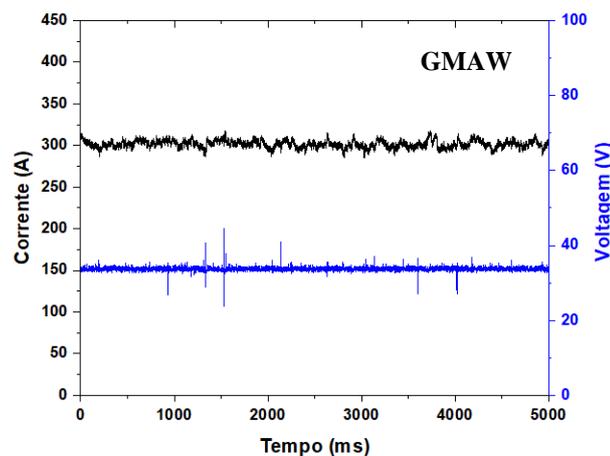
**Tabela 3.3** - Parâmetros elétricos de soldagem - Experimento I. **Fonte:** Autor (2020).

Processos	Vel. Alim. (m/min)	U (V)	Corrente nominal (A)	Corrente nominal HW (A)	Polaridade HW	Taxa de alim. CW/HW (%)
CW		33,9±0,2	299,80±0,9	-	-	40
		33,7±0,3	297,74±5,1	-	-	80
		33,4±0,5	305,80±6,4	-	-	120
HW	10,0	33,4±0,1	296,60±1,7	40	Inversa	40
		33,9±0,2	299,00±0,9	80		80
		34,0±0,1	297,74±2,1	40		80
		33,8±0,3	297,20±7,0	80		80
		33,9±0,3	298,50±9,4	40		40
		33,7±0,3	302,90±6,4	80		120
GMAW		33,4±0,3	297,74±2,1	-	-	-

A Figura 3.6 apresenta o oscilograma do processo GMAW, com flutuações de corrente pequenas e regulares e a resposta da tensão do arco foi constante. Liu, Siewert e Lan (1989) desenvolveram um critério, a partir da observação de fotografias em alta velocidade, em que a tensão no arco elétrico ao variar entre 0,5 V e 1,0 V sugere que a transferência metálica está ocorrendo no modo spray. De acordo com a Tabela 3.3, a tensão durante o processo de soldagem, variou na faixa 33,4 V a 34 V, ou seja, uma variação de 0,6 V, que associada a uma eleva corrente média gerada no arco, em torno de 300 A, nos levou a concluir que a transferência ocorreu no modo spray.

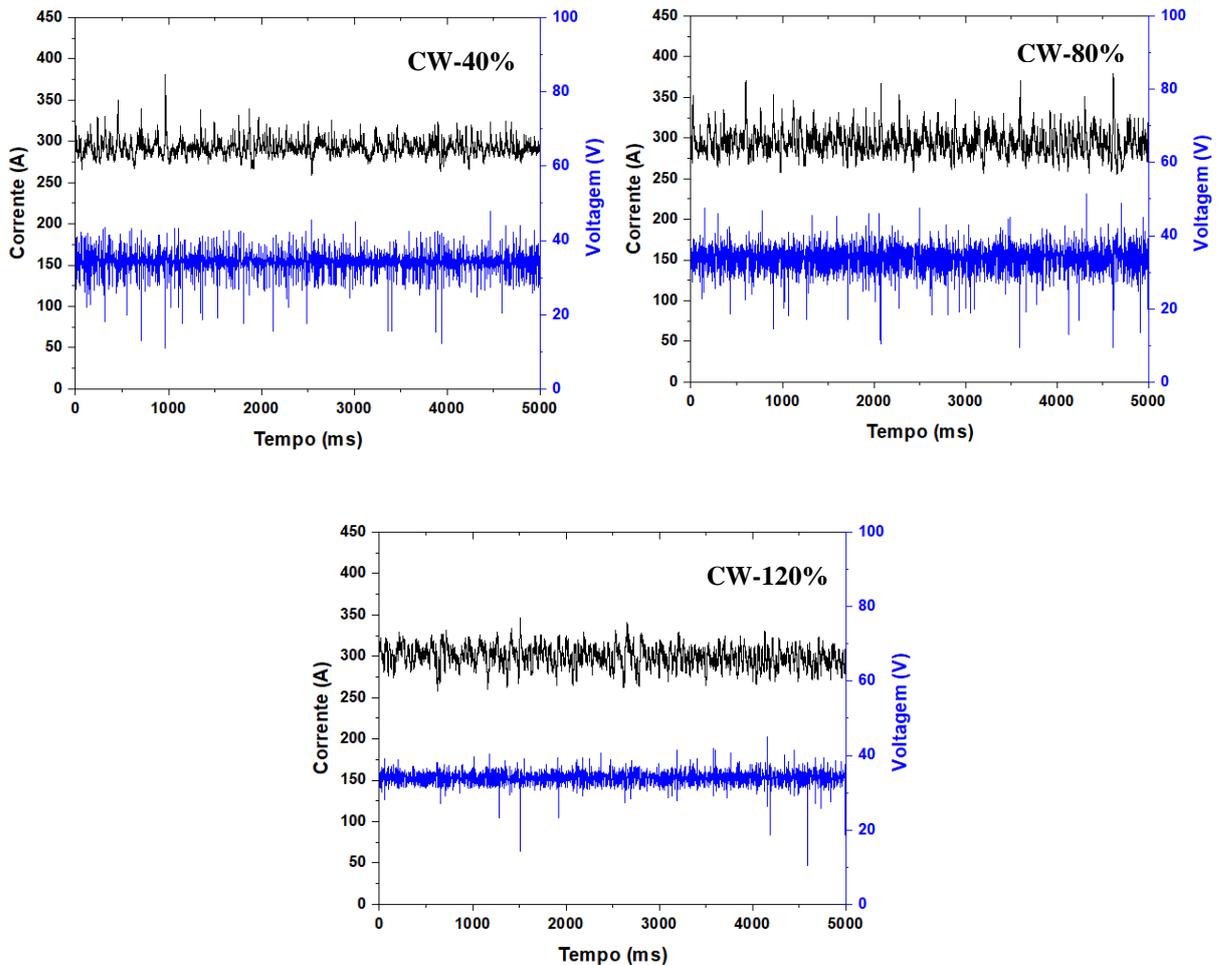
Um fator importante para a transferência spray é a corrente de transição (faixa) normalmente obtida quando é utilizado um gás de proteção com elevados teores de argônio ou hélio, e com baixo percentual de dióxido de carbono. Para valores de corrente do arco acima desta faixa a transferência torna-se spray (CARY, 1998). Durante o experimento, para velocidade de alimentação do arame eletrodo (10 m/min), o nível de corrente utilizado em média, 300 A, foi maior que a faixa de corrente de transição levando a reforçar que a transferência metálica ocorreu no modo spray.

A análise da resposta da tensão do arco no oscilograma do processo GMAW sugere que ela ocorreu de forma constante levando a concluir, segundo Bingul e Cook (1999) que houve um equilíbrio da taxa de alimentação com a taxa de fusão do eletrodo mantendo o comprimento do arco constante gerando estabilidade do arco elétrico. Durante o experimento foi observado que o processo de transferência metálica ocorreu suave, identificada pelo seu ruído característico e ausência de salpico nas laterais do cordão de solda, sugerindo a estabilidade do processo (ADOLFSSON, BAHRAMI, *et al.*, 1999; GONÇALVES, DUTRA, *et.al.*, 2007, RESENDE, 2007).



**Figura 3.6** - Oscilograma do processo GMAW. **Fonte:** Autor (2022).

A Figura 3.7 apresenta os oscilogramas de soldagem do processo CW-GMAW com taxa de adição de 40%, 80% e 120% de arame adicional, respectivamente. Foram observadas variações significativas nos valores de corrente e tensão sugerindo que a adição do arame frio provocou certa instabilidade no sistema arco/poça de fusão. A análise dos oscilogramas mostra que houve um aumento nos valores de pico de tensão e corrente com a adição de 40% e 80% de arame adicional em relação ao GMAW sugerindo uma transferência metálica instável, porém com a adição de 120%, o número de picos e vales de tensão reduziu tornando o processo mais estável, em relação as taxas menores. Isso sugere que a maior taxa de alimentação do arame frio pode ter contribuído para estabilidade do arco elétrico. De acordo com Ribeiro *et al.*, (2019) para taxa de alimentação de arame frio acima de 100%, o arco muda de posição, se fixando completamente ao arame frio, provavelmente devido a menor resistência elétrica oferecida pelo arame. Nesta condição houve uma diminuição no comprimento do arco elétrico provocando o aumento da corrente de soldagem, elevando a frequência de destacamento da gota, melhorando a estabilidade do processo.

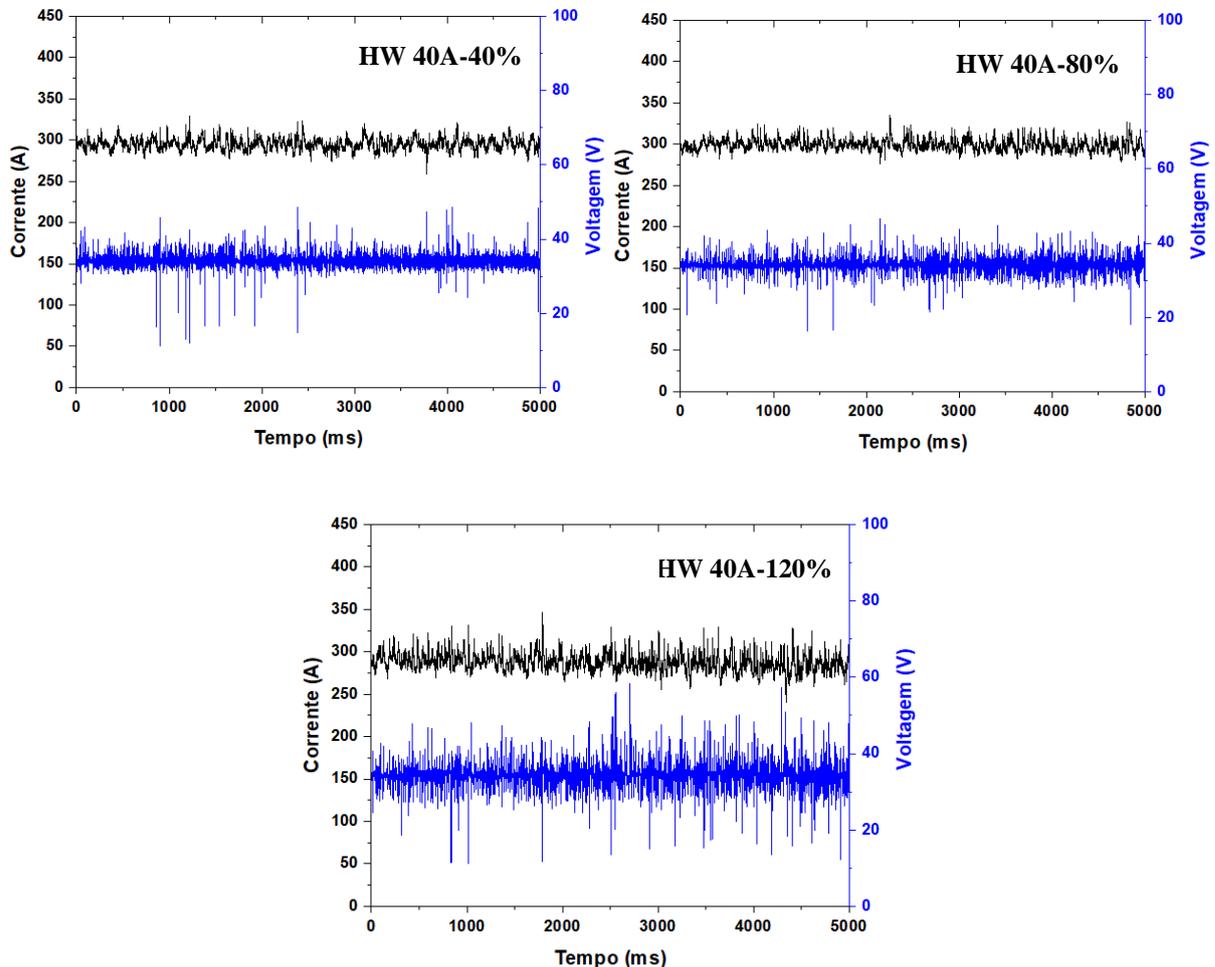


**Figura 3.7** – Oscilogramas do processo CW-GMAW. **Fonte:** Autor (2022).

Por outro lado, comparando as macrografias do processo CW-GMAW da Figura 3.21 é perceptível que o aumento da taxa de alimentação do arame frio diminuiu drasticamente a profundidade de penetração devido a extração de energia térmica da poça de fusão.

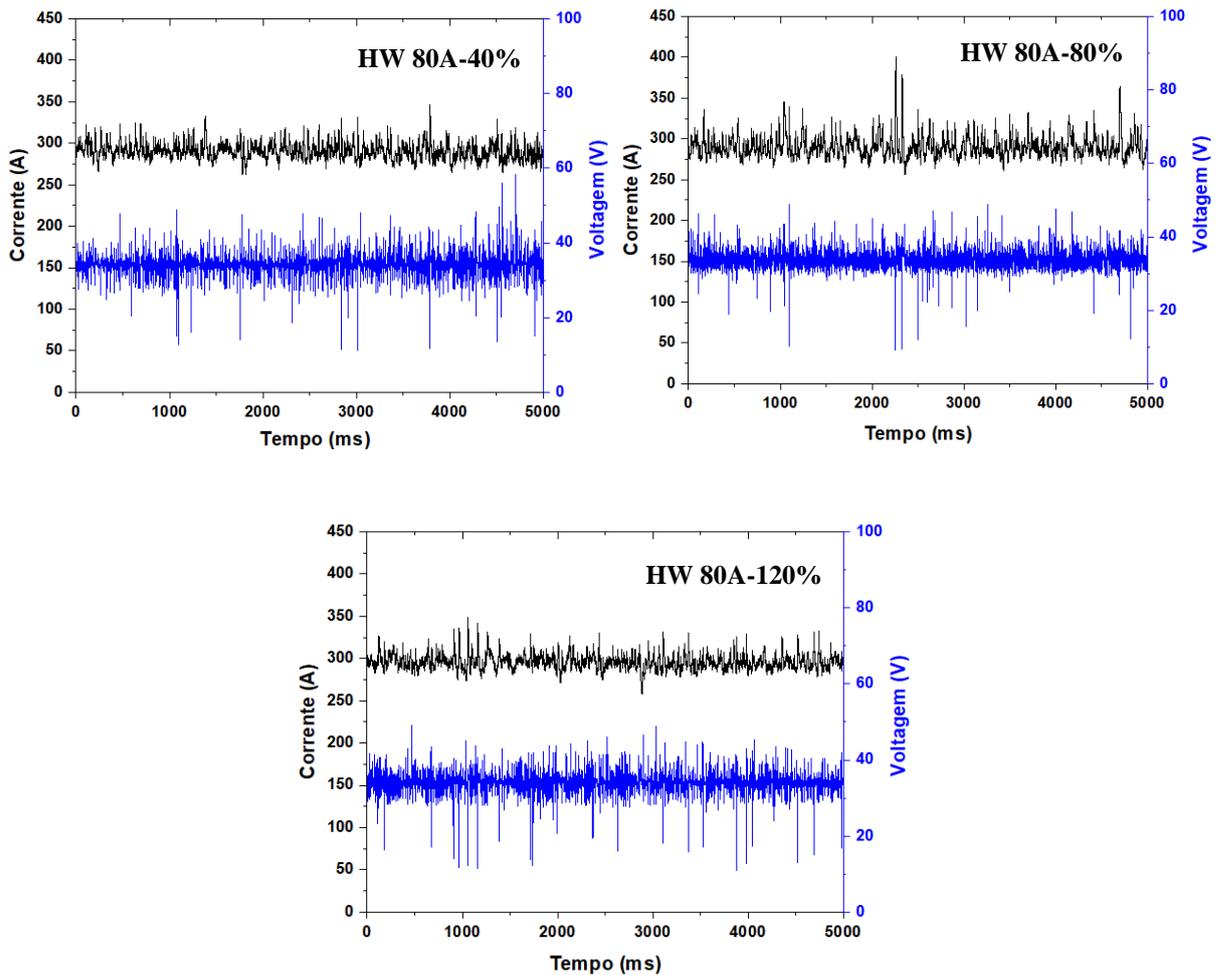
A Figura 3.8 apresenta os oscilogramas de soldagem do processo HW-GMAW com adição da corrente de 40 A e taxas de arame adicional variando a sua alimentação em 40%, 80% e 120%, respectivamente. Na análise verificou-se que uma participação crescente da adição de arame energizado em 40% e 80% no sistema arco/poça de fusão não provocou variações significativas nos valores de picos de tensão e corrente, sugerindo que o processo foi estável, no entanto para 100% percebe-se pequena instabilidade. Segundo estudos de Schreiber *et. al.*, (2018), estando o arame eletrodo e HW na polaridade inversa, os campos magnéticos gerados serão de natureza atrativa fazendo com que o arco seja direcionado ao HW. A redução do comprimento do arco, associado ao seu contato intermitente com o HW, sugere pequena

instabilidade no sistema arco/poça com a adição de 100 % de arame, fato este evidenciado pelo aumento de picos de tensão e corrente no oscilograma em relação aos eventos anteriores.



**Figura 3.8** - Oscilogramas do processo HW-GMAW (40A). **Fonte:** Autor (2022).

A Figura 3.9 mostra os oscilogramas do processo de soldagem HW-GMAW com adição da corrente de 80 A e taxas de arame adicional variando a sua alimentação em 40%, 80% e 120%, respectivamente. Na análise dos oscilogramas verificou-se que, apesar do aumento da corrente de 40 A para 80 A contribuir para um aumento das forças eletromagnéticas decorrentes da passagem de corrente elétrica no arame eletrodo e de adição gerando provavelmente maior perturbação no arco elétrico, a participação crescente da adição de arame energizado não provocou variações significativas nos valores de picos de tensão e corrente, sugerindo que o processo foi estável.

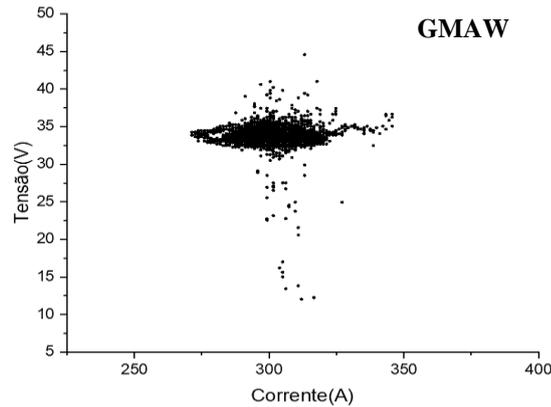


**Figura 3.9** - Oscilograma do processo HW-GMAW (80A). **Fonte:** Autor (2022).

## b) Ciclogramas

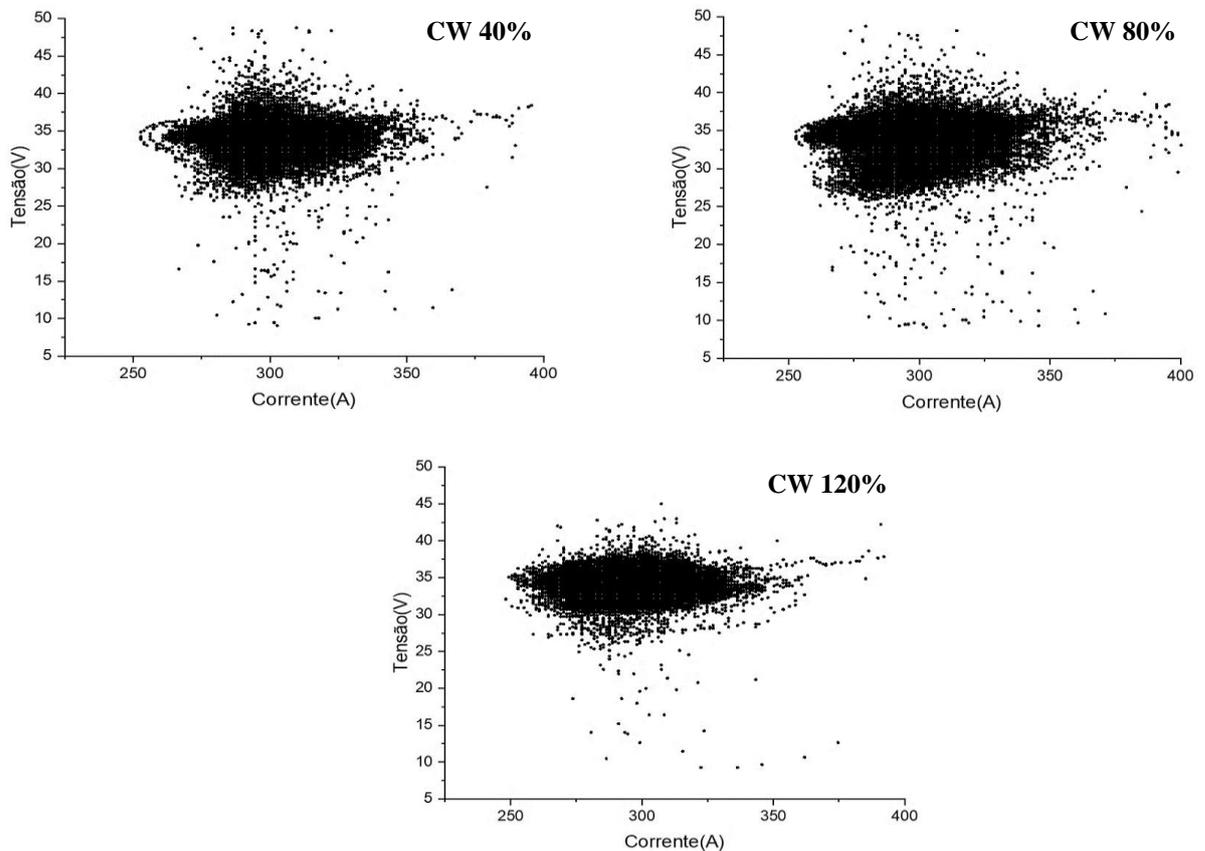
Os ciclogramas fazem uma análise gráfica dos valores médios de tensão em função da corrente para identificar o comportamento dessas variáveis sobre a estabilidade da soldagem. É um gráfico tipo  $xy$  onde os valores de corrente são mostrados no eixo “ $x$ ” e os valores de tensão no eixo “ $y$ ”. Pode-se analisar visualmente a regularidade e estabilidade do processo na medida em que o gráfico se mostrar mais concentrado numa menor área.

A Figura 3.10 apresenta o ciclograma do processo de soldagem GMAW onde foi verificado uma concentração significativa de pontos em uma pequena área, ou seja, não houve dispersão significativa dos valores de tensão e corrente, caracterizando o processo como regular e estável, com modo de transferência predominante spray, de acordo com estudos de SUBAN (2003).



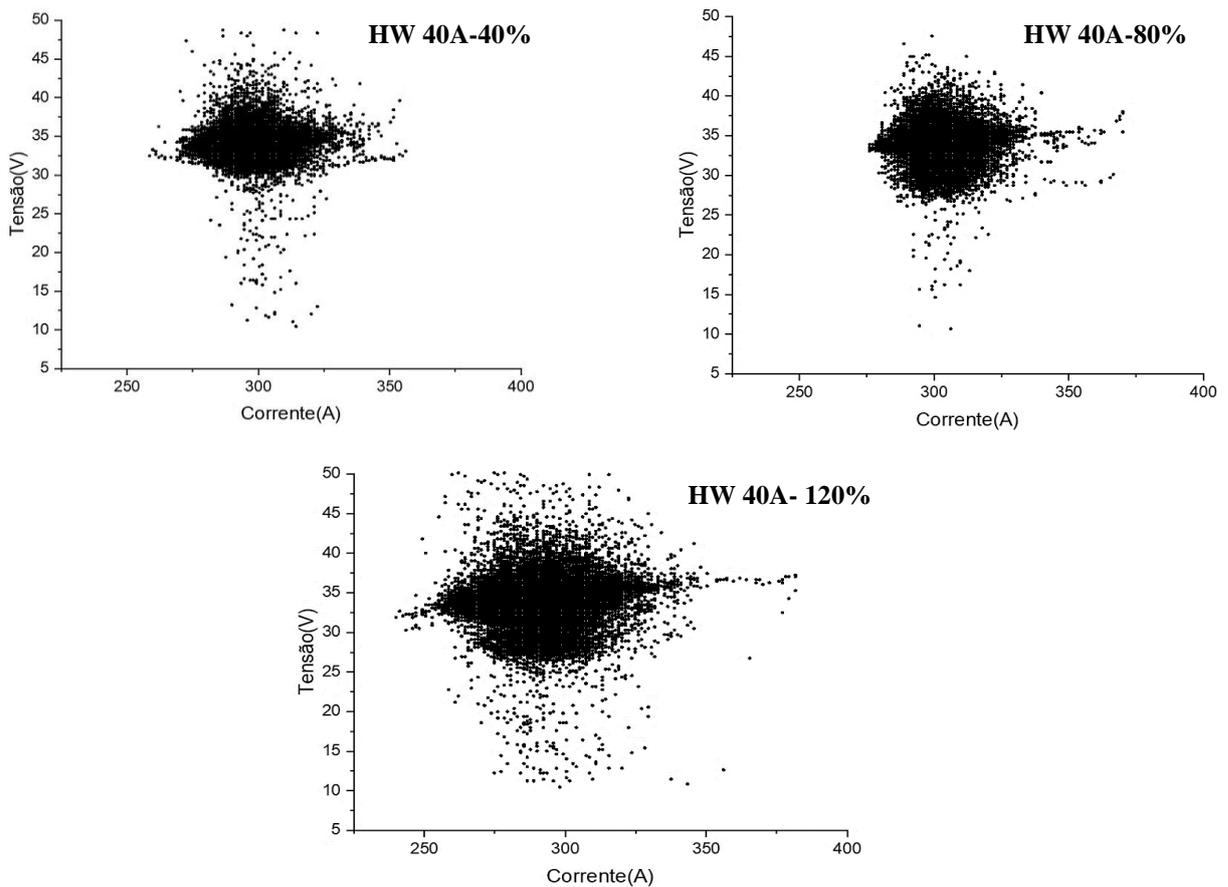
**Figura 3.10** - Ciclograma do processo GMAW. Fonte: Autor (2022).

A Figura 3.11 apresenta o processo CW-GMAW com taxa de adição de 40%, 80% e 120% de arame adicional, respectivamente. Foi observado que para 120% de adição de arame houve uma maior concentração dos valores de tensão e corrente quando comparado às taxas de 40% e 80%, sugerindo maior estabilidade do processo para esta taxa de arame adicional (RIBEIRO *et al.*, 2019).



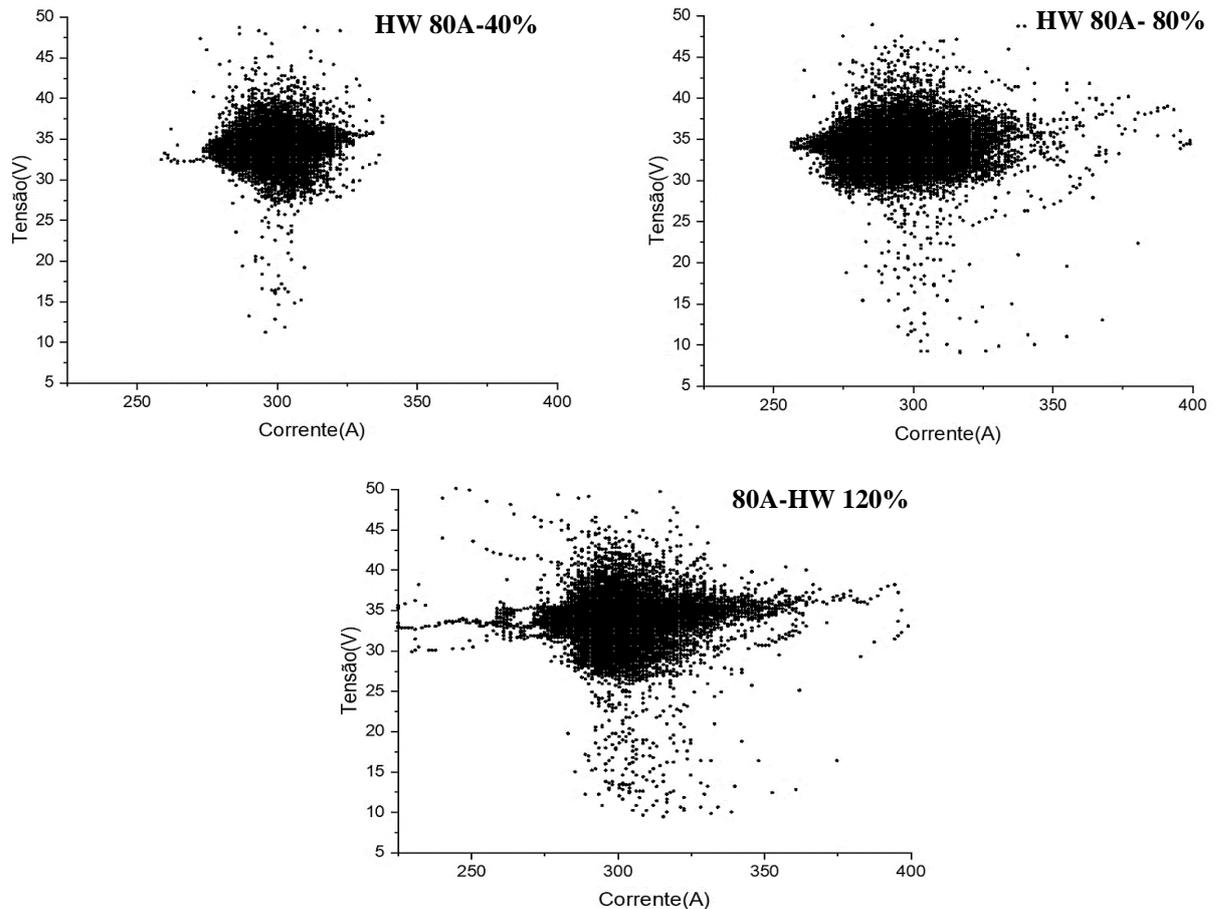
**Figura 3.11** - Ciclogramas do processo CW-GMAW. Fonte: Autor (2022).

O processo HW-GMAW utilizando corrente de 40 A, vide Figura 3.12, com incrementos da taxa de alimentação em 40%, 80% e 120%, apresentaram regiões com maior dispersão que os processos GMAW e CW-GMAW, contudo, essa variação não comprometeu a estabilidade e regularidade do processo. O experimento com taxa de arame de 80%, foi a que apresentou menor dispersão, sugerindo que o uso da corrente mais baixa gerou um campo magnético com menor intensidade resultando menor interferência no arco elétrico.



**Figura 3.12** - Ciclogramas do processo HW-GMAW (40A). **Fonte:** Autor (2022).

Para o processo HW-GMAW utilizando corrente de 80 A, vide Figura 3.13, com incrementos da taxa de alimentação em 40%, 80% e 120%, apresentaram regiões de maior dispersão dos valores de tensão e corrente, contudo, semelhante ao processo anterior (Figura 3.12), essa variação não comprometeu a estabilidade e regularidade do processo. O experimento com taxa de arame de 40%, foi o que apresentou visualmente maior estabilidade por apresentar menor dispersão e maior concentração de valores de tensão e corrente numa menor área.



**Figura 3.13** - Ciclogramas do processo HW-GMAW (80A). **Fonte:** Autor (2022).

Em síntese, os CP's soldados pelos processos CW-GMAW e HW-GMAW apresentaram maiores variações nos níveis de dispersão dos valores de tensão e corrente, em comparação ao processo GMAW, o que pode ser caracterizado por pequenas instabilidades no arco observadas durante o processo de soldagem; acredita-se que podem ter sido geradas devido à inserção do arame adicional na região do arco elétrico, provocando pequenas alterações no comprimento do arco ou até mesmo desvios no arco, conforme foi observado por Assunção *et al.*, (2017) e Ribeiro *et al.*, (2019b).

### 3.2.2.2 Influência da corrente de aquecimento (HW) e taxa de alimentação de arame adicional na geometria dos cordões de solda depositados

Na soldagem com processo HW foi observado, visualmente, a formação de um arco “escravo” para a corrente de 80 A, provavelmente decorrente da configuração no modo de

aquecimento do arame adicional, onde o contato elétrico foi fixado diretamente no injetor auxiliar como também pelo valor adotado na corrente de aquecimento (80 A), haja vista que no experimento da fase II esta formação não ocorreu para 70 A.

Quando a corrente elétrica foi inserida ao arame adicional, esta foi somada à corrente do arame eletrodo, aumentando a energia do sistema arco/poça e a força eletromagnética, reduzindo a viscosidade do metal fundido e aumentando o fluxo das linhas de convecção, favorecendo sua penetração (LI, CHEN, *et al.*, 2007). Neste sentido, infere-se que o aumento de energia no sistema arco/poça pelo arame adicional energizado, contribuiu provavelmente, na magnitude da força de Lorentz, gerando um aumento no poder de penetração na poça de fusão. Este fenômeno pode ter ocorrido devido ao aumento do fluxo de corrente para o eletrodo e conseqüentemente do campo magnético, gerando uma componente de maior intensidade, no sentido normal a poça de fusão, causando o aumento no valor de penetração.

Os valores dos parâmetros do cordão de solda (geométrico/econômico) obtidos nesta fase do experimento são apresentados na Tabela 3.4, relacionando os efeitos da variação da taxa de alimentação de arame adicional e corrente de aquecimento.

Para o cálculo da Taxa de Deposição (TD) foi utilizada a equação 3.1, onde: *mi* é a massa inicial da solda (g), *mf* é a massa final após a solda (g) e *tm* é tempo médio de deposição do arame eletrodo/arame adicional (s) (SÁBIO, 2007).

$$TD = 3,6 \left( \frac{mf - mi}{t_m} \right) [kg/h] \quad (3.1)$$

Tabela 3.4 – Parâmetros das amostras soldadas – Experimento I. Fonte: Autor (2017).

Processos	Taxa Alim. Ad. (%)	Corrente Ad. (A)	Largura (mm)	Reforço (mm)	Penetração (mm)	Área Penetração (mm <sup>2</sup> )	Área Total (mm <sup>2</sup> )	Área ZTA (mm <sup>2</sup> )	Diluição (%)	Taxa de Deposição (kg/h)
GMAW	-	-	11,20±1,09	3,00±0,26	3,27±0,10	23,03±0,91	43,47±1,57	21,92±4,05	52,97±1,23	5,06±0,21
CW-GMAW	40	-	12,81±0,46	3,09±0,08	2,69±0,04	22,49±0,10	47,23±0,65	25,84±1,34	47,62±0,68	6,62±0,14
	80	-	12,59±0,46	3,43±0,37	2,10±0,15	16,63±0,57	45,08±4,26	26,45±1,56	37,03±2,28	7,94±0,15
	120	-	12,96±0,09	4,36±0,08	1,64±0,27	12,94±1,89	50,35±1,70	26,60±3,14	25,65±3,10	9,54±0,20
HW-GMAW	40	40	13,84±0,31	2,94±0,06	3,22±0,07	26,33±1,84	50,94±1,96	29,73±1,47	51,65±1,76	6,78±0,08
		80	13,00±1,44	2,84±0,05	3,73±0,17	30,44±3,11	52,05±4,04	32,70±3,64	58,42±2,03	6,87±0,16
	80	40	12,50±1,03	3,00±0,22	2,90±0,20	21,66±3,53	47,37±6,79	23,83±3,69	47,78±4,69	7,51±0,19
		80	13,70±0,49	3,01±0,17	3,39±0,28	26,42±2,69	51,46±3,93	29,81±1,86	51,31±2,81	7,41±0,51
	120	40	12,18±1,03	3,67±0,19	2,68±0,35	16,23±1,29	45,74±2,78	26,51±1,76	35,69±4,86	8,75±0,16
		80	13,42±0,75	3,48±0,17	2,83±0,17	20,56±2,60	50,08±2,62	30,34±4,08	41,03±4,25	8,96±0,41

Obs: A taxa de alimentação adicional é um percentual do valor da alimentação do arame principal

A seguir, gráficos tendo como referência o processo GMAW convencional foram usados para avaliar a influência dos valores médios da taxa de alimentação de arame frio e aquecido por efeito Joule apresentados na Tabela 3.4, sobre as características geométricas e econômica das seções dos cordões depositados na execução do experimento nesta fase.

a) Largura e reforço

Calculando os efeitos da taxa de alimentação de arame adicional e corrente usando a Análise de Variância (ANOVA), identificou-se o parâmetro que exerceu influência significativa na largura e reforço foi a taxa de arame (Figura A.1 - Apêndice). Isso significa que ao mudar o seu valor ocorre variação na magnitude desses parâmetros de resposta. Foi observado, de forma geral, que os valores de largura foram superiores ao GMAW e mantiveram baixa variação entre os processos estudados, porém para os valores de reforço, o processo HW com taxa de alimentação de 40% e corrente adicional 40 A e 80 A, vide destaques em vermelho na Tabela 3.4, obteve menores valores comparado ao processo GMAW e para outras condições estudadas (80% e 120%) devido a maior taxa de arame inserida na poça de fusão, houve uma redução na penetração (Figura 3.16) e um aumento no reforço. Os gráficos de largura e reforço são apresentados na Figura 3.14 e Figura 3.15.

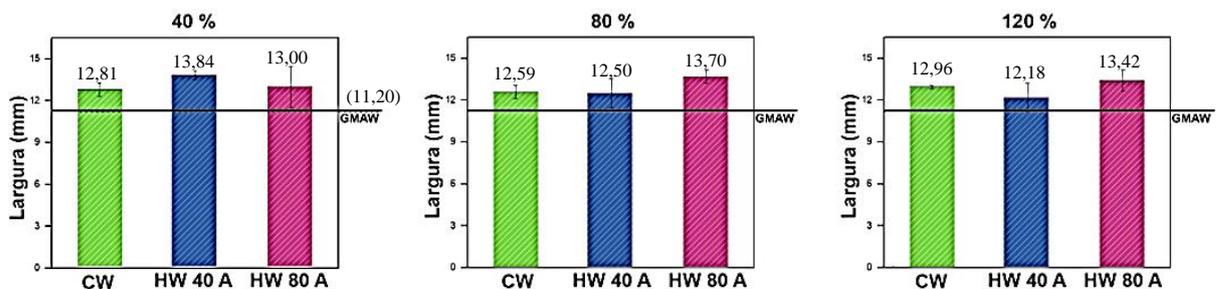


Figura 3.14 – Valores médios de largura: GMAW, CW-GMAW e HW-GMAW. Fonte: Autor (2022).

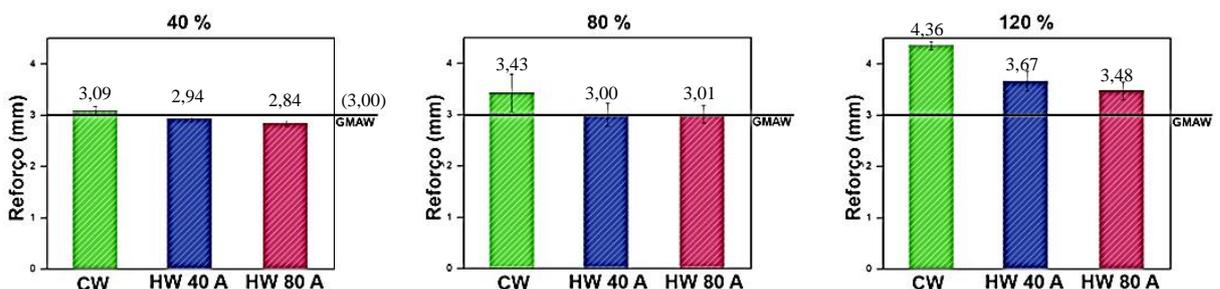


Figura 3.15 – Valores médios de reforço: GMAW, CW-GMAW e HW-GMAW. Fonte: Autor (2022).

## b) Penetração e área penetrada

Os cálculos dos efeitos usando a Análise de Variância (ANOVA) mostraram que a taxa de alimentação e a corrente inserida no arame adicional influenciaram significativamente a penetração e área penetrada (Figura A.3 e A.4 - Apêndice). A condição operacional que gerou maior valor para os dois parâmetros em relação ao processo GMAW podem ser observadas pelos gráficos na Figuras 3.16 e 3.17, vide Tabela 3.4 (40% de HW e 80 A), destacadas em vermelho.

Para o processo CW-GMAW, à medida que a taxa de alimentação foi incrementada em 40%, 80% e 120%, ocorreu uma redução nos níveis de penetração em relação ao processo GMAW. Acredita-se que a introdução de um arame frio contribuiu para a extração de energia do sistema arco/poça reduzindo os níveis de penetração, conforme já observado por (SÁBIO, 2007; ASSUNÇÃO *et al.*, 2017; COSTA *et al.*, 2017; RIBEIRO *et al.*, 2019).

No processo HW-GMAW energizado com 40 A, houve menor penetração da poça de fusão em relação ao processo GMAW, proporcionalmente a adição de arame considerada neste estudo. Acredita-se que o arame ao chegar aquecido por efeito Joule no sistema arco/poça diminui a parcela de energia do arco usada para fundir o arame (ALI, GUENTHER, *et al.*, 2015). Este ganho de energia pelo arco foi responsável pela recuperação dos níveis de penetração quando comparado com o processo GMAW, porém o aumento da taxa de HW extraiu energia da poça reduzindo sua penetração, vide Figura 3.16.

Ao comparar o processo HW-GMAW usando 80 A com o GMAW observa-se que para incrementos de arame de adição de 40% e 80% houve um aumento de penetração. Acredita-se que a maior corrente utilizada disponibilizou uma parcela ainda maior de energia para o arco fundir o arame aumentando os níveis de penetração. Porém, quando foi adicionado 120% de arame, devido a maior extração de energia da poça, a penetração foi reduzida em aproximadamente 13%. Isso surge que através do controle da taxa de deposição de arame e da corrente de adição do arame adicional é possível a soldagem de peças com diferentes espessuras.

A Figura 3.17 mostra que o comportamento da área penetrada foi semelhante à da penetração (Figura 3.16). Para o processo CW-GMAW apresentou, para todas as taxas de alimentação de arame adicional, valores abaixo dos encontrados para o processo GMAW, haja vista, o aumento da taxa de arame frio inserido no sistema arco/poça reduziu sua energia. No processo HW-GMAW, ao aumentar a corrente no arame adicional de 40 A para 80 A, a área

penetrada apresentou valores superiores ao processo GMAW, no entanto, ao aumentar para 120%, a redução da energia do sistema contribuiu para a redução desse parâmetro.

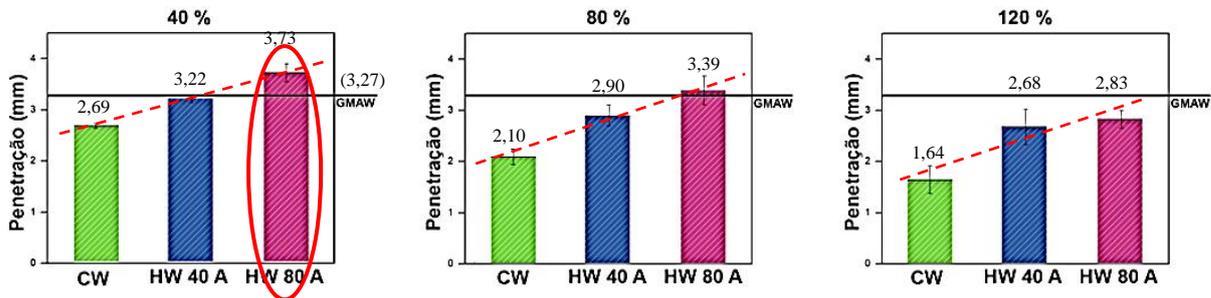


Figura 3.16 – Valores médios de penetração: GMAW, CW-GMAW e HW-GMAW. Fonte: Autor (2022).

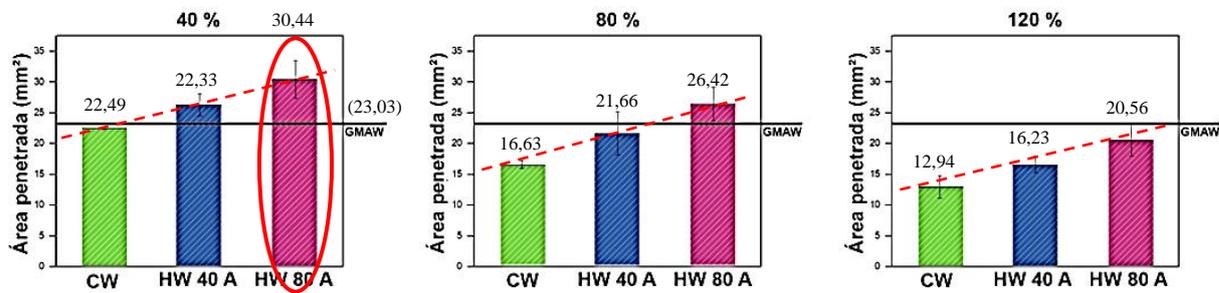


Figura 3.17 – Valores médios de área penetrada: GMAW, CW-GMAW e HW-GMAW. Fonte: Autor (2022).

### c) Área da Zona Termicamente Afetada (ZTA) e diluição

A Análise de Variância (ANOVA) mostrou que a taxa de alimentação e a corrente inserida no arame exerceram influência significativa na ZTA (Figura A.5 - Apêndice) e, os valores obtidos, vide Figura 3.18, mostraram-se superiores ao GMAW. A provável causa é que ao adicionar CW no sistema arco/poça, a fonte responde com um aumento de corrente, elevando a energia do sistema arco/poça e após o equilíbrio termodinâmico registrou uma ZTA superior ao GMAW. Ao adicionar HW, além do aumento de energia gerada, com adição de massa simultaneamente, ocorreu uma contribuição energética do arame energizado ao sistema que após o equilíbrio termodinâmico registrou uma ZTA também superior ao GMAW.

Na diluição, a ANOVA mostrou que a taxa de arame adicional apresentou efeito significativo (Figura A.6 - Apêndice). No processo CW-GMAW foi observado uma tendência de diminuição nos valores deste parâmetro com o aumento da taxa de arame adicional no sistema arco/poça em relação ao processo GMAW, vide Figura 3.19. Já para o processo HW-GMAW, para correntes de 40 A e 80 A e taxas de adição de arame de 80% e 120%, a diluição foi menor do que as registradas no processo GMAW, vide destaques em vermelho na Tabela 3.4. Acredita-se que taxas crescentes de HW na poça de fusão contribuam para o controle da

diluição sugerindo a aplicação do processo em revestimento duro sujeito a desgaste (GÜNTHER, 2018).

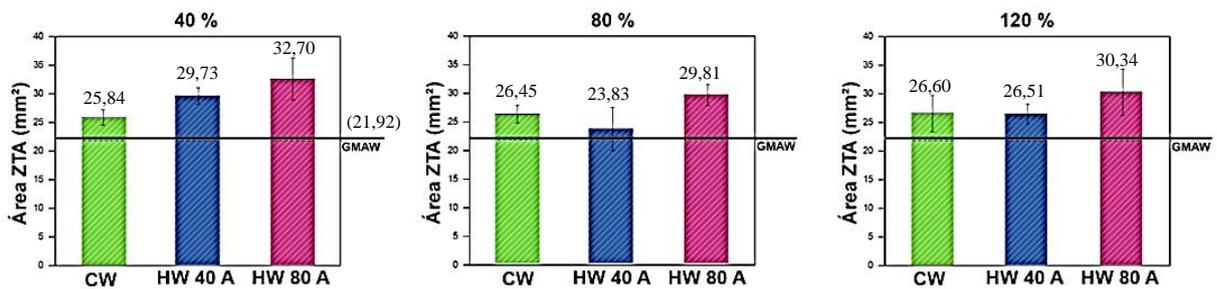


Figura 3.18 – Valores médios de área da ZTA: GMAW, CW-GMAW e HW-GMAW. Fonte: Autor (2022).

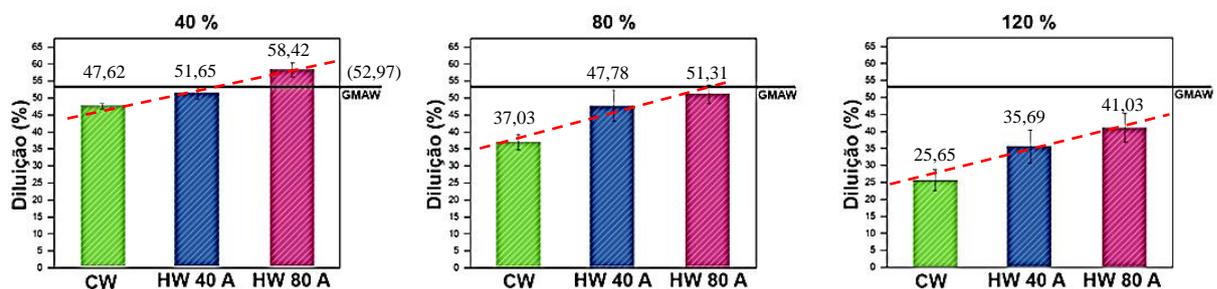


Figura 3.19 – Valores médios de diluição: GMAW, CW-GMAW e HW-GMAW. Fonte: Autor (2022).

#### d) Taxa de deposição

O cálculo da Análise de Variância (ANOVA) mostrou que a taxa de alimentação de arame adicional associada a taxa de arame e corrente de alimentação teve influência significativa na taxa de deposição (Figura A.7 - Apêndice). Em todos os processos estudados os valores médios deste parâmetro foram superiores ao GMAW, vide Figura 3.20, e conforme destacados em vermelho na Tabela 3.4. Para os processos CW e HW-GMAW, o aumento da taxa de deposição foi proporcional ao aumento da taxa de arame adicional. No processo HW-GMAW o aumento da taxa de deposição sugere ter sido potencializado pelo aquecimento do arame adicional que reduziu as trocas térmicas e aumenta a energia disponível no arco elétrico para fundir o arame adicional e o metal de base.

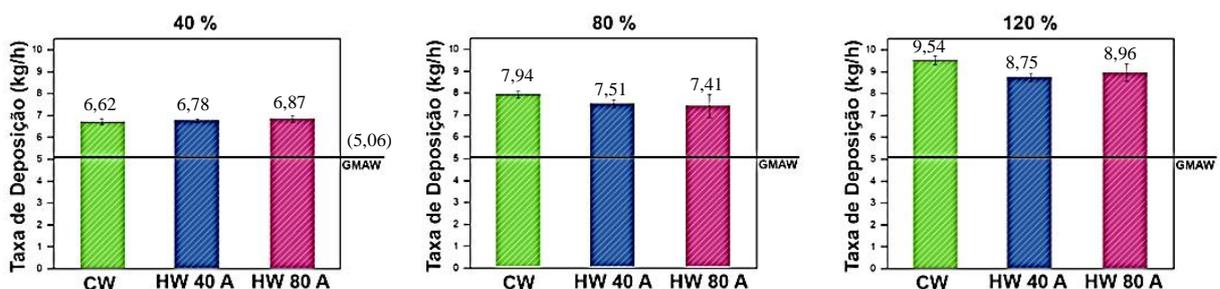
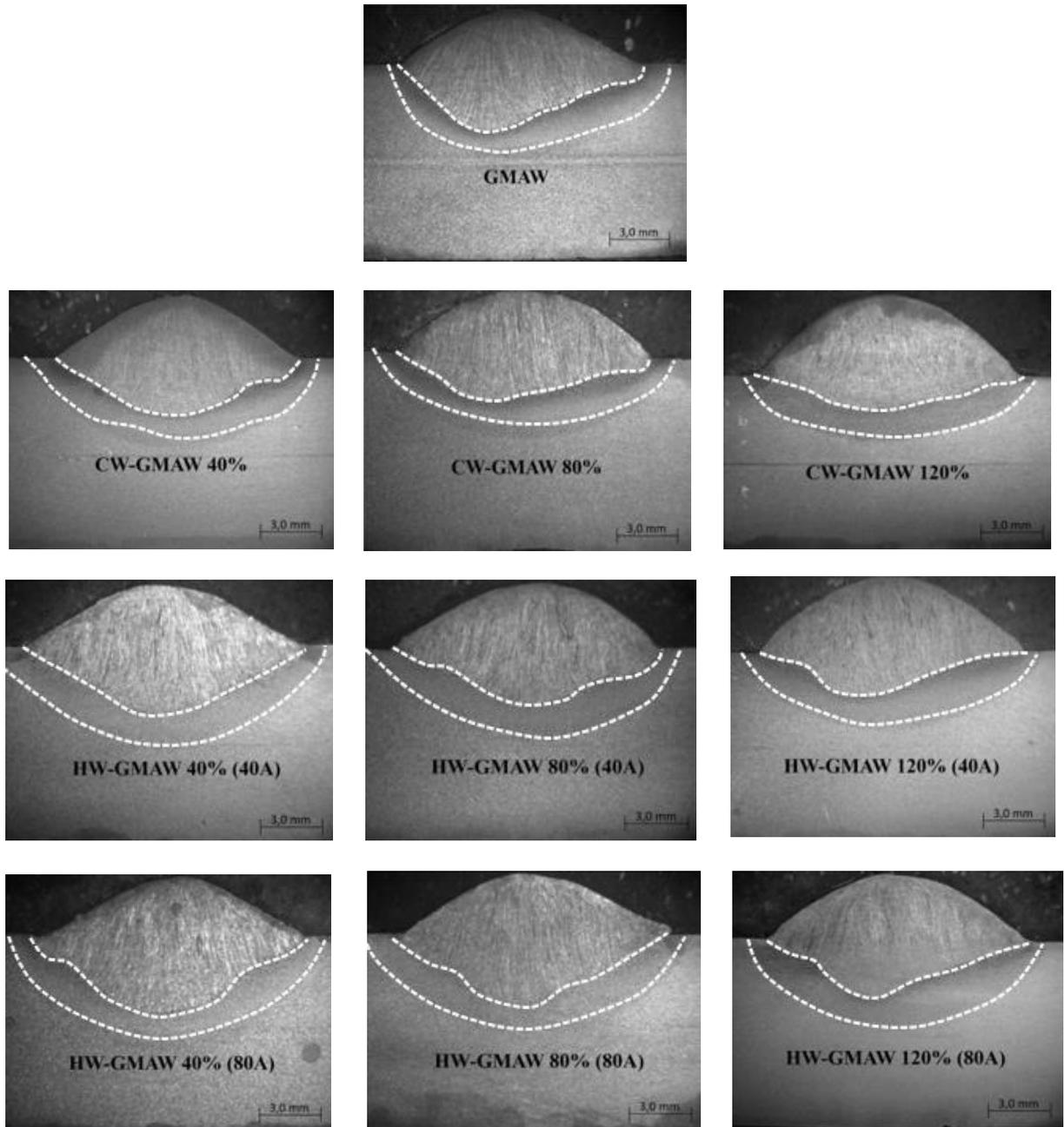


Figura 3.20 – Valores médios de taxa de deposição: GMAW, CW-GMAW e HW-GMAW. Fonte: Autor (2022).

A seguir, exemplos da geometria da seção transversal das amostras soldadas são mostrados através da Figura 3.21.



**Figura 3.21** – Exemplos da seção transversal das amostras soldadas pelos processos GMAW, CW-GMAW e HW-GMAW (40 A e 80 A). **Fonte:** Autor (2022).

Observando as imagens (Figura 3.21) e os valores (Tabela 3.4) de seus parâmetros geométricos médios, no processo CW-GMAW, ocorreu uma redução na profundidade de penetração com o aumento dos níveis da taxa de alimentação de arame adicional em relação ao

processo GMAW. Já com o processo HW-GMAW, o aquecimento do arame promoveu a recuperação da profundidade de penetração em relação ao processo CW-GMAW.

### 3.2.3 Conclusões

A dinâmica da transferência metálica, sua influência na geometria do cordão e na formação do cordão de soldagem foram analisadas. Com base nas observações, podem ser tiradas as seguintes conclusões:

- A estabilidade relacionada a avaliação dos oscilogramas e ciclogramas apresentaram pequenas flutuações de tensão e corrente, quando do uso de arame adicional CW e HW em relação ao processo GMAW.
- As taxas de alimentação do processo CW-GMAW diminuem a penetração em até 49% e a diluição em até 46% em comparação ao GMAW.
- O processo HW-GMAW em relação ao GMAW, reduz os níveis de diluição em até 10% mantendo a profundidade de penetração semelhante (GMAW), principalmente quando a taxa de HW é de 80%.
- Taxas de alimentação do arame adicional para o processo HW-GMAW resultaram em taxas de deposição em até 31% maiores em relação ao processo GMAW.
- Com valores de 40% de arame adicional e corrente de 80 A no processo HW, a penetração apresentou valores semelhantes ao processo GMAW.

### 3.3 EXPERIMENTO II – UMA NOVA ABORDAGEM

Esta fase da pesquisa teve como objetivo o estudo do processo HW-GMAW, inicialmente com o levantamento dos melhores parâmetros de soldagem, usando o processo GMAW tais como, velocidade de soldagem, sentido de deslocamento da tocha (puxando ou empurrando) e posteriormente com o processo HW-GMAW, a taxa de arame adicional, corrente de aquecimento, polaridade do arame de adição e suas interações na formação de um cordão de solda aceitável em termos de sanidade superficial, com bom aspecto visual, regularidade geométrica e isento de descontinuidades. Posteriormente foram realizados cordões de solda por simples deposição para investigação desses parâmetros de soldagem, na estabilidade geral do processo de soldagem, na dinâmica do arco e na geometria final do cordão de solda.

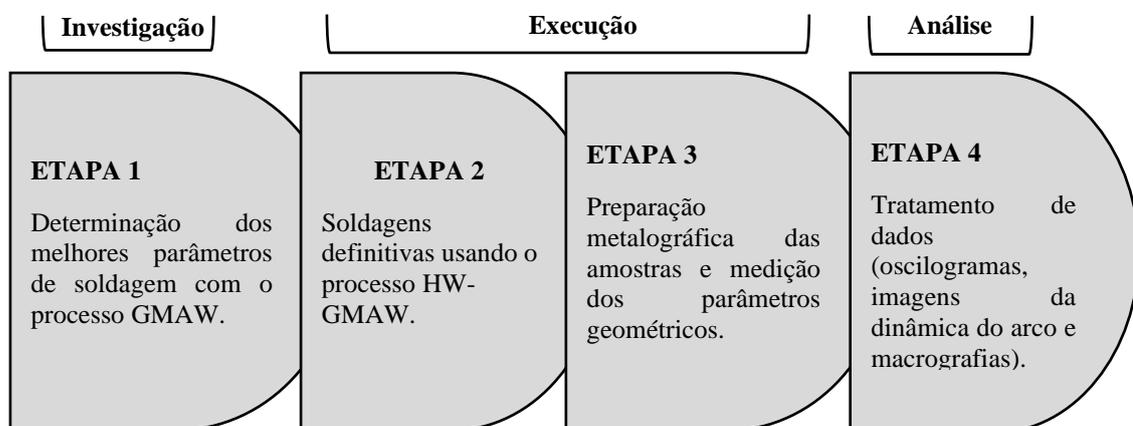
### 3.3.1 Consumíveis, equipamentos e metodologias utilizados nos processos de soldagem

Chapas de aço AISI 1020, nas dimensões de 225,0 mm de comprimento por 56,0 mm de largura por de 9,5 mm de espessura foram usadas como metal base para o depósito dos cordões com o objetivo de estudar o processo HW-GMAW em um aço com grande aplicação genérica, selecionado em função da sua boa soldabilidade e do seu baixo custo de aquisição. Os arames empregados no experimento foram o de classe AWS ER70S-6, conforme classificação da norma AWS 5.18, nos diâmetros de 1,2 mm e 0,9 mm para o arame eletrodo e arame adicional, respectivamente. A seleção foi determinada pelas suas características de elevada produção, facilidade de manutenção da estabilidade do arco e adequação experimental ao processo de soldagem com alimentação de arame quente. Trata-se de um arame com larga aplicação na indústria metal-mecânica, na soldagem de aço de baixo carbono e de baixo custo de aquisição. A Tabela 3.5 fornece a composição química nominal do metal de base e dos arames de solda.

**Tabela 3.5** - Composição química (% em peso) do metal base e dos arames de solda - Experimento II. **Fonte:** AWS.A5.18/A5.18M (2005); ASTM, A 29/A 29M – 04 (2009).

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe
AISI 1020	0,18	-	0,3	Máx. 0,04	Máx. 0,05	-	Bal.
ER70S-6	0,15	1,15	1,85	0,025	0,035	0,05	Bal.

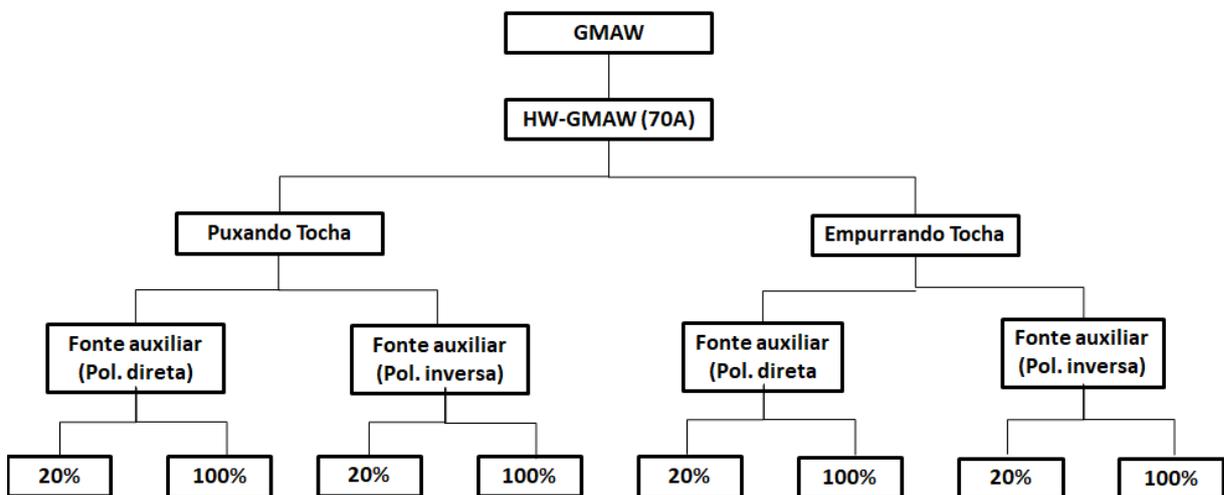
O procedimento para execução desta fase foi dividido em quatro etapas, conforme mostrada na Figura 3.22.



**Figura 3.22** – Etapas de execução do experimento II. **Fonte:** Autor (2022).

O experimento teve início com o processo GMAW para identificar as melhores condições de comportamento do arco elétrico e regularidade na transferência metálica, além de análises visuais sobre o acabamento do cordão de solda, imperfeições e geração de salpicos. Em seguida, a célula de trabalho foi organizada para o processo HW-GMAW variando a taxa de arame adicional em 20% e 100% utilizando corrente de 70 A, variando a polaridade da fonte auxiliar (direta e inversa) e o sentido de deslocamento da tocha (puxando e empurrando) conforme organograma apresentado na Figura 3.23.

Para cada parâmetro estudado (Tabela 3.6) foram geradas três amostras, uma definitiva e duas réplicas, resultando em nove seções transversais que foram examinadas.

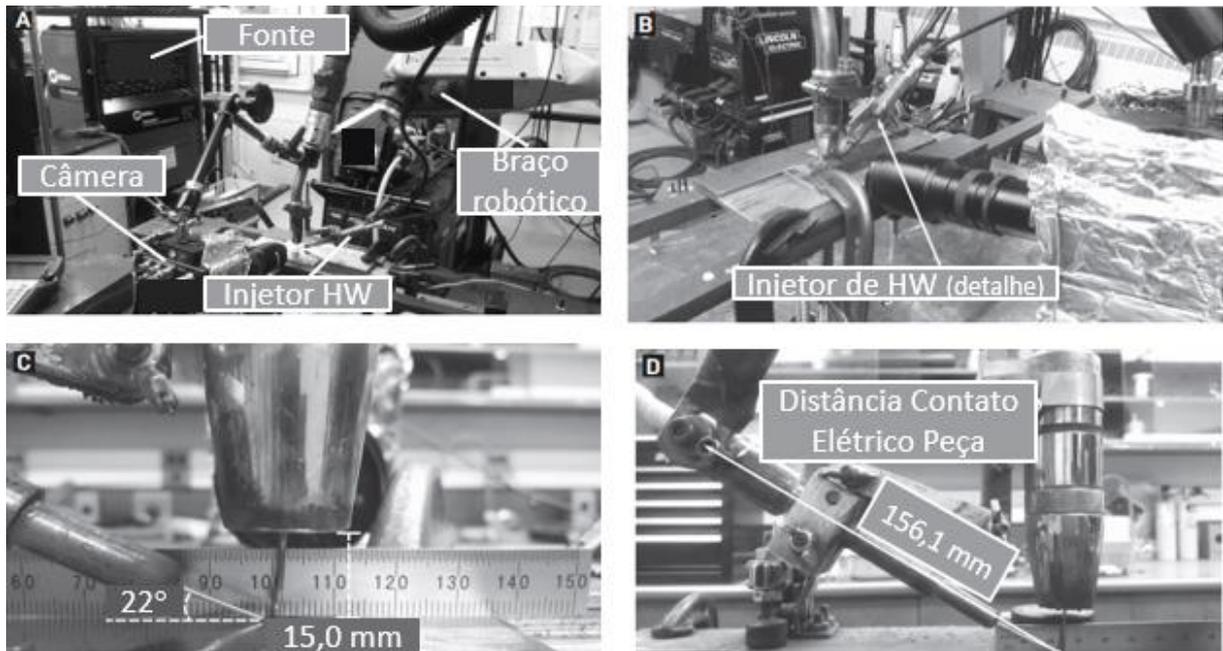


Obs: A taxa de alimentação adicional é um percentual do valor da alimentação do arame principal

**Figura 3.23** – Organograma de execução da soldagem. **Fonte:** Autor (2022).

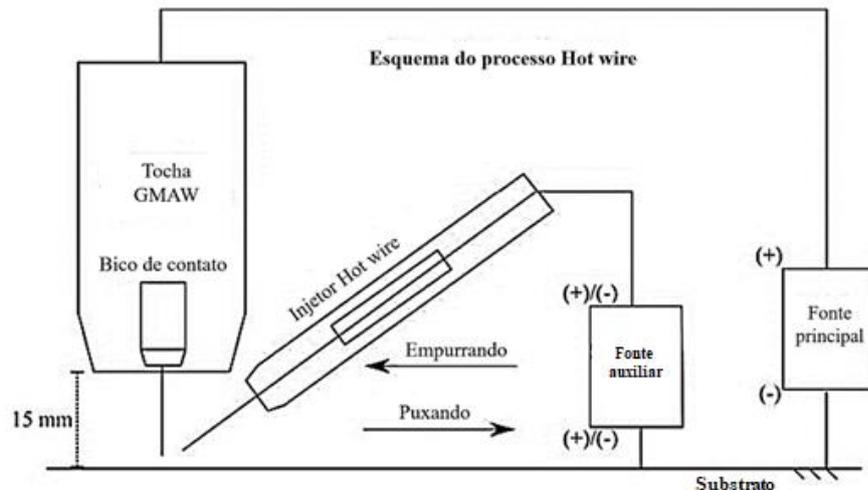
As soldas foram depositadas usando uma fonte de soldagem multiprocessos para o arame principal, e uma fonte de soldagem auxiliar para o HW (arame adicional). Para as soldagens foi utilizado a célula de trabalho, Figura 3.24, que incorporou um braço robótico, equipado com uma tocha de soldagem. Os alimentadores de arame (para o arame principal e para o arame adicional) usados foram incorporados ao braço robótico. Durante os experimentos, a fonte principal foi operada no modo de tensão constante (UC), enquanto a fonte de HW foi mantida no modo de corrente constante (CC). A polaridade do arame aquecido (HW) foi alterada para direta ou inversa durante os experimentos, a fim de estudar seu efeito na transferência metálica. A fonte auxiliar empregada no aquecimento do arame adicional utilizou um sistema de aquecimento por efeito Joule, através de uma resistência elétrica, similar aos equipamentos apresentados no item 2.3.

Através da Figura 3.24A e Figura 3.24B pode ser observado a configuração experimental usada para investigar a transferência de metal. Durante todas as experiências, o ângulo HW de  $22^\circ$  e DBCP de 15,0 mm foram mantidos constantes (Figura 3.24C). A distância entre o contato elétrico do arame adicional e a poça (DCEP) foi de 151,6 mm (Figura 3.24D); o ponto de contato elétrico para o HW foi mantido constante.



**Figura 3.24** – Configuração da célula de trabalho: A-Vista geral; B-Detalhe mostrando o injetor de HW; C-Detalhe mostrando distância bico de contato peça (DBCP) e ângulo do HW; D-Distância do contato elétrico do arame adicional à poça (DCEP). **Fonte:** Ribeiro, *et. al.*, (2020).

A Figura 3.25 apresenta um esquema da configuração experimental, destacando os sentidos de soldagem, empurrando e puxando. No primeiro modo, o HW empurra a poça de soldagem, enquanto no segundo, puxa. É importante enfatizar que o ângulo da tocha de soldagem foi mantido reto ( $90^\circ$ ) em relação à mesa de trabalho onde foram fixadas as chapas usadas nos experimentos como substratos, vide Figura 3.24C.



**Figura 3.25** – Esquema da configuração do HW-GMAW indicando as direções de soldagem, empurrando (HW seguindo o arco) e puxando (HW guiando o arco). **Fonte:** Ribeiro, *et. al.*, (2020).

A tensão da fonte principal foi medida como a diferença de potencial entre a tocha de soldagem e o substrato, e a corrente da fonte principal foi medida através do cabo terra, usando o efeito Hall. Por outro lado, a tensão no HW foi medida como a diferença de potencial entre a ponta de contato do HW (mostrada na Figura 3.24D) e o substrato; a corrente no HW foi medida através do cabo terra da fonte de energia de soldagem auxiliar. As conexões de terra das fontes de energia principal e auxiliar foram conectadas ao substrato. Os valores de corrente e tensão medidos para ambas as fontes de energia de soldagem foram registrados como valores absolutos. Durante o experimento, corrente e tensão foram registradas em 10 kHz por dois segundos, para o arame principal e o HW.

O gás de proteção usado foi uma mistura de argônio (Ar) e 25% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), com uma vazão de 19 l/min. A taxa de massa de HW foi calculada como uma porcentagem da taxa de alimentação do arame principal. A Tabela 3.6 apresenta os valores dos parâmetros de soldagem dos corpos de prova (CP's) desta etapa; polaridade de HW, taxa de alimentação HW (%) e sentido de soldagem, enquanto outros valores foram mantidos constantes. As taxas de alimentação de 20% e 100% de arame quente (HW) foram equivalentes a taxas de deposição de 0,96 kg/h e 4,80 k/h. Para todas as condições de soldagem, três repetições foram realizadas para garantir a reprodutibilidade dos fenômenos observados.

O valor escolhido para a corrente nominal HW (70 A) foi definido para evitar a fusão completa do arame adicional ou gerar um arco entre os dois arames, como ocorreu no levantamento de parâmetros de soldagem na Fase I para correntes a partir de 80 A.

**Tabela 3.6** – Parâmetros de soldagem - Experimento II. **Fonte:** Autor (2020).

Execução	CP's	Vel. Alim. (m/min)	Tensão (V)	Vel. de soldagem (cm/min)	Corrente nominal HW (A)	Polaridade HW	Taxa de alim. HW (%)	Sentido de soldagem
1	23,24 e 25					Negativa	20	Puxando
2	1,2 e 3					Positiva	20	
3	12,14 e 15					Negativa	100	
4	17, 18 e 19					Positiva	100	
5	7, 8 e 9	8,89	28	63,50	70	Negativa	20	Empurrando
6	4, 5 e 6					Positiva	20	
7	10, 11 e 12					Negativa	100	
8	20, 21 e 22					Positiva	100	
9	26, 27 e 28					-	-	

Obs: A taxa de alimentação adicional é um percentual do valor da alimentação do arame principal

Paralelamente, imagens sincronizadas de alta velocidade foram empregadas para estudar a dinâmica do arco elétrico. Os vídeos foram gravados a 5000 fps, com velocidade de obturador de 25  $\mu$ s.

A tensão média ( $\bar{U}$ ), corrente média ( $\bar{I}$ ) e potência média ( $\bar{P}$ ), relatadas neste trabalho, foram calculadas usando as equações, (3.2), (3.3) e (3.4), respectivamente (JOSEPH *et. al.*, 2003):

$$\bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i(t) \quad (3.2)$$

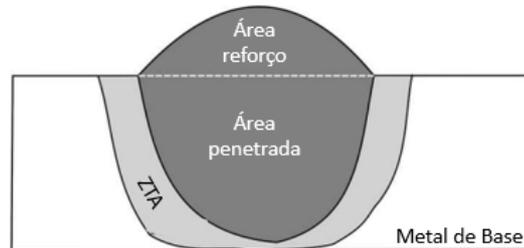
$$\bar{I} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i(t) \quad (3.3)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i(t) \cdot I_i(t) \quad (3.4)$$

Onde  $U_i$  e  $I_i$  representam os valores instantâneos de tensão e corrente, respectivamente; enquanto  $n$  representa o número de medições de corrente e tensão.

Após as soldagens, os CP's foram seccionados para cada parâmetro de estudo e obtidas três réplicas, resultando em nove seções transversais que foram examinadas. Em seguida foram realizados procedimentos padrão de polimento metalográfico e ataque utilizando Nital 2% para

revelar as macroestruturas. A Figura 3.26 mostra um esquema da seção transversal do cordão de solda.



**Figura 3.26** – Esquema para cálculo da diluição. **Fonte:** Ribeiro, *et. al.*, (2020).

A diluição ( $\delta$ ) foi calculada como uma média dos valores de área de reforço e da área penetrada, usando a equação (3.5) (MARQUES, *et.al.*, 2017).

$$\delta = \frac{A_{penetrada}}{A_{penetrada} + A_{reforço}} (\%) \quad (3.5)$$

### 3.3.2 Resultados e discussões

Este tópico apresenta os resultados obtidos do experimento utilizando as análises dos oscilogramas, aquisição de imagens da transferência metálica e macrografias. Através da análise comparativa dos pontos de tensão e corrente nos oscilogramas da fonte principal e auxiliar dos processos de soldagens foi possível fazer uma análise sobre a estabilidade do arco elétrico e, por conseguinte, a regularidade do processo de soldagem e seus reflexos no cordão depositado. Imagens da transferência metálica e as macrografias obtidas corroboraram para o entendimento da dinâmica dos processos de soldagem.

#### 3.3.2.1 Sinais de corrente e tensão

A Tabela 3.7 apresenta para cada execução do experimento os valores médios de corrente, tensão e potência (fonte principal e auxiliar). A variação de tensão e corrente pode ser melhor observada através da análise dos oscilogramas da Figura 3.27 a 3.30.

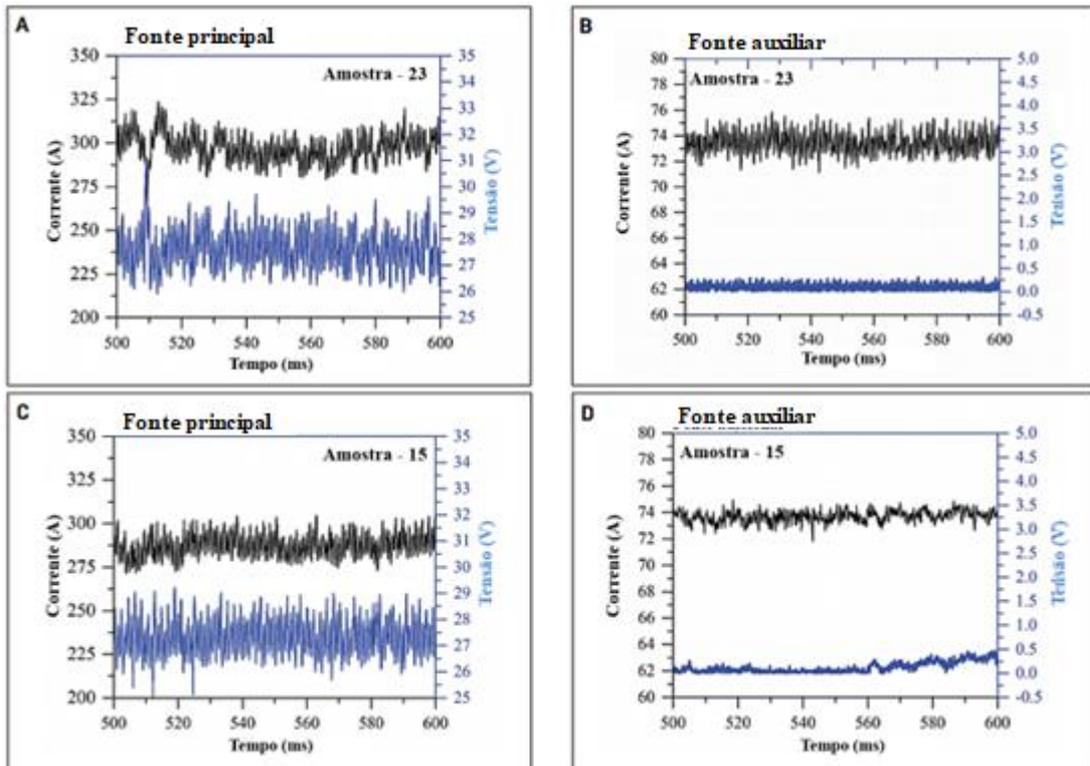
**Tabela 3.7** – Parâmetros elétricos de soldagem - Experimento II. **Fonte:** Ribeiro, *et. al.*, (2020).

Execução	Espécime	Fonte Principal			Fonte Auxiliar		
		Corrente Média (A)	Tensão Média (V)	Potência Média (W)	Corrente Média (A)	Tensão Média (V)	Potência Média (W)
1	23	300,79	25,58	8296,25	73,48	0,092	6,77
	24	293,58	28,08	8244,93	70,17	0,037	2,66
	25	294,14	28,09	8261,34	64,3	0,035	2,33
2	1	278,32	27,56	7670,79	67,81	2,62	177,24
	2	275,14	27,56	7584,13	67,98	2,58	175,15
	3	276,81	27,55	7625,81	67,86	2,62	177,85
3	13	279,85	27,43	7677,6	73,79	0,157	11,605
	14	279,75	27,41	7668,5	73,93	0,252	18,66
	15	278,82	27,44	7651,37	73,61	0,0014	1,06
4	17	275,15	27,41	7535,97	67,28	2,45	164,84
	18	280,76	28,07	7878,041	67,17	2,59	173,87
	19	279,94	28,05	7851,02	67,93	2,38	162,04
5	7	280,32	27,51	7711,96	74,51	0,282	21,14
	8	276,44	27,45	7589,71	74,1	0,45	33,99
	9	288,083	27,67	7972,59	57,43	0,072	4,14
6	4	289,79	27,67	8018,4	25,73	0,073	1,92
	5	296,54	28,05	8318,69	53,47	0,036	2,05
	6	296,94	28,05	8327,43	66,87	0,037	2,57
7	10	280,54	27,45	7699,72	74,05	0,77	57,23
	11	276,84	27,42	7588,6	73,84	0,39	28,87
	12	278,46	27,42	7633,12	73,92	0,24	17,674
8	20	278,63	27,43	7641,24	68,46	2,1	143,96
	21	283,25	28,06	7949,03	68,97	2,06	142,2
	22	282,75	28,04	7926,83	68,44	2,23	152,66
9	26	295,11	27,49	8112,7	0	0	0
	27	290,32	27,51	7988,35	0	0	0
	28	291,51	28,05	8176,21	0	0	0

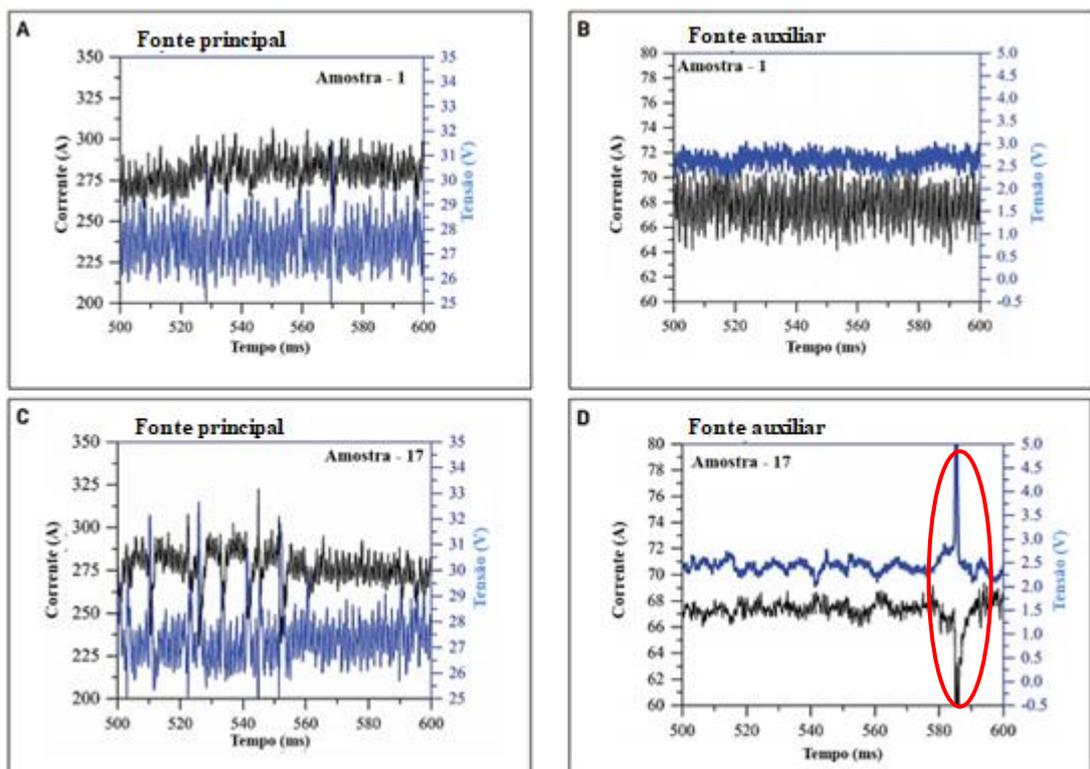
Na Figura 3.27 pode ser observado os sinais de corrente/tensão nas execuções das amostras 23 (polaridade direta, puxando, 20%) e 15 (polaridade direta, puxando, 100%); comparando o efeito da variação da taxa de alimentação do arame aquecido (HW) de 20 % para 100% nas execuções, o resultado levou a concluir que as tensões apresentaram valores semelhantes. Entretanto, comparando as execuções da Figura 3.27, com as execuções das amostras 1 e 17, mostradas na Figura 3.28, que diferem entre si apenas na polaridade HW - direta e inversa, respectivamente, a tensão registrada na fonte auxiliar mudou em média de 0,092 V e 0,208 V (amostra 1 – polaridade direta HW) para 2,62 V e 2,46 V (amostra 17 – polaridade inversa HW). Em síntese, quando se compara os resultados das amostras 23 e 15, que possuem polaridade direta, com a amostra 17 com polaridade inversa, puxando a 100% de HW, fica claro que uma polaridade diferente para o HW promoveu uma alteração na tensão medida, destacada em vermelho na Figura 3.28D pelo intenso curto-circuito. Nesta condição o arco é fortemente atraído pelo HW gerando uma redução instantânea no comprimento do arco, causando uma transferência metálica momentaneamente por curto-circuito, a autorregulagem da fonte principal contrabalança com um aumento da corrente para manter a taxa de fusão e o comprimento do arco definidos, vide Figura 3.33B.

Comparando os resultados obtidos nas Figura 3.27 e Figura 3.28, pode-se observar que o evento da Figura 3.27 é mais estável que o da Figura 3.28, fundamentado com base no registro de maiores flutuações e no comportamento transitório da tensão em particular, o que levou a concluir que possivelmente devido à maior taxa de alimentação de HW (100%) na amostra 15 (Figura 3.27), contribuiu para estabilizar a dispersão dos pontos catódicos na poça de fusão, levando a uma condição de maior estabilidade do arco.

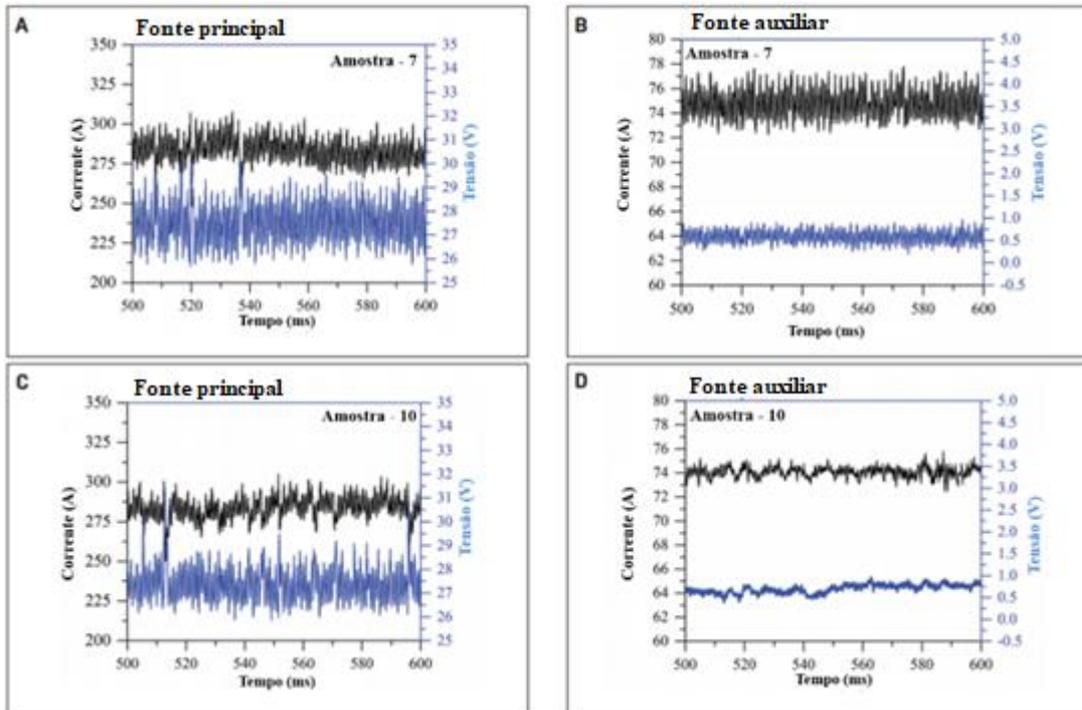
Comparando a amostra 7 (polaridade direta, empurrando, 20%) e a amostra 10 (polaridade direta, empurrando, 100%) na Figura 3.29, pode-se observar que, embora a fonte auxiliar responda da mesma forma, a amplitude de corrente e tensão é maior na amostra 7 do que na amostra 10. Na amostra 10, a maior taxa de alimentação de HW estabilizou a resposta da fonte auxiliar, responsável pela menor variação do valor de corrente e tensão, o mecanismo pode ser explicado em trabalhos anteriores (XIANG, LI, *et al.*, 2016).



**Figura 3.27** - Sinais de corrente/tensão da fonte principal e fonte auxiliar comparando duas amostras diferentes: A-B: Amostra-23 (Execução n° 1, polaridade direta, puxando, 20%); C-D: Amostra-15 (Execução n° 3, polaridade direta, puxando, 100%). **Fonte:** Ribeiro, *et. al.*, (2020).



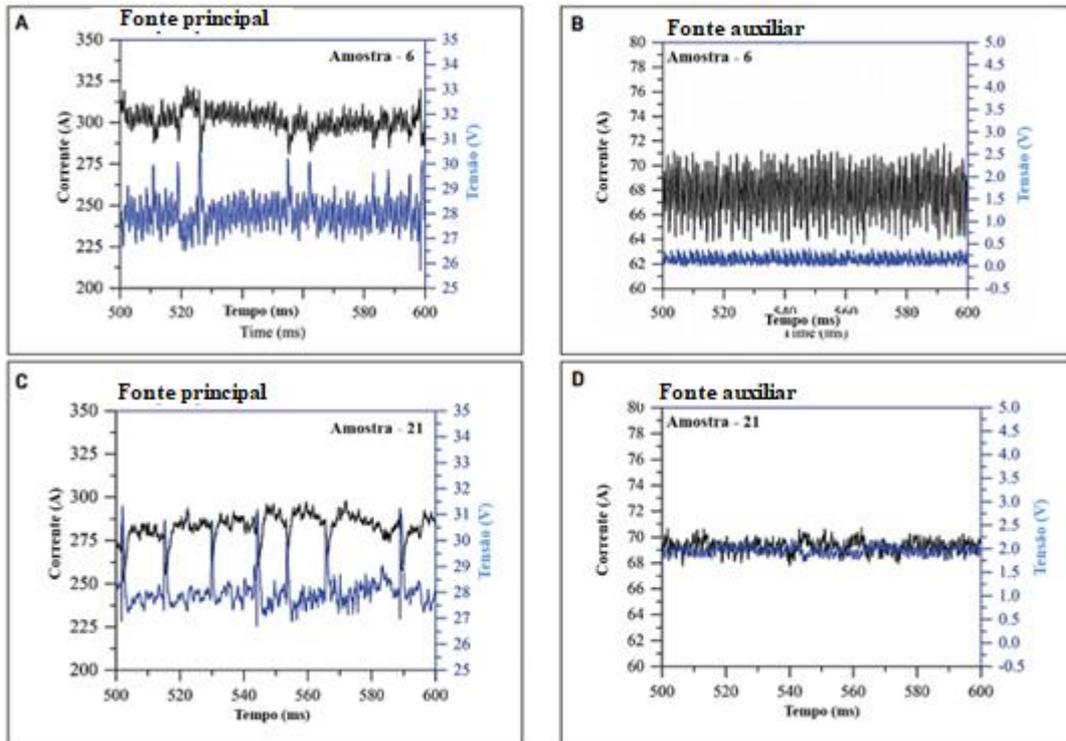
**Figura 3.28** - Sinais de corrente/tensão da fonte principal e fonte auxiliar comparando duas amostras diferentes: A-B: Amostra-1 (Execução n° 2, polaridade inversa, puxando, 20%); C-D: Amostra-17 (Execução n° 4, polaridade inversa, puxando, 100%). **Fonte:** Ribeiro, *et. al.*, (2020).



**Figura 3.29** – Sinais de corrente/tensão da fonte principal e fonte auxiliara comparando duas amostras diferentes: A-B: Amostra-7 (Execução n° 5, polaridade direta, empurrando, 20%); C-D: Amostra-10 (Execução n° 7, polaridade direta, empurrando, 100%). **Fonte:** Ribeiro, *et. al.*, (2020).

Comparando as amostras 6 (polaridade inversa, empurrando, 20%) e 21 (polaridade inversa, empurrando, 100%), vide Figura 3.30, pode-se observar que, aumentando a taxa de alimentação do HW enquanto utiliza-se a polaridade inversa na orientação empurrando, a saída apresenta variações repentinas de corrente e tensão. Isso ocorre devido ao contato intermitente do arco elétrico com o HW, o que promove breves alterações na fixação ou comprimento do arco.

Comparando o efeito das polaridades das Figura 3.27 (amostra 23 – polaridade direta, puxando, 20 % e amostra 15 – polaridade direta, puxando, 100 %) e Figura 3.28 (amostra 1 – polaridade inversa, puxando, 20% e amostra 17 – polaridade inversa, puxando, 100%), a polaridade direta do HW gerou um arco mais estável do que a polaridade inversa, como pode ser constatado pela variação de corrente e tensão destacada na fonte auxiliar, pelas variações repentinas de corrente e tensão na fonte principal. Provavelmente, isso se deve ao fato de o HW estando na polaridade direta repeliu o arco, evitando curto-circuito. Comparando a estabilidade do arco para diferentes orientações e alimentação de HW na Figura 3.27 e Figura 3.29 (amostra 7 – polaridade direta, empurrando, 20% e amostra 10 – polaridade direta, empurrando, 100%), quando o arame HW foi empurrado, a poça de soldagem ficou mais instável do que quando estava na orientação puxando.



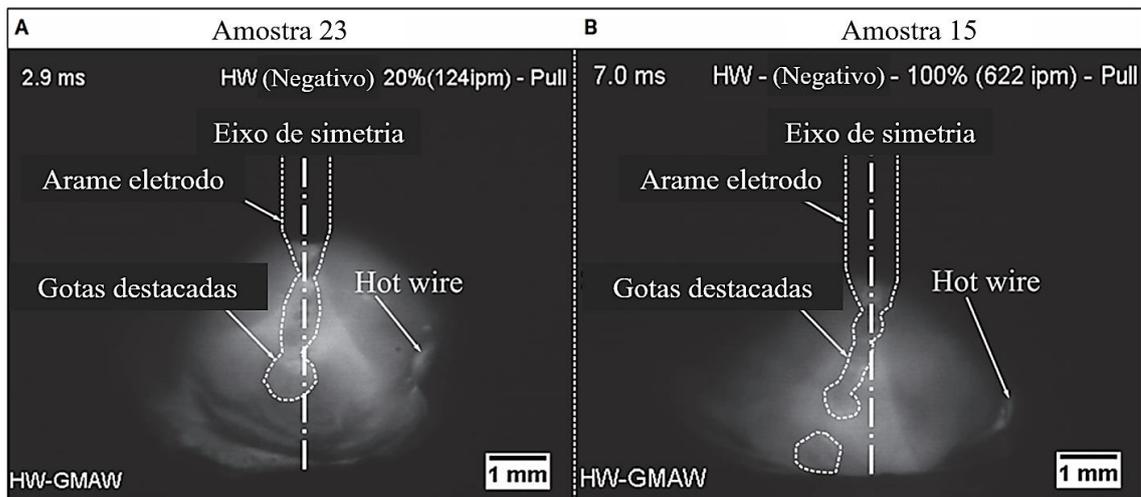
**Figura 3.30** – Sinais de corrente/tensão da fonte principal e fonte auxiliar comparando duas amostras diferentes: A-B: Amostra-6 (Execução n° 6, polaridade inversa, empurrando, 20%); C-D: Amostra-21 (Execução n° 8, polaridade inversa, empurrando, 100%). **Fonte:** Ribeiro, *et al.*, (2020).

Ao colocar o HW na orientação empurrando, há uma tendência de comprimir a poça de soldagem ou submergir o arame abaixo dela, perturbando os pontos catódicos que surgem na sua superfície. Por outro lado, quando o HW estava na orientação puxando, em frente à poça de fusão, há uma tendência para que esta fosse “esticada”, transferindo as gotículas de HW mais facilmente do que na orientação empurrando. Novamente, quando há um incremento na adição de HW, pode-se observar a estabilização dos pontos catódicos (locais emissores de elétrons) devido ao resfriamento da poça de fusão (GUNTHER, BERGMANN, *et al.*, 2018), o que resulta em um sinal de arco mais estável (resposta de corrente e tensão).

### 3.3.2.2 Mecanismo de transferência metálica

A dinâmica do arco durante o processo HW-GMAW depende da polaridade do HW e da corrente no arame eletrodo, que pode ser modelado como dois condutores cilíndricos. Quando a corrente passa por dois condutores cilíndricos com polaridades diferentes, o campo magnético induzido pelo fluxo de corrente produz uma força resultante que repele os dois condutores (REIS, 2009; SCHREIBER, ALLEBRODT, *et al.*, 2018). Por outro lado, se os condutores têm a mesma polaridade, a força resultante tende a atrair os dois condutores. Como

esperado, quando o HW é mantido em polaridade direta, a força resultante da corrente gerada repele o arco, como pode ser visto pelas gotículas desviadas na Figura 3.31.



**Figura 3.31** - Transferência metálica no processo HW-GMAW: A-amostra 23 (polaridade direta, puxando, 20%); B-amostra 15 (polaridade direta, puxando, 100%). **Fonte:** Ribeiro, *et. al.*, (2020).

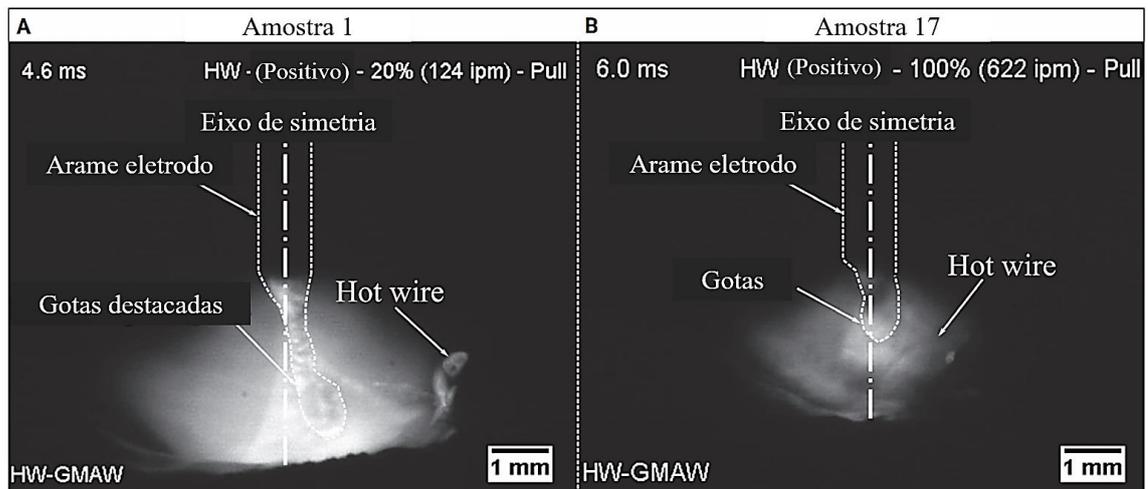
Para baixa e alta taxa de alimentação de HW, 20% e 100% respectivamente, o HW funde dentro da poça de fusão. Mesmo com altas taxas de alimentação o HW é facilmente fundido pelo arco, devido à energia adicional fornecida pelo aquecimento por efeito Joule, que aumenta o rendimento do arco, observar a Tabela 3.8.

A Figura 3.32 indica que, ao se mudar a polaridade do HW para inversa, o arco é atraído para o HW. Nesse caso, o HW ainda é fundido na poça de fusão. No entanto, quando a taxa de alimentação aumenta ainda mais, Figura 3.32B, o arco é fortemente atraído pelo HW, induzindo uma redução instantânea no comprimento do arco, causando uma transferência metálica momentaneamente por curto-circuito. Devido à auto-regulação da fonte principal, que opera no modo de tensão constante, essa redução no comprimento do arco é contrabalanceada por um aumento no valor de corrente, para manter a taxa de fusão e o comprimento do arco pré-definido.

**Tabela 3.8** - Percentual da energia total devido à dissipação de calor do arame adicional por efeito Joule. **Fonte:** Ribeiro, *et. al.*, (2020).

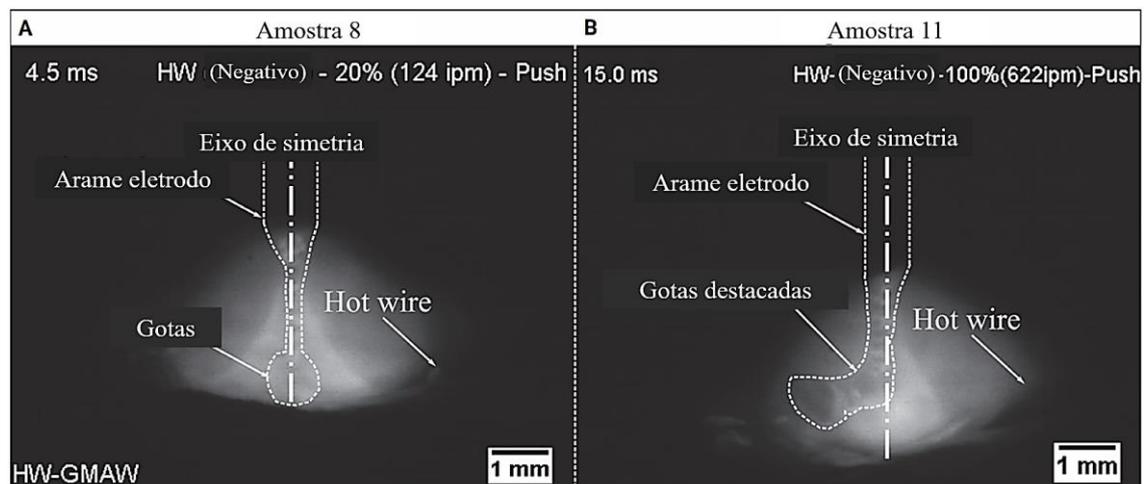
Execuções	Potência Instantânea média HW (W)	Potência total (W)*	Relação de potência (%) **
1	4	8242	0,05
2	177	7804	2,26
3	10	7676	0,14
4	167	7922	2,11
5	20	7778	0,25
6	2	8224	0,03
7	36	7675	0,46
8	146	7085	2,06

Obs.: \* A potência total é a soma da potência instantânea média do arame eletrodo e do HW; \*\* A relação de potência é a relação entre a potência do HW e a potência total em watts.



**Figura 3.32** - Transferência metálica no processo HW-GMAW: A-amostra 1 (polaridade inversa, puxando, 20%); B-amostra 17 (polaridade inversa, puxando, 100%). **Fonte:** Ribeiro, *et. al.*, (2020).

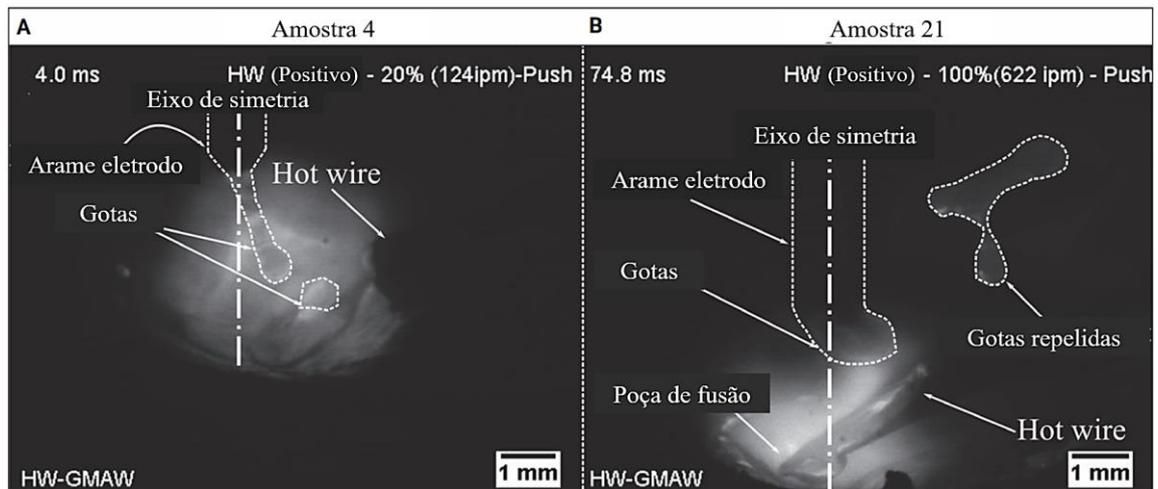
A Figura 3.33A apresenta a situação em que há apenas uma leve repulsão do arco pelo HW (execução 8: polaridade direta, empurrando, 20%). Devido à baixa taxa de alimentação do HW, ele é facilmente fundido e não exerce uma forte influência no arco. Por outro lado, quando é usada uma alta taxa de alimentação para o HW (100%), essa alteração promove uma forte repulsão do arco, que causa a repulsão da gota destacada, fazendo com que as gotas sejam transferidas para a região da poça de fusão, como mostra a Figura 3.33B.



**Figura 3.33** - Transferência metálica no processo HW-GMAW: A-amostra 8 (polaridade direta, empurrando, 20%); B-amostra 11 (polaridade direta, empurrando, 100%). **Fonte:** Ribeiro, *et. al.*, (2020).

Através da Figura 3.34A pode ser observado a forte atração do arco pelo HW, quando a polaridade é inversa, isso desloca a poça de fusão. O HW se funde na poça de fusão, mas o

arco não está fixo ao HW nesta situação, e a transferência de metal é direcionada para a parte traseira da poça de fusão. Na Figura 3.34B, o arco está completamente fixo ao HW, o que provoca uma redução acentuada no comprimento do arco e gera curtos-circuitos mais intensos, já que a gota agora pode tocar o HW com facilidade. As diferenças entre esses dois modos de transferência podem ser claramente observadas em termos da influência na geometria final do cordão. Além disso, a presença de curtos-circuitos leva a um aumento de respingos.



**Figura 3.34** - Transferência de metal no processo HW-GMAW: A-amostra 4 (polaridade inversa, empurrando, 20%); B- amostra 21 (polaridade inversa, empurrando, 100%). **Fonte:** Ribeiro, *et. al.*, (2020).

### 3.3.2.3 Influência da polaridade, taxa de alimentação do arame aquecido (HW) e sentido de soldagem na geometria dos cordões de solda depositados

A aplicação do processo HW-GMAW em estruturas metálicas é importante considerar os efeitos que os parâmetros de soldagem podem ter na geometria das soldas e suas implicações no comportamento desses componentes em serviço. Em suas pesquisas, Alam *et. al.*, (2010) concluíram que a geometria das soldas está relacionada com a resistência a fadiga de juntas soldadas. Ou seja, soldas com geometrias suaves e com o mínimo de defeitos contribuem para oferecer resistência à fadiga, haja vista que estes contribuem para a concentração de tensões onde estão presentes. É importante salientar que as normas técnicas não apresentam critérios objetivos para classificar uma solda com geometria ótima, os critérios para esta avaliação só estabelecem que a aparência é um aspecto que pode ser importante no desempenho da solda em serviço, ou seja, trata-se um critério subjetivo de avaliação. Já Cortés *et. al.* (2011) definem dois grupos de conceitos para garantir as melhores condições de geometria: aparência e a morfologia da solda. Devido a subjetividade que envolve a avaliação da aparência do cordão, alguns parâmetros quantitativos e qualitativos foram usados para definir de maneira objetiva a

aparência, entre os quais, números de impressões no cordão por unidade de comprimento, o seu padrão de exposição e a percentagem de enchimento. Quanto a morfologia, avalia o perfil do contorno do cordão considerando suas dimensões principais: Largura (L), Reforço (R), Penetração (P), Zona Termicamente afetada (ZTA), etc. (Figura 3.35).



**Figura 3.35** – Esquema representativo das grandezas geométricas do cordão de solda. **Fonte:** Autor (2022).

Portanto, na fabricação de uma construção soldada, os parâmetros geométricos e seus controles são importantes, não só na qualidade, mas na produtividade e no custo final do projeto.

Para melhor análise das variáveis de entrada sobre as variáveis de saída, a partir da Tabela 3.9 foram construídos gráficos de barra tendo como referência o processo GMAW para a avaliação da influência da taxa de alimentação, polaridade do arame adicional (HW) e do sentido de soldagem, sobre as características geométricas e econômica das seções obtidas pelo seccionamento dos cordões de solda depositados. As letras na coluna de execução (Tabela 3.9) indicam a relação entre a execução e a macrografia obtida, a partir dos parâmetros de soldagem, vide Figura 3.45.

**Tabela 3.9** – Parâmetros das amostras soldadas - Experimento II. **Fonte:** Autor (2020).

Execução	CP's	Polaridade HW	Taxa de alim. HW (%)	Sentido de soldagem	Largura (mm)	Reforço (mm)	Penetração (mm)	Área penetrada (mm <sup>2</sup> )	Área total (mm <sup>2</sup> )	Área ZTA (mm <sup>2</sup> )	Diluição (%)	Taxa de deposição (kg/h)
<b>1 (B)</b>	23,24 e 25	Direta	20	Puxando	10,36±0,22	2,98±0,11	<b>3,39±0,11</b>	15,09±1,14	33,17±2,16	15,02±0,16	45,49±1,80	<b>0,95±0,21</b>
<b>2 (D)</b>	1,2 e 3	Inversa	20		12,21±0,45	2,85±1,06	<b>3,29±0,13</b>	17,09±0,59	38,91±0,18	19,62±1,35	43,47±0,74	<b>0,98±0,32</b>
<b>3 (C)</b>	13,14 e 15	Direta	100		11,07±0,62	4,03±0,53	<b>2,31±0,12</b>	13,55±1,85	40,96±5,52	16,54±1,12	33,40±0,56	<b>4,82±0,10</b>
<b>4 (E)</b>	17, 18 e 19	Inversa	100		9,23±0,87	4,31±0,67	<b>1,82±0,66</b>	10,65±3,32	33,79±3,21	12,12±1,83	27,37±4,06	<b>4,91±0,28</b>
<b>5 (F)</b>	7, 8 e 9	Direta	20	Empurrando	11,66±0,10	2,93±0,43	<b>3,70±0,10</b>	17,91±0,29	39,63±1,16	27,02±1,21	45,41±1,06	<b>0,89±0,20</b>
<b>6 (H)</b>	4, 5 e 6	Inversa	20		12,23±0,24	3,21±0,39	<b>3,60±0,14</b>	17,26±0,25	39,09±0,65	14,81±0,95	44,25±0,63	<b>1,02±0,14</b>
<b>7 (G)</b>	10, 11 e 12	Direta	100		11,75±0,69	3,98±1,20	<b>2,15±0,38</b>	12,79±2,22	43,05±0,58	15,07±1,08	29,42±4,92	<b>4,46±0,65</b>
<b>8 (I)</b>	20, 21 e 22	Inversa	100		8,86±0,08	4,50±1,02	<b>1,89±0,20</b>	10,29±0,70	33,51±0,33	12,09±0,74	30,19±1,34	<b>5,01±0,51</b>
<b>9 (A)</b>	26, 27 e 28	-	-	-	9,37±1,03	2,80±0,52	3,64±0,26	16,13±0,34	30,32±1,03	17,99±0,89	52,80±0,40	0,76±0,10

Obs \* As letras na coluna de execução indicam as seções representativas das soldas fabricadas processos GMAW (execução 9) e HW-GMAW (vide Figura 3.46)

## a) Largura e reforço

Os valores médios de largura, reforço e o processo GMAW representado por suas linhas características para todas as execuções do experimento são mostrados nas Figuras 3.36 e 3.37. Na taxa de 100% de HW na polaridade inversa, independente da condição de movimentação da tocha, a largura do cordão foi inferior ao processo GMAW (Tabela 3.9). A análise dos efeitos mostrou que a polaridade e a taxa de HW tiveram influência significativa na largura do cordão (Tabela A.11 - Apêndice). Na polaridade inversa ao mudar de 20% para 100% a taxa de HW, ocorreu uma redução neste parâmetro em comparação ao GMAW (Tabela 3.9). Um possível mecanismo é que o HW na polaridade inversa para 100% o arco é fortemente atraído pelo HW (Figura 3.32B) induzindo uma redução instantânea no comprimento, diminuindo a tensão na fonte auxiliar, contribuindo para a redução da largura do cordão (Tabela 3.7, execuções 4 e 8).

Quanto ao reforço, a análise dos efeitos mostrou que o aumento da taxa de HW de 20% para 100% teve efeito significativo neste parâmetro (Tabela A.12 - Apêndice). Este aumento do HW contribuiu para a extração de calor da poça reduzindo a profundidade de penetração, vide Figuras 3.39, aumentando o reforço, vide Figuras 3.36; 3.37 e 3.45 (H-I). É importante no processo de soldagem um controle do reforço pois sua robustez aumenta a resistência da junta soldada, no entanto, o seu aumento excessivo, além de aumentar o consumo de arame pode contribuir para o aparecimento de discontinuidades (por ex. Figura 3.46EGI) gerando tensões residuais no cordão de solda (SHOEB *et. al.*, 2013).

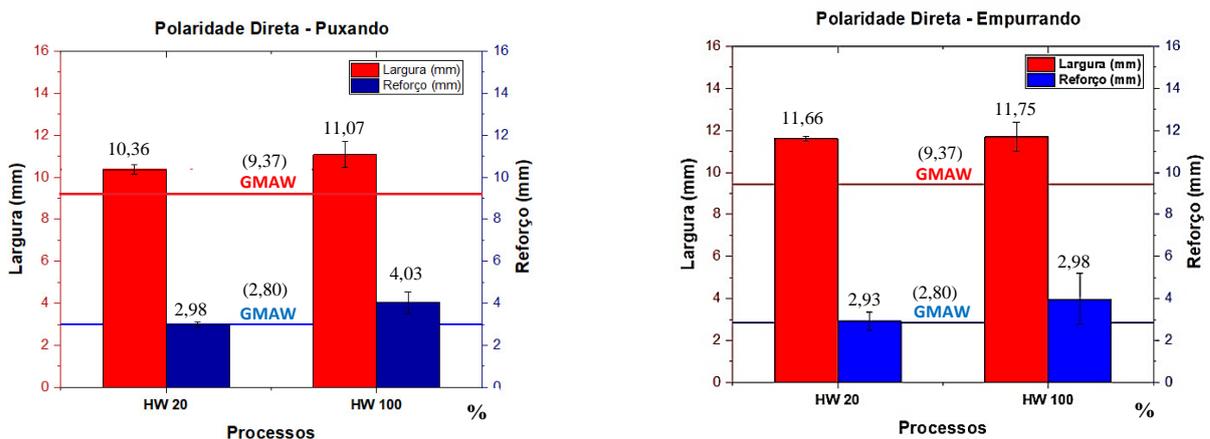


Figura 3.36 – Largura e reforço para os processos GMAW, HW-GMAW (CC<sup>o</sup>). Fonte: Autor (2022).

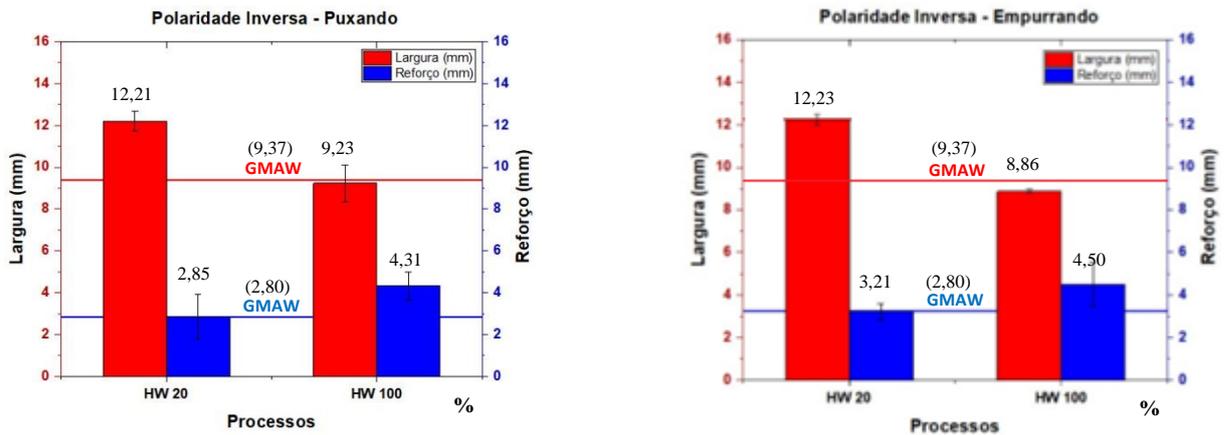


Figura 3.37 – Largura e reforço para os processos GMAW, HW-GMAW (CC<sup>+</sup>). Fonte: Autor (2022).

b) Penetração e área penetrada

As Figuras 3.38 e 3.39 mostram os valores médios de penetração, área penetrada e o processo GMAW representado por suas linhas características calculado para todas as amostras. Em todas as execuções o aumento destes parâmetros foi inversamente proporcional a taxa de adição de HW. A análise dos efeitos mostrou que a taxa de HW ao mudar de 20% para 100% reduziu a penetração e a área penetrada (Tabela A.13 - Apêndice). O aumento de massa na poça contribui para reduzir a sua energia, reduzindo esses valores em relação ao GMAW.

Para a taxa de alimentação de 20% de HW, a extração de energia da poça pela introdução de arame de adição foi menor (menor massa), nesta condição a penetração e a área penetrada (polaridade direta/inversa) equipararam-se ao processo GMAW. Porém, quando a taxa de HW aumentou (100%), a extração de energia da poça foi maior (maior massa) contribuindo para redução desses parâmetros (vide destaques em vermelho Tabela 3.9 e macrografias, Figura 3.45 CEGI).

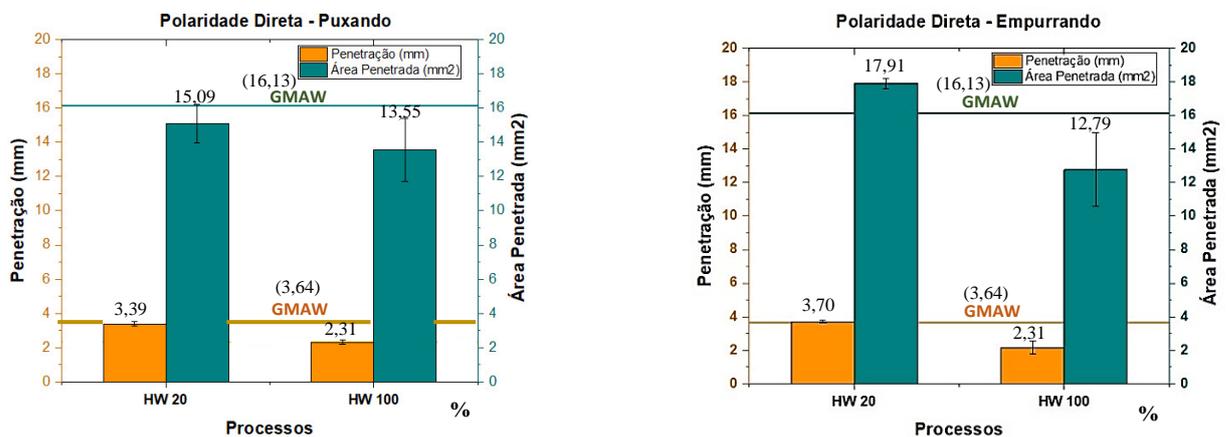
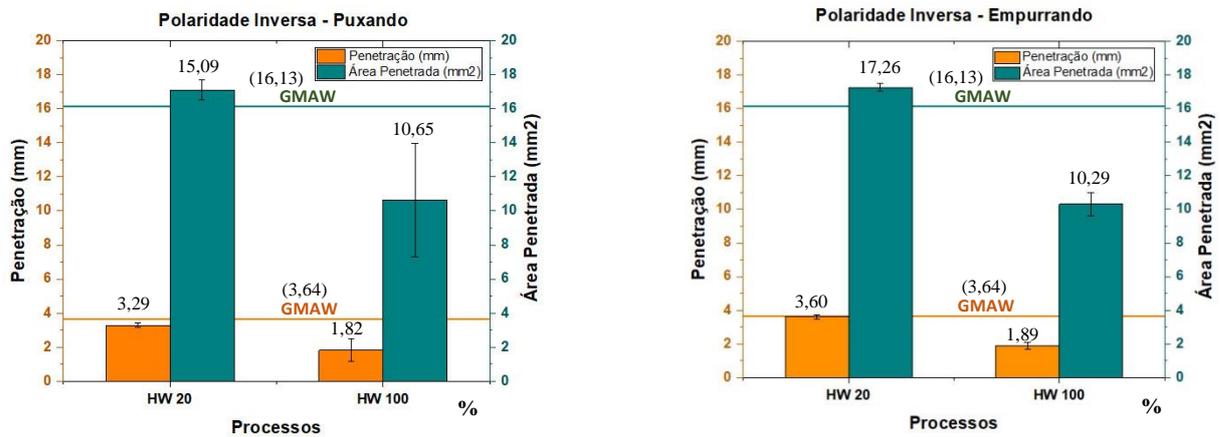


Figura 3.38 – Penetração e área penetrada para os processos GMAW, HW-GMAW (CC<sup>-</sup>). Fonte: Autor (2022).



**Figura 3.39** – Penetração e área penetrada para os processos GMAW, HW-GMAW (CC<sup>+</sup>). **Fonte:** Autor (2022).

### c) Zona Termicamente Afetada (ZTA) e diluição

A área da ZTA, diluição e o processo GMAW para as diversas condições do experimento são mostradas nas Figuras 3.40 e 3.41. Observa-se de uma forma geral que tanto a área da ZTA quanto a diluição apresentam valores médios abaixo dos obtidos no processo GMAW. A análise dos efeitos mostrou que a ZTA foi influenciada pela taxa de adição de HW e pela polaridade do HW (Tabela A.14 – Apêndice). Acredita-se que o aumento de energia da poça de fusão ocorreu ao mudar a polaridade de direta para inversa devido a maior taxa de potência (maior tensão na fonte auxiliar), vide Tabela 3.7, execuções 2, 4 e 8. e, que a taxa do arame de adição ao mudar de 20% para 100% contribuiu para extração de energia da poça, reduzindo a ZTA. Observa-se em destaque na Figura 3.40 na condição empurrando a tocha, a ZTA para 20% HW foi superior ao GMAW. Uma possível causa para este comportamento é que na condição empurrando, o HW ao tocar a poça contribuiu com o aumento de sua energia por efeito Joule face a baixa taxa de arame de adição (20%), aumentando a ZTA.

Na diluição foi observada para todas as condições avaliadas nas execuções experimentais uma redução em seus valores em relação ao processo GMAW quando a taxa de arame de adição aumentou (100%) devido a extração de energia da poça, vide Figuras 3.40 e 3.41. Por exemplo, a introdução de um HW pode diminuir a diluição em média 25%, considerando a condição puxando a tocha, polaridade inversa, 100%. É importante enfatizar que o comportamento dessa variável de soldagem foi influenciado fortemente pela taxa do HW quando variou de 20% para 100% (Tabela A.15 -Apêndice). Uma aplicação promissora do processo HW-GMAW parece ser em revestimentos de solda, uma vez que oferece menor

entrada de calor e diluição em comparação com o GMAW com taxas de deposição superiores (GÜNTHER, et. al., 2018).

Vale ressaltar que a temperatura da poça e sua velocidade de resfriamento têm efeitos significativos nas propriedades e qualidade do cordão de solda depositado, pelas mudanças na microestrutura do metal de base adjacente a poça.

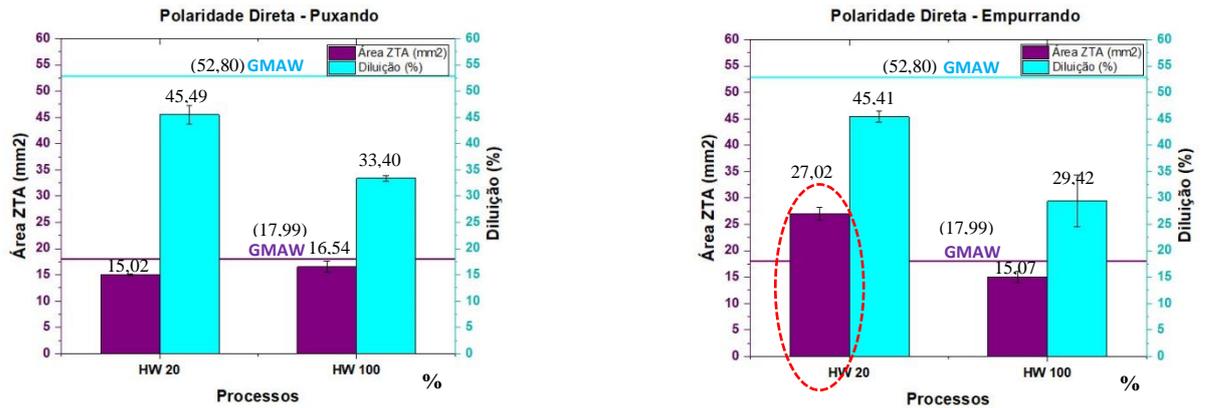


Figura 3.40 – Área da ZTA e diluição para os processos GMAW, HW-GMAW (CC<sup>-</sup>): Fonte: Autor (2022).

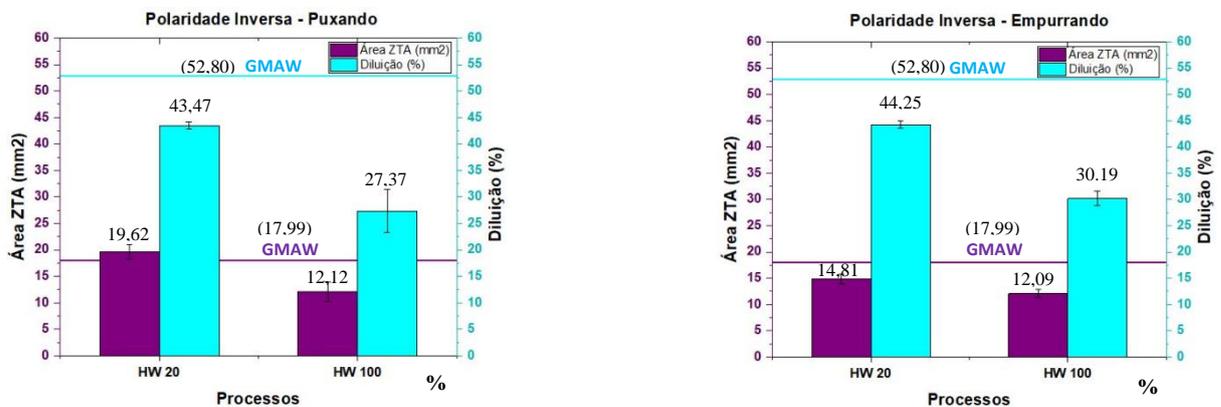
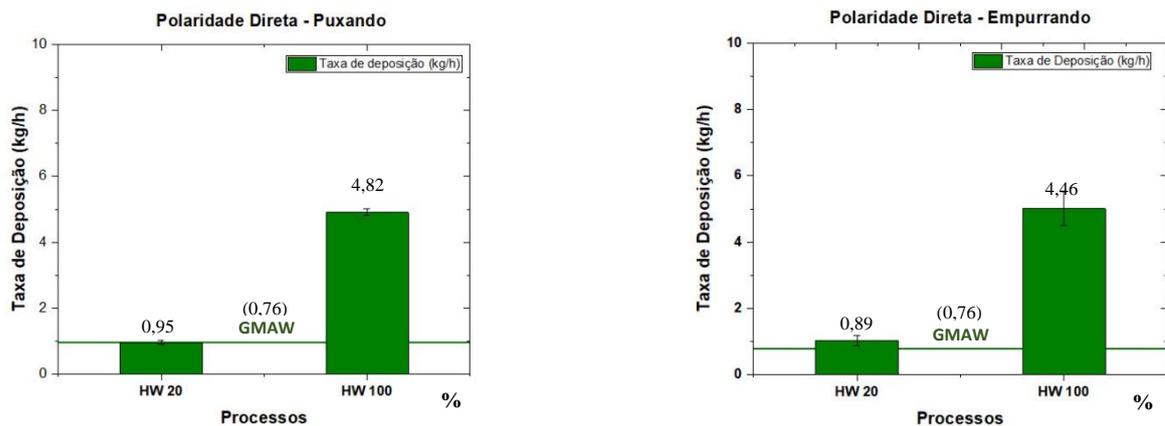


Figura 3.41 – Área da ZTA e diluição para os processos GMAW, HW-GMAW (CC<sup>+</sup>). Fonte: Autor (2022).

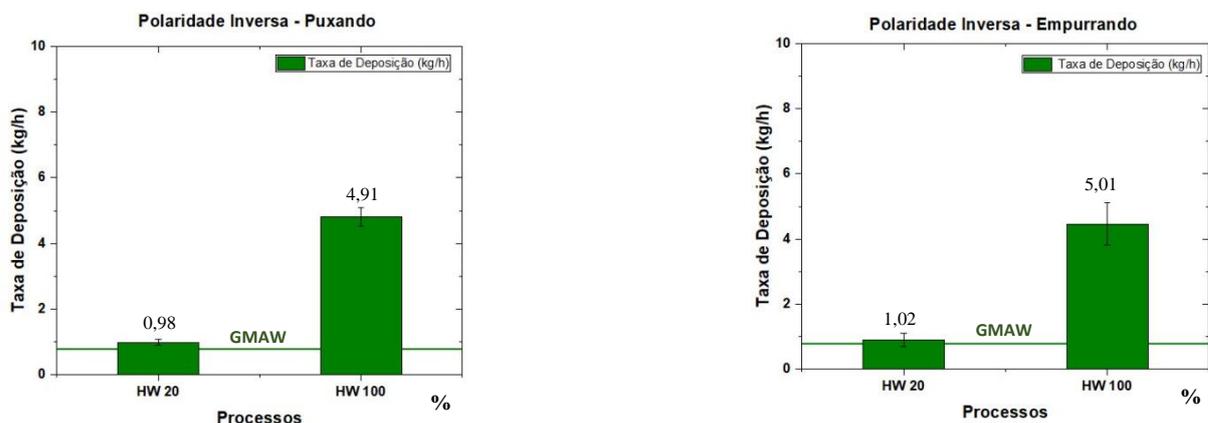
#### d) Taxa de deposição

A taxa de deposição e o processo GMAW para as diversas condições do experimento são mostradas nas Figuras 3.42 e 3.43. A análise dos efeitos mostrou que ao mudar de 20% para 100% o HW, aumentou a taxa de deposição (Tabela A.16 - Apêndice). Em todos os processos, os valores médios obtidos deste parâmetro foram superiores ao GMAW e seu crescimento foi proporcional ao aumento da taxa de arame de adição (vide destaques em vermelho Tabela 3.9).

Ao analisar os gráficos (Figuras 3.42 e 3.43), observa-se que o aquecimento do arame de adição por efeito Joule reduziu as trocas térmicas e aumentou a energia disponível no arco elétrico para fundir o arame adicional depositado, aumentando a taxa de deposição. É importante citar que o aumento da taxa de deposição também tem um efeito na profundidade de penetração da solda, visto que, com o aumento da massa metal depositado para a mesma corrente de soldagem, a penetração foi reduzida (vide Figuras 3.38; 3.39 e 3.45 CEIG).



**Figura 3.42** – Taxa de deposição para os processos GMAW, HW-GMAW (CC<sup>-</sup>). Fonte: Autor (2022).

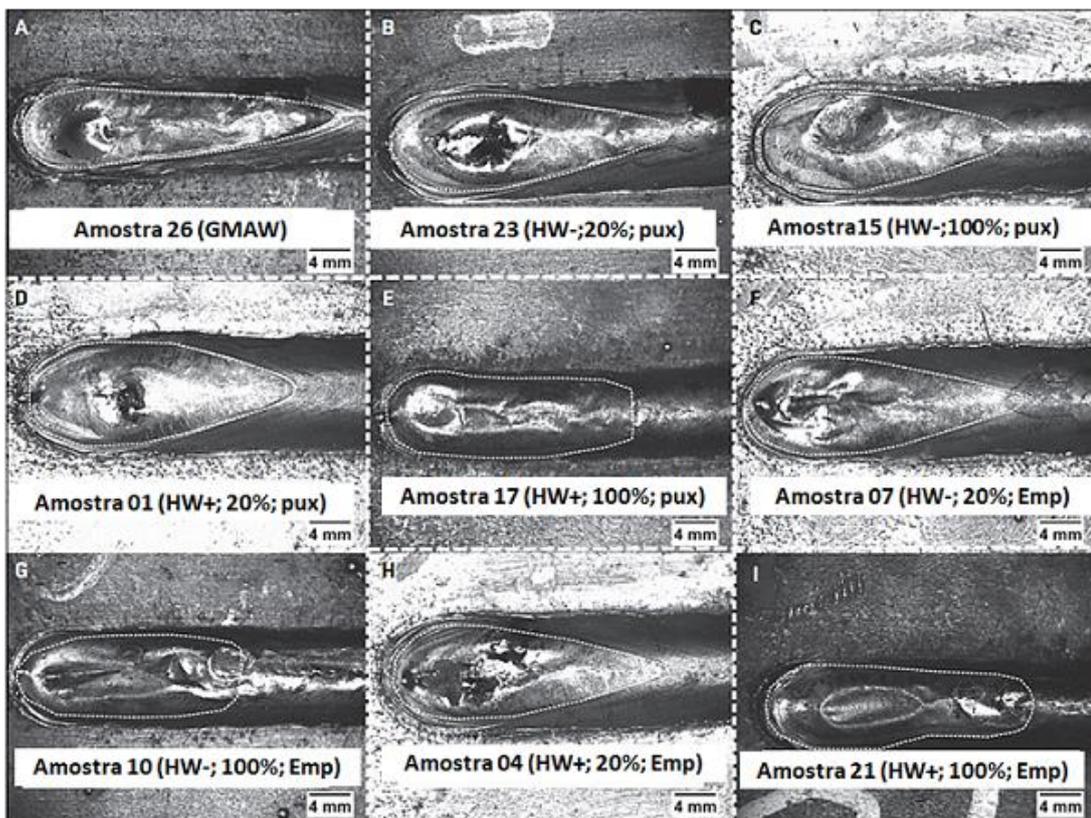


**Figura 3.43** – Taxa de deposição para os processos GMAW, HW-GMAW (CC<sup>+</sup>). Fonte: Autor (2022).

#### Aspecto do cordão e seções transversais

Aspectos do cordão para as amostras soldadas são apresentados na Figura 3.44. Os contornos da isotérmica dos cordões (linhas tracejadas) fornecem evidências de que a introdução de HW, polaridade do HW e sentido de soldagem alteram o seu formato,

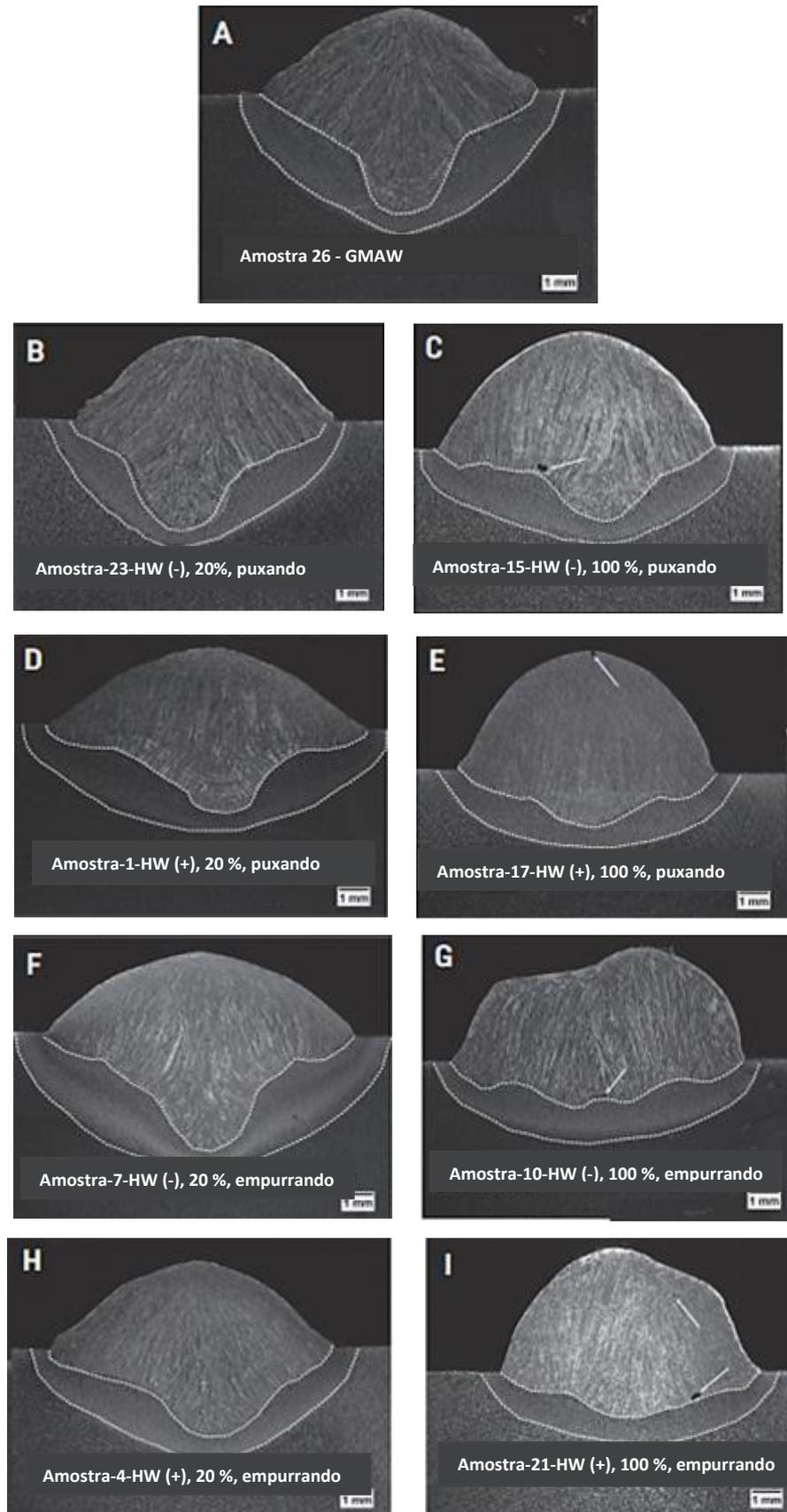
consequentemente, variando a distribuição de calor no CP. No entanto, não é possível afirmar que o calor transferido para os CP's tenham sofrido alguma alteração, uma vez que não foram realizadas medidas calorimétricas. Foi observado nas amostras um defeito denominado rechupe de cratera tendo como possível causa a falta de metal resultante da contração da zona fundida, localizada na cratera do cordão (WAINER, E., *et al.*, 1992).



**Figura 3.44** - Aspectos representativos do cordão para as amostras soldadas: GMAW (A) e HW-GMAW (B-I).  
**Fonte:** Ribeiro, *et. al.*, (2020).

Obs.: A alimentação de HW: 20% e 100%.

A Figura 3.45 apresenta as seções transversais das amostras soldadas. Como pode ser observado na Figura 3.45A, a amostra do processo GMAW exibe maior penetração e diluição (vide Tabela 3.9) do que aquelas produzidas com o processo HW-GMAW. As modificações induzidas pela alteração da polaridade, sentido da soldagem e taxas de alimentação do HW promovem alterações na geometria para o mesmo valor de alimentação de HW e velocidade de deslocamento da tocha. Também é importante ressaltar que na Figura 3.45 CEGI as setas destacadas em branco indicam descontinuidades nas seções transversais do cordão de solda. Tais descontinuidades provavelmente podem estar relacionadas pela presença de porosidades.



**Figura 3.45** - Seções representativas das soldas fabricadas processos GMAW (A) e HW-GMAW (B-I). **Fonte:** Ribeiro, *et. al.*, (2020).

A adição de HW diminuiu a profundidade de penetração ao mesmo tempo em que causou uma mudança no campo elétrico próximo à poça de fusão, promovendo a repulsão ou atração do arco para o HW. Entende-se que a penetração é função do momento da gota, que penetra à poça de fusão (ESSERS, WALTER, 1981; MURRAY, SCOTTI, 1999). Se o arco estiver preso ao HW, este atua protegendo a poça de fusão de gotículas e conseqüentemente reduzindo a penetração da poça.

No entanto, variar a polaridade do HW resultou em maiores taxas de deposição assim como a geração de uma repulsão ou atração do arco. Essa repulsão ou atração do arco pode mover a poça de fusão para longe ou para próximo ao HW e aumentar ou diminuir as dimensões da gota destacada. A Figura 3.45 indica que a variação da taxa de HW exerce um efeito mais significativo do que apenas a alteração da polaridade, principalmente com base na Figura 3.45B e Figura 3.45G, onde há uma diferença nas taxas de alimentação, mas a polaridade é a mesma. Por outro lado, comparando a 3.45H e a Figura 3.45I, o aumento na taxa de alimentação do HW parece diminuir drasticamente a profundidade da penetração.

A amostra indicada pela Figura 3.45H exibe perfil de penetração levemente reduzido, em relação à amostra indicada pela Figura 3.45F. Sugere-se que a polaridade tenha um papel no desenvolvimento da penetração com forma mais alongada na soldagem com o HW, embora sejam necessárias mais experiências para esclarecer esse assunto. Segundo Lancaster (1986), o mecanismo de penetração em forma alongada resulta de uma cavidade formada abaixo da poça de solda, que sustenta a pressão do jato de plasma. Uma das forças que se opõe à formação dessa cavidade é a tensão superficial. Outra teoria explica a penetração em forma alongada pelo “*momentum*” transferido pelas gotículas para o centro da poça de fusão, o que promove a convecção e leva a um aumento local da fusão do substrato.

Como a amostra 3.45H foram soldadas em polaridade inversa, o arco é desviado em direção ao HW devido à interação de seus campos eletromagnéticos. Esse deslocamento do arco altera a trajetória das gotículas, atraindo-as em direção ao HW. No entanto, a taxa de alimentação de HW em 20% na execução das soldas foi incapaz de proteger completamente a poça de fusão das gotículas que foram direcionadas para o lado da poça de fusão próxima ao arame, promovendo o impacto na sua lateral, reduzindo assim o perfil da poça e mantendo a penetração semelhante às amostras da execução 3.45F.

### 3.3.3 Conclusões

A dinâmica da transferência metálica e sua influência na geometria do cordão e na formação do cordão de soldagem foram analisadas. Com base nas observações, podem ser tiradas as seguintes conclusões:

- Através da filmagem de alta velocidade, observou-se que a polaridade do HW é responsável por atrair ou repelir o arco e, juntamente com a taxa de alimentação de HW, pode alterar a geometria do cordão através de alterações na profundidade de penetração e na altura do cordão.
- As taxas de alimentação de arame quente (HW) podem diminuir a penetração em até 45% e a diluição em até 25% em comparação com GMAW quando a taxa de alimentação HW é 100%, por exemplo;
- O sentido de soldagem e as taxas de alimentação do arame quente são os parâmetros que mais afetam a estabilidade do arco com base nos sinais de corrente/tensão para a faixa de parâmetros deste estudo;
- O HW-GMAW fornece baixos valores de diluição, mantendo a profundidade de penetração semelhante ao GMAW, principalmente quando a taxa de alimentação do arame quente (HW) é de 20%, como por exemplo na execução 1 (HW polaridade direta e orientação puxando), execução 2 (HW polaridade inversa e orientação puxando), execução 5 (HW polaridade direta e orientação empurrando) e execução 6 (HW polaridade inversa e orientação empurrando). Para todas as outras execuções de soldagem, a penetração é menor do que no GMAW.

## CAPÍTULO 4

### CONCLUSÃO GERAL

Após investigação comparativa da operacionalização do processo HW-GMAW com os processos GMAW, CW-GMAW nas duas fases do experimento, foi constatado que:

- O processo HW-GMAW promove níveis de penetração superiores ao processo CW-GMAW em 27% e 12% em relação ao processo GMAW;
- A diluição no HW-GMAW para o estudo ficou abaixo do processo GMAW;
- O aumento das taxas de alimentação de arame adicional para o processo HW-GMAW resultou em maiores taxas de deposição quando comparadas com as do processo GMAW.
- Em relação ao GMAW, a maior penetração no processo HW foi na fase I, com 40% de HW e 80 A, no entanto na fase II na polaridade inversa e com 100% de HW ocorreu melhor condição de diluição, puxando a tocha e para a taxa de deposição, empurrando a tocha.

Diante das considerações apresentadas, concluímos que a aplicação do processo HW-GMAW é viável operacionalmente na soldagem de aços.

## CAPÍTULO 5

### PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados apresentados nesta tese e de algumas limitações observadas, novas oportunidades de pesquisas e desenvolvimentos dentro desta área podem ser sugeridas, tais como:

- Realizar o processo HW-GMAW com diferentes DCEP a fim de se avaliar sua influência na transferência metálica e na geometria do revestimento depositado;
- Analisar as amostras geradas com o viés metalúrgico, através dos equipamentos de microscopia ótica e eletrônica de varredura, a fim de se obter possíveis alterações provenientes das fases geradas durante o processo de soldagem;
- Realizar a caracterização com ensaios mecânicos dos revestimentos para se obter os perfis para os processos CW e HW.
- Avaliar o efeito do aquecimento do arame adicional com e sem o contato com a poça de fusão sobre a geometria do revestimento depositado.
- Analisar a influência do ângulo entre o arame adicional e o arame eletrodo na taxa de deposição, geometria do cordão e na estabilidade do processo HW.
- Investigar a possibilidade do processo HW-GMAW ser usado na manufatura aditiva.

## REFERÊNCIAS

- ADOLFSSON, S., BAHRAMI, A., BOLMSJÖ, G., *et al.* "On-line quality monitoring in short-circuit gas metal arc welding", **Welding Journal (Miami, Fla)**, v. 78, n. 2, p. 59s-72s 1999.
- ALAM, M.M., BARSOUM, Z., JONSÉN, P., *et al.* "The influence of surface geometry and topography on the fatigue cracking behavior of laser hybrid welded eccentric fillet joints". In: **Journal Applied Surface Science** v.256, p.1936–1945, 2010.
- ALI, Y., GUENTHER, K., BURT, A., *et al.* "Laser-assisted GMAW hardfacing", **Welding Journal**, v. 94, n. 12, p. 367s-373s, 2015.
- ARCPRODUCTS. **Arcproducts - Osciladores Magnéticos**. 2011. Disponível em: [www.arcproducts.com](http://www.arcproducts.com). Acesso em: 22/06/2022.
- ASSUNÇÃO, P. **Estudo da viabilidade do processo de soldagem GMAW-DCW (Double Cold Wire)**. 2013. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.
- ASSUNÇÃO, P., RIBEIRO, R. A., F. DOS SANTOS, E. B., *et al.* "Feasibility of narrow gap welding using the cold-wire gas metal arc welding (CW-GMAW) process", **Welding in the World**, v. 61, n. 4, p. 659–666, 2 jun. 2017. DOI: 10.1007/s40194-017-0466-5.
- ASTM A 29/A 29M – 04 **Standard specification for general requirements for steel bars, carbon and alloy, hot-wrought**. Changes i:1–16, 2009. <https://doi.org/10.1520/A0029>.
- ASTM.A131/A131M.**Standard Specification for Structural Steel for Ships**.West Conshohocken, Para.: ASTM Internacional, 2013.
- AWS 1987, **Welding Handbook - Welding Technology**, American Welding Societ, Eighth Edition, vol. I, 638p.
- AWS.A5.18/A5.18M. **Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding**. Miami, Fla.: AmericanWelding Society, 2005.
- BASKORO, A. S., FAUZIAN, A., BASALAMAH, H., *et al.* "Improving weld penetration by employing of magnetic poles' configurations to an autogenous tungsten inert gas (TIG) welding", **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 99, n. 5–8, p. 1603–1613, 2018. DOI: 10.1007/s00170-018-2552-2.
- BINGUL, Z., COOK, G. E. "Dynamic modeling of GMAW process", **Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation**, v. 4, n. April, p. 3059–3064, 1999. DOI: 10.1109/robot.1999.774063.
- BORLE, S. D., GALL, I. L., MENDEZ, P. F. "Primary Chromium Carbide Fraction Control with Variable Polarity SAW", **Journal of Manufacturing Processes**, v. 94, n. 1, p. 1–7, 2015.

BUTTON, S. T. **Metodologia para planejamento experimental e análise de resultado**. São Paulo, 2012. Universidade Estadual de Campinas. Apostila. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/posgraduacao/IM317/apostila.pdf> Acesso em: 09/02/2023.

CABRAL, T. dos S. **Análise da relação de deposição de revestimentos soldados pelo processo cw-gmaw aplicados na resistência à cavitação**. 2019. 149 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazonia. Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

CABRAL, T. dos S., BRAGA, E. M., MENDONÇA, E. A. M., *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. DOI: 10.1080/09507116.2014.932993.

CABRAL, T. dos S., DIAS, S. E., FILHO, A. A. C., *et al.* "Influence of a cobalt-based wire injection in austenitic coating deposited via CW-GMAW", **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 40, n. 9, p. 461, 2018. DOI: 10.1007/s40430-018-1384-1. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s40430-018-1384-1>.

CAMARGO, L. F. R. *et. al.* Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos no desenvolvimento de novos produtos em uma empresa de saneantes. **Estudos Tecnológicos**, São Leopoldo, Vol. 5, n° 3: 404-42, 2009. DOI: 10.4013/ete.2009.53.11.

CAO, F., CHEN, S., DU, C. "Investigation of hot-wire TIG welding based on the heat-conduction", **Energy Procedia**, v. 144, p. 9–15, 2018. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.06.003. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.06.003>.

CARY, H. B. **Modern welding technology**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, [s.n.], 1998.

CORTÉS, P.A., GÓMEZ, D.A., POSADA, D., GIRALDO, J.E. **Efecto de la oscilación en la geometría de soldaduras superficiales aplicadas con GMAW corto circuito**, 2011. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2011.

COSTA, E. S., ASSUNÇÃO, P., DOS SANTOS, E. B. F., *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. DOI: 10.1080/13621718.2017.1306014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/13621718.2017.1306014>.

CUNHA, T. V. da, DUTRA, J. C., SILVA, R. H. G., *et al.* "Desenvolvimento de um sistema adaptativo de alimentação de arame para o processo TIG", **Welding Laboratory of the Federal University of Santa Catarina. Mechanical Engineering Department**, n. February 2016, 2016. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/266480816\\_Desenvolvimento\\_de\\_um\\_sistema\\_adaptativo\\_de\\_alimentacao\\_de\\_arames\\_para\\_o\\_processo\\_TIG](https://www.researchgate.net/publication/266480816_Desenvolvimento_de_um_sistema_adaptativo_de_alimentacao_de_arames_para_o_processo_TIG).

EISAZADEH, H., HAINES, D. J., TORABIZADEH, M. "Effects of gravity on mechanical properties of GTA welded joints", **Journal of Materials Processing Technology**, v. 214, n. 5, p. 1136–1142, 2014. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.01.002.

ESSERS, W. G., WALTER, R. "Heat transfer and penetration mechanisms with GMA and plasma-GMA welding". **Welding Journal** 60(2): 37-s to 42-s, 1981.

FUHAI, Z., XUEMING, H., XIN, Y., *et al.* "Research on Development of Hot-wire TIG Welding Process", **Hot Working Technology**, v. 3, p. 151–155, 2011.

GHAZVINLOO, H. R., HONARBAKHSR-RAOUF, A., SHADFAR, N. "Effect of arc voltage, welding current and welding speed on fatigue life, impact energy and bead penetration of AA6061 joints produced by robotic MIG welding", **Indian Journal of Science and Technology**, v. 3, n. 2, p. 156–162, 2010. DOI: 10.17485/ijst/2010/v3i2/29669.

GONÇALVES, H.; DUTRA, J. C.; GOHR, R. "Fundamentos Científicos e Tecnológicos para o Desenvolvimento do Processo MIG / MAG por Curto-Circuito Controlado (CCC) – Uma Revisão da Literatura. Parte 3 de 3: Princípios dos Sistemas MIG / MAG em Curto-Circuito com Controle de Corrente", **Soldagem & Inspeção**, v. 13, n. 1, p. 70–81, 2007.

GOODARZI, M., CHOO, R., TAKASU, T., *et al.* "The effect of the cathode tip angle on the gas tungsten arc welding arc and weld pool: II. The mathematical model for the weld pool", **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 31, n. 5, p. 569–583, 1998. DOI: 10.1088/0022-3727/31/5/014.

GÜNTHER, K., **Fertigungstechnik – aus den Grundlagen für die Anwendung Schriften aus der Ilmenauer Fertigungstechnik Band 1**. Phd thesis, Technische Universität Ilmenau, 2018.

GÜNTHER, K., BERGMANN, J. P., SUCHODOLL, D. "Hot wire-assisted gas metal arc welding of hypereutectic FeCrC hardfacing alloys: Microstructure and wear properties", **Surface and Coatings Technology**, v. 334, p. 420–428, 2018. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.11.059.

GUNTHER, K., BERGMANN, J. P., ZHANG, C., *et al.* "Hot wire-assisted gas metal arc welding of Ni-based hardfacing", **Welding Journal**, v. 97, n. 4, p. 99s-107s, 2018. DOI: 10.29391/2018.97.009.

HAYT, W. H., BUCK, J. A. **Eletromagnetismo**. 8a. ed. [S.l.], Bookman Editora, 2013.  
HORI, K., BUTSUSAKI, Y., TAKUWA, T., *et al.* **AC TIG welding apparatus using hot wire**. . Japan, [s.n.]. , 1990.

HORI, K., MYOGA, T., SHINOMIYA, M., *et al.* **Semi-automatic hot wire tig welding equipment**. . Japan, [s.n.]. , 1986.

JOSE, M. J., KUMAR, S. S., SHARMA, A. "Vibration assisted welding processes and their influence on quality of welds", **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 21, n. 4, p. 243–258, 2016. DOI: 10.1179/1362171815Y.0000000088.

JOSEPH, A., HARWIG, D., FARSON, D.F., RICHARDSON, R. "Measurement and calculation of arc power and heat transfer efficiency in pulsed gas metal arc welding". **Science and Technology of Welding and Joining** 8:400–406, 2003. doi: 10.1179/136217103225005642.

KOU, S. **Welding Metallurgy**. 2. ed. [S.l.], John Wiley & Sons, 2003.

KOU, S., SUN, D. K. Fluid flow and weld penetration in stationary arc welds, **Metallurgical Transactions A**, v. 16, n. 2, p. 203–213, 1985. DOI: 10.1007/BF02816047.

LANCASTER, J. F. **The Physics of Welding**. 2nd. ed. Oxford, UK, Pergamon Press, 1986.

LANCASTER, J. F. **The Physics of Welding**. 2. ed. [S.l.], Pergamon, 1994. (International series on materials science and technology).

LEZZI, F., COSTA, L. "The development of conventional welding processes in naval construction", **Welding International**, v. 27, n. 10, p. 786–797, 2013. DOI: 10.1080/09507116.2012.753256. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09507116.2012.753256>

LI, K. H., CHEN, J. S., ZHANG, Y. M. "Double-Electrode GMAW Process and Control", **Welding Journal**, v. 86, n. 8, p. 231s-237s, 2007. Disponível em: [https://app.aws.org/wj/supplement/WJ\\_2007\\_08\\_s231.pdf](https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_2007_08_s231.pdf).

LI, K. H., ZHANG, Y. M. "Consumable Double-Electrode GMAW — Part I: The Process", **Welding Journal**, v. 87, n. January, p. 11s-17s, 2008a.

LI, K. H., ZHANG, Y. M. "Consumable Double-Electrode GMAW Part II: Monitoring, Modeling, and Control", **Welding Journal**, v. 87, n. 8, p. 44s-50s, 2008b. Disponível em: [https://app.aws.org/wj/supplement/WJ\\_2008\\_02\\_s44.pdf](https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_2008_02_s44.pdf).

LIU, S., SIEWERT, T. A. AND LAN, H. G. "Metal Transfer Mode in Gas Metal Arc Welding". 1989. **Anais [...]** Gatlinburg, [s.n.], 1989.

LIU, Y. B., LI, J. Z., SUN, Q. J., *et al.* "Optimization of magnetic oscillation system and microstructural characteristics in arc welding of Al/Mg alloys", **Journal of Manufacturing Processes**, v. 39, n. 2, p. 69–78, 2019. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.02.008.

LIU, Z., CHEN, S., YUAN, X., *et al.* "Magnetic-enhanced keyhole TIG welding process", **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 99, n. 1–4, p. 275–285, 2018. DOI: 10.1007/s00170-018-2501-0.

LU, Y., CHEN, S., SHI, Y., *et al.* "Double-electrode arc welding process: Principle, variants, control and developments", **Journal of Manufacturing Processes**, v. 16, n. 1, p. 93–108, 2014. DOI: 10.1016/j.jmapro.2013.08.003.

LU, Y., ZHANG, Y. . M., KVIDAHL, L. "Heat Input Reduction in Fillet Welding Using Bypass and Root Opening", **Welding Journal**, v. 92, n. December, p. 390s-400s, 2013. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/296922744\\_Heat\\_Input\\_Reduction\\_in\\_Fillet\\_Welding\\_Using\\_Bypass\\_and\\_Root\\_Opening](https://www.researchgate.net/publication/296922744_Heat_Input_Reduction_in_Fillet_Welding_Using_Bypass_and_Root_Opening).

LV, S. X., TIAN, X. B., WANG, H. T., *et al.* "Arc heating hot wire assisted arc welding technique for low resistance welding wire", **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 12, n. 5, p. 431–435, jul. 2007. DOI: 10.1179/174329307X213828.

MAHAPATRA, S. S., PATNAIK, A., BISWAS, S. "An evolutionary approach to parameter optimisation of submerged arc welding in the hardfacing process Amar Patnaik Sandhyarani Biswas", **International Journal of Manufacturing Research**, v. 2, n. 4, p. 462–483, 2007.

MARQUES, L. F. N., SANTOS, E. B. F., GERLICH, A. P., *et al.* "Fatigue life assessment of weld joints manufactured by GMAW and CW-GMAW processes". **Science and Technology of Welding and Joining**. [S.l: s.n.]. , 2017.

MARQUES, P.V., MONDENESI, P.J., BRACARENSE, A.Q., **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 4a. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

MARQUES, P. V. **Desenvolvimento e avaliação de um sistema para soldagem TIG mecanizada**. 1984. Dissertação (Mestrado) – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1984.

MARTINS, N. **Introdução a teoria da eletricidade e do magnetismo**. [S.l.], 2ª. Ed. São Paulo. Ed. Blucher, 1975. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=kuV2kQEACAAJ>.

MATTOS, V. L. D.; BARBETTA, P. A.; SAMOHYL, R. W. Identificação de efeitos de dispersão em experimentos fatoriais 2k e 2k-p. **Revista Produção** v. 14 n. 2, 2004.

MENDEZ, F.M. BARNES, N., BELL, K., *et al.*, "Welding processes for resistant overlays", **Journal Manufacturing Process**. V. 16, p. 4-25, 2014.

MILLS, K. C., KEENE, B. J. "Factors affecting variable weld penetration", **International Materials Reviews**, v. 35, n. 1, p. 185–216, 1990. DOI: 10.1179/095066090790323966.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C., **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 4ª. Ed. Rio de Janeiro. Editora LTC, 2008.

MURRAY, P. E., SCOTTI, A. "Depth of penetration in gas metal arc welding". **Science and Technology of Welding and Joining** v. 4, p. 112–117, 1999. DOI: 10.1179/136217199101537644.

MVOLA, B., KAH, P., MARTIKAINEN, J., *et al.* "State-of-the-art of advanced gas metal arc welding processes: Dissimilar metal welding", **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 229, n. 10, p. 1694–1710, 2015. DOI: 10.1177/0954405414538630.

NATIVIDAD, C., GARCÍA, R., LÓPEZ, V. H., *et al.* "Metallurgical characterization of API X65 steel joint welded by MIG welding process with axial magnetic field1", **Materials Research**, v. 20, n. 5, p. 1174–1178, 2017. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2016-0182. .

NORRISH, J. **Advanced Welding Processes**. 1a. ed. Cambridge, England, Woodhead Publishing Limited, 2006.

NORRISH, J. **Advanced welding processes Technologies and process control**. Vol. 1. Cambridge, Institute of Materials, Minerals & Mining, 2015.

O'BRIEN, A. **Welding Handbook**. 9a. ed. Vol. 1. Miami, American Welding Society, 2004.

OLIVARES, E. A. G., DÍAZ, V. M. V. "Study of the hot-wire TIG process with AISI-316L filler material, analysing the effect of magnetic arc blow on the dilution of the weld bead", **Welding International**, v. 32, n. 2, p. 139–148, 2017. DOI: 10.1080/09507116.2017.1347327. Disponível em: <http://doi.org/10.1080/09507116.2017.1347327>.

PADMANABAN, M. R. A., NEELAKANDAN, B., KANDASAMY, D. "A study on process characteristics and performance of hot wire gas tungsten arc welding process for high temperature materials", **Materials Research**, v. 20, n. 1, p. 76–87, 2017. DOI: 10.1590/1980-5373-MR-2016-0321.

REIS, R. P. **Assessment of low current tandem gmaw processes with waveform control and with aid of laser beam**. 2009. 294 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

RESENDE, A. **Mapeamento paramétrico da soldagem GMAW com arames de aço inoxidável ferrítico e austenítico**. 2007. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

RIBEIRO, J.L.D.; CATEN, C.T. **Projeto de Experimentos**. Escola de Engenharia. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

RIBEIRO, R. A., **The cold wire gas metal arc welding (CW-GMAW) process: Description and Applications**. 2020, p. 58. Thesis of Doctor in Mechanical and Mechatronics - University of Waterloo. Canada, 2020.

RIBEIRO, R. A., SANTOS, E. B. F., ASSUNÇÃO, P., *et al.* "Predicting Weld Bead Geometry in the Novel CW-GMAW Process", **Welding Journal**, v. 94, n. September, p. 301s-311s, 2015. Disponível em: [https://app.aws.org/wj/supplement/WJ\\_2015\\_09\\_s301.pdf](https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_2015_09_s301.pdf).

RIBEIRO, R. A., ASSUNÇÃO, P., DOS SANTOS, E.B.F, *et al.* "Application of Cold Wire Gas Metal Arc Welding for Narrow Gap Welding (NGW) of High Strength Low Alloy Steel", **Materials**, v. 12, n. 3, p. 335, 2019. DOI: 10.3390/ma12030335. Disponível em: <http://www.mdpi.com/1996-1944/12/3/335>.

RIBEIRO, R. A., DOS SANTOS, E. B. F., ASSUNÇÃO, P., *et al.* "Cold wire gas metal arc welding: Droplet transfer and geometry", **Welding Journal**, v. 98, n. 5, p. 135S-149S, 2019. DOI: 10.29391/2019.98.011.

RIBEIRO, R. A., DOS SANTOS, E. B. F., ASSUNÇÃO, P., *et al.* "Cold Wire Gas Metal Arc Welding: Droplet Transfer and Geometry", **Welding Journal**, v. 98, p. 135–149, 2019. DOI: 10.29391/2019.98.011. Disponível em: <https://s3.amazonaws.com/WJ-www.aws.org/supplement/2019.98.011.pdf>.

RIBEIRO, P.P.G., R.A.RIBEIRO, ASSUNÇÃO, P.D.A., *et al.* "Metal Transfer Mechanisms in Hot-Wire Gas Metal Arc Welding: Hot-Wire Polarity Influences Bead Geometry in this Process", v. 99, p. 281s-294s **Welding Journal**, <https://doi.org/10.29391/2020.99.026>. Disponível em: <https://www.aws.org/publications/page/research-papers-2020>.

SÁBIO, A. D. **Estudo da viabilidade operacional do processo de soldagem MAG com alimentação adicional de arame frio**. Dissertação (Mestrado) - Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

SCHREIBER, F., ALLEBRODT, B., ERPEL, T. "Hardfacing material solutions for high performance coatings in wear and corrosion applications", **Advanced Technologies & Materials**, v. 43, n. 2, p. 21–25, 2018. DOI: 10.24867/atm-2018-2-004.

SHINOZAKI, K., YAMAMOTO, M., MITSUHATA, K., *et al.* "Bead formation and wire temperature distribution during ultra-high-speed GTA welding using pulse-heated hot-wire", **Welding in the World**, v. 55, n. 3–4, p. 12–18, mar. 2013. DOI: 10.1007/BF03321281.

SHOEB, M., PARVEZ, M., KUMARI, P. (2013). Effect of mig welding input process parameters on weld bead geometry on HSLA steel. In: **International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)**, 5(1), 200- 212.

SILVA, R. H. G. **Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito controlado ao passe de raiz**. 2005. 127f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SILVA, R. H. G. e, CORREA RIFFEL, K.C., OKUYAMA, M.P., *et al.* "Effect of dynamic wire in the GTAW process", **Journal of Materials Processing Technology**, v. 269, n. January, p. 91–101, 2019. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2019.01.033. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.01.033>.

SILVA, R. H. G. e, PAES DOS SANTOS, L. E., OKUYAMA, M. P., *et al.* "TIG welding process with dynamic feeding: a characterization approach", **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 96, n. 9–12, p. 4467–4475, 2018. DOI: 10.1007/s00170-018-1929-6.

SILWAL, B., SANTANGELO, M. "Effect of vibration and hot-wire gas tungsten arc (GTA) on the geometric shape", **Journal of Materials Processing Technology**, v. 251, n. August 2017, p. 138–145, 2018. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.08.010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.08.010>.

SOUZA, D; RESENDE, A. A. de; SCOTTI, A. "Um Modelo Qualitativo para Explicar a Influência da Polaridade na Taxa de Fusão no Processo MIG/MAG". **Soldagem e Inspeção**. Set 2009.

SPANIOL, E., TRAUTMANN, M., UNGETHÜM, T., *et al.* "Development of a highly productive GMAW hot wire process using a two-dimensional arc deflection", **Welding in the World**, v. 64, n. 5, p. 873–883, 2020. DOI: 10.1007/s40194-020-00880-9.

SPANIOL, E., UNGETHÜM, T., TRAUTMANN, M., *et al.* "Development of a novel TIG hot-wire process for wire and arc additive manufacturing", **Welding in the World**, 2020. DOI: 10.1007/s40194-020-00871-w.

SUBAN, M, TUSEK, J. **Methods for the determination of arc stability**. **Journal of Materials Processing Technology**; 143:430–7, 2003. DOI:10.1016/S0924-0136(03)00416-3.  
SUN, Q., WANG, J., CAI, C., *et al.* "Optimization of magnetic arc oscillation system by using double magnetic pole to TIG narrow gap welding", **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 86, n. 1–4, p. 761–767, 2016. DOI: 10.1007/s00170-015-8214-8.

VOIGT, A. L., CUNHA, T. V. da, NIÑO, C. E. "Conception, implementation and evaluation of induction wire heating system applied to hot wire GTAW (IHW-GTAW)", **Journal of Materials Processing Technology**, v. 281, n. January, p. 116615, 2020. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116615. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116615>.

WAINER, E., BRANDI, S.D., MELO, F.D.H., **Soldagem: processos e metalurgia**. 1ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1992.

WEINGRILL, L., SCHWALD, M., FRÜHSTÜCK, D., *et al.* "GMA root welding of pearlitic rails using magnetic arc deflection", **Zavarivanje i zavarene konstrukcije**, v. 64, n. 3, p. 133–143, 2019. DOI: 10.5937/zsk1903133W.

WU, H., CHANG, Y., LU, L., *et al.* "Review on magnetically controlled arc welding process", **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 91, n. 9–12, p. 4263–4273, ago. 2017. DOI: 10.1007/s00170-017-0068-9.

YUDODIBROTO, B. Y. B., HERMANS, M. J. M., HIRATA, Y., *et al.* "Influence of filler wire addition on weld pool oscillation during gas tungsten arc welding", **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 9, n. 2, p. 163–168, 2004. DOI: 10.1179/136217104225012274.

## APÊNDICE – ANÁLISE ESTATÍSTICA

### 1. Experimento I

Um momento importante na realização do experimento é a análise de dados obtidos. Para isso é importante o entendimento de como as variáveis independentes, aquelas que podem ser controladas, influenciam ou não nas variáveis dependentes, isto é, as respostas desejadas (obtidas experimentalmente). Para isso é necessário comparar a variação, dentro dos grupos e entre os grupos, para as variáveis dependentes é verificar se a diferença nas médias obtidas, para as variáveis independentes é significativa ou apenas uma variação de médias amostrais. Para concluir positivamente sobre estas questões no experimento, para cada variável de interesse (dependente) foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA), para verificar se existem diferenças nas médias entre os grupos de comparação, ou seja, para diferentes combinações de arame e corrente. As hipóteses desta ferramenta são:

- Hipótese nula ( $H_0$ ), não há diferenças de médias entre as diferentes combinações de arame e corrente;
- Hipótese alternativa ( $H_1$ ), existe pelo menos uma combinação de arame e corrente que difere das demais.

Seguindo a prática adotada na elaboração de trabalhos científicos, para verificação se a diferença estatística é significativa, ou não, adotou-se um nível de significância  $\alpha$  de 5% ( $p = 0,05$ ), ou seja, 95% de certeza dos resultados, dessa forma para que a hipótese  $H_0$  seja aceita, o valor de “p” (valor de referência calculado pelo programa estatístico, a ser comparado com o valor do nível de significância  $\alpha$  definido) deve ser maior que o de “ $\alpha$ ”, então “p” está fora dos 5% de erro estipulado para a análise do experimento. Se isso for verdadeiro ( $p > \alpha$ ) mostra que os desvios padrões podem ser considerados estatisticamente iguais, caso contrário, se  $p < \alpha$ ,  $H_0$  é rejeitada. Para testar a hipótese  $H_0$ , utiliza-se o teste F. Este teste é a razão da variação entre os grupos e a variação dentro dos grupos. Sua finalidade é estimar as diferenças entre os dois componentes da variabilidade, que permite a comparação de mais de duas médias simultaneamente. Se F é próximo de 1,0: as duas estimativas da variância são semelhantes e aceita-se  $H_0$ ; se F muito maior que 1,0: existe alguma força atribuível para as diferenças dos grupos e rejeita-se  $H_0$ .

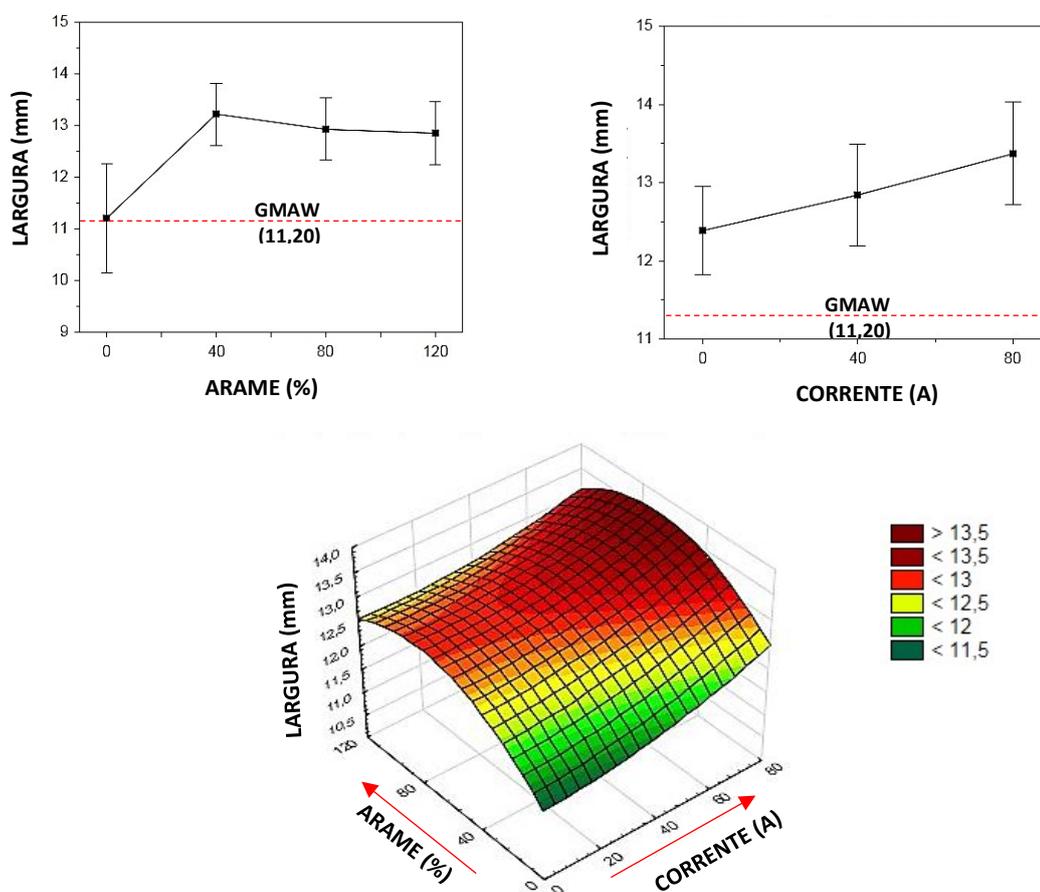
Para realização da análise estatística foi usado o *software STATITICA*®, versão livre. Trata-se de um programa integrado para gerenciar Análise Estatística e Bases de Dados, caracterizando uma ampla seleção do processo analítico, do básico ao avançado, para as mais diversas áreas das ciências.

A seguir é apresentado tabela com valores para cada variável dependente mostrando o teste F e o valor-p para cada variável independente e a superfície de resposta.

a) Resultados – Largura (mm)

**Tabela A.1** – Efeitos sobre a largura. **Fonte:** Autor (2023).

Variável dependente	Variável independente	Teste F	Valor-p	Significância
Largura	Arame (%)	4,0085	0,01802	$p < 0,05$
	Corrente (A)	2,7374	0,08271	$P > 0,05$
	Arame x corrente	1,8364	0,16144	$P > 0,05$



**Figura A.1** – Superfície 3D - Largura. **Fonte:** Autor (2022).

b) Resultados – Reforço (mm)

**Tabela A.2** – Efeitos sobre o reforço. **Fonte:** Autor (2023).

Variável dependente	Variável independente	Valor F	Valor-p	Significância
Reforço	Arame (%)	14,3870	0,00001	$p < 0,05$
	Corrente (A)	1,6963	0,02023	$P > 0,05$
	Arame x corrente	2,6557	0,63110	$P > 0,05$

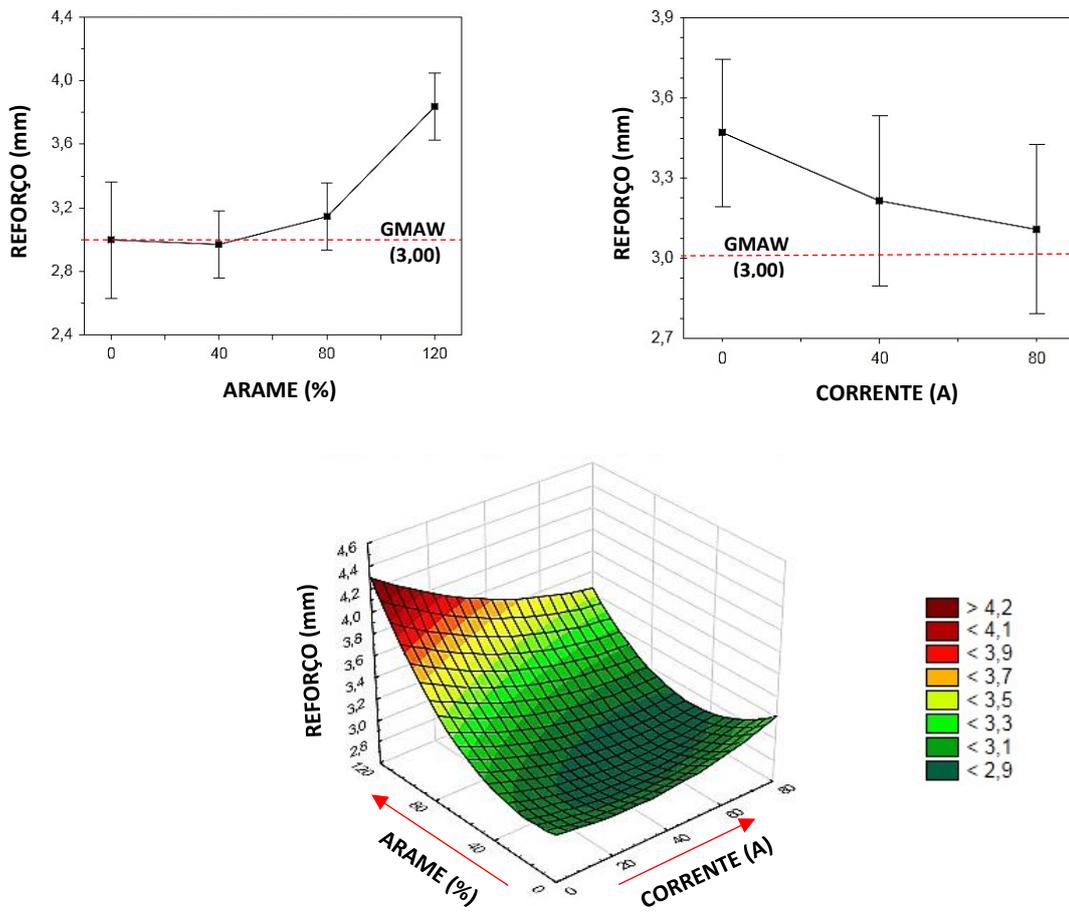
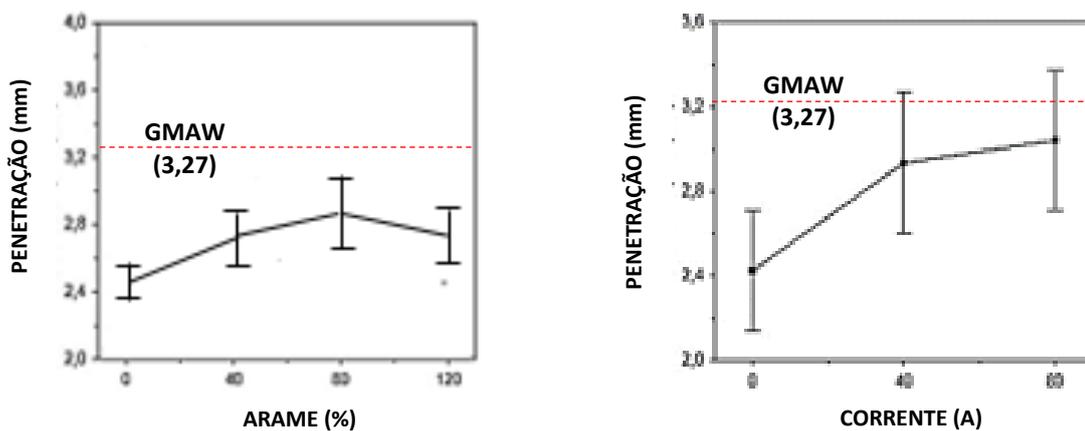


Figura A.2 – Superfície 3D - Reforço. Fonte: Autor (2022).

c) Resultados – Penetração (mm)

Tabela A.3 – Efeitos sobre a penetração. Fonte: Autor (2023).

Variável dependente	Variável independente	Teste F	Valor-p	Significância
Penetração	Arame (%)	3,2081	0,03950	p < 0,05
	Corrente (A)	4,9421	0,01483	P < 0,05
	Arame x corrente	6,8800	0,00118	P < 0,05



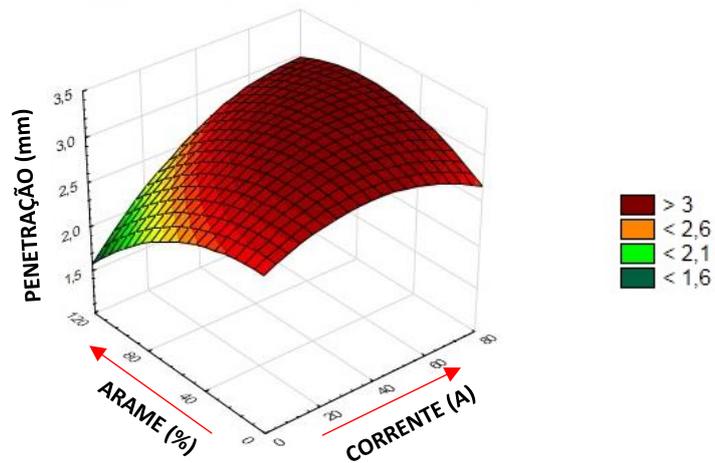
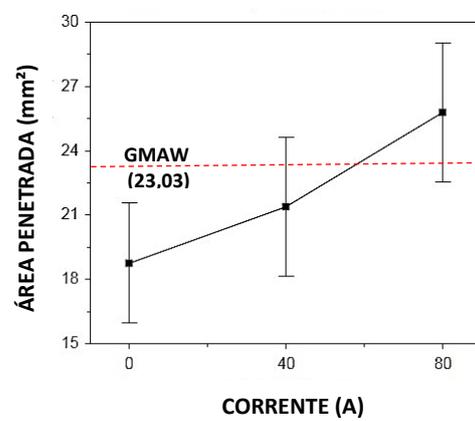
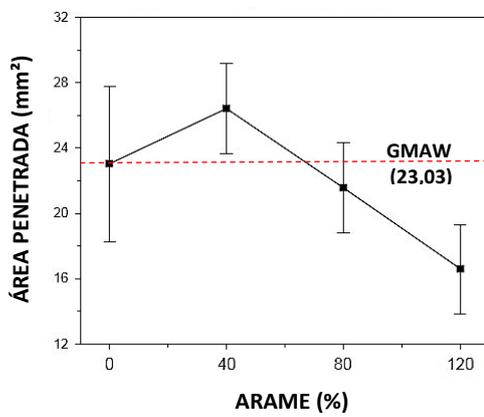


Figura A.3 – Superfície 3D - Penetração. Fonte: Autor (2022).

d) Resultados – Área Penetração ( $\text{mm}^2$ )

Tabela A.4 – Efeitos sobre área penetrada. Fonte: Autor (2023).

Variável dependente	Variável independente	Teste F	Valor-p	Significância
Área Penetração	Arame (%)	9,1616	0,00026	$p < 0,05$
	Corrente (A)	5,7036	0,00859	$P < 0,05$
	Arame x corrente	0,2459	0,90875	$P > 0,05$



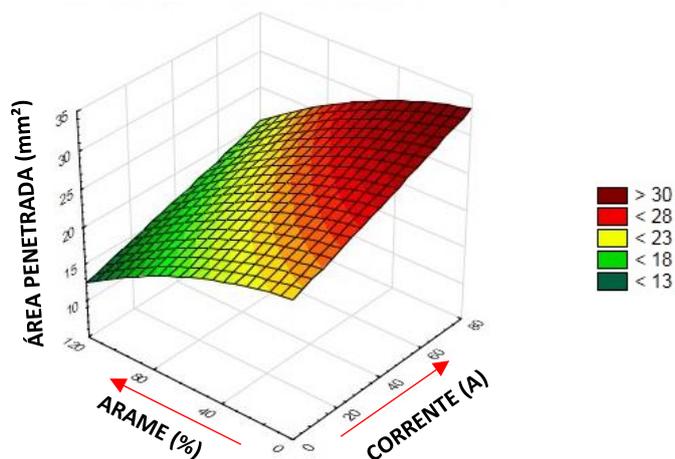


Figura A.4 – Superfície 3D - Área penetrada. Fonte: Autor (2022).

e) Resultados – Área da Zona Termicamente Afetada (ZTA) ( $\text{mm}^2$ )

Tabela A.5 – Efeitos sobre área da ZTA. Fonte: Autor (2023).

Variável dependente	Variável independente	Teste F	Valor-p	Significância
Área da ZTA	Arame (%)	3,6135	0,02641	$p < 0,05$
	Corrente (A)	8,6088	0,00128	$P < 0,05$
	Arame x corrente	1,0191	0,42136	$P > 0,05$

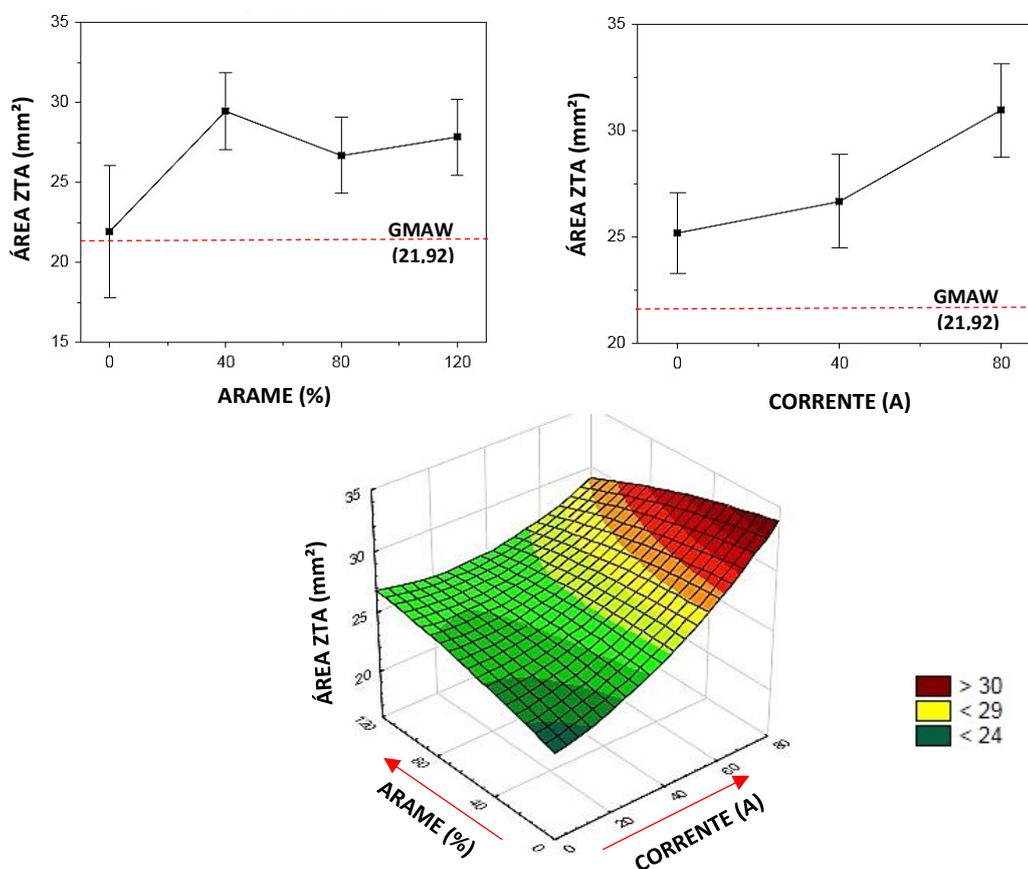
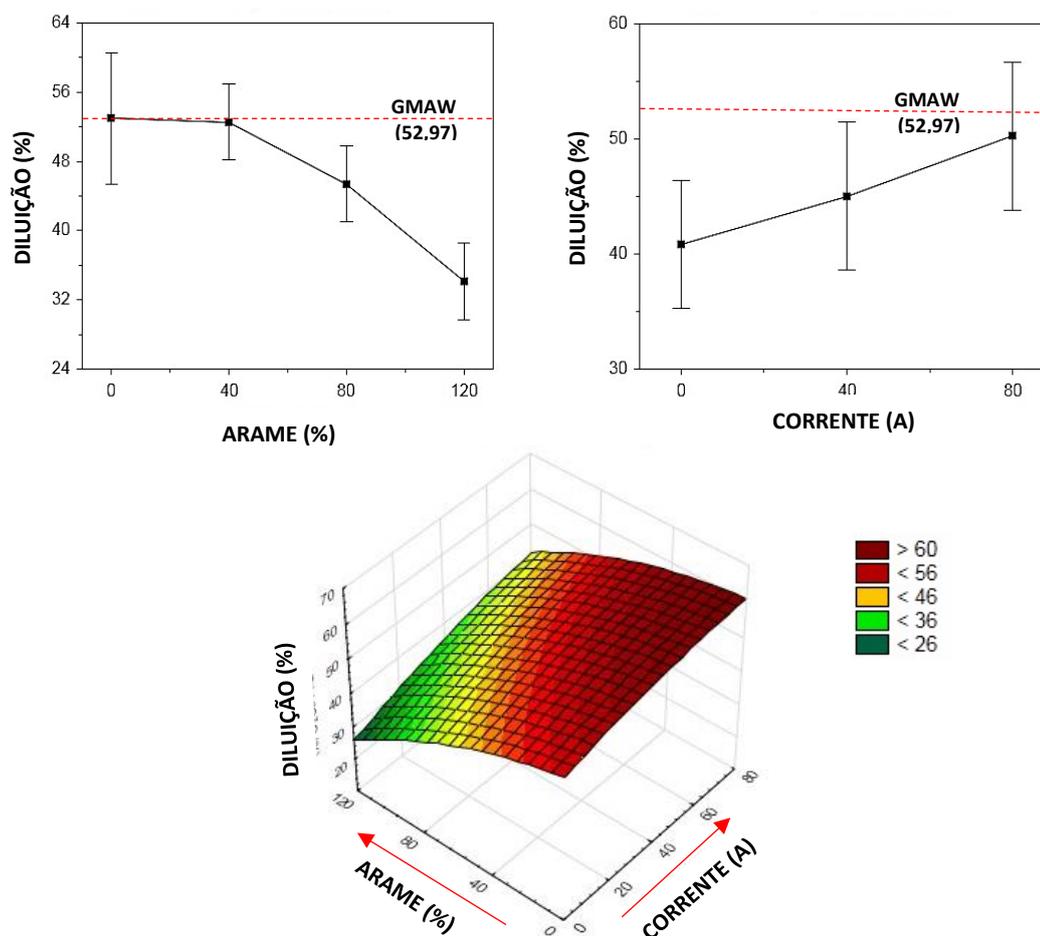


Figura A.5 – Superfície 3D – Área da ZTA. Fonte: Autor (2022).

## f) Resultados – Diluição (%)

**Tabela A.6** – Efeitos sobre a diluição. **Fonte:** Autor (2023).

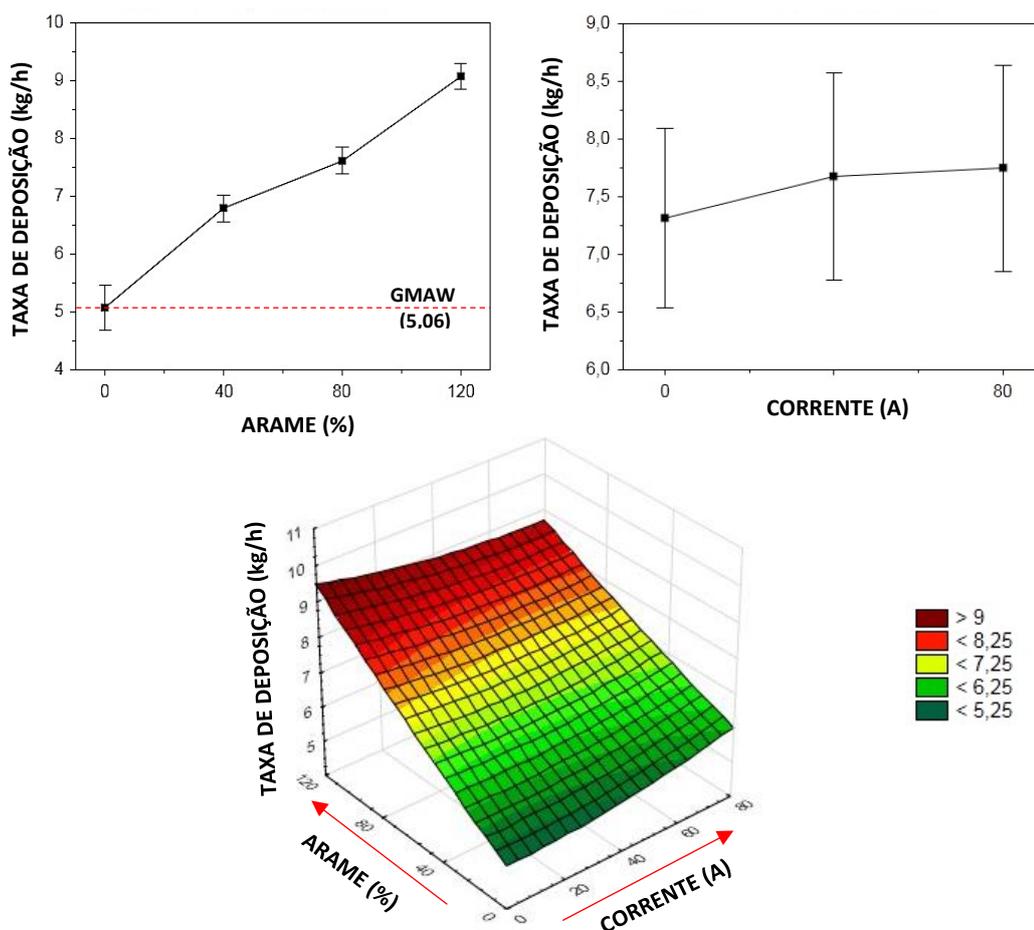
Variável dependente	Variável independente	Teste F	Valor-p	Significância
Diluição	Arame (%)	14,3920	0,00001	$p < 0,05$
	Corrente (A)	2,5941	0,09322	$P > 0,05$
	Arame x corrente	1,1476	0,36312	$P > 0,05$

**Figura A.6** – Superfície 3D – Diluição. **Fonte:** Autor (2022).

## g) Resultados – Taxa de deposição (kg/h)

**Tabela A.7** – Efeitos sobre a taxa de deposição. **Fonte:** Autor (2023).

Variável dependente	Variável independente	Teste F	Valor-p	Significância
Taxa de deposição	Arame (%)	138,1500	0,00001	$p < 0,05$
	Corrente (A)	0,3365	0,71721	$P > 0,05$
	Arame x corrente	2,9524	0,04550	$P < 0,05$



**Figura A.7** – Superfície 3D - Taxa de deposição. Fonte: Autor (2022).

De acordo com a ferramenta estatística utilizada, ao se analisar os níveis de significância utilizando-se o Teste F, Valor-p e as superfícies de resposta para cada variável independente na resposta de cada evento do experimento (variáveis dependentes), a Tabela A.1 e Figura A.1, Tabela A.2 e Figura A.2, mostram por exemplo que a taxa de arame influencia a largura e o reforço do cordão de solda, respectivamente, no entanto sobre o reforço a adição de arame é mais significativa. A penetração, Tabela A.3 e Figura A.3, é influenciada pela taxa adição de arame, cujo aumento reduz o seu valor e aumento da corrente de aquecimento eleva seu valor. A área da ZTA é influenciada pela taxa de arame e pela corrente que gerou um resultado mais significativo, vide Tabela A.5 e Figura A.5. Já a diluição e a taxa de deposição são influenciadas pela adição de arame na poça de fusão, Tabela A.6 e Figura A.6; Tabela A.7 e Figura A.7, respectivamente.

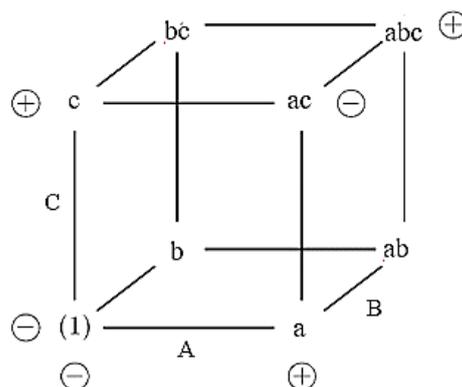
## 2. Experimento II

A aplicação de técnicas estatísticas no desenvolvimento de novos processos é de grande relevância para obtenção de uma melhor performance na redução de custos de processos (CAMARGO *et al.*, 2009). Contudo, a utilização do planejamento na realização de um experimento permite avaliar e quantificar o erro experimental e apresentar resultados onde as análises dos efeitos são interpretadas individualmente, possibilitando uma melhor compreensão do processo.

Quando o experimento é executado com diversos fatores ( $k$ ), cada qual em dois níveis, este projeto de experimento é denominado projeto fatorial  $2^k$ . Com a realização de um único projeto fatorial é possível avaliar os efeitos de cada fator sobre a variável de saída bem como os efeitos da interação desses fatores sobre o resultado do produto ou processo (MATTOS; BARBETTA; SAMOHYL, 2004).

Em seus estudos Ribeiro e Caten (2003) indicam que esta metodologia deve ser utilizada nos estágios iniciais da pesquisa e caso seja importante verificar mais níveis em cada fator, esse novo experimento pode ser realizado alterando somente os fatores que são significativos para a variável de resposta. A maior vantagem desta ferramenta estatística é a simplicidade de ser conduzida e de análise, no entanto outras vantagens podem ser citadas entre as quais: a redução do número de ensaios sem prejuízo da qualidade da informação; o estudo simultâneo de diversas variáveis, definindo seus efeitos; a determinação da confiabilidade dos resultados; a realização da pesquisa em etapas, em um processo iterativo com acréscimo de novos ensaios; seleção das variáveis que influem em um processo com número reduzido de ensaios; representação do processo estudado através de expressões matemáticas e a elaboração de conclusões a partir de resultados qualitativos (BUTTON, 2012).

Este experimento foi planejado de acordo com um projeto fatorial  $2^k$  com três fatores ( $k=3$ ) cada um com dois níveis resultando em oito corridas ou combinações de tratamento. Nas duas formas de análise foram avaliados os efeitos principais (A, B e C) e as interações de segunda ordem resultantes das combinações dos três fatores estudados (AB, AC e BC) e de terceira ordem (ABC). A Figura A8 mostra a representação geométrica do planejamento com oito corridas formando os vértices do cubo onde cada aresta representa um efeito. No experimento o efeito A representa a polaridade do arame (direta e inversa), B a movimentação da tocha (puxando e empurrando) e C a taxa de arame de arame (20% e 100%).



**Figura A.8** – O planejamento  $2^3$ . **Fonte:** Adaptado de Montgomery *et. al.*, (2008).

Segundo Montgomery *et. Al.*, (2008) para a estimativa dos efeitos principais as letras minúsculas (1), a, b, ab, c, ac, bc e abc (Figura A8) representam o total de todas as  $n$  réplicas em cada uma das oito corridas no planejamento. A Figura A9(a) mostra o efeito principal A que pode ser estimado calculando a média das quatro combinações de tratamento no lado direito do cubo, quando A estiver no nível alto, e subtraindo dessa quantidade a média das quatro combinações de tratamento no lado esquerdo do cubo, onde A está no nível mais baixo. Assim temos:

$$A = \bar{Y} A_+ - \bar{Y} A_- = \frac{1}{4n} [a + ab + ac + abc - (l) - b - c - bc] \quad (\text{A.1})$$

De maneira similar, o efeito de B é representado pela diferença nas médias entre as quatro combinações de tratamento na face posterior do cubo, Figura A9(a) e as quatro combinações de tratamento na face anterior do cubo. Isso dá como resultado:

$$B = \bar{Y} B_+ - \bar{Y} B_- = \frac{1}{4n} [b + ab + bc + abc - (l) - a - c - bc] \quad (\text{A.2})$$

O efeito de C é a diferença na resposta média entre as quatro combinações de tratamento na face superior do cubo, Figura A9(a) e as quatro combinações de tratamento na face inferior do cubo, ou seja:

$$A = \bar{Y} C_+ - \bar{Y} C_- = \frac{1}{4n} [c + ac + bc + abc - (l) - a - b - ab] \quad (\text{A.3})$$

Para o cálculo do efeito de segunda ordem a medida da interação AB é a diferença entre os efeitos médios de A e de B nos dois níveis. Dessa forma a metade da interação AB é representada, a seguir:

<b>B</b>	<b>Efeito Médio de A</b>
Alto (+)	$\frac{[(abc-bc)+(ab-b)]}{2n}$
Baixo (-)	$\frac{\{(ac-c)+a-(l)\}}{2n}$
Diferença	$\frac{[abc-bc+ab-b-ac+c-a+(l)]}{2n}$

A interação de AB pode ser vista na Figura A9(b), visto que a interação AB é a metade dessa diferença, então temos:

$$AB = \frac{1}{4n} [abc - bc + ab - b - ac + c - a + (l)] \quad (\text{A.4})$$

De forma similar as interações AC e BC são representadas da seguinte forma:

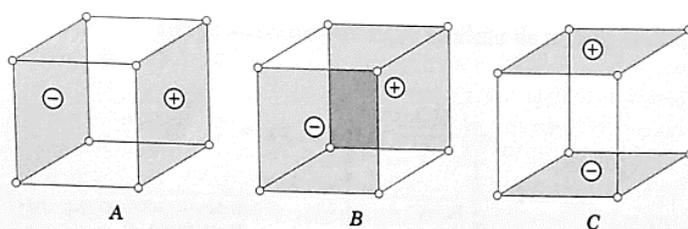
$$AC = \frac{1}{4n} [(l) - a + b - ab - c + ac - bc + abc] \quad (\text{A.5})$$

$$BC = \frac{1}{4n} [(l) + a - b - ab - c - ac + bc + abc] \quad (\text{A.6})$$

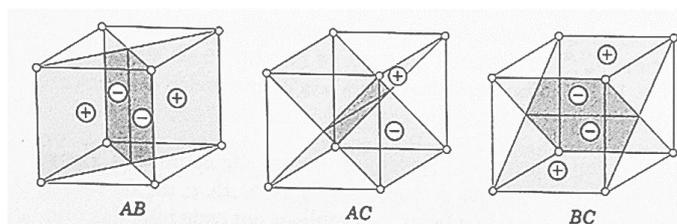
A interpretação de ABC é definida como a diferença média entre a interação AB para os níveis de C. Assim, temos:

$$ABC = \frac{1}{4n} [abc - bc - ac + c - ab + b + a - (l)] \quad (\text{A.7})$$

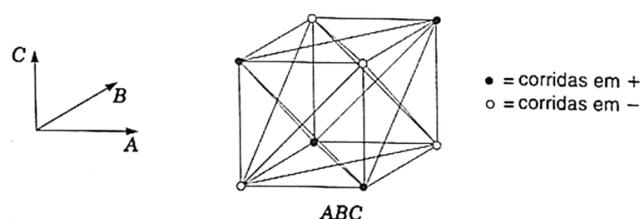
Como anteriormente, a interpretação da interação ABC pode ser considerando duas médias. Se as corridas nas duas médias forem isoladas, elas definirão os vértices dos dois tetraedros que compreendem o cubo da Figura A9(c).



(a) Efeitos principais.



(b) Interações de segunda ordem.



(c) Interações de terceira ordem.

**Figura A.9** – Representação geométrica de contrastes dos efeitos principais e as interações no planejamento  $2^3$ . (a) Efeitos principais, (b) Interações de segunda ordem, (c) Interações de terceira ordem.

**Fonte:** Adaptado de Montgomery *et. al.*, (2008).

Uma tabela de sinais mais (+) e menos (-) pode ser desenvolvida a partir dos contrastes, resultando a Tabela A.8. Os sinais para os efeitos principais são determinados pela associação do sinal (+) ao nível mais alto e do sinal (-) ao nível mais baixo. Para as colunas restantes os sinais podem ser obtidos pela multiplicação das colunas apropriadas precedentes.

**Tabela A.8** – Sinais algébricos para o cálculo dos efeitos no planejamento  $2^3$ . **Fonte:** Adaptado de Montgomery *et. al.*, (2008).

Combinações dos Tratamentos	Efeito Fatorial							
	I	A	B	AB	C	AC	BC	ABC
(I)	+	-	-	+	+	+	+	-
A	+	+	-	-	+	-	+	+
B	+	-	+	-	+	+	-	+
Ab	+	+	+	+	+	-	-	-
C	+	-	-	+	-	-	-	+
Ac	+	+	-	-	-	+	-	-
Bc	+	-	+	-	-	-	+	-
Abc	+	+	+	+	-	+	+	+

A estimativa de qualquer efeito principal em um planejamento  $2^k$  é determinada pela multiplicação das combinações dos tratamentos na primeira coluna (Tabela A.8) pelos sinais na coluna do efeito principal ou da interação correspondente, pela adição do resultado de modo a produzir um contraste e então pela divisão do contraste pela metade do número total de corridas do experimento (MONTGOMERY *et. al.*, 2008). A estimativa dos efeitos é calculada para qualquer planejamento  $2^k$  com  $n$  réplicas da seguinte forma:

$$Efeito = \frac{Contraste}{n2^{k-1}} \quad (A.8)$$

A soma quadrática (SQ) para qualquer efeito é

$$SQ = \frac{(Contraste)^2}{n2^k} \quad (A.9)$$

Um método que pode ser usado para julgar a significância é a Análise de Variância (ANOVA). Trata-se de uma maneira formal de determinar quais os efeitos são diferentes de zero. As estimativas de cada efeito ( $V$ ) têm variância dada por:

$$V(Efeito) = V\left[\frac{Contraste}{n2^{k-1}}\right] = \frac{1}{(n2^{k-1})^2} V(Contraste)$$

Cada contraste é uma combinação linear dos  $2^k$  tratamentos totais e cada total consiste de  $n$  observações e uma estimativa  $\sigma$ . Assim:

$$V(Contraste) = n2^k \sigma^2$$

A variância de um efeito é:

$$V(Efeito) = \frac{1}{(n2^{k-1})^2} n2^k \sigma^2 = \frac{1}{n2^{k-2}} \sigma^2 \quad (A.10)$$

Consequentemente, o erro-padrão ( $ep$ ) de um efeito é:

$$ep = \sqrt{\frac{1}{n2^{k-2}} \sigma^2} \quad (A.11)$$

Para a realização das análises estatísticas foi utilizado o *software* TIBCO® STATISTICA versão 2018. Na aplicação da ferramenta estatística é mostrada na Tabela A.9 as legendas usadas para identificar as variáveis independentes e dependentes estudadas no experimento.

**Tabela A.9** – Legenda de variáveis usadas no software. **Fonte:** Autor (2023).

VARIÁVEIS INDEPENDENTES	NÍVEIS
VAR 1 – Polaridade HW	DIRETA – D (-)
	INVERSA – I (+)
VAR 2 – Movimento da Tocha	P – PUXANDO (-)
	E – EMPURRANDO (+)
VAR 3 - % arame quente (HW)	20 (-)
	100 (+)
VARIÁVEIS DEPENDENTES	
VAR 4 - Largura	VAR 7 – Área ZTA
VAR 5 - Reforço	VAR 9 - Diluição
VAR 6 - Penetração	VAR 10 – Taxa de Deposição

A Tabela A.10 mostra os efeitos principais e suas interações para cada variável de resposta estudada nesta fase do experimento. A seguir, para facilitar as análises dos efeitos sobre cada variável de resposta foi criada uma tabela para cada variável de resposta com os efeitos mostrados em ordem crescente. Quando o resultado do efeito é negativo indica que a resposta da variável correspondente diminui e quando é positivo indica que a resposta da variável aumenta quando os níveis variam de (-1) até (+1), vide Tabela A.9. Dando continuidade as análises, gráficos de superfície de resposta 3D/2D foram gerados usando efeitos principais de maior significância.

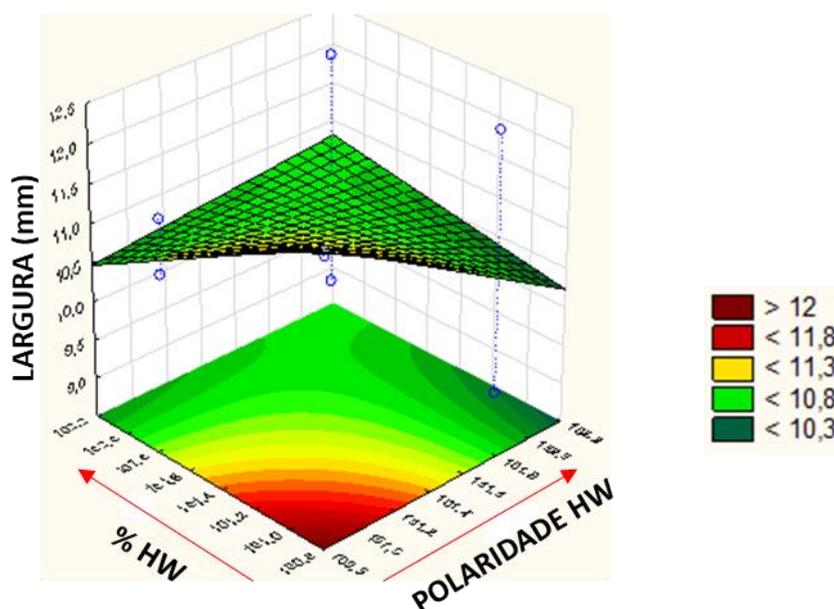
**Tabela A.10** – Resumo do cálculo dos efeitos. **Fonte:** Autor (2023).

VARIÁVEIS DE RESPOSTA	EFEITOS PRINCIPAIS			EFEITOS DE INTERAÇÃO			
	Polaridade HW	Mov da tocha	% HW	Pol x Mov	Pol x % HW	Mov x % HW	Pol x Mov x % HW
Largura (mm)	-0,5787	-0,4033	-1,3872	0,5813	-1,7835	0,2532	-0,0595
Reforço (mm)	0,2375	-0,1125	1,2125	-0,1625	0,1625	0,0425	0,0425
Penetração (mm)	-0,2398	-0,1318	-1,4503	-0,0614	-0,1346	0,1741	-0,0579
Área ZTA (mm <sup>2</sup> )	-3,7525	-1,4225	-5,1625	3,8425	0,0525	2,1725	-4,5625
Diluição (%)	-2,1083	0,1150	-14,5617	-1,9183	-0,5183	0,4617	-1,4817
Taxa de deposição (kg/h)	-0,1858	0,0708	3,8392	0,1542	-0,1342	0,0592	0,0758

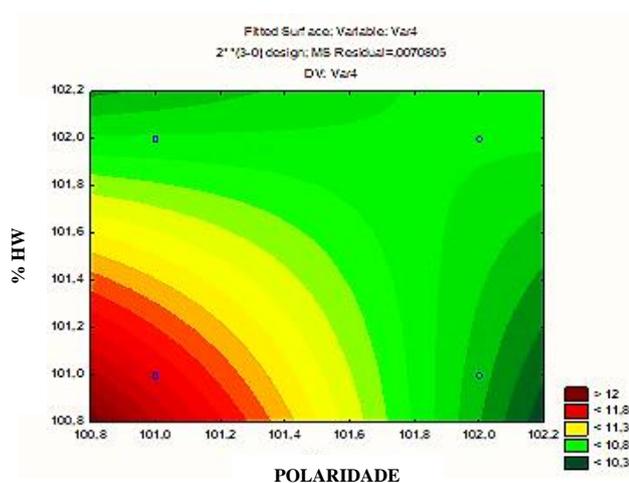
a) Resultados – Largura (mm)

**Tabela A.11** – Efeitos sobre a largura. **Fonte:** Autor (2023).

EFEITOS PRINCIPAIS E INTERAÇÕES	LARGURA
Polaridade x % arame quente (HW)	-1,7835
% arame quente (HW)	-1,3872
Polaridade HW	-0,5787
Movimento da tocha	-0,4033
Polaridade HW x Movimento da tocha x % arame quente HW	-0,0595
Movimento da tocha x % arame quente HW	0,2532
Polaridade HW x Movimento da tocha	0,5813



**Figura A.10** – Superfície 3D – Largura. **Fonte:** Autor (2023).



**Figura A.11** – Diagrama de contorno 2D – Largura. **Fonte:** Autor (2023).

## b) Resultados – Reforço (mm)

Tabela A.12 – Efeitos sobre o reforço. Fonte: Autor (2023).

EFEITOS PRINCIPAIS E INTERAÇÕES	REFORÇO
Polaridade HW x % arame quente (HW)	-0,1625
Movimento da tocha	-0,1125
Movimento da tocha x % arame quente (HW)	0,0425
Polaridade HW x Movimento da tocha x % arame quente (HW)	0,0425
Polaridade HW x % arame quente (HW)	0,1625
Polaridade HW	0,2375
% arame quente (HW)	1,2125

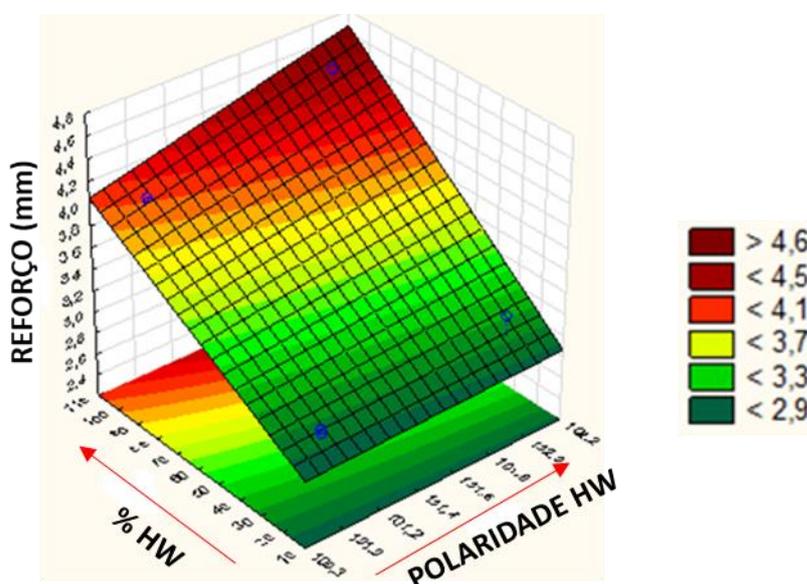


Figura A.12 – Superfície 3D – Reforço. Fonte: Autor (2023).

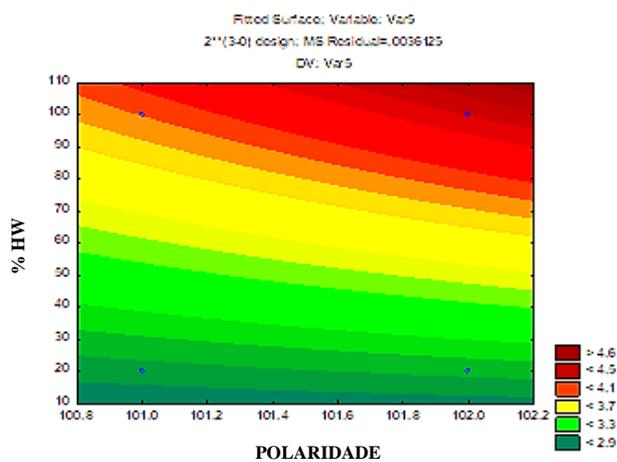


Figura A.13 – Diagrama de contorno 2D – Reforço. Fonte: Autor (2023).

## c) Resultados – Penetração (mm)

Tabela A.13 – Efeitos sobre a Penetração. Fonte: Autor (2023).

EFEITOS PRINCIPAIS E INTERAÇÕES	PENETRAÇÃO
% arame quente (HW)	-1,4503
Polaridade HW	-0,2398
Polaridade HW x % arame quente (HW)	-0,1346
Movimento da tocha	-0,1318
Polaridade HW x Movimento da tocha	-0,0614
Polaridade HW x Movimento tocha x % arame quente (HW)	-0,0579
Movimento tocha x % arame quente (HW)	0,1741

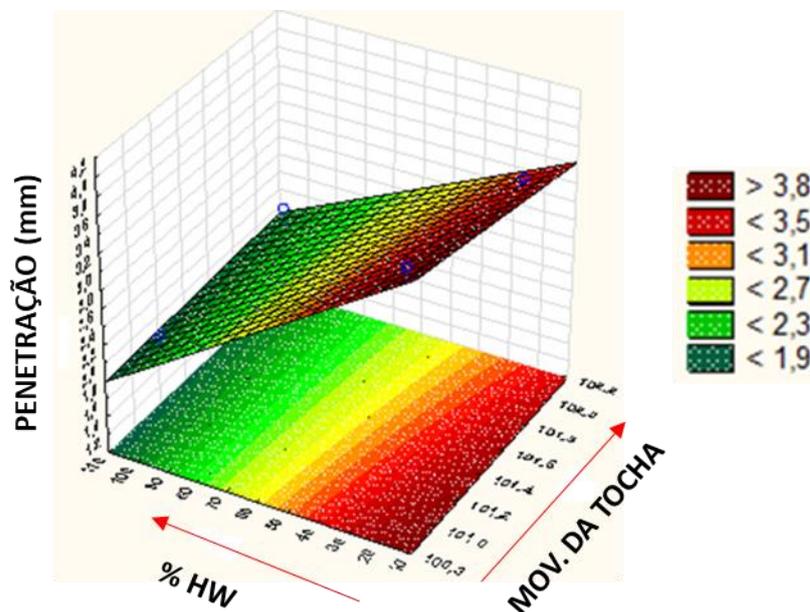


Figura A.14 Superfície 3D - Penetração. Fonte: Autor (2023).

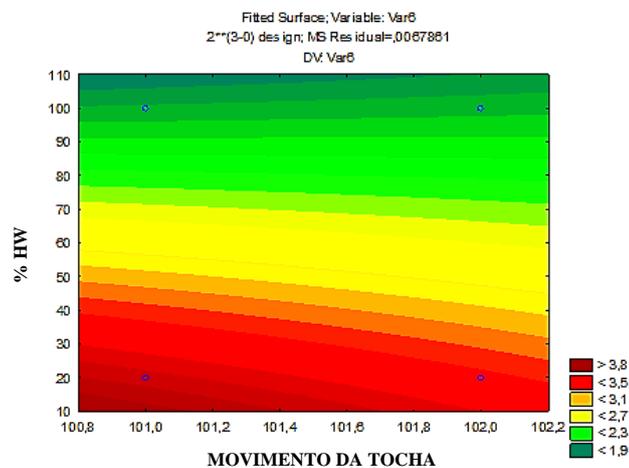


Figura A.15 – Diagrama de contorno 2D – Penetração. Fonte: Autor (2023).

d) Resultados – Área da ZTA (mm<sup>2</sup>)

Tabela A.14 – Efeitos sobre a área da ZTA. Fonte: Autor (2023). Fonte: Autor (2023).

EFEITOS PRINCIPAIS E INTERAÇÕES	ÁREA DA ZTA
% arame quente (HW)	-5,1625
Polaridade HW x Movimento da tocha x % arame quente (HW)	-4,5625
Polaridade HW	-3,7525
Movimento da tocha	-1,4225
Polaridade HW x % arame quente (HW)	0,0525
Movimento da tocha x % arame quente (HW)	2,1725
Polaridade HW x Movimento da tocha	3,8425

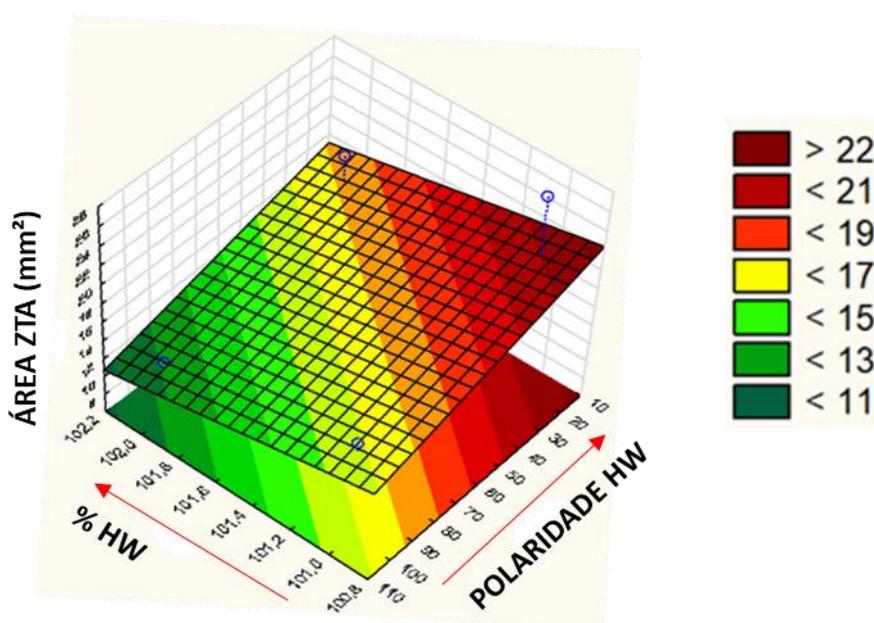


Figura A.16 – Diagrama de contorno 3D – Área da ZTA. Fonte: Autor (2023).

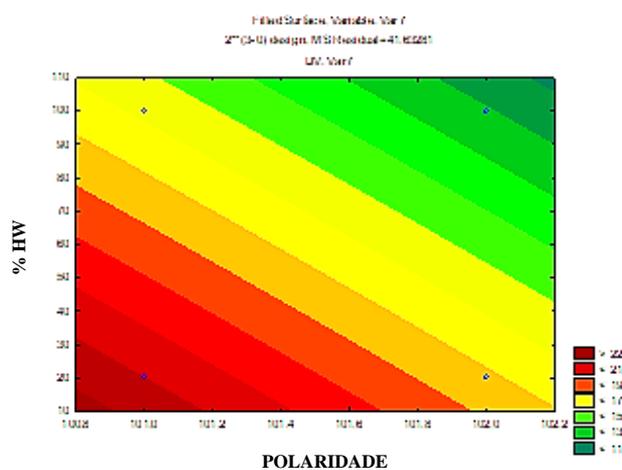


Figura A.17 – Diagrama de contorno 2D – Área da ZTA. Fonte: Autor (2023).

## e) Resultados – Diluição (%)

Tabela A.15 – Cálculo dos efeitos sobre a diluição. Fonte: Autor (2023).

EFEITOS PRINCIPAIS E INTERAÇÕES	DILUIÇÃO
% arame quente (HW)	-14,5617
Polaridade HW	-2,1083
Polaridade HW x Movimento da tocha	-1,9183
Polaridade HW x Movimento da tocha x % arame quente (HW)	-1,4817
Polaridade HW x % arame quente HW	-0,5183
Movimento da tocha	0,1150
Movimento da tocha x % arame quente (HW)	0,4617

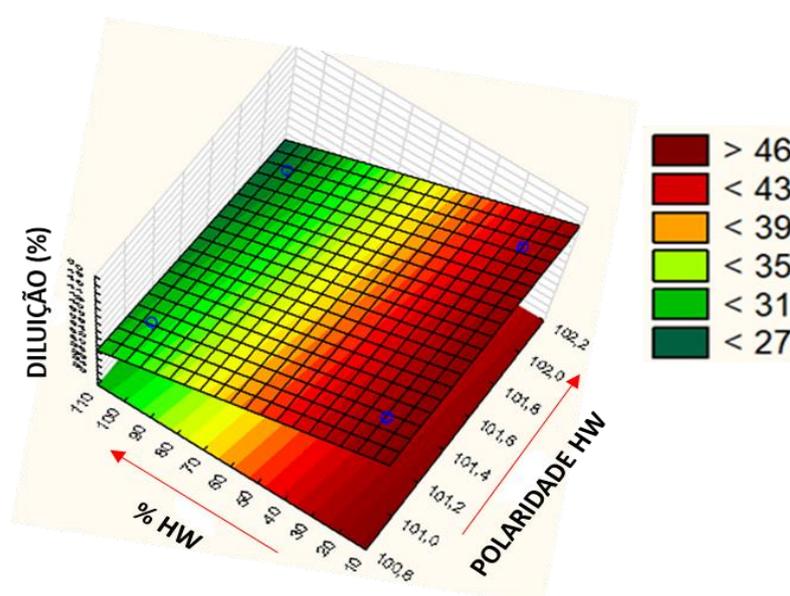


Figura A.18 – Superfície 3D - Diluição. Fonte: Autor (2023).

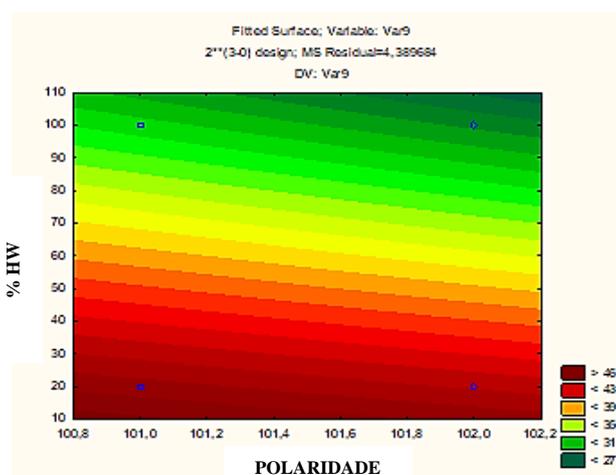


Figura A.19 – Diagrama de contorno 2D – Diluição. Fonte: Autor (2023).

## f) Resultados – Taxa de deposição (kg/h)

Tabela A.16 – Cálculo dos efeitos sobre a Taxa de Deposição. Fonte: Autor (2023).

EFEITOS PRINCIPAIS E INTERAÇÕES	TAXA DEPOSIÇÃO
Polaridade HW	-0,1858
Polaridade HW x % arame quente (HW)	-0,1342
Movimento da tocha x % arame quente (HW)	0,0592
Movimento da tocha	0,0708
Polaridade HW x Movimento da tocha x % arame quente (HW)	0,0758
Polaridade HW x Movimento da tocha	0,1542
% arame quente (HW)	3,8392

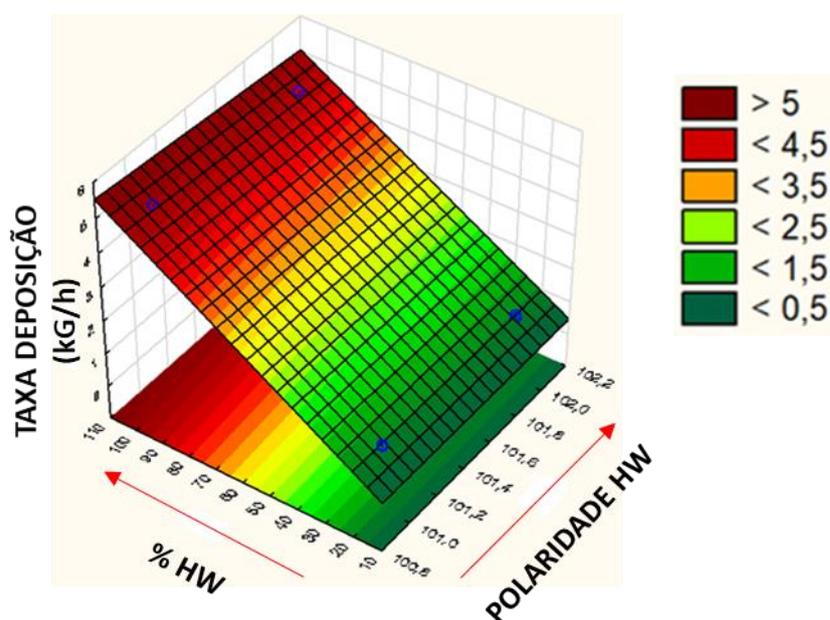


Figura A.20 – Superfície 3D – Taxa de deposição. Fonte: Autor (2023).

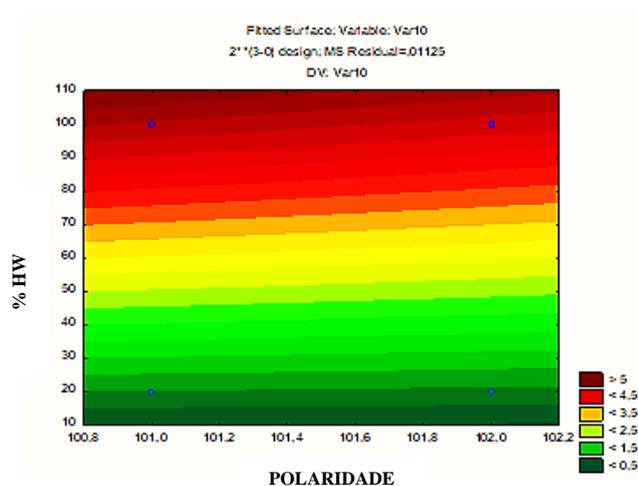


Figura A.21 – Diagrama de contorno 2D – Taxa de deposição. Fonte: Autor (2023).

De acordo com a ferramenta estatística utilizada, ao se analisar os efeitos de cada variável independente na resposta de cada evento do experimento (variáveis dependentes), a Tabela A.12 e a Figura A.12, mostram por exemplo que a taxa de HW influencia o reforço do cordão de solda, aumentando o seu valor quando passa de 20% para 100%. A Tabela A.13 e Figura A.14, mostram que a penetração diminui quando a taxa de HW varia de 20% para 100%. Na ZTA ocorre uma redução de sua área com o aumento da taxa adição de HW, no entanto a mudança de polaridade do HW, de direta para inversa associada com a movimentação da tocha de puxando para empurrando, aumenta sua área, vide Tabela A.14 e Figura A.16. Já a diluição, Tabela A.15 e Figura A.18, tem seu valor reduzido quando a taxa de HW aumenta de 20% para 100%. A taxa de deposição é fortemente influenciada pela adição de HW na poça de fusão, vide Tabela A.16 e Figura A.20.