



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

Diego Raimundi Corradi

**INFLUÊNCIA DA OSCILAÇÃO MAGNÉTICA DO ARCO ELÉTRICO NA
GEOMETRIA DE PAREDES MULTICAMADAS DE PASSE ÚNICO FABRICADAS
POR MANUFATURA ADITIVA BASEADA NA SOLDAGEM GTAW**

Belo Horizonte

2020

Diego Raimundi Corradi

**INFLUÊNCIA DA OSCILAÇÃO MAGNÉTICA DO ARCO ELÉTRICO NA GEOMETRIA
DE PAREDES MULTICAMADAS DE PASSE ÚNICO FABRICADAS POR
MANUFATURA ADITIVA BASEADA NA SOLDAGEM GTAW**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Linha de Pesquisa: Processos de Soldagem

Orientador: Alexandre Queiroz Bracarense

Belo Horizonte

2020

C823i	<p>Corradi, Diego Raimundi. Influência da oscilação magnética do arco elétrico na geometria de paredes multicamadas de passe único fabricadas por manufatura aditiva baseada na soldagem GTAW [recurso eletrônico] / Diego Raimundi Corradi. - 2020. 1 recurso online (186 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Alexandre Queiroz Bracarense.</p> <p>Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos e apêndices: f. 135-186.</p> <p>Bibliografia: f. 125-134. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Processos de fabricação - Teses. 3. Manufatura aditiva - Teses. 4. Soldagem - Teses. I. Bracarense, Alexandre Queiroz, 1959-. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621(043)</p>
-------	---



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

"INFLUÊNCIA DA OSCILAÇÃO MAGNÉTICA DO ARCO ELÉTRICO NA GEOMETRIA DE PAREDES MULTICAMADAS DE PASSE ÚNICO FABRICADAS POR MANUFATURA ADITIVA BASEADA NA SOLDAGEM GTAW"

DIEGO RAIMUNDI CORRADI

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Alexandre Queiroz Bracarense (orientador/DEMEC/UFMG), Dr. Ariel Rodriguez Arias (DEMEC/UFMG), Dr. Paulo Jose Modenesi (ex professor do DEMET/UFMG), Dr. Pedro Paiva Brito (PUC Minas) e Dr. Guilherme Caribé de Carvalho (UnB), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "Doutor em Engenharia Mecânica", na área de concentração de "Processos de Fabricação".

Teses aprovada no dia 02 de julho de 2020.

Por:



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Queiroz Bracarense, Professor do Magistério Superior**, em 06/07/2020, às 17:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ariel Rodriguez Arias, Professor do Magistério Superior**, em 06/07/2020, às 23:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Jose Modenesi, Membro**, em 08/07/2020, às 08:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme Caribé de Carvalho, Usuário Externo**, em 08/07/2020, às 16:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Paiva Brito, Usuário Externo**, em 16/07/2020, às 00:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site
[https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&codigo_verificador=0167706&codigo_crc=F966E47D&hash_download...)

29/07/2020

SEI/UFMG - 0167706 - Ata



[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](#), informando o código verificador **0167706** e o código CRC **F966E47D**.

Referência: Processo nº 23072.217230/2020-10

SEI nº 0167706

Aos meus pais, Afonso Carlos Raimundi e Maria da Conceição Silva Corradi.

AGRADECIMENTOS

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, fica expressa aqui a minha gratidão, em especial:

A Deus, pois sem Ele nada é possível.

Aos meus pais, Afonso Carlos Raimundi e Maria da Conceição Silva Corradi, pelo incentivo e apoio.

A Larissa, por todo amor, carinho, apoio e compreensão, principalmente durante os anos em que precisei me dedicar ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Alexandre Bracarense por me abrir as portas do LRSS e me confiar o tema desta tese, além de todo suporte durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos estagiários Pedro Ivo e Marcus Valle, por toda ajuda durante a construção da bancada de testes.

Ao colega de laboratório Fagner Guilherme Ferreira Coelho, por ceder o encoder instalado no sistema de alimentação de arame desenvolvido.

A todos os colegas do LRSS, por todos os momentos juntos.

Ao Professor Zengxi Pan, por me aceitar em seu grupo de pesquisa na Universidade de Wollongong, Austrália, e todo suporte durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos Pesquisadores Dr. Bintao Wu e Dr. Dominic Cuiuri, por toda ajuda durante a realização deste trabalho.

Aos colegas professores do NIPEM, por apoiar o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas de república, Ali Rabea e Praneshwar Sethupathy, que foram minha família na Austrália, por todo apoio durante o tempo que estive com eles.

A UFSJ e ao DETEM, por me concederem afastamento integral no ano de 2019 para que eu pudesse cursar doutorado sanduíche na Universidade de Wollongong, Austrália.

Ao CNPq, por me conceder a bolsa de doutorado sanduíche no exterior.

Ao SENAI BETIM – Maria Madalena Nogueira e ao instrutor Magno Lara, por ajudarem na fabricação da base de alumínio utilizada neste trabalho.

A FCO, por ajudar financeiramente na compra de parte do material utilizado neste trabalho.

A UFMG e a Universidade de Wollongong, pela estrutura oferecida para o desenvolvimento deste trabalho.

“O que sabemos é uma gota. O que ignoramos é um oceano.”

(Isaac Newton)

RESUMO

Peças fabricadas por manufatura aditiva baseada em soldagem a arco elétrico apresentam um acabamento superficial de má qualidade e precisam passar por operações de usinagem antes de serem colocadas em serviço. Nessa etapa, o ideal é que a quantidade de material removido seja a menor possível para evitar o desperdício de matéria prima. Entretanto, em estruturas de parede fina, essa quantidade se torna expressiva por causa do fenômeno de transbordamento da poça de fusão. Neste trabalho, para minimizar este problema, aplicou-se a técnica de oscilar o arco elétrico de soldagem por força magnética durante a deposição dos cordões de solda. Assim, paredes multicamadas de passe único de aço baixo carbono e liga de titânio Ti6Al4V foram fabricadas por manufatura aditiva baseada no processo GTAW com e sem oscilação magnética do arco elétrico e a influência dessa técnica na geometria da parede e na estabilidade do processo foi investigada. As características geométricas foram analisadas a partir de macrografias das seções transversais e os efeitos de diferentes padrões e frequências de oscilação no comportamento do arco elétrico, da transferência metálica e da poça de fusão foram avaliados a partir de imagens e vídeos produzidos durante o processo. Os resultados mostram que a parede se torna mais fina e a distribuição de material ao longo de seu comprimento se torna mais homogênea quando a técnica é aplicada. Uma explicação para os efeitos da oscilação magnética do arco elétrico na geometria das paredes baseada em forças que agem na poça de fusão durante a deposição das camadas de solda foi feita. Por causa do movimento oscilatório do arco elétrico, o calor é distribuído em uma área maior e a potência específica é reduzida. Assim, menos camadas pré-depositadas são refundidas, e o volume e o peso da poça de fusão diminuem. A distribuição de pressão do arco também se torna menos concentrada e a força do arco sobre a poça de fusão é reduzida. Além disso, uma força eletromagnética surge no metal fundido, o que contribui para mudança de direção da força resultante na poça de fusão. Por fim, conclui-se que a oscilação magnética do arco elétrico é capaz de minimizar o transbordamento de metal fundido e aumentar a eficiência de deposição do processo.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva, GTAW, Oscilação Magnética, Arco Elétrico, Poça de Fusão, Transbordamento, Eficiência de Deposição.

ABSTRACT

Parts manufactured by Wire Arc Additive Manufacturing have a poor surface finish and need to undergo machining operations before being put into service. In this step, the ideal is the amount of removed material to be as small as possible to avoid the waste of raw material. However, in thin-walled structures, this amount increases significantly because of the overflow of the weld pool. In this work, Magnetic Arc Oscillation was applied during the deposition of the weld beads for minimizing the problem. Thus, single-pass multi-layer walls of low carbon steel and Ti6Al4V were produced by the Gas Tungsten Arc Welding-based Wire and Arc Additive Manufacturing process with and without Magnetic Arc Oscillation, and the influence of this technique on the geometry and the process stability was evaluated. The geometric features were assessed using transverse section macrographs and the effects of different patterns and frequencies of oscillation on the arc characteristics, metal transfer and weld pool behaviour during the layer deposition were investigated using images and videos produced during the process. The results show that the wall becomes thinner, and the distribution of material along the wall length becomes more homogeneous when Magnetic Arc Oscillation is applied. An explanation of the effects of the technique on the wall geometry based on forces that act on the molten metal during layer deposition was made. Because of the swinging movement of the welding arc, the heat is distributed over a larger area, and the power density decreases. Thus, fewer previous layers are remelted, and the volume and the weight of the weld pool reduce. The distribution of arc pressure also becomes less concentrated, and the arc force on the molten metal decreases. Additionally, a magnetic force appears on the molten metal, which contributes to a change in the direction of the resultant force on the weld pool. Finally, Magnetic Arc Oscillation can minimize the overflow phenomenon and increase the deposition efficiency of the process.

Keywords: WAAM, GTAW, Magnetic Arc Oscillation, Welding Arc, Weld Pool, Overflow, Deposition Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo de deposição para parede multicamadas de passe único. (a) Baixa eficiência de deposição e (b) alta eficiência de deposição	22
Figura 2: Sistema de soldagem a arco elétrico para manufatura aditiva (adaptada pelo autor)	25
Figura 3: Largura da parede em função da altura da parede (adaptada pelo autor)	26
Figura 4: Gradiente de temperatura versus número de camadas (adaptada pelo autor)	28
Figura 5: Variação da temperatura e do calor acumulado durante a fabricação (adaptada pelo autor).....	28
Figura 6: Comparação da força do arco nos modos pulsado e não pulsado (adaptada pelo autor)	29
Figura 7: Ciclos térmicos da primeira e da quinta camada (adaptada pelo autor).....	29
Figura 8: Representação esquemática do modelo de força (adaptada pelo autor).....	30
Figura 9: Tensão superficial de metais líquidos (adaptada pelo autor)	31
Figura 10: Tocha de soldagem (a) perpendicular e (b) inclinada em relação ao substrato (adaptada pelo autor)	32
Figura 11: Representação esquemática do modelo de força (adaptada pelo autor).....	32
Figura 12: Representação esquemática do modelo de força.....	33
Figura 13: Viscosidade de metais líquidos (adaptada pelo autor)	33
Figura 14: Seção transversal de uma parede fabricada (adaptada pelo autor).....	34
Figura 15: Montagem experimental. (a) Sistema robótico. (b) Placas de <i>Peltier</i> em contato com a parede. (adaptada pelo autor).....	36
Figura 16: Montagem experimental com o robô industrial e o tanque de água (adaptada pelo autor).....	36
Figura 17: Montagem experimental com mesa rotativa e robô industrial de 6 eixos.....	37
Figura 18: Efeito de % EP na (a) largura efetiva da parede e na (b) altura da camada (adaptada pelo autor).....	38
Figura 19: Diagrama esquemático da deposição do cordão de solda com o processo CMT (adaptada pelo autor)	39
Figura 20: Geometria dos cordões depositados em diferentes ângulos da tocha (adaptada pelo autor).....	39
Figura 21: Efeito da direção da força do arco na altura do cordão (adaptada pelo autor).....	40

Figura 22: Característica da razão entre altura e largura (h/w) da camada depositada sem e com corrente pulsada (adaptada pelo autor)	41
Figura 23: Largura e espessura em função da frequência do pulso (adaptada pelo autor).....	41
Figura 24: Seção transversal da parede produzida (a) sem e (b) com visão computacional ...	42
Figura 25: Comparação da largura da camada utilizando diferentes estratégias de deposição (adaptada pelo autor)	43
Figura 26: Nova tocha de soldagem para manufatura aditiva (adaptada pelo autor)	43
Figura 27: Diagrama esquemático do sistema de manufatura aditiva baseada no processo DE-GMAW (adaptada pelo autor)	44
Figura 28: Variação da largura da parede em função do número de camadas depositadas para dois modos de transferência metálica (adaptada pelo autor).....	45
Figura 29: Representação esquemática do processo com a bobina eletromagnética (adaptada pelo autor).....	45
Figura 30: Morfologias dos cordões de solda em diferentes ângulos de inclinação da parede (adaptada pelo autor)	46
Figura 31: Oscilador magnético desenvolvido Greene.....	48
Figura 32: Diagrama da força de Lorentz (Adaptada pelo autor).....	48
Figura 33: Diagrama esquemático da força magnética adicional (adaptado pelo autor).....	49
Figura 34: Velocidade resultante da poça de fusão (adaptada pelo autor)	49
Figura 35: Padrões de oscilação (adaptada pelo autor)	50
Figura 36: Distribuição da densidade do fluxo de calor sem B (adaptada pelo autor).....	51
Figura 37: Distribuição da densidade do fluxo de calor com uma onda senoidal com $B = 3,43$ mT e R_0 (Raio da região anódica do raio) = 10 mm (adaptada pelo autor).....	51
Figura 38: Distribuição da densidade do fluxo de calor com uma onda triangular com $B = 3,43$ mT e R_0 (Raio da região anódica do raio) = 10 mm (adaptada pelo autor).....	51
Figura 39: Pontos de medição	52
Figura 40: Pressão de arco no primeiro ponto de medição sob diferentes densidades de fluxo magnético. (a) Pressão do arco ao longo da direção da soldagem. (b) Valor máximo da pressão do arco (adaptada pelo autor)	52
Figura 41: A pressão máxima do arco de oito pontos de medição no fundo e na lateral da parede sob diferentes densidades de fluxo magnético (adaptada pelo autor)	53
Figura 42: Efeito da densidade de fluxo magnético no formato do cordão (adaptada pelo autor)	54

Figura 43: Seção transversal das juntas sob diferentes condições de soldagem: (a) sem oscilação e (b) com oscilação	55
Figura 44: Geometria do cordão em função da frequência de oscilação.....	55
Figura 45: Ilustração esquemática da transferência metálica durante o processo GTAW com alimentação de arame frio. (a) Fusão de Arame Intermitente. (b) Transferência por contato ininterrupto ou em ponte ininterrupta. (c) Transferência por contato interrompido ou em ponte interrompida. (d) Transferência por voo livre (ou sem contato)	56
Figura 46: Transferência por contato ininterrupto: (a) imagem do processo e (b) modelo de forças	57
Figura 47: Transferência por contato interrompido: (a) imagem do processo e (b) modelo de forças	57
Figura 48: Transferência por voo livre: (a) imagem do processo e (b) modelo de forças (adaptada pelo autor)	58
Figura 49: Primeira camada de (a) aço e (b) titânio	66
Figura 50: As posições e os ângulos da tocha TIG e do bico de saída do arame para a fabricação das paredes de (a) aço e (b) titânio	66
Figura 51: Controle do comprimento de arco realizado com auxílio de uma chave Allen.	67
Figura 52: (a) Movimento do arco elétrico. (b) Gráfico força magnética versus tempo. (c) Gráfico velocidade do arame versus tempo para as paredes de aço. (d) Gráfico velocidade do arame versus tempo para as paredes de titânio.....	67
Figura 53: Bancada de testes construída no LRSS da UFMG.....	68
Figura 54: Sistema de manufatura aditiva baseada no processo GTAW da UOW. (a) Tocha GTAW e bico de saída do arame, (b) bobinas eletromagnéticas, (c) Fonte de Soldagem e Alimentador de Arame, (d) Sistema de refrigeração da Tocha GTAW	69
Figura 55: Regiões de medição na parede	70
Figura 56: (a) Câmera de alta velocidade, (b) câmera para soldagem e (c) posicionamento das câmeras	70
Figura 57: Sistema para movimentação da tocha TIG	71
Figura 58: Vistas (a) lateral e (b) frontal do sistema para movimentação da tocha TIG.....	72
Figura 59: Suporte de sustentação da tocha TIG, da bobina eletromagnética e do bico de saída do arame	72
Figura 60: Graus de liberdade do suporte da tocha TIG.....	73
Figura 61: Mesa deslizante e motores para movimentação da tocha TIG.....	73

Figura 62: Placa de controle dos motores.....	74
Figura 63: Encoder Indutivo e Sensor de Luminosidade	75
Figura 64: Ponte H do motor que movimenta a tocha TIG na Horizontal	75
Figura 65: Ponte H do motor que movimenta a tocha TIG na vertical	76
Figura 66: Painel de controle.....	76
Figura 67: Alimentador de arame.....	77
Figura 68: Bico de saída do arame	78
Figura 69: Placa de controle do alimentador de arame	78
Figura 70: Gráfico Velocidade do Motor versus Duty Cycle.....	80
Figura 71: Regime Transiente	80
Figura 72: Constante de tempo.....	81
Figura 73: Diagrama de blocos do sistema em malha fechada.....	81
Figura 74: Gráfico velocidade versus tempo.....	81
Figura 75: Diagrama esquemático do oscilador magnético desenvolvido	82
Figura 76: Placa 1 do oscilador magnético.....	83
Figura 77: Placa 2 do oscilador magnético.....	84
Figura 78: Sinal de onda discretizado.....	84
Figura 79: Bobina eletromagnética utilizada na bancada de testes desenvolvida na UFMG, Brasil.....	85
Figura 80: Bobinas eletromagnéticas utilizadas na Universidade de Wollongong, Austrália..	85
Figura 81: Gráfico da corrente em função do tempo no eletroímã.....	87
Figura 82: Sinal elétrico gerado. a) Onda quadrada. b) Onda Senoidal. c) Onda dente de serra decrescente. c) Onda dente de serra crescente.....	88
Figura 83: Posicionamento das bobinas eletromagnéticas para as oscilações (a) circular, (b) transversal e (c) longitudinal. (d) Sinais elétricos aplicados nas bobinas para a oscilação circular	89
Figura 84: Cordões sobre chapa depositados	90
Figura 85: 3 Cordões 1	91
Figura 86: Macrografias da seção transversal das paredes de aço produzidas (a) sem e (b) com oscilação magnética do arco elétrico	92
Figura 87: LTP e LEP para as paredes de aço.....	93
Figura 88: Larguras totais das regiões extremas das paredes de aço produzidas (a) sem e (b) com oscilação magnética do arco elétrico	93

Figura 89: ATP para as paredes de aço	94
Figura 90: Alturas totais das regiões extremas das paredes de aço produzidas (a) sem e (b) com oscilação magnética do arco elétrico	94
Figura 91: Sentido do fluxo de metal líquido na poça (a) quando a tocha está na posição vertical e (b) quando a tocha está inclinada.....	96
Figura 92: Gráfico de altura versus número de camadas.....	97
Figura 93: ED para as paredes de aço.....	98
Figura 94: Macrografias das paredes de titânio produzidas na Etapa 2. (a) Sem oscilação magnética – T1. (b) Com oscilação magnética longitudinal 1 Hz – T2. (c) Com oscilação magnética longitudinal 10 Hz – T3. (d) Com oscilação magnética circular 5 Hz – T4	99
Figura 95: Larguras totais das regiões extremas das paredes de titânio produzidas na Etapa 2. (a) Sem oscilação magnética – T1. (b) Com oscilação magnética longitudinal 1 Hz – T2. (c) Com oscilação magnética longitudinal 10 Hz – T3. (d) Com oscilação magnética circular 5 Hz – T4.....	100
Figura 96: Alturas totais das regiões extremas das paredes de titânio produzidas na Etapa 2. (a) Sem oscilação magnética – T1. (b) Com oscilação magnética longitudinal 1 Hz – T2. (c) Com oscilação magnética longitudinal 10 Hz – T3. (d) Com oscilação magnética circular 5 Hz – T4. As paredes têm 12 camadas cada e as fotos foram tiradas em perspectiva para tentar evidenciar as camadas.	100
Figura 97: Comportamento do arco elétrico para (a) T1, (b) T2, (c) T3 e (d) T4	104
Figura 98: Representação esquemática da área de contato do arco elétrico com a peça em função do padrão de oscilação adotado	105
Figura 99: Comportamento do modo de transferência metálica para (a) T1, (b) T2, (c) T3 e (d) T4.....	105
Figura 100: Influência da oscilação longitudinal (em baixa frequência) na velocidade de soldagem e fluxo de metal líquido.....	106
Figura 101: Diagrama esquemático mostrado o fluxo de metal fundido na poça de fusão quando o arco elétrico defletia no mesmo sentido e em sentido contrário ao de soldagem durante a fabricação das paredes de aço.....	107
Figura 102: Movimentos de (a) avanço e (b) recuo da poça de fusão.....	107
Figura 103: Diagrama esquemático dos movimentos de (a) avanço e (b) recuo da poça de fusão	108
Figura 104: As forças que agem na poça de fusão e o fenômeno de transbordamento.....	109

Figura 105: Variação da direção de F_a durante a oscilação longitudinal	110
Figura 106: Variação do comprimento de arco com a oscilação magnética (adaptado pelo autor)	111
Figura 107: Distribuição de pressão do arco em função do comprimento do arco (adaptado pelo autor).....	111
Figura 108: Largura da ZTA na base do substrato das paredes de titânio produzidas na Etapa 2. (a) Sem oscilação magnética – T1. (b) Com oscilação magnética longitudinal 1 Hz – T2. (c) Com oscilação magnética longitudinal 10 Hz – T3. (d) Com oscilação magnética circular 5 Hz – T4.....	113
Figura 109: Zonas térmicas do lado oposto da chapa para as condições (a) sem e (b) com oscilação mecânica longitudinal do arco elétrico (adaptado pelo autor).....	113
Figura 110: Altura da poça de fusão durante a deposição da 6ª camada na Etapa 3. (a) Sem oscilação magnética – T5. (b) Com oscilação magnética longitudinal 10 Hz – T6 . (c) com oscilação magnética circular 10 Hz – T7.....	114
Figura 111: Influência da distribuição de densidade de potência na profundidade de penetração da solda (adaptado pelo autor).....	115
Figura 112: Influência da intensidade de campo magnética na largura e profundidade de penetração da solda (adaptado pelo autor)	116
Figura 113: (a) Ponte líquida entre o arame e a poça de fusão e (b) Forças que agem na ponte líquida, no arame e na poça de fusão.....	117
Figura 114: Modelo de forças proposto que considera os efeitos da oscilação longitudinal quando o arco está (a) defletido no sentido de deposição do cordão de solda, (b) sem deflexão e (c) defletido em sentido contrário ao de deposição do cordão de solda	119
Figura 115: Modelo de forças proposto que considera os efeitos da oscilação circular quando o arco completa (a) 0, (b) 1/4, (c) 1/2 e (d) 3/4 do período de oscilação.	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de velocidade de soldagem utilizados por outros autores.	60
Tabela 2: Valores de frequência de pulsação do arame utilizados por outros autores.	61
Tabela 3: Valores de velocidade de alimentação de arame e diâmetros de arame utilizados por outros autores.	61
Tabela 4: Valores de frequência de oscilação e amplitude de deflexão do arco utilizados por outros autores.	62
Tabela 5: Condições de Oscilação	64
Tabela 6: Quantidade e comprimento das camadas	64
Tabela 7: Consumíveis	64
Tabela 8: Parâmetros de Soldagem	65
Tabela 9: Propriedades elétricas da bobina eletromagnética.	85
Tabela 10: Condições experimentais adotadas por Julian (2014)	86
Tabela 11: Parâmetros de soldagem para os 10 cordões depositados	90
Tabela 12: LTP e LEP para as paredes de aço.	92
Tabela 13: ATP para as paredes de aço.	94
Tabela 14: ED para as paredes de aço	97
Tabela 15: Parâmetros geométricos das paredes de titânio produzidas na Etapa 2.	99
Tabela 16: Propriedades físicas do aço com baixo teor de carbono e do titânio	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a	Difusividade térmica do material da peça
$A(C)$	Altura da parede em função do número de camadas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATP	Altura Total da Parede
B	Campo Magnético
c	Calor específico do material
C	Número da Camada
CC	Corrente Contínua
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>
CNC	Controle Numérico Computadorizado
DE – GMAW	<i>Double Electrode Gas Metal Arc Welding</i>
DC	<i>Duty Cycle</i>
D/A	Digital / Analógico
E	Tensão Contínua
ED	Eficiência de Deposição
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
EP	Tempo de Ciclo Positivo da Corrente Alternada
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
F_a	Força do Arco
F_{ax}	Componente Horizontal da Força do Arco
F_{ay}	Componente Vertical Força do Arco
F_b	Força de Empuxo
F_B	Força de Lorentz
F_d	Força de Impacto das Gotículas Metálicas
F_g	Força da Gravidade
F_m	Força Magnética Adicional
F_N	Força Normal à Superfície
F_R	Força Resultante
F_η	Força de Atrito Viscoso

F_{σ}	Força de Tensão Superficial
$F_{\sigma ap}$	Força de Tensão Superficial que atua no arame
$F_{\sigma pp}$	Força de Tensão Superficial que atua na poça de fusão
$F_{\sigma' ap}$	Reação da força de tensão superficial que atua no arame
$F_{\sigma' pp}$	Reação da força de tensão superficial que atua na poça de fusão
h	Penetração
h/w	Razão entre Altura e Largura
H	Reforço
i	Corrente Elétrica
I ₂ C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
KI	Constante Integral
KP	Constante Proporcional
l	Comprimento do condutor de eletricidade
L	Indutância
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LDR	<i>Light Dependent Resistor</i>
LEP	Largura Efetiva da Parede
LRSS	Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação da UFMG
LTP	Largura Total da Parede
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
P	Proporção de Fusão
PI	Proporcional Integral
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i>
PPR	Pulsos por Rotação
q	Potência Específica
R	Resistencia Elétrica
R ₀	Raio do arco elétrico na região anódica
R ²	Coefficiente de Determinação
$R_{m\acute{a}x}$	Velocidade máxima de solidificação
R _D	Raio da superfície de contato
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
S	Espaço vazio na frente da poça de fusão
S ₁	Área de Penetração

S_2	Área de Deposição
t	Tempo
$t_{\text{acomodação}}$	Tempo de Acomodação
T_0	Temperatura Inicial
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
u	Velocidade na direção de soldagem
UOW	Universidade de Wollongong
v	Velocidade perpendicular a direção de soldagem
VP	Velocidade do Motor em Regime Permanente
W	Largura
w	Velocidade resultante de soldagem
z	Distância de um ponto da peça em relação à superfície da peça
ZTA	Zona Termicamente Afetada
α	Ângulo de Inclinação da Tocha de Soldagem na Transversal
β	Ângulo de Inclinação da Tocha de Soldagem na Longitudinal
η	Viscosidade
θ	Ângulo de inclinação da tocha, do arco ou da parede
ρ	Densidade do material
σ	Tensão Superficial
Φ	Ângulo entre o campo magnético e o comprimento do condutor

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	21
1.1. Objetivo Geral	24
1.2. Objetivos Específicos	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1. Manufatura Aditiva Baseada em Processos de Soldagem a Arco Elétrico	25
2.1.1. Aspectos Gerais.....	25
2.1.2. Transbordamento da Poça de Fusão.....	26
2.2. Oscilação Magnética do Arco Elétrico	47
2.2.1. Aspectos Gerais.....	47
2.2.2. Distribuição de Calor e Pressão	50
2.2.3. Geometria do Cordão de Solda	53
2.3. Transferência Metálica no Processo GTAW com Alimentação Automática de Arame Frio.....	55
3. METODOLOGIA.....	59
3.1. Desenvolvimento da Bancada de Testes.....	59
3.1.1. Sistema para movimentação da tocha de soldagem TIG.....	59
3.1.2. Alimentador Automático de Arame	60
3.1.3. Oscilador Magnético de Arco Elétrico.....	62
3.2. Fabricação das Paredes	63
3.3. Análise Geométrica	68
3.4. Filmagem do Processo e Análise do Comportamento do Arco Elétrico, da Poça de Fusão e da Transferência Metálica.....	69
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
4.1. Bancada de Testes.....	71
4.1.1. Sistema para Movimentação da Tocha TIG.....	71
4.1.2. Alimentador Automático de Arame	77
4.1.3. Oscilador Magnético de Arco Elétrico.....	82
4.1.4. Testes Preliminares	88

4.2. Geometria da Parede.....	92
4.2.1. Paredes de Aço	92
4.2.2. Paredes de Titânio	97
4.2.3. Influência das Propriedades Físicas dos Materiais no Fenômeno de Transbordamento da Poça de Fusão.....	100
4.3. Estabilidade do Processo	101
4.3.1. Características do Arco Elétrico.....	102
4.3.2. Transferência Metálica e Superfície da Poça de Fusão.....	102
4.3.3. Poça de Fusão.....	103
4.4. Forças na Poça de Fusão.....	108
4.4.1. Influência da Oscilação Magnética do Arco Elétrico na Força do Arco.....	109
4.4.2. Influência da Oscilação Magnética do Arco Elétrico na Força da Gravidade ..	112
4.4.3. Influência da Oscilação Magnética na Força Resultante da Transferência Metálica	116
4.4.6. Modelo de Forças Proposto.....	118
4.5. Considerações Finais	121
5. CONCLUSÕES	122
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	124
REFERÊNCIAS	125
APÊNDICES	135
APÊNDICE A – CIRCUITOS ELETRÔNICOS	135
A.1 CONTROLADOR DOS MOTORES.....	135
A.2 PONTE H PARA DESLOCAMENTO HORIZONTAL DA TOCHA GTAW ..	136
A.3 PONTE H PARA DESLOCAMENTO VERTICAL DA TOCHA GTAW	136
A.4 ALIMENTADOR DE ARAME.....	137
A.5 OSCILADOR MAGNÉTICO DE ARCO ELÉTRICO	138
APÊNDICE B – CÓDIGOS DE PROGRAMAÇÃO.....	139
B.1 CONTROLADOR DOS MOTORES	139
B.2 ALIMENTADOR DE ARAME (ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA)	150

B.3 ALIMENTADOR DE ARAME (ALIMENTAÇÃO PULSADA).....	158
B.4 OSCILADOR MAGNÉTICO DE ARCO ELÉTRICO.....	166
ANEXOS.....	183
ANEXO A – CÂMERA MOTIONPRO X3PLUS.....	183
ANEXO B – CÂMERA XIRIS XVC-1100	185

1. INTRODUÇÃO

Manufatura aditiva é um processo de adição de materiais, geralmente camada sobre camada, para criar objetos a partir dos dados de um modelo 3D, ao contrário das metodologias de manufatura subtrativa (ASTM, 2012). Charles Hull foi o precursor desse método de fabricação e, em 1986, desenvolveu o processo conhecido como estereolitografia, que foi acompanhado do desenvolvimento subsequente de novas tecnologias em manufatura aditiva. A fabricação por adição de material tem sido amplamente aplicada em diferentes indústrias, incluindo os setores de construção civil, prototipagem e biomecânica. O consenso crescente de substituir as técnicas tradicionais por essa tecnologia de fabricação é atribuído a vários benefícios, incluindo a produção de geometrias complexas com alta precisão dimensional, máxima economia de material, flexibilidade no projeto e customização de produtos. Além disso, uma ampla gama de materiais utilizados atualmente na impressão 3D inclui metais, polímeros, cerâmicas e concreto (Ngo et al., 2018).

Neste trabalho, focou-se na manufatura aditiva baseada nos processos de soldagem a arco elétrico, que apresenta diversas vantagens em relação aos demais métodos de manufatura aditiva aplicados na produção de peças metálicas, como aqueles estabelecidos com *laser* ou feixe de elétrons e pó metálico. Alguns desses benefícios são o menor custo de equipamentos, o uso mais eficiente de matéria prima e a alta taxa de deposição. Entretanto, por ser uma tecnologia recente, alguns problemas precisam ser solucionados para que este método de fabricação se torne ainda mais atraente para a indústria. Dentre esses problemas, podem ser mencionados as distorções e tensões residuais produzidas nas peças fabricadas, a baixa precisão dimensional, o insatisfatório acabamento superficial, o elevado grau de anisotropia das peças fabricadas etc. (Cunningham et al., 2018)

Para diversas aplicações, os componentes produzidos precisam passar por operações de usinagem antes de serem colocados em serviço por causa do acabamento superficial de má qualidade (Martina et al., 2012). Nessa etapa, o ideal seria que a quantidade de material removido da peça fosse a menor possível, visando um menor desperdício de matéria prima. Entretanto, em peças metálicas de parede fina, que são estruturas multicamadas de passe único e bastante utilizadas na indústria aeroespacial principalmente por serem leves (Xiong et al, 2016), essa quantidade de material se torna expressiva em razão do fenômeno de

transbordamento da poça de fusão, o que prejudica a eficiência de deposição do processo, que é a razão entre a quantidade de metal aproveitado e a quantidade de metal adicionado para a fabricação da peça, e impacta negativamente nos custos da produção e do produto fabricado.

O transbordamento ou colapso da poça de fusão ocorre principalmente durante a deposição das camadas superiores e consiste no escoamento do metal fundido pelas laterais da parede, devido sobretudo a ação da gravidade. Como consequência, a largura da parede aumenta com a altura (Wu et al., 2017) e a eficiência de deposição do processo diminui. Segundo Xiong et al. (2015), as principais causas desse fenômeno são o calor acumulado, a refusão de camadas anteriores e a pressão do arco. Além da perda de matéria prima, o tempo de produção do componente metálico também aumenta, já que uma etapa de remoção de material é acrescentada ao processo. Portanto, ao solucionar este problema, aumenta-se a eficiência de deposição, possibilitando a produção de estruturas multicamadas de passe único mais altas e com menos camadas, e diminui-se o tempo de produção, uma vez que minimiza ou elimina a etapa de usinagem e reduz o número de camadas necessárias a serem depositadas. Torna-se, assim, o custo de produção e, conseqüentemente, do produto fabricado mais baixo. Para exemplificar, duas paredes finas com o mesmo número de camadas são ilustradas na Figura 1, uma produzida por um processo com baixa eficiência de deposição (a) e a outra, por um processo com alta eficiência de deposição (b). Observa-se que com o aumento da eficiência de deposição a largura da parede varia menos com a altura.

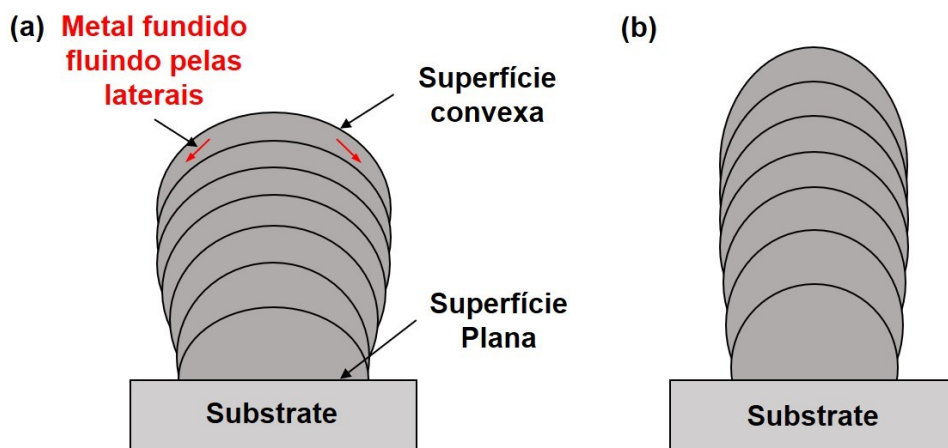


Figura 1: Modelo de deposição para parede multicamadas de passe único. (a) Baixa eficiência de deposição e (b) alta eficiência de deposição

Neste estudo, para minimizar o transbordamento da poça de fusão e aumentar a eficiência de deposição do processo, aplicou-se a técnica de oscilar o arco elétrico por força

magnética durante a construção de paredes multicamadas de passe único. A oscilação magnética do arco elétrico é utilizada na soldagem GTAW e GMAW para melhorar as propriedades mecânicas da junta soldada, tais como resistência mecânica (Reddy et al., 1997; Janaki Ram et al., 1999; Sundaresan et al., 1999; Koteswara Rao et al., 2005) e resistência a fissuração a quente (Reddy et al., 1997; Yu et al., 2014), a fusão das paredes laterais em juntas de topo com chanfro estreito (Sun et al., 2016, Wang et al., 2017 e Wang et al., 2018), o passe de raiz (Juliani, 2014) e o aspecto geométrico do cordão de solda (Chen et al., 1990). Tais melhorias ocorrem devido à perturbação do fluxo de metal fundido no interior da poça de fusão e à alteração da distribuição de calor e pressão na região da junta como consequência do movimento oscilatório do arco elétrico durante o processo. Esses efeitos também podem ser benéficos para manufatura aditiva baseada na soldagem a arco elétrico e contribuir para minimizar o fenômeno de transbordamento da poça de fusão. A desconcentração de calor e pressão do arco causado pela oscilação magnética, por exemplo, pode ser uma alternativa para diminuir a profundidade de penetração da solda e, portanto, a refusão das camadas pré-depositadas, que é um dos principais fatores que causam o colapso de metal fundido.

Os experimentos foram realizados com o processo GTAW e paredes finas de aço com baixo teor de carbono e liga de titânio Ti6Al4V foram fabricadas com e sem oscilação magnética do arco elétrico. Escolheu-se trabalhar com aço de baixo carbono por conta do seu baixo custo e porque é amplamente empregado na indústria metalmeccânica. Já a liga de titânio Ti6Al4V, por ser bastante utilizada na produção de peças para a indústria de aviões, onde atualmente a manufatura aditiva baseada em processos de soldagem a arco elétrico tem sido muito aproveitada. A partir de macrografias da seção transversal, avaliou-se a geometria das paredes construídas e verificou-se que é possível tornar as paredes mais finas e aumentar a eficiência de deposição do processo oscilando o arco elétrico por forças magnéticas enquanto a camada é depositada. A fim de se entender a influência da oscilação magnética no comportamento do arco elétrico, da poça de fusão e da transferência metálica, filmagens foram realizadas com câmeras adequadas para monitorar o processo de soldagem. Por fim, os efeitos da oscilação magnética do arco elétrico no fenômeno de transbordamento da poça de fusão foram explicados a partir de um modelo físico que se baseia em forças que agem no metal fundido durante a deposição do cordão de solda.

Existem diversas soluções para o transbordamento da poça de fusão. No entanto, muitas delas são caras, difíceis de adaptar ao processo ou aumentam o tempo de produção. A técnica de oscilar o arco elétrico através de forças eletromagnéticas, além de não aumentar o tempo de

produção, é relativamente de baixo custo, tanto em termos de equipamentos, visto que são utilizados elementos eletroeletrônicos simples, como bobinas eletromagnéticas, fonte de energia e componentes eletrônicos comuns, quanto em termos de consumo de energia, já que as bobinas são de baixa potência, na ordem de 10 a 12W. O aumento da eficiência de deposição torna a manufatura aditiva menos dispendiosa para as fabricas de peças metálicas, em especial as da indústria aeroespacial, que investem bastante no desenvolvimento de novas técnicas para diminuir a razão de compra-e-voo dos materiais, que é um parâmetro que avalia o desperdício de matéria prima. Pelo que se sabe até então, o uso da oscilação magnética na manufatura aditiva baseada na soldagem a arco elétrico não havia ainda sido abordado na literatura e esse trabalho apresenta explicações para os seus efeitos na geometria de paredes finas e no fenômeno de transbordamento da poça de fusão.

1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa foi estudar os efeitos da oscilação magnética do arco elétrico no fenômeno de transbordamento da poça de fusão durante a fabricação de paredes multicamadas de passe único.

1.2. Objetivos Específicos

- Projetar e construir uma bancada de testes integrada com um oscilador magnético de arco elétrico para a fabricação de paredes multicamadas de passe único por manufatura aditiva baseada na soldagem GTAW;
- Fabricar paredes multicamadas de passe único de aço baixo carbono SAE 1010 e liga de titânio Ti6Al4V com e sem oscilação magnética do arco elétrico;
- Avaliar os efeitos da oscilação magnética do arco elétrico na geometria das paredes fabricadas;
- Investigar os efeitos da oscilação magnética no comportamento do arco elétrico, da poça de fusão e do modo de transferência metálica;
- Propor um modelo físico que explique os efeitos da oscilação magnética do arco elétrico no fenômeno de transbordamento da poça de fusão.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Manufatura Aditiva Baseada em Processos de Soldagem a Arco Elétrico

2.1.1. Aspectos Gerais

A manufatura aditiva baseada em processos de soldagem a arco elétrico pode ser classificada em função do processo base de soldagem (Pan et al., 2018). Tipicamente são três: *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) e *Plasma Arc Welding* (PAW). Independentemente do processo de soldagem utilizado, as principais características dessa manufatura aditiva são o uso do arco elétrico como fonte de energia e do arame como metal de adição.

Os sistemas de soldagem a arco elétrico para manufatura aditiva consistem essencialmente de um robô industrial ou uma mesa CNC (*Computer Numeric Control*), uma fonte de soldagem com seus acessórios (tocha, cabo terra, cilindro de gás de proteção, sistema de refrigeração etc.) e um alimentador automático de arame (Pan et al., 2018). Um diagrama com esses elementos básicos é apresentado na Figura 2.

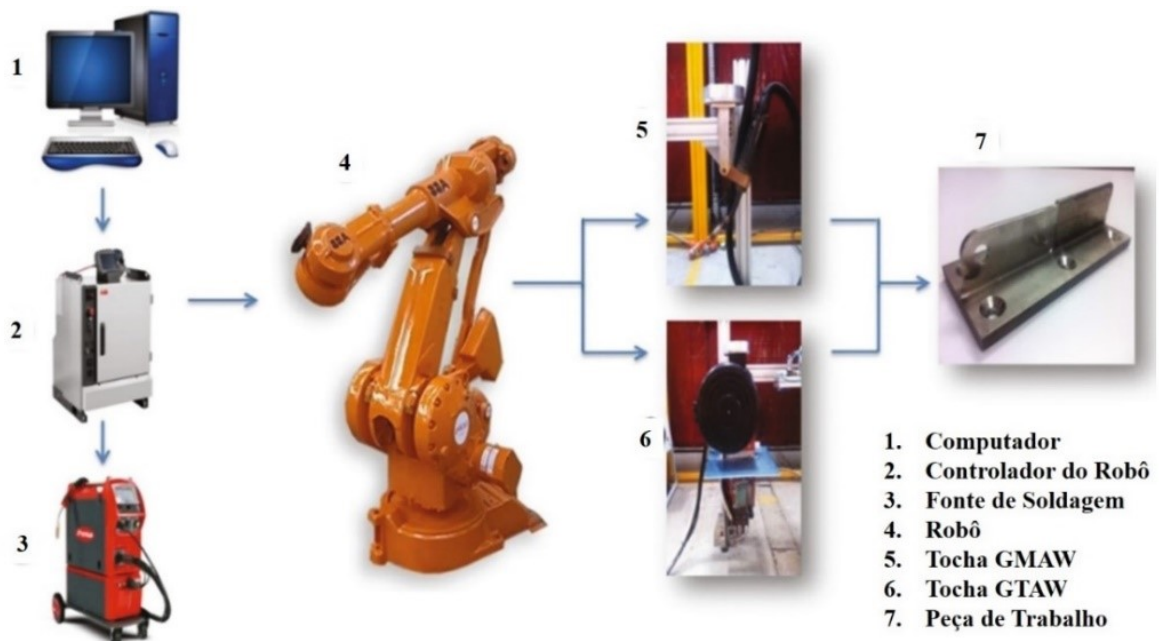


Figura 2: Sistema de soldagem a arco elétrico para manufatura aditiva (adaptada pelo autor)

Fonte: Pan et al. (2018)

Segundo Xiong et al. (2015), as peças fabricadas por manufatura aditiva baseada em processos de soldagem a arco elétrico dividem-se em dois tipos de estruturas: multicamadas de passe único e multicamadas de múltiplos passes. Como o próprio nome diz, a classificação está em função do número de cordões de solda necessários para formar uma única camada do componente metálico. Em estrutura multicamadas de passe único, a camada é composta por apenas um cordão de solda, e em estruturas multicamadas de múltiplos passes, a camada é constituída de pelo menos dois cordões.

2.1.2. Transbordamento da Poça de Fusão

2.1.2.1. Consequência para Geometria da Parede e Causas do Problema

A consequência do fenômeno de transbordamento da poça fusão para a geometria da seção transversal de uma parede multicamadas de passe único feita de titânio com o processo GTAW pode ser vista na Figura 3. Observa-se que a largura da parede cresce com a altura, sendo, portanto, fina próximo a base e larga próximo ao topo (Wu et al. 2017).

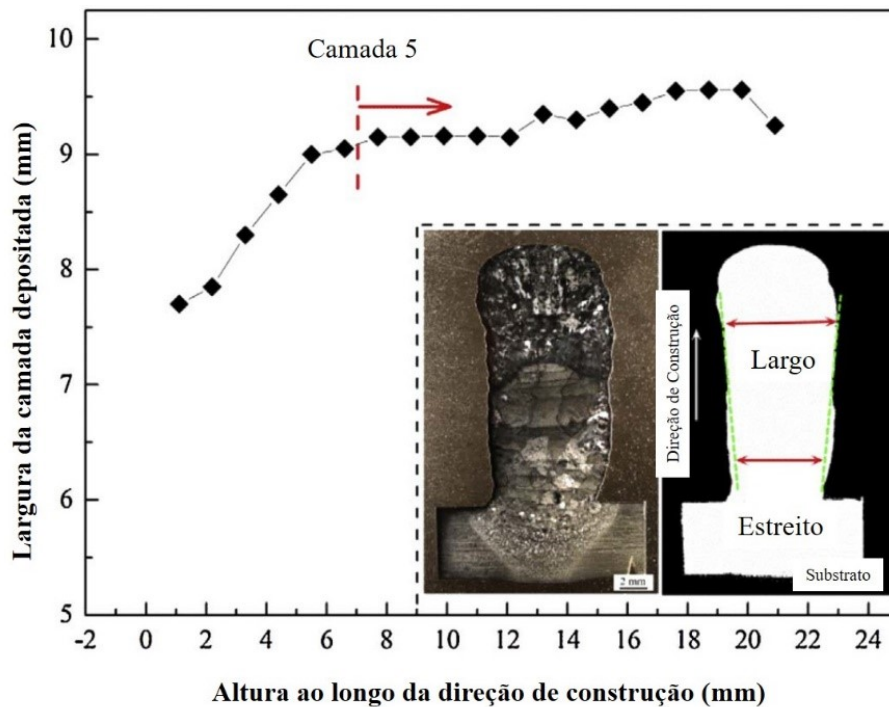


Figura 3: Largura da parede em função da altura da parede (adaptada pelo autor)

Fonte: Wu et al. (2017)

Este problema é causado pelos seguintes fatores:

- Calor acumulado na parede;
- Pressão do arco;
- Refusão das camadas pré-depositadas;
- Falta de suportes laterais.

O calor acumulado ou a energia retida na parede devido à diminuição da taxa de transferência de calor por condução da poça até o substrato (metal de base) à medida que o número de camadas depositadas aumenta é o principal responsável pelo transbordamento da poça de fusão. Zhao et al. (2011) e Xiong et al. (2018) verificaram a partir de uma análise pelo método de elementos finitos que o gradiente máximo de temperatura na direção vertical na poça de fusão da camada depositada diminui com o aumento da altura da parede, conforme apresentado na Figura 4, o que segundo a Lei de Fourier, prejudica a condução de calor. Como resultado, a cada cordão de solda depositado, o metal fundido tem mais tempo para se solidificar e, portanto, transbordar. Wu et al. (2017) calcularam, a partir de dados obtidos experimentalmente, o calor acumulado após cada camada depositada, durante a fabricação de uma parede de titânio multicamadas de passe único com o processo GTAW, e plotaram o gráfico exibido na Figura 5. Nota-se que a quantidade de energia acumulada na parede aumenta linearmente com o número de camadas depositadas. Embora a transferência de calor por convecção e radiação aumente com a altura da parede, esses mecanismos de troca de calor não são tão efetivos quanto a condução, conforme Wu et al. (2019).

De acordo com Xiong et al. (2015), o arco elétrico além de ser uma fonte de calor é também uma fonte de pressão, e o jato de plasma produz uma força sobre a poça de fusão que também contribui com o transbordamento. Luo et al. (2018) observaram que a força do arco elétrico e a força de impacto da gotícula de metal líquido transferida do arame para a poça de fusão aumentam com a potência do arco, conforme mostrado na Figura 6, e que, para valores elevados, esse efeito pode provocar o colapso do metal fundido durante a fabricação de uma parede de alumínio multicamadas de passe único com o processo GMAW.

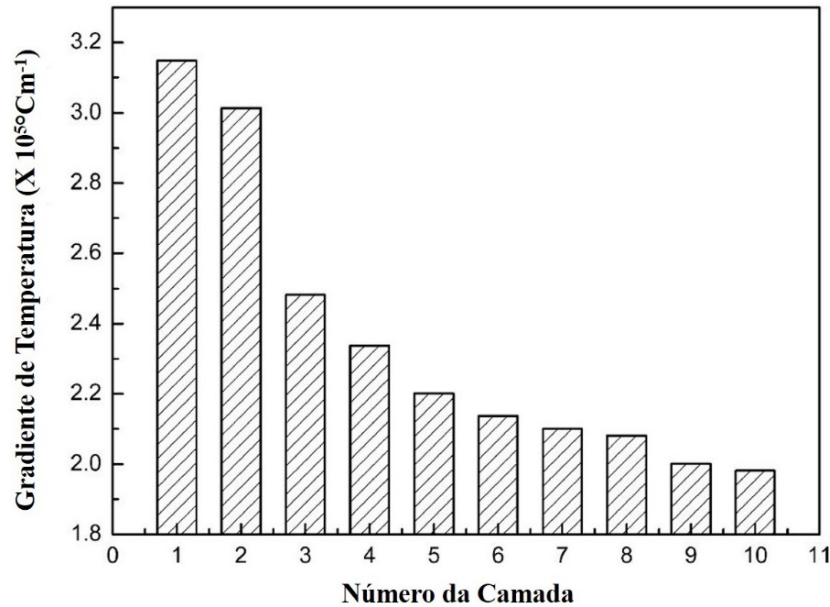


Figura 4: Gradiente de temperatura versus número de camadas (adaptada pelo autor)

Fonte: Zhao et al. (2011)

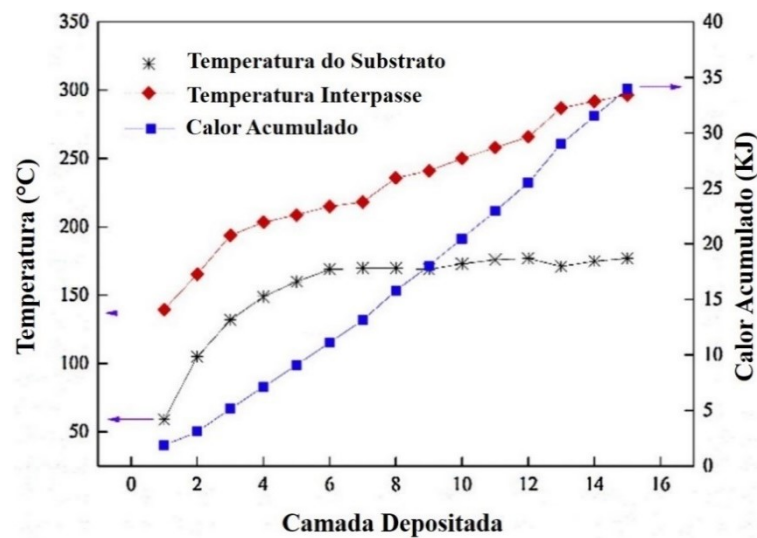


Figura 5: Variação da temperatura e do calor acumulado durante a fabricação (adaptada pelo autor)

Fonte: Wu et al. (2017)

Para Xiong et al. (2015), a refusão de camadas anteriores durante o processo de deposição também contribui com o colapso do metal fundido, já que causa um aumento do volume e, conseqüentemente, do peso da poça de fusão. Zhao et al. (2011) obteve a partir do método de elementos finitos os ciclos térmicos dos pontos localizados na metade do comprimento da primeira e quinta camada de uma parede de aço multicamadas de passe único fabricada por manufatura aditiva baseada na soldagem GMAW e exibidos na Figura 7. Observa-

se que, para as condições de soldagem adotadas, as três primeiras temperaturas de pico nesses pontos foram maiores que a temperatura de fusão do material. A primeira temperatura de pico está relacionada a formação da camada e as duas temperaturas de pico seguintes indicam a refusão da camada. Portanto, para cada camada depositada, as duas camadas anteriores eram refundidas.

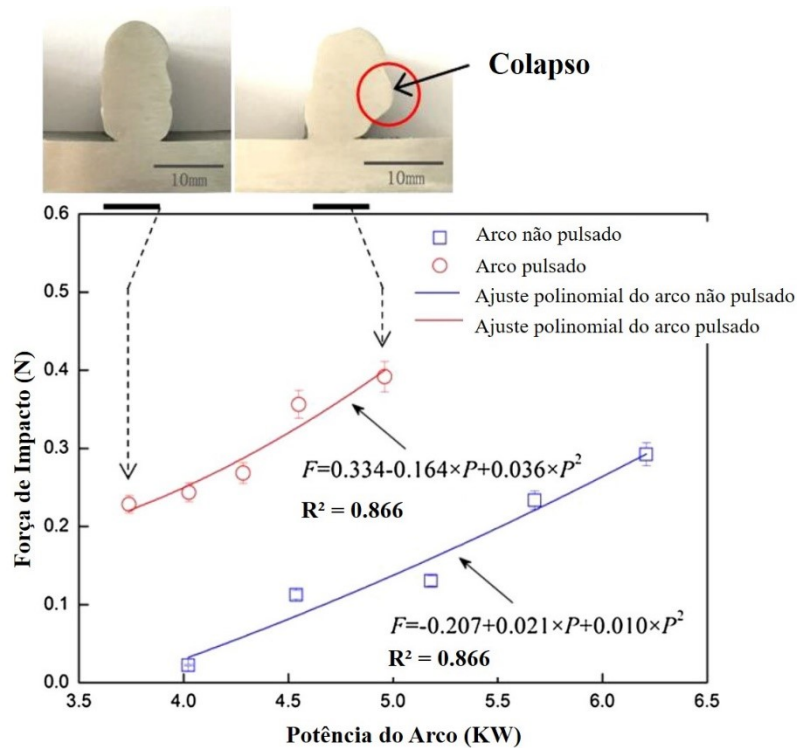


Figura 6: Comparação da força do arco nos modos pulsado e não pulsado (adaptada pelo autor)

Fonte: Luo et al. (2018)

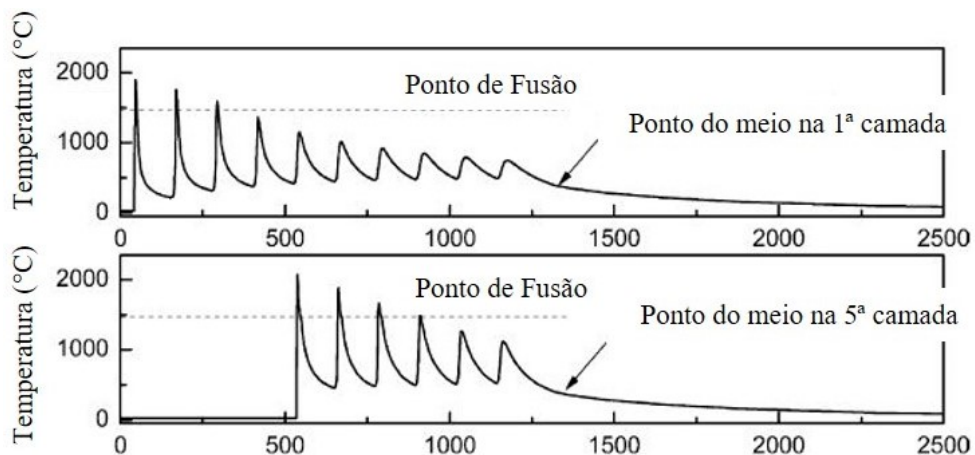


Figura 7: Ciclos térmicos da primeira e da quinta camada (adaptada pelo autor)

Fonte: Zhao et al. (2011)

Por fim, como observado por Bai et al. (2018), com exceção da primeira camada que é depositada sobre o substrato que é uma superfície plana, as demais camadas de solda são depositadas em uma superfície convexa (Figura 1). Assim, a falta de suportes laterais contribui com o escoamento do metal líquido pelos lados da parede.

2.1.2.2. Forças que Agem na Poça de Fusão

O colapso da poça de fusão também pode ser descrito como o resultado da ação de forças que atuam no metal líquido durante a deposição da camada de solda. Xiong et al. (2017) explicaram o fenômeno de transbordamento que ocorre durante a construção de paredes inclinadas de aço multicamadas de passe único por manufatura aditiva baseada no processo GMAW a partir do modelo de forças apresentado na Figura 8. Para Xiong et al. (2017), a força de tensão superficial da poça de fusão (F_σ) é a principal força de contenção durante o processo de deposição e que mantém o metal líquido estável. Já as forças da gravidade (F_g), de impacto das gotículas de metal líquido (F_d) e do arco elétrico (F_a) são as principais forças responsáveis por desestabilizar a poça de fusão.

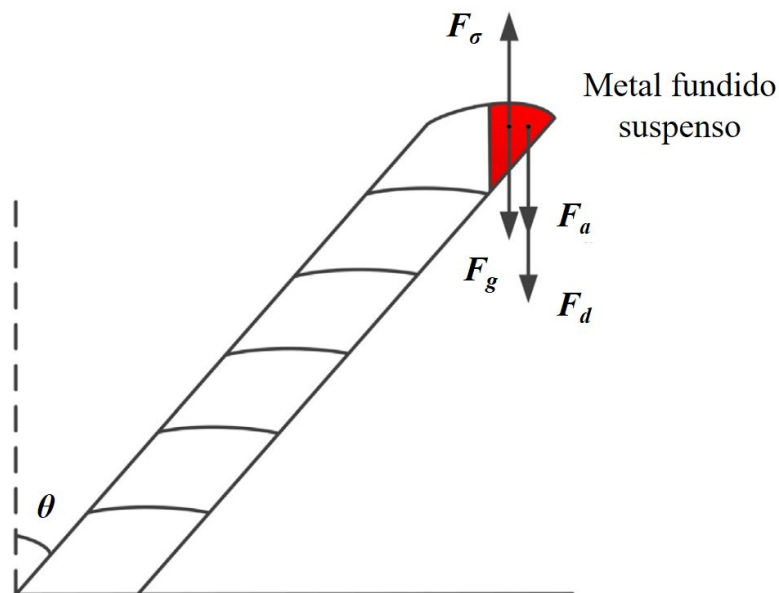


Figura 8: Representação esquemática do modelo de força (adaptada pelo autor)

Fonte: Xiong et al. (2017)

O gráfico da variação da tensão superficial (σ) de alguns metais líquidos em função da temperatura pode ser visto na Figura 9. Nota-se que a tensão superficial tende a diminuir com o aumento da temperatura. Assim, quanto maior a temperatura da poça de fusão, menor será F_σ .

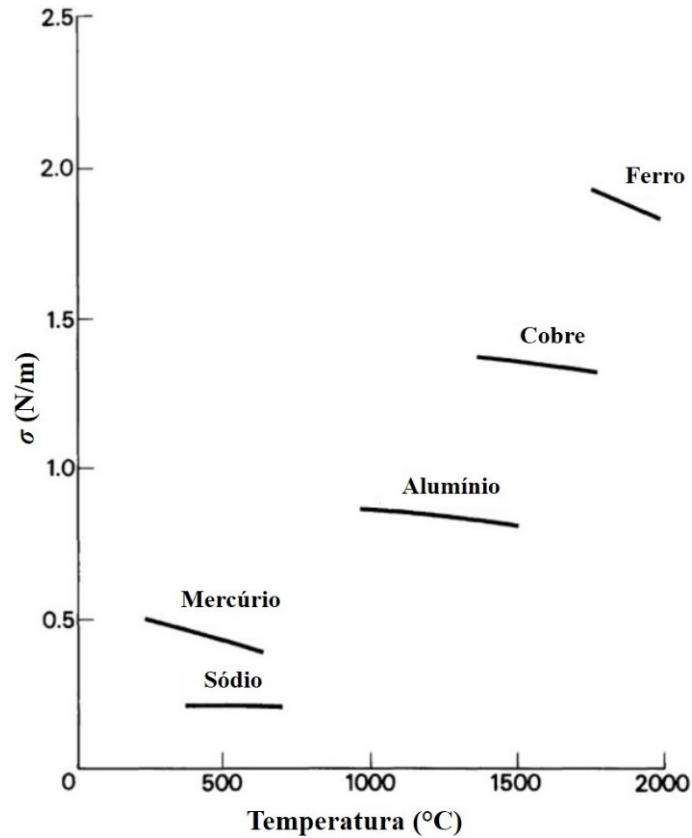


Figura 9: Tensão superficial de metais líquidos (adaptada pelo autor)

Fonte: Lancaster (1986)

Conforme Li et al. (2020), que também produziram paredes inclinadas de aço multicamadas de passe único com o processo GMAW, F_a e F_d possuem a mesma direção que a tocha de soldagem, ou seja, que o jato de plasma, como mostrado na Figura 10. Li et al. (2020) ainda consideram em seu modelo a força normal à superfície (F_N), que é uma reação de apoio devido ao contato do metal líquido com a superfície sólida da parede.

No modelo de forças proposto por Li et al. (2018), que trabalharam com paredes inclinadas de aço multicamadas de múltiplos passes fabricadas por manufatura aditiva baseada na soldagem GMAW, F_N é levada em consideração e F_σ é considerada uma força distribuída ao longo da superfície da poça de fusão, conforme apresentado na Figura 11.

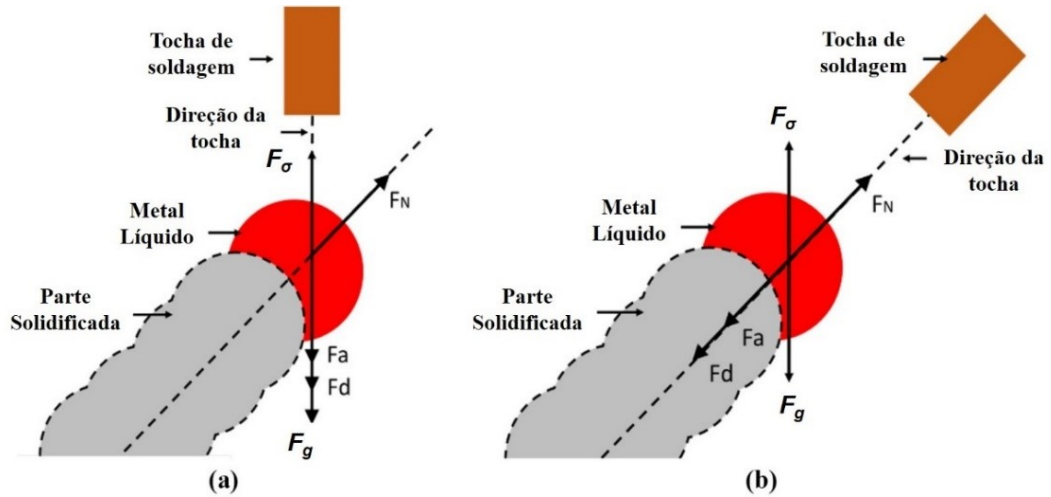


Figura 10: Tocha de soldagem (a) perpendicular e (b) inclinada em relação ao substrato (adaptada pelo autor)

Fonte: Li et al. (2020)

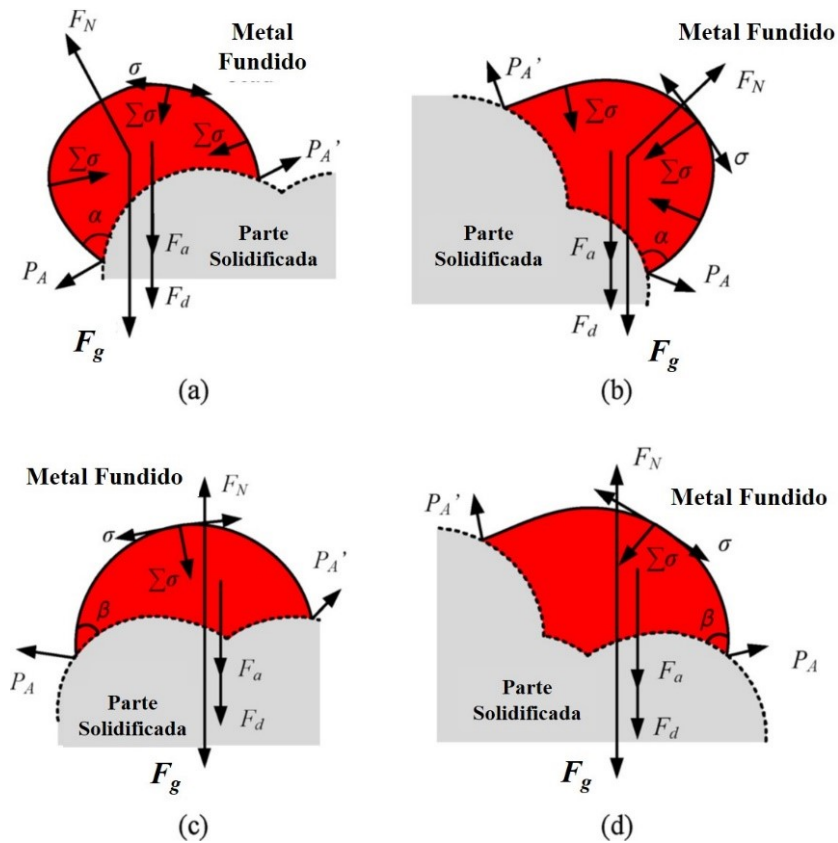


Figura 11: Representação esquemática do modelo de força (adaptada pelo autor)

Fonte: Li et al. (2018)

Em seu modelo, Zhang et al. (2019), que fabricaram paredes finas de alumínio com o processo *Cold Metal Transfer* (CMT), que é uma variação do processo GMAW, levam em consideração a força de atrito viscoso (F_{η}), que é a resistência ao escoamento do metal líquido

em contato com a superfície sólida da parede, e a força de empuxo (F_b), em razão da diferença de densidade no interior da poça de fusão, mas desconsideram F_N e F_d , como exibido na Figura 12. A força resultante é F_R .

O gráfico da variação da viscosidade (η) de alguns metais líquidos em função temperatura é apresentado na Figura 13. Observa-se que a viscosidade diminui à medida que a temperatura aumenta. Portanto, quanto maior a temperatura, menor será F_η .

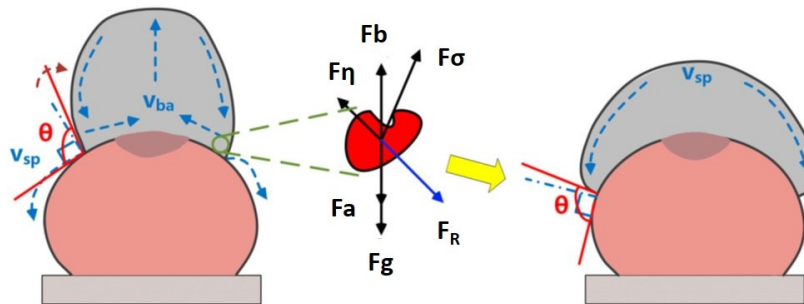


Figura 12: Representação esquemática do modelo de força

Fonte: Zhang et al. (2019)

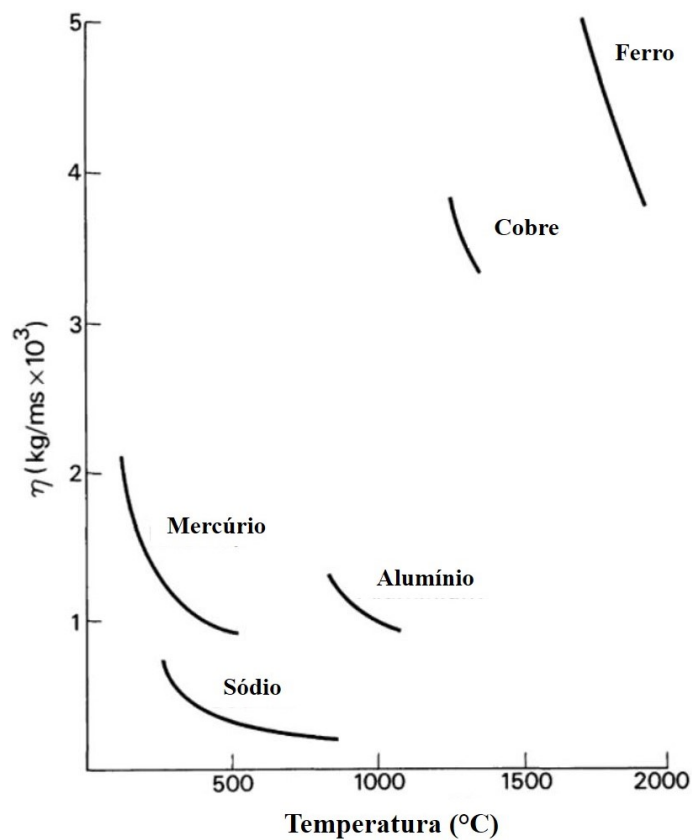


Figura 13: Viscosidade de metais líquidos (adaptada pelo autor)

Fonte: Lancaster (1986)

2.1.2.3. Parâmetros Geométricos da Parede

Conforme Martina et al. (2012), as paredes fabricadas por manufatura aditiva baseada em processos de soldagem a arco elétrico apresentam uma superfície irregular, tornando-se necessário uma operação de usinagem para se atingir um acabamento superficial satisfatório. As larguras antes e depois da usinagem são chamadas de Largura Total da Parede (LTP) e Largura Efetiva da Parede (LEP), respectivamente. Ambas são apresentadas na Figura 14. A área A é a área da seção transversal cercada pela LEP, e as áreas B e C são as áreas da seção transversal do material que precisam ser removidas pela operação de usinagem. A Eficiência de Deposição (ED) representa a quantidade de material de adição aproveitada para fabricação da parede. A fórmula para cálculo de ED é dada pela Equação 1. ED igual a 100% é a condição ideal, o que indica que não são necessárias operações de usinagem após a construção da parede. A altura total da parede (ATP) também é indicada na Figura 14.

$$ED = \frac{\text{Área A}}{\text{Área A} + \text{Área B} + \text{Área C}} \times 100 \% \quad (1)$$

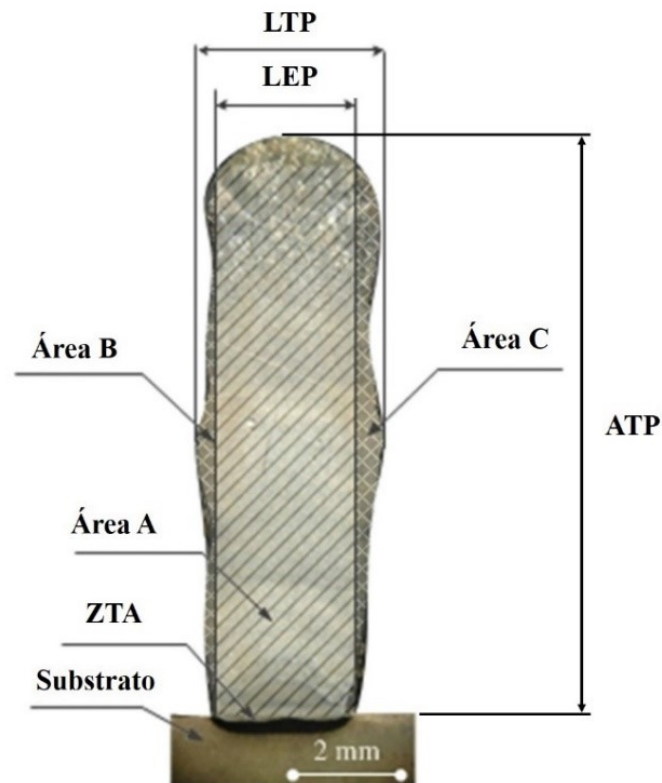


Figura 14: Seção transversal de uma parede fabricada (adaptada pelo autor)

Fonte: Jhavar et al. (2014)

2.1.2.4. Soluções para o Transbordamento da Poça de Fusão

Nos últimos anos, foram propostas diversas maneiras de minimizar o problema do transbordamento da poça de fusão, dentre as quais, a principal estratégia adotada foi a de criar meios que aumentassem as trocas de calor entre a parede e o ambiente e, portanto, que diminuíssem o calor acumulado na peça. Lu et al. (2017), por exemplo, fabricaram paredes de aço com o processo GMAW sobre uma base de cobre refrigerada a água, o que facilitou a condução de calor da parede para o substrato. Já Li et al. (2018) produziram paredes de alumínio com o processo GMAW utilizando placas *Peltier* em contato com as superfícies laterais da parede (Figura 15). Assim, a transferência de calor por condução passou a ser da parede para as placas, e não mais para o substrato. Silva et al. (2020), por sua vez, construíram paredes de alumínio com o processo CMT no interior de um tanque cujo nível de água subia à medida que a parede crescia, como exibido na Figura 16. Dessa forma, a peça era refrigerada ao mesmo tempo que era produzida.

Outros autores utilizaram jatos de gases sobre a superfície da parede para refrigerá-la por convecção forçada. Henckell et al. (2017) produziram peças cilíndricas de aço com o processo GMAW lançando jatos de Argônio puro, Argônio com 5% de Hidrogênio e Nitrogênio com 5% de Hidrogênio na superfície da parede em construção por meio de dois bocais adicionais mostrados na Figura 17. Utilizando uma câmera de infravermelho, verificou-se que todos os tipos de gases utilizados garantem a redução do calor acumulado, sendo que o melhor resultado foi para o Nitrogênio com 5% de Hidrogênio. Henckell et al. (2017) justificaram tal resultado pelo fato de Nitrogênio e Hidrogênio apresentarem maiores valores de capacidade térmica específica e condutividade térmica em relação ao Argônio, o que leva a uma absorção e uma dissipação de calor mais eficazes. Wu et al. (2018) produziram paredes de titânio com o processo GTAW aplicando gás carbônico (CO₂) na superfície da parede. O grande benefício dessa aplicação foi a diminuição no tempo de produção. Montevecchi et al. (2018) sugeriram a utilização de ar comprimido para minimizar o efeito do calor acumulado e do transbordamento da poça de fusão durante a construção de paredes de aço com o processo GMAW.

Outra forma de reduzir o calor acumulado na parede foi aumentando o tempo interpasse, que é o tempo entre o término da deposição da camada anterior e o início da deposição da camada seguinte. Assim, o componente tem mais tempo para trocar calor com o meio. Orgino et al. (2018), por exemplo, produziram paredes de aço com o processo GMAW mais altas e finas adotando essa estratégia. Contudo, essa medida aumenta o tempo de produção da peça.

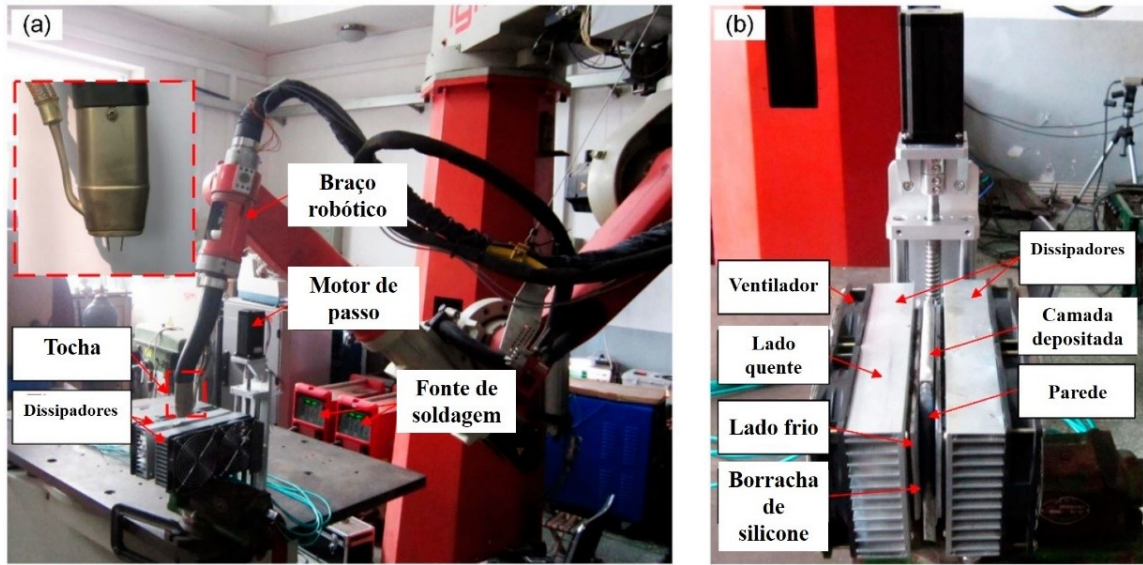


Figura 15: Montagem experimental. (a) Sistema robótico. (b) Placas de *Peltier* em contato com a parede.

(adaptada pelo autor)

Fonte: Li et al. (2018)

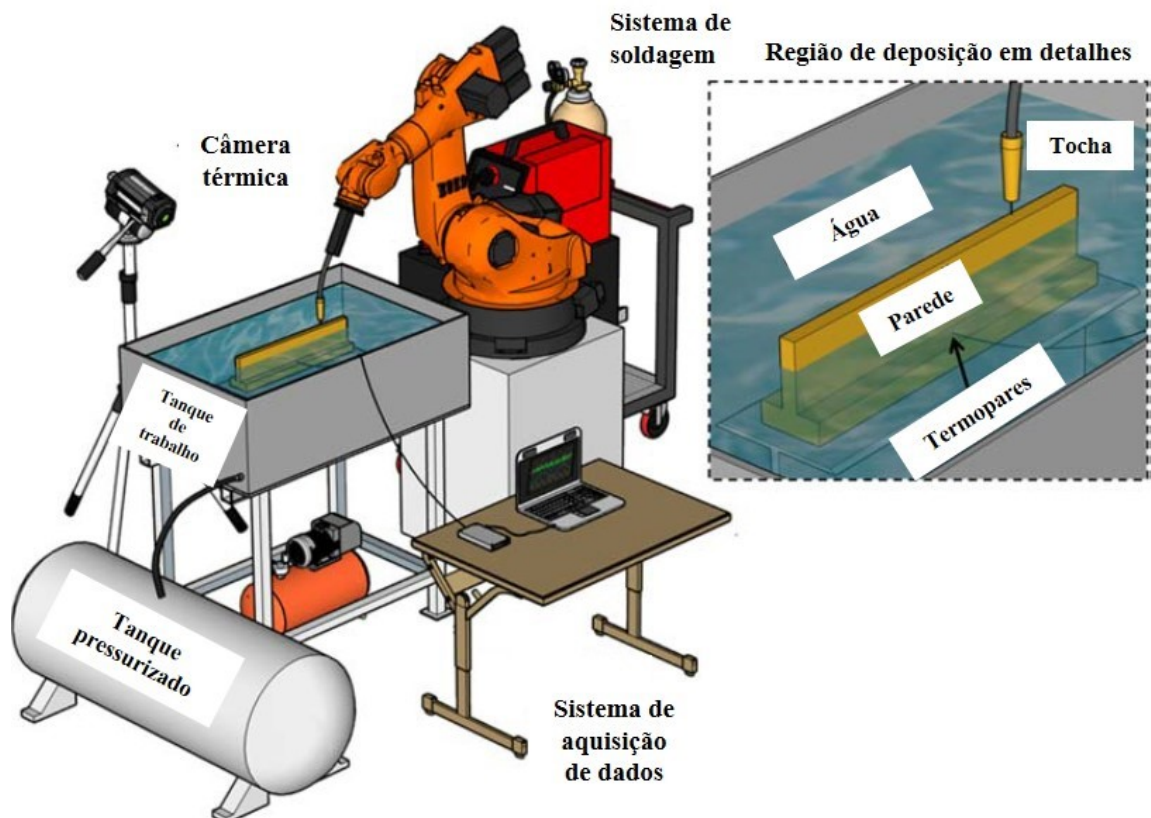


Figura 16: Montagem experimental com o robô industrial e o tanque de água (adaptada pelo autor)

Fonte: Silva et al. (2020)

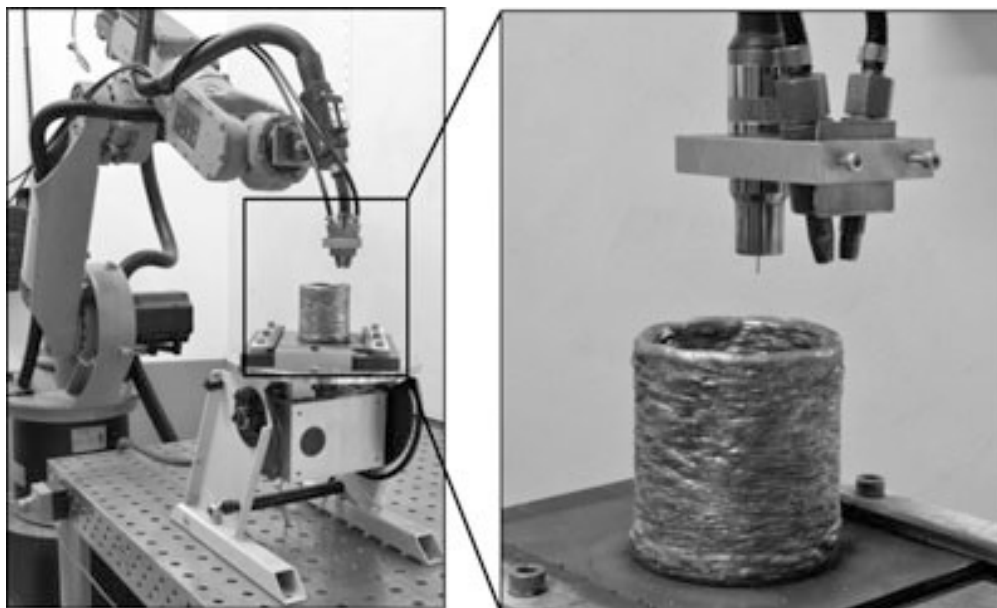


Figura 17: Montagem experimental com mesa rotativa e robô industrial de 6 eixos

Fonte: Henckell et al. (2017)

O controle das variáveis de processo durante a deposição das camadas de solda é outra tática utilizada para mitigar o problema. Neste sentido, diversos pesquisadores investigaram os efeitos dos parâmetros de soldagem, tais como corrente de soldagem, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação de arame, polaridade do eletrodo e ângulo de inclinação da tocha, na geometria da parede ou do cordão de solda depositado. Xiong et al. (2015), Hu et al. (2018) e Dinovitzer et al. (2019), por exemplo, verificaram que o problema de transbordamento da poça de fusão agrava-se em altas correntes e baixas velocidades de soldagem. Isso ocorre porque quanto maior for a corrente de soldagem, maiores serão F_a , F_d , a energia de soldagem e a penetração da solda, e quanto menor for a velocidade de soldagem, maiores serão a energia de soldagem e a penetração da solda. Além disso, Dinovitzer et al. (2019) também observaram que a espessura da camada de solda depositada com o processo GTAW aumenta com a velocidade de alimentação de arame.

Ayarkwa et al. (2017) constataram que paredes de alumínio se tornam mais altas e finas ao reduzir o tempo de ciclo positivo da corrente alternada (% EP) na manufatura aditiva baseada no processo GTAW. Os resultados obtidos são mostrados na Figuras 18. Segundo os autores, isso se deve à redução do aporte térmico com a diminuição de % EP. Essa explicação diverge da literatura clássica, que diz que quanto menor % EP, mais o calor se concentra na peça e menos se concentra no eletrodo, o que resultaria em um cordão de maior largura e menor espessura.

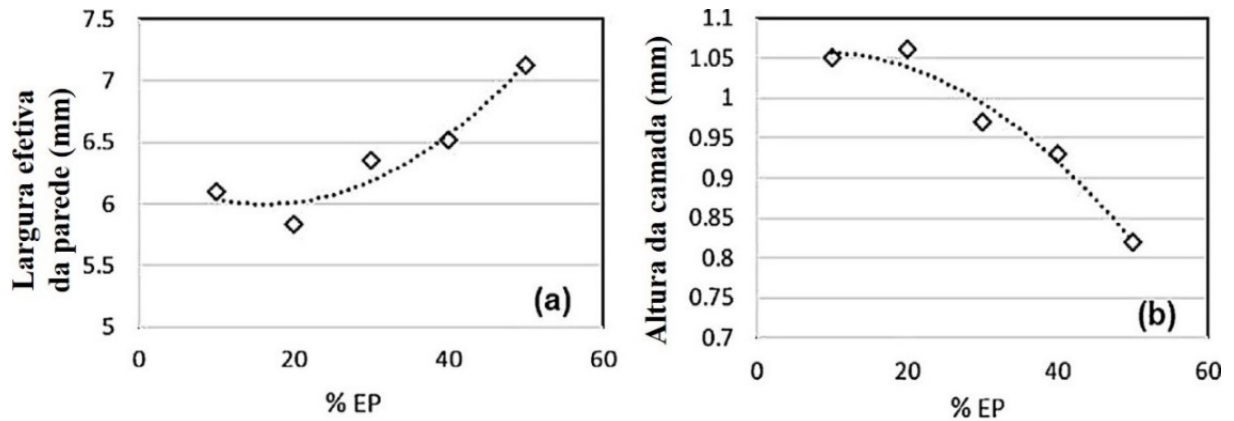


Figura 18: Efeito de % EP na (a) largura efetiva da parede e na (b) altura da camada (adaptada pelo autor)

Fonte: Ayarkwa et al. (2017)

Su e Chen (2019) e Li et al. (2019) trabalharam com os processos CMT e GMAW, respectivamente, e verificaram que os ângulos de inclinação da tocha de soldagem (α e β , Figura 19) afetam significativamente a geometria dos cordões de solda depositados. Os resultados encontrados por Su e Chen (2019) são apresentados por gráficos na Figura 20. Aumentando-se α de 30° a 150° e mantendo-se β igual a 90° (Figuras 20a e 20c), a penetração (h), a área de penetração (S_1) e a proporção de fusão (P), que é a razão entre S_1 e área da seção transversal do cordão depositado, primeiro aumentam e depois diminuem, sendo máxima quando α é igual a 90° . Já a largura (W) mostra comportamento contrário, e o reforço (H) e a área de deposição (S_2) parecem constantes. Aumentando-se β de 30° a 150° e mantendo-se α igual a 90° (Figuras 20b e 20d), W diminui e H aumenta. S_1 , P e h primeiramente aumentam e depois diminuem, sendo máxima quando β é igual a 90° . Já S_2 mostra comportamento contrário. Segundo Su e Chen (2019), a geometria do cordão de solda varia com α e β principalmente porque tais ângulos afetam a direção do jato de plasma e, conseqüentemente, as direções de F_a e F_d sobre poça de fusão. Li et al. (2019), que variaram apenas β em seus experimentos, obtiveram os mesmos resultados encontrados por Su e Chen (2019) e sugeriram que F_a seja decomposta em duas componentes, vertical (F_{a_y}) e horizontal (F_{a_x}), como mostrado na Figura 21. F_{a_y} é responsável pela penetração da solda e máxima quando a tocha está na posição vertical (Figura 21b). Isso explica o porquê de a penetração ser maior para essa condição. F_{a_x} é capaz de movimentar o metal fundido ao longo do comprimento da parede. Quando β é maior que 90° (Figura 21c), F_{a_x} está no sentido contrário da velocidade de soldagem e isso faz com que parte do metal fundido seja empurrado para trás subindo a região já solidificada da camada, o que torna a altura da parede maior. Entretanto, quando β é menor que 90° (Figura 21a), F_{a_x} tem o mesmo sentido da

velocidade de soldagem e empurra o material para frente, o que diminui a espessura da camada e torna a altura da parede menor.

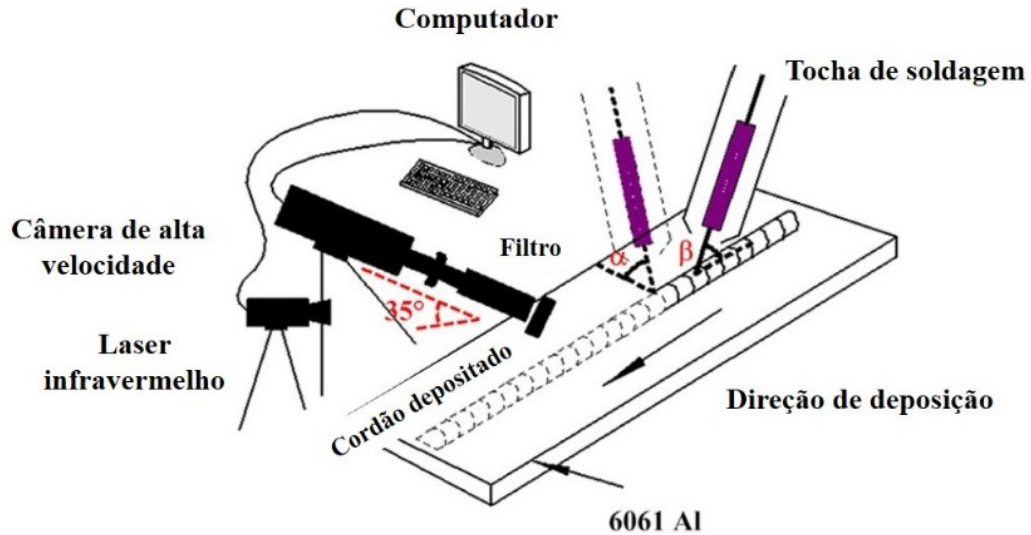


Figura 19: Diagrama esquemático da deposição do cordão de solda com o processo CMT (adaptada pelo autor)

Fonte: Su e Chen (2019)

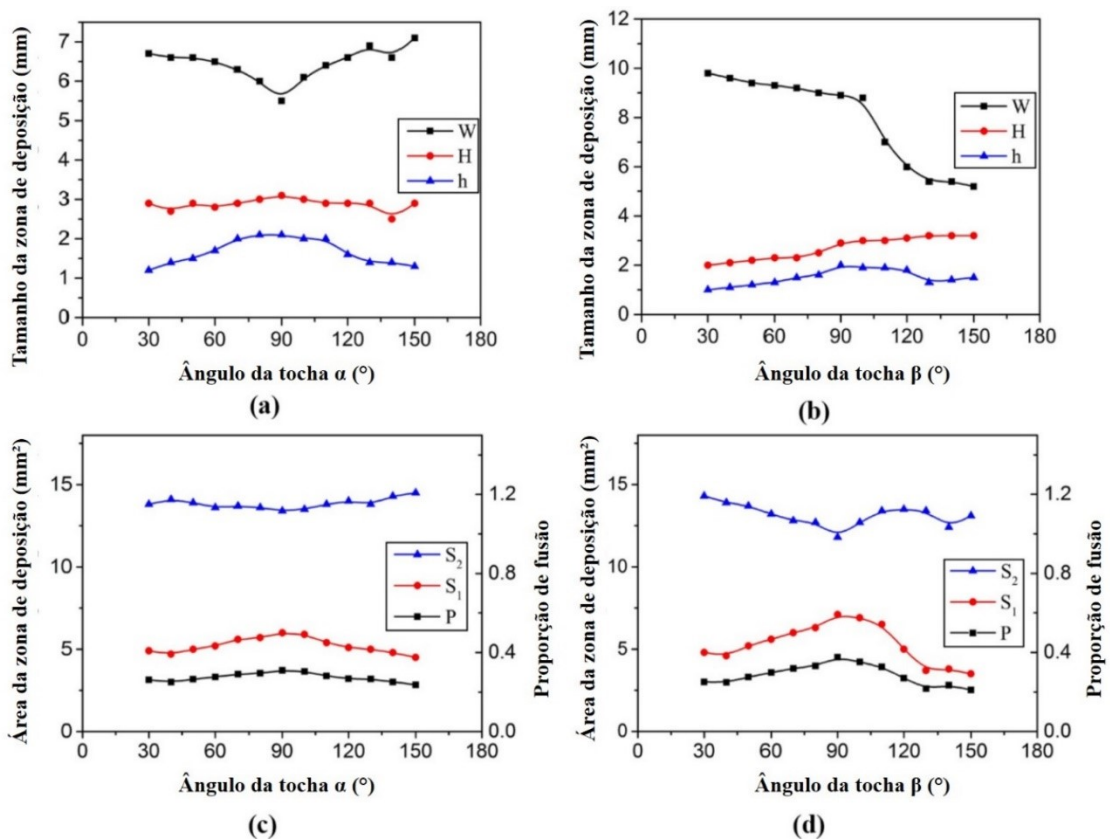


Figura 20: Geometria dos cordões depositados em diferentes ângulos da tocha (adaptada pelo autor)

Fonte: Su e Chen (2019)

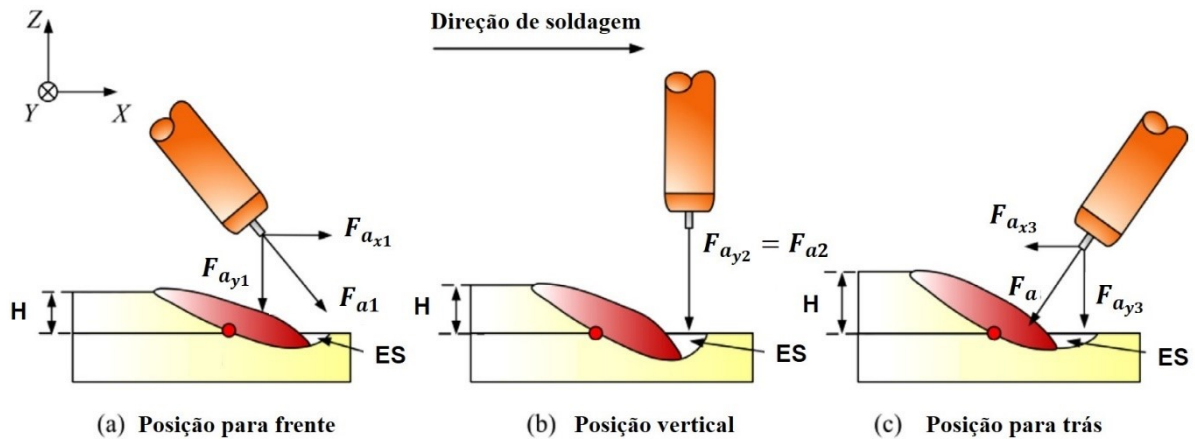


Figura 21: Efeito da direção da força do arco na altura do cordão (adaptada pelo autor)

Fonte: Li et al. (2019)

Os efeitos da corrente pulsada na geometria da parede também foram estudados. Zhu et al. (2019) compararam a geometria da seção transversal de paredes de alumínio fabricadas com corrente pulsada e não pulsada na manufatura aditiva baseada na soldagem GMAW. Conforme o gráfico apresentado na Figura 22, para uma mesma potência de arco elétrico, a razão entre altura e largura (h/w) é maior para paredes fabricadas com corrente pulsada. De acordo com os autores, a correspondência entre o arco pulsado e o modo de transferência metálica pulsado proporciona as melhores características de transferência térmica e mecânica no processo. No modo pulsado funde-se mais arame que no modo contínuo. Nota-se também que, independentemente do tipo de corrente utilizada, aumentando-se a potência do arco elétrico, diminui-se h/w , o que indica um maior transbordamento da poça de fusão em função do aumento da energia de soldagem, de F_a e F_d . Guo et al. (2016) verificaram que paredes de magnésio fabricadas com o processo GTAW e corrente pulsada se tornam mais altas e finas quando a frequência do pulso aumenta dentro do intervalo de 10 Hz até 100 Hz (Figura 23), mantendo-se a corrente média constante. Segundo os autores, a frequência de pulso altera as oscilações e a taxa de resfriamento da poça de fusão.

Conhecendo-se os efeitos dos parâmetros de soldagem na geometria do cordão de solda, Xiong et. al. (2013), Xiong et. al. (2014), Xiong et. al. (2016) e Han et al. (2018) aplicaram visão computacional para evitar o transbordamento. Essa técnica consiste em um controle em malha fechada que utiliza câmeras como sensores. Algum parâmetro geométrico da camada depositada ou da poça de fusão é a variável de saída e algum parâmetro que afete o aporte térmico, como, por exemplo, a velocidade ou corrente de soldagem, ou a adição de material é

a variável de entrada. O resultado obtido por Han et al. (2018) para paredes de aço construídas com o processo GMAW é apresentado na Figura 24. Observa-se nitidamente que essa aplicação inibiu o colapso da poça de fusão. Quando a visão computacional foi utilizada, a largura se manteve constante com o crescimento da parede.

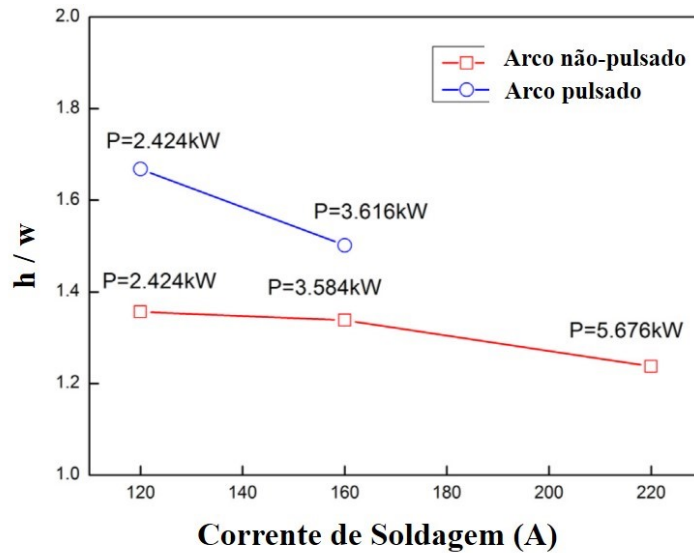


Figura 22: Característica da razão entre altura e largura (h/w) da camada depositada sem e com corrente pulsada (adaptada pelo autor)

Fonte: Zhu et al. (2019)

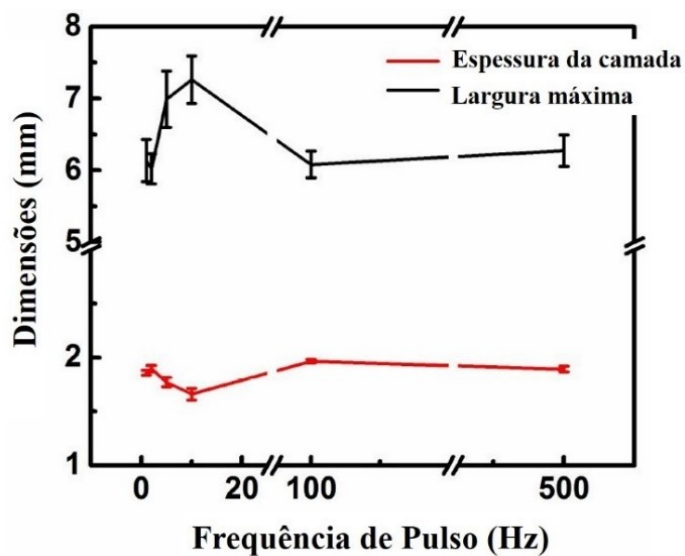


Figura 23: Largura e espessura em função da frequência do pulso (adaptada pelo autor)

Fonte: Guo et al. (2016)

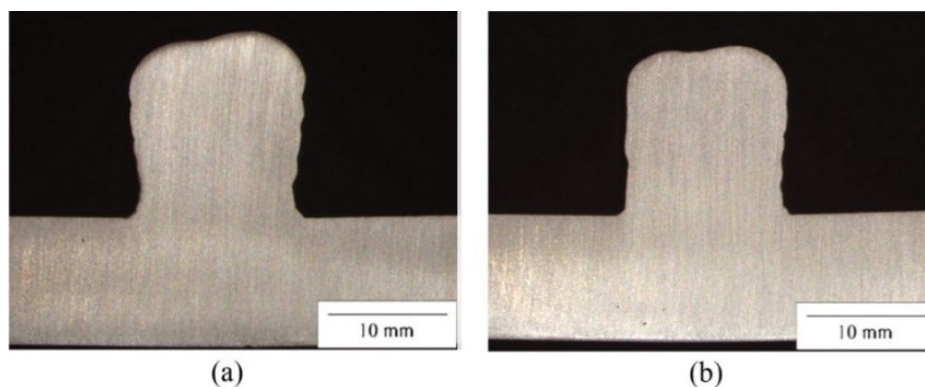


Figura 24: Seção transversal da parede produzida (a) sem e (b) com visão computacional

Fonte: Han et al. (2018)

Já Zhao et al. (2020) propuseram uma nova estratégia para a deposição de camadas que garante a uniformidade dimensional das camadas depositadas sem a necessidade de tempo interpasse ou qualquer dispositivo para eliminação de calor. Baseando-se na temperatura interpasse seguinte, prevista por meio de um algoritmo desenvolvido pelos próprios autores, alteram-se as velocidades de soldagem e alimentação de arame e evita-se, assim, a variação da largura da camada. Zhao et al. (2020) aplicaram esse método na fabricação de uma peça cilíndrica de alumínio com o processo CMT e obtiveram alta precisão dimensional, além de reduzir o tempo de produção. O comportamento da largura de camada durante o processo para três diferentes estratégias de deposição (parâmetros otimizados e deposição contínua; parâmetros constantes e deposição contínua; e parâmetros constantes e tempo interpasse de 1 minuto) pode ser visto na Figura 25. Verifica-se que apenas para a estratégia proposta (parâmetros otimizados e deposição contínua) a largura da camada se mantém constante.

Alterações nos processos convencionais de soldagem que diminuíssem o colapso de metal fundido também foram sugeridas. Liu et al. (2019) desenvolveram uma tocha de soldagem para aplicação em manufatura aditiva em que o arco elétrico é estabelecido entre o arame e um eletrodo de tungstênio dentro de um bocal cerâmico e um arco plasma indireto é constringido e transferido a peça, conforme apresentado na Figura 26. Visto que o arco elétrico não tem contato direto com o substrato ou com a peça e a maior parte do calor é utilizado para aquecer e fundir o metal de adição, o aporte térmico e o calor acumulado diminuem efetivamente. Além disso, por esse método é possível produzir pequenas gotículas de metal líquido que são transferidas para poça de fusão em trajetórias regulares.

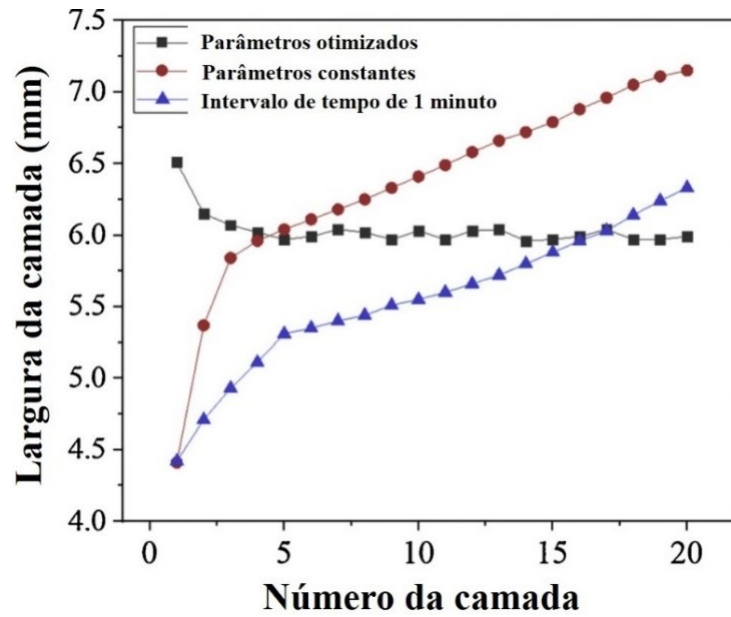


Figura 25: Comparação da largura da camada utilizando diferentes estratégias de deposição (adaptada pelo autor)

Fonte: Zhao et al. (2020)

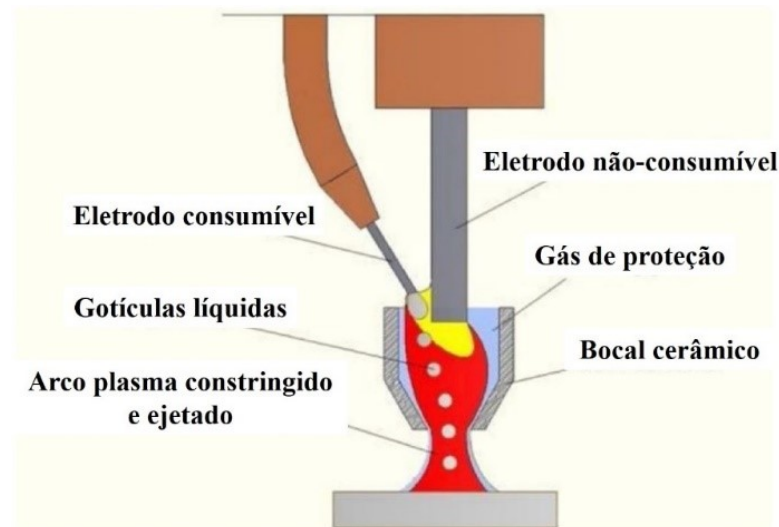


Figura 26: Nova tocha de soldagem para manufatura aditiva (adaptada pelo autor)

Fonte: Liu et al. (2019)

Yang et al. (2016) observaram que paredes de aço fabricadas com o processo *Double Electrode Gas Metal Arc Welding* (DE-GMAW) se tornam mais altas e finas aumentando-se a corrente de “*bypass*”. Conforme o diagrama esquemático apresentado na Figura 27, nesse processo utilizam-se duas tochas de soldagem, uma GMAW e outra GTAW, e a corrente de “*bypass*” é a corrente desviada pela tocha de soldagem GTAW. Segundo Yang et al. (2016), o aporte térmico e a pressão do arco diminuem com o aumento da corrente de “*bypass*”.

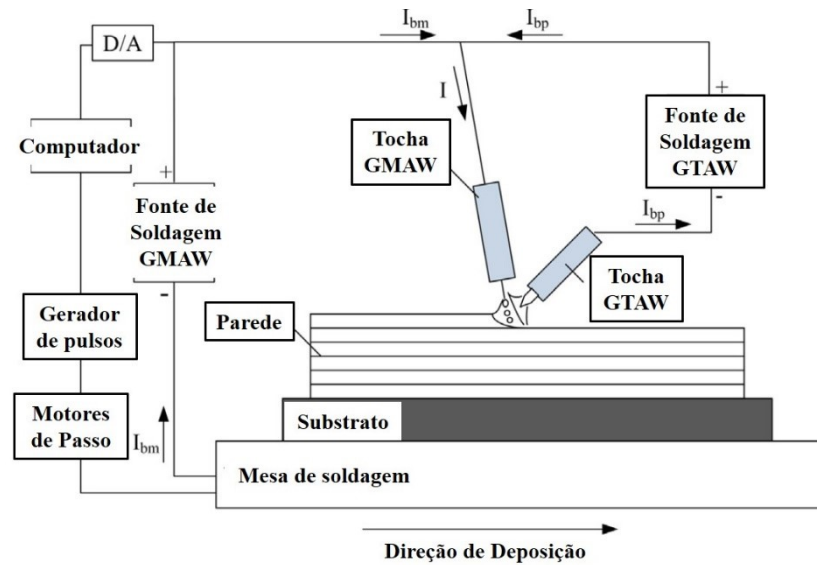


Figura 27: Diagrama esquemático do sistema de manufatura aditiva baseada no processo DE-GMAW (adaptada pelo autor)

Fonte: Yang et al. (2016)

Huang et al. (2020) estudaram uma variação da manufatura aditiva baseada no processo GTAW, em que parte da corrente de soldagem (corrente de “*bypass*”) é desviada pelo arame. Os autores investigaram a influência do modo de transferência metálica na largura de paredes de aço inoxidável austenítico multicamadas de passe único fabricadas por esse processo e observaram que paredes construídas com o modo de transferência em ponte são mais finas que aquelas construídas com modo de transferência em gotícula livre, como mostrado na Figura 28. De acordo com Huang et al. (2020), na transferência em ponte, o metal de adição é adicionado à poça de fusão de forma mais suave, sob ação apenas da força de tensão superficial, e na transferência em gotícula livre, o impacto das gotículas metálicas na poça de fusão, sob ação das forças da gravidade, de tensão superficial e do arco, prejudica a formação da camada de solda. Assim, para garantir o modo de transferência metálica em ponte deve-se controlar a velocidade de alimentação de arame e a corrente de “*bypass*”.

Bai et al. (2013) evitaram o transbordamento da poça de fusão durante a construção de paredes inclinadas de aço com o processo GMAW usando força eletromagnética para conter a poça de fusão. Uma representação esquemática do processo pode ser vista na Figura 29. Campo magnético alternado foi gerado por uma bobina de indução energizada por uma fonte de energia de alta frequência. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 30. Observa-se que o ângulo de inclinação (θ) máximo para construção das paredes sem a ocorrência do colapso de metal fundido aumentou de 50° para 60° quando imposta a contenção eletromagnética. Para a

fabricação de paredes inclinadas, a falta de suportes laterais é um dos principais fatores responsáveis pelo transbordamento, e essa técnica se mostra eficaz em compensar essa deficiência.

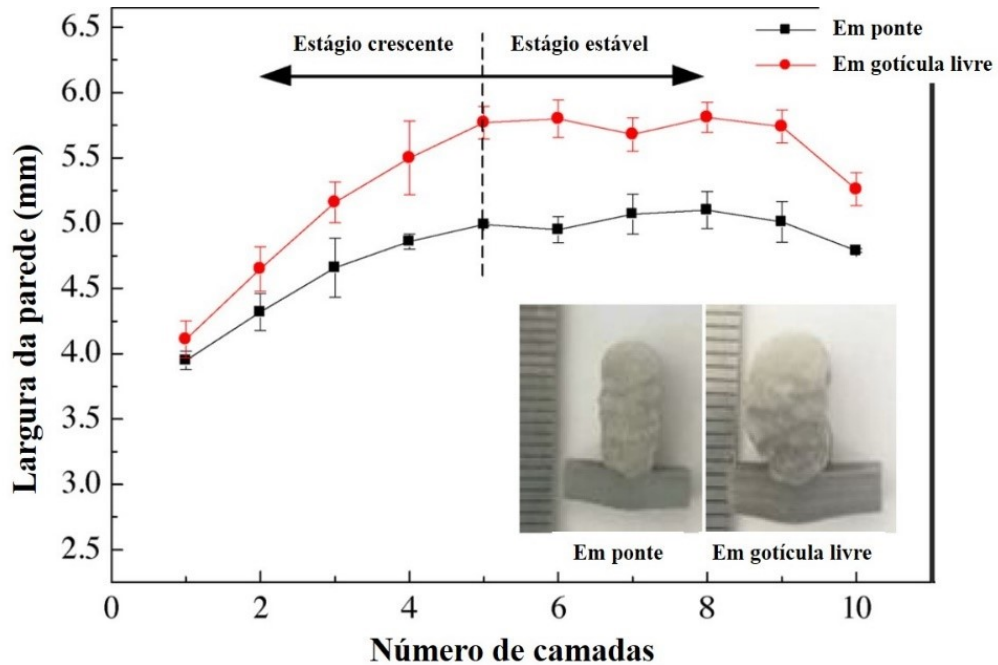


Figura 28: Variação da largura da parede em função do número de camadas depositadas para dois modos de transferência metálica (adaptada pelo autor)

Fonte: Huang et al. (2020)

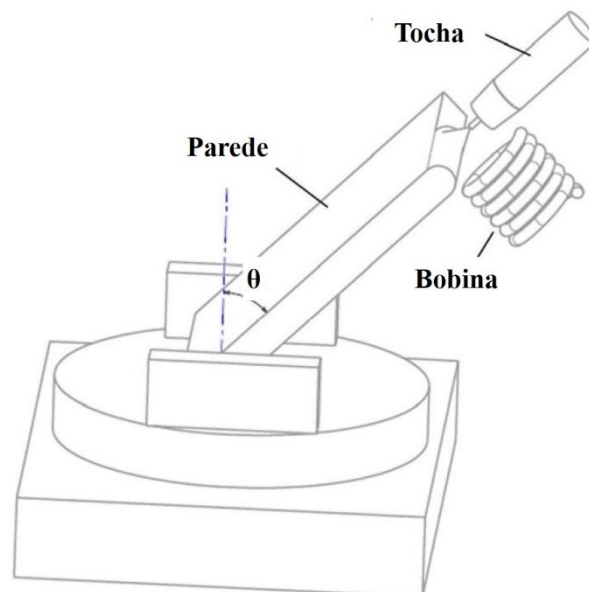


Figura 29: Representação esquemática do processo com a bobina eletromagnética (adaptada pelo autor)

Fonte: Bai et al. (2013)

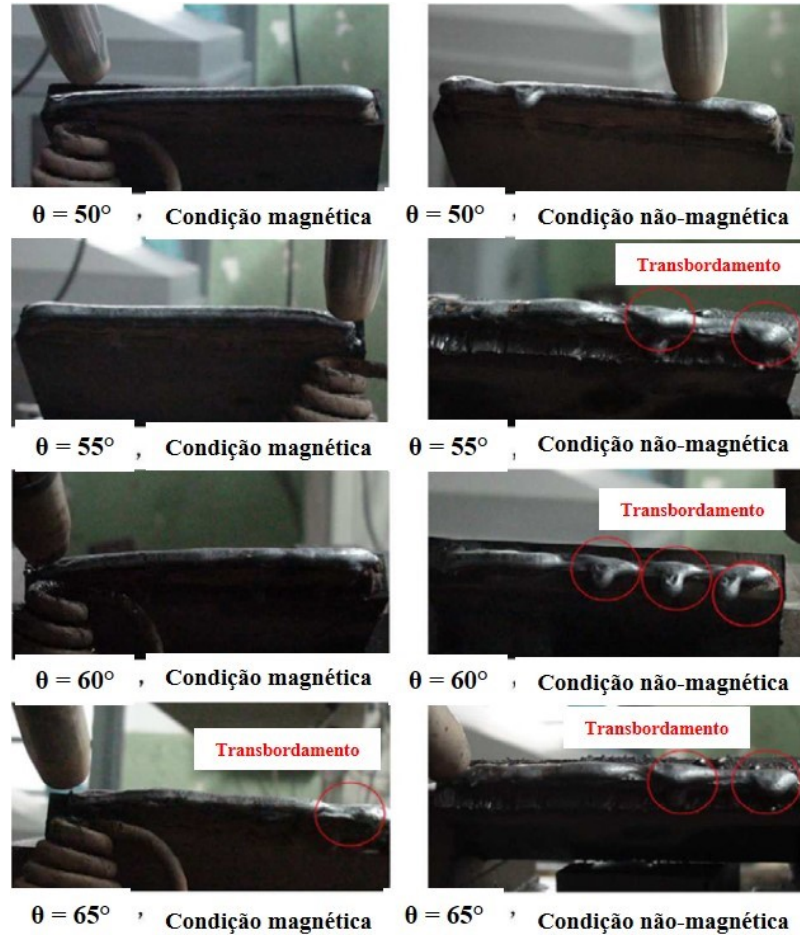


Figura 30: Morfologias dos cordões de solda em diferentes ângulos de inclinação da parede (adaptada pelo autor)

Fonte: Bai et al. (2013)

Diante das mais diversas soluções encontradas na literatura para minimizar o fenômeno de transbordamento da poça de fusão, nota-se que as duas estratégias mais utilizadas são: diminuir o calor acumulado na parede, por meio de medidas que facilitem a troca de calor entre a peça e o ambiente, e controlar a energia de soldagem e a pressão do arco durante a deposição da camada de solda, a partir das variáveis de processo. Apesar dessas duas táticas já serem eficazes para evitar o problema, ainda existem poucas alternativas de solução cujo foco seja diminuir a refusão das camadas pré-depositadas ou compensar a falta de suportes laterais. Neste estudo, para minimizar o transbordamento da poça de fusão e aumentar a eficiência de deposição do processo, aplicou-se a técnica de oscilar o arco elétrico por força magnética durante a construção de paredes multicamadas de passe único. A desconcentração de calor e pressão do arco causado pela oscilação magnética pode ser uma nova alternativa para diminuir a profundidade de penetração da solda e, portanto, a refusão das camadas pré-depositadas, que é um dos principais fatores que causam o colapso de metal fundido.

2.2. Oscilação Magnética do Arco Elétrico

2.2.1. Aspectos Gerais

A técnica de oscilar o arco elétrico durante as operações de soldagem GTAW ou GMAW pode resultar em alguns benefícios para a solda realizada, tais como o aumento da resistência mecânica, em consequência do refino e da formação de grãos equiaxiais na ZF (Reddy et al., 1997; Janaki Ram et al., 1999; Sundaresan et al., 1999; Koteswara Rao et al., 2005; Biradar e Raman, 2012; Mahajan et al., 2012), a diminuição da ocorrência do fenômeno de fissuração a quente em ligas propícias a esse fenômeno (Reddy et al., 1997; Biradar et al., 2012; Yu et al., 2014) e a melhora no aspecto visual do cordão de solda (Chen et al., 1990).

A oscilação pode ocorrer de forma mecânica ou eletromagnética (Minnick, 1996). A primeira forma é realizada por um oscilador mecânico que vibra a tocha de soldagem durante o processo por meio de motores elétricos e sistemas de engrenagens. Já a oscilação magnética do arco elétrico é realizada a partir do controle de campo magnético externo aplicado nas proximidades do arco elétrico por um oscilador magnético, que pode ser um sistema eletroeletrônico composto por um gerador de sinais, amplificadores de potência e bobinas eletromagnéticas (Chen et al., 1990).

Um dos primeiros registros que se tem conhecimento da aplicação de campo magnético externo para oscilar o arco elétrico de soldagem ocorreu em 1960, quando Willian J. Greene desenvolveu e patenteou um oscilador magnético capaz de oscilar o arco elétrico durante o processo de soldagem GMAW aplicado no revestimento de chapas. Esse sistema era composto por duas bobinas conectadas em série, como mostrado na Figura 31, e uma fonte de alimentação de frequência variável.

Posteriormente, novos trabalhos surgiram nessa área. Segundo uma revisão feita por Wu et al. (2017), as primeiras pesquisas se concentraram em estudar os efeitos do campo magnético na solidificação da poça de fusão. Em seguida, o foco foi a influência do eletromagnetismo nos fenômenos de soldagem, tais como formato do arco elétrico e transferência metálica. A partir de 1990, as atenções se voltaram para o estudo dos efeitos de campos magnéticos controlados nas propriedades do arco elétrico e no desenvolvimento de modelos numéricos. Depois dos anos 2000, o uso da oscilação magnética do arco elétrico se expandiu. Os resultados alcançados pelas pesquisas proporcionaram a aplicação dessa técnica em vários campos da soldagem, tais

como soldagem de tubulações, revestimentos de superfícies, soldagem em juntas com chanfro estreito etc.

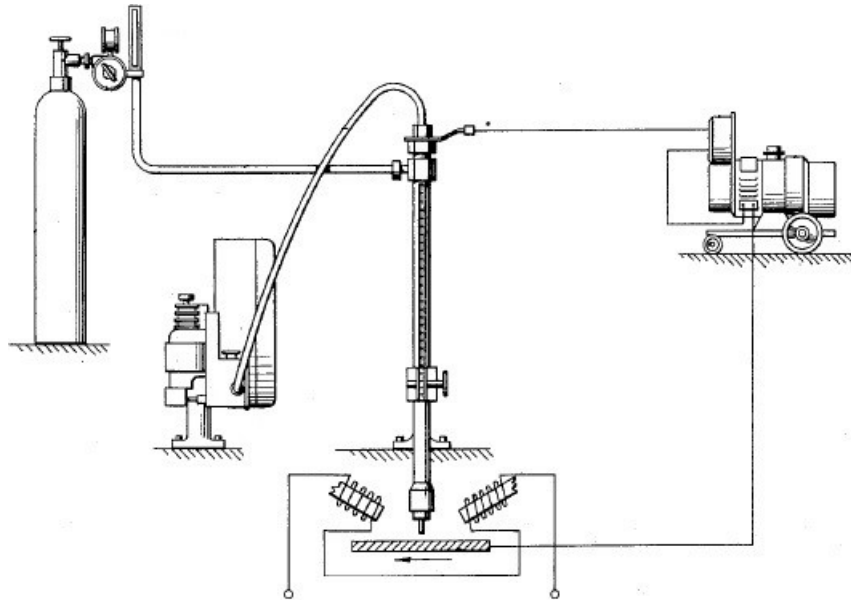


Figura 31: Oscilador magnético desenvolvido Greene

Fonte: Greene (1960)

De acordo com as leis do eletromagnetismo (Halliday et al., 2020), sempre que um condutor elétrico de comprimento l e percorrido por uma corrente elétrica i é colocado em uma região onde exista um campo magnético B , nele atuará uma força magnética (F_B), também conhecida como Força de Lorentz, perpendicular a B e i (Figura 32), cuja magnitude pode ser calculada pela Equação 2, onde Φ é o ângulo entre B e l . F_B é capaz de defletir o arco elétrico de soldagem em razão deste ser um condutor gasoso de eletricidade bem mais sensível à influência de campos magnéticos do que um fio metálico (Marques et al., 2016).

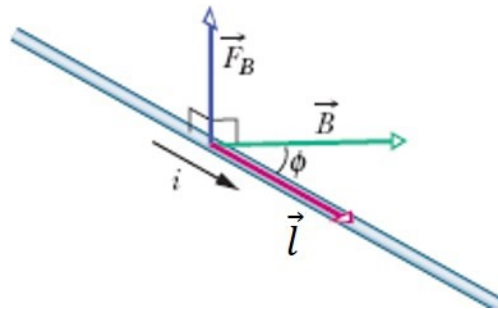


Figura 32: Diagrama da força de Lorentz (Adaptada pelo autor)

Fonte: Halliday et al. (2020)

$$F_B = i L B \sin \Phi \quad (2)$$

Segundo Wang et al., 2018, a interação entre o campo magnético externo e a corrente de soldagem, além de produzir uma força eletromagnética (F_B) capaz de defletir o arco elétrico, também induz uma força adicional eletromagnética (F_m) na poça de fusão, capaz de movimentá-la durante a soldagem. Conforme ilustrado na Figura 33, F_m apresenta a mesma direção da deflexão do arco. Assim, como já mencionado por Minnick (1996), a oscilação magnética é aplicada para controlar o movimento do arco elétrico e da poça de fusão.

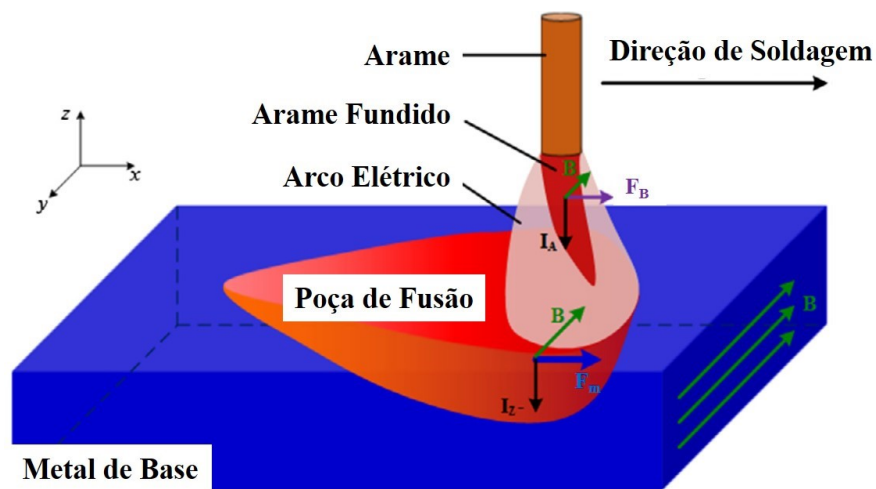


Figura 33: Diagrama esquemático da força magnética adicional (adaptado pelo autor)

Fonte: Wang et al. (2018)

Segundo Kou e Le (1985), na soldagem com oscilação magnética transversal do arco elétrico, a poça de fusão possui duas componentes de velocidade: uma na direção de soldagem (u) e a outra perpendicular a direção de soldagem (v), como exibido na Figura 34. A velocidade resultante (w) é maior que a velocidade da poça de fusão sem oscilação (u).

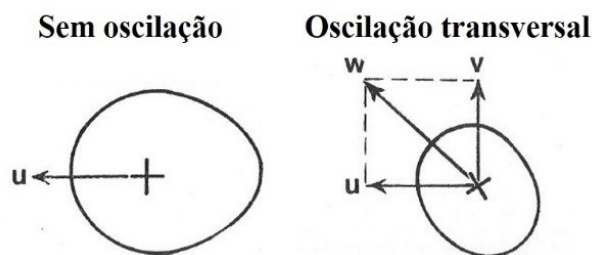


Figura 34: Velocidade resultante da poça de fusão (adaptada pelo autor)

Fonte: Kou e Le (1985)

As principais variáveis da oscilação magnética do arco elétrico são frequência e amplitude de oscilação, padrão de oscilação (transversal, longitudinal, circular), conforme ilustrado na Figura 35 (Kou e Le, 1985), e o sinal elétrico de entrada na bobina (senoidal, quadrado, dente de serra etc.).

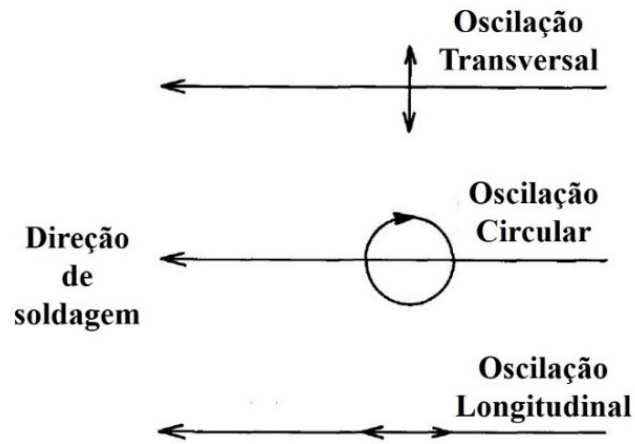


Figura 35: Padrões de oscilação (adaptada pelo autor)

Fonte: Kou e Le (1985)

2.2.2. Distribuição de Calor e Pressão

Yamamoto et al. (2007) provaram analiticamente e experimentalmente que a oscilação magnética do arco elétrico empregada no processo PAW provoca alteração na distribuição da densidade de fluxo de calor na superfície da peça. Em seus experimentos, a frequência de oscilação do arco elétrico adotada foi de 100 Hz. Os autores também consideraram a densidade de fluxo de calor como a razão entre a potência do arco e a largura de contato entre o arco elétrico e a peça. Nas Figuras 36, 37 e 38, encontram-se os gráficos da distribuição de densidade de fluxo de calor sobre uma chapa de cobre para as condições: sem oscilação magnética; com oscilação magnética e forma de onda senoidal; e com oscilação magnética e forma de onda triangular, respectivamente. Observa-se que a densidade de fluxo de calor máxima diminuiu quando a oscilação magnética foi aplicada e que, para a oscilação magnética com onda senoidal, a densidade foi maior nas extremidades de oscilação. Tais resultados comprovam que a oscilação magnética desconcentra o calor do arco na superfície da peça.

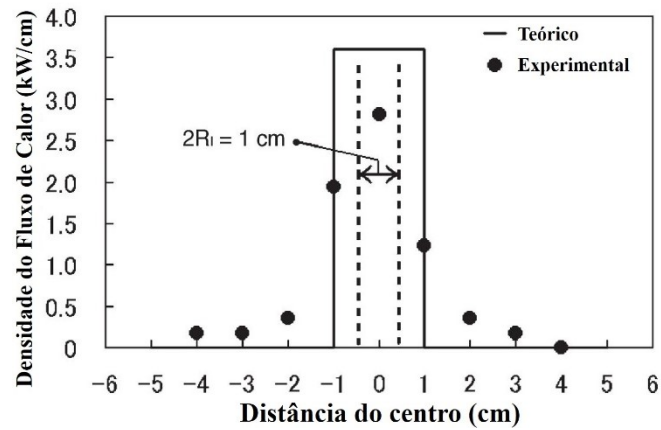


Figura 36: Distribuição da densidade do fluxo de calor sem B (adaptada pelo autor)

Fonte: Yamamoto et al. (2007)

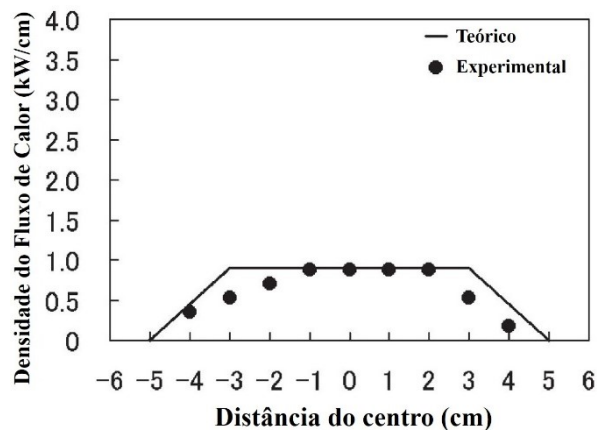


Figura 37: Distribuição da densidade do fluxo de calor com uma onda senoidal com $B = 3,43$ mT e R_0 (Raio da região anódica do raio) = 10 mm (adaptada pelo autor)

Fonte: Yamamoto et al. (2007)

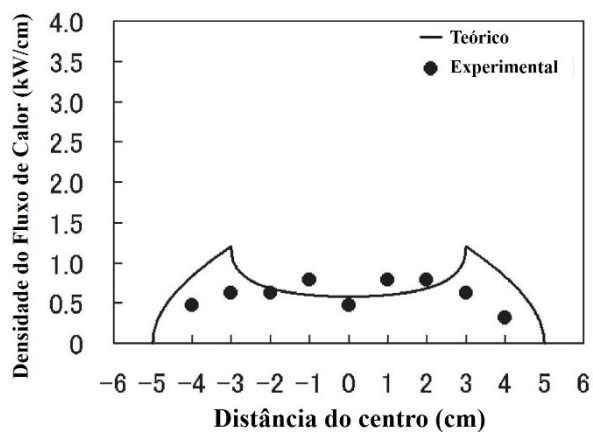


Figura 38: Distribuição da densidade do fluxo de calor com uma onda triangular com $B = 3,43$ mT e R_0 (Raio da região anódica do raio) = 10 mm (adaptada pelo autor)

Fonte: Yamamoto et al. (2007)

Wang et al. (2017) investigaram a influência da oscilação magnética do arco elétrico, aplicada no processo GTAW, na distribuição de pressão na parte inferior e na parede lateral de um chanfro estreito. Para isso, oito sensores foram instalados ao longo do chanfro, como mostrado na Figura 39. Wang et al. (2017) trabalharam com uma frequência de oscilação de 10 Hz e variou o campo magnético de 0 a 4 mT. A variação de pressão no Ponto 1 com a intensidade de campo magnético é apresentada na Figura 40. Observa-se que com o aumento da intensidade do campo magnético e, conseqüentemente, da amplitude de oscilação do arco elétrico, a pressão no ponto 1 diminui. Conforme exibido na Figura 41, a distribuição de pressão se torna mais homogênea e há uma redução da pressão máxima no chanfro. Portanto, a oscilação magnética desconcentra a pressão do arco na superfície da peça.

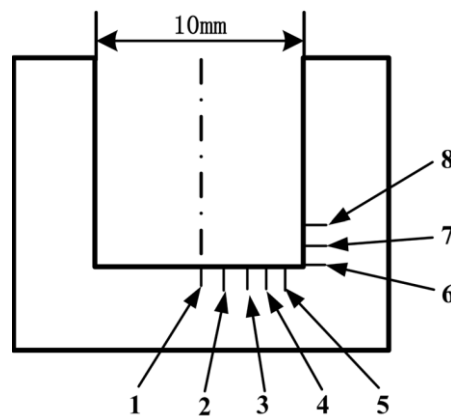


Figura 39: Pontos de medição

Fonte: Wang et al. (2017)

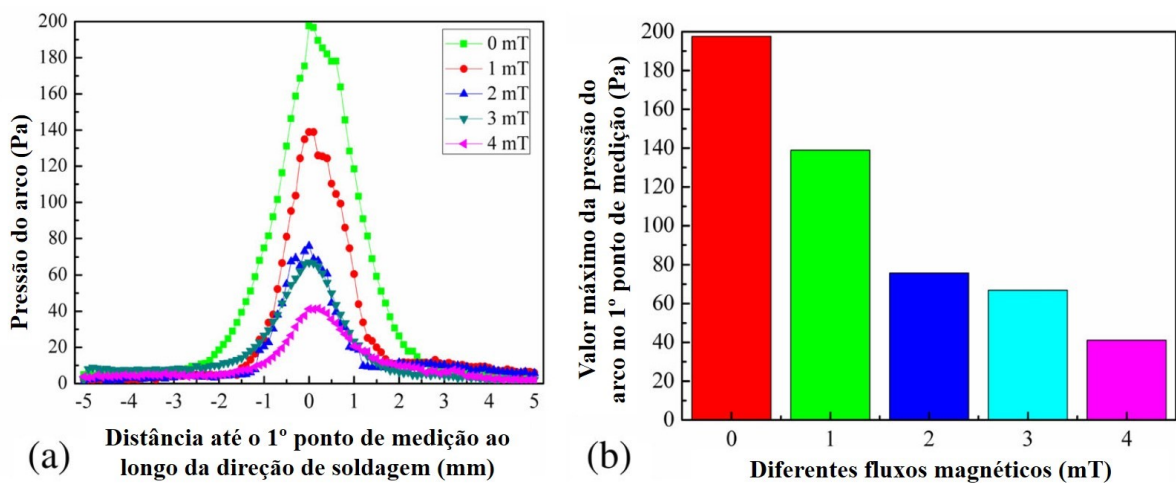


Figura 40: Pressão de arco no primeiro ponto de medição sob diferentes densidades de fluxo magnético. (a) Pressão do arco ao longo da direção da soldagem. (b) Valor máximo da pressão do arco (adaptada pelo autor)

Fonte: Wang et al. (2017)

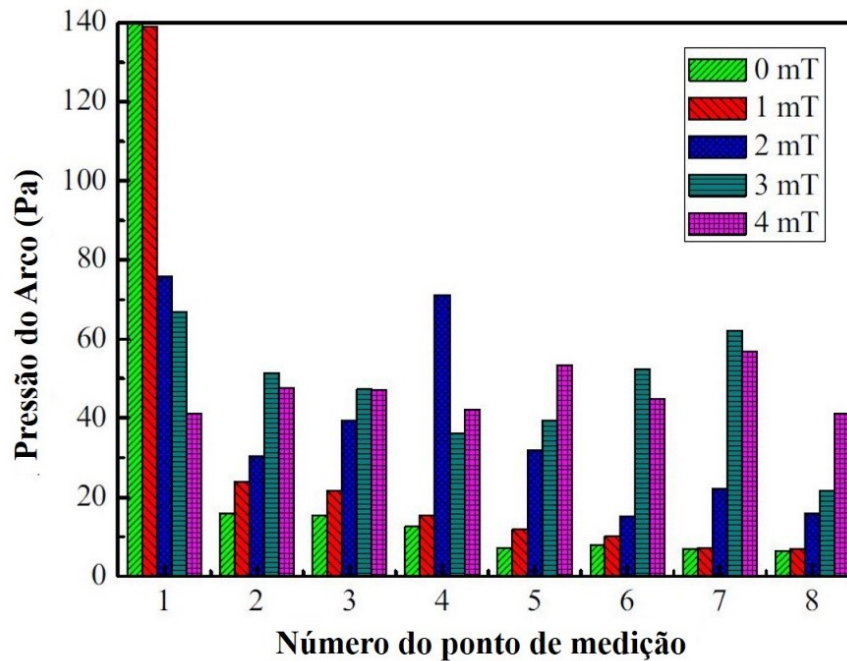


Figura 41: A pressão máxima do arco de oito pontos de medição no fundo e na lateral da parede sob diferentes densidades de fluxo magnético (adaptada pelo autor)

Fonte: Wang et al. (2017)

2.2.3. Geometria do Cordão de Solda

Sun et al. (2016) e Wang et al. (2018) investigaram a influência da oscilação magnética do arco elétrico na penetração da solda realizada em chanfro estreito com o processo autógeno GTAW. Sun et al. (2016) trabalhou com frequência de oscilação de 10 Hz e variou a intensidade de campo magnético de 0 a 9 mT. Como mostrado na Figura 42, aumentando-se a intensidade do campo magnético e, conseqüentemente, a amplitude de oscilação, diminui-se a penetração da solda na parte inferior do chanfro e aumenta-se a penetração nas paredes laterais. Nota-se que, quando a oscilação magnética não é aplicada, o calor se mantém concentrado na parte inferior e forma-se um perfil de penetração na solda do tipo “finger”. Wang et al. (2018) trabalhou com corrente pulsada, frequência de oscilação de 1 Hz e intensidade de campo magnético de 6 mT. Conforme apresentado na Figura 43, a penetração da solda na parte inferior do chanfro diminuiu e a penetração nas paredes laterais aumentou com a aplicação da oscilação magnética. Isso ocorre em conseqüência de uma desconcentração de calor e pressão, já que o arco elétrico passa a atuar em uma área maior, que inclui a parte inferior e as paredes laterais da junta.

Corradi et al. (2015) aplicaram oscilação magnética transversal durante a deposição de cordões sobre chapas de aço inoxidável austenítico com o processo GMAW. Conforme apresentado na Figura 44, o perfil de penetração do cordão de solda variou em função da frequência de oscilação do arco elétrico. Quando a oscilação não foi aplicada (frequência de 0 Hz), o perfil foi do tipo “finger”. Já quando o arco oscilou com frequências de 5 e 10 Hz, observa-se que dois “fingers” se formaram nas laterais do cordão. Para frequências de oscilação de 25 Hz e 50 Hz, o “finger” desapareceu. Em relação a geometria do cordão, a penetração da solda diminuiu quando o arco oscilou com frequências abaixo de 90 Hz. Tais resultados evidenciam a desconcentração da pressão e do calor do arco sobre a chapa causada pela oscilação magnética. Para frequências acima de 90 Hz, devido a inércia do arco, este não consegue mais se defletir de forma satisfatória. Assim, o calor e a pressão do arco voltam a se concentrar, e a penetração não diminui. Como resultado do espalhamento de metal fundido sobre a chapa causado pela oscilação magnética, a largura do cordão aumentou para todas as frequências testadas. Já o reforço apenas não diminuiu para a frequência de 70 Hz.

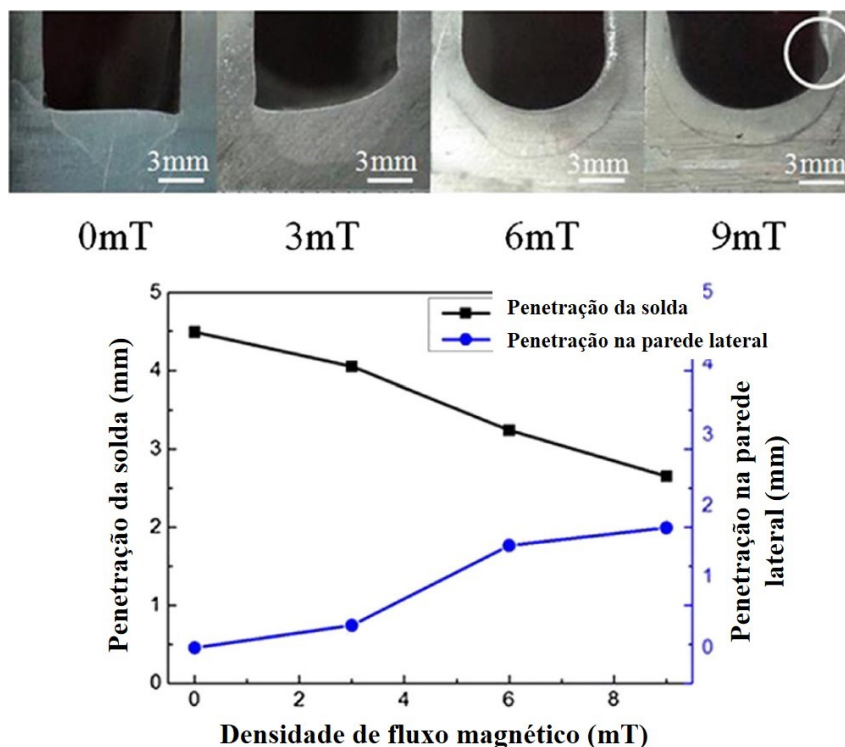


Figura 42: Efeito da densidade de fluxo magnético no formato do cordão (adaptada pelo autor)

Fonte: Sun et al. (2016)

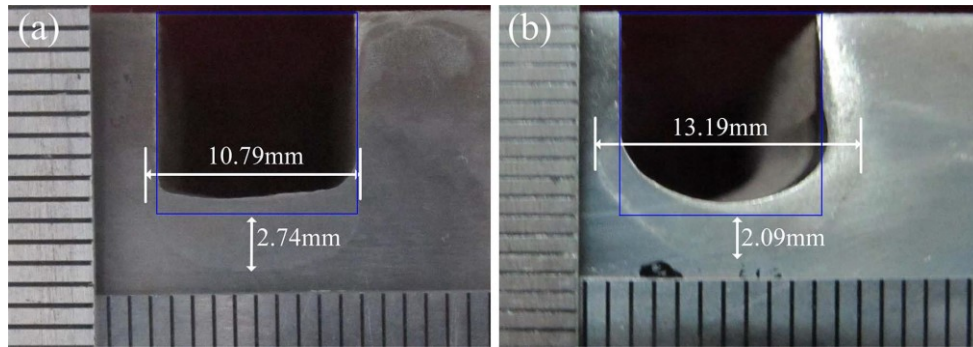


Figura 43: Seção transversal das juntas sob diferentes condições de soldagem: (a) sem oscilação e (b) com oscilação

Fonte: Wang et al. (2018)

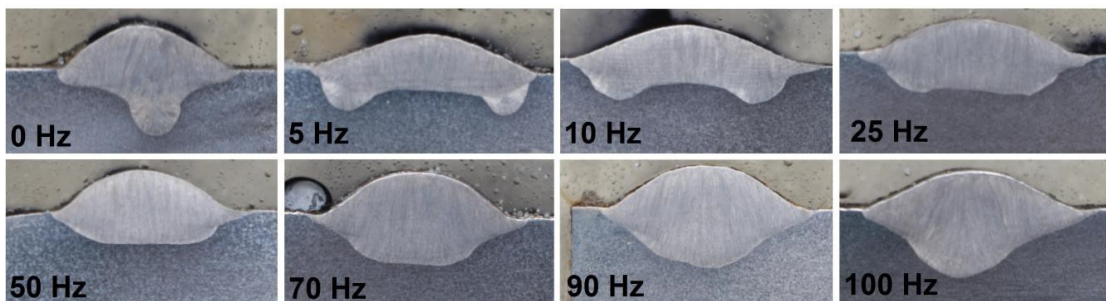


Figura 44: Geometria do cordão em função da frequência de oscilação

Fonte: Corradí et al. (2015)

Visto que a profundidade de penetração da solda diminui quando a oscilação magnética do arco elétrico é aplicada no processo de soldagem, neste trabalho será avaliado se com essa técnica é possível diminuir a refusão das camadas pré-depositadas durante a construção de paredes multicamadas de passe único.

2.3. Transferência Metálica no Processo GTAW com Alimentação Automática de Arame Frio

Conforme Yudodibroto et al. (2004), quando a alimentação de arame é contínua, a transferência metálica dependerá da posição de entrega do arame. Assim, para uma posição de entrega muito baixa (Figura 45a), a ponta do arame atinge a peça na frente da poça de fusão, resultando em uma fusão de arame intermitente. Para uma posição de entrega um pouco maior (Figura 45b), o arame entra na ponta da poça de fusão, o que corresponde a transferência por contato ininterrupto ou em ponte ininterrupta. Aumentando ainda mais a posição de entrega do

arame (Figura 45c), uma gota cresce de forma contínua na ponta do arame até atingir a poça de fusão e se destacar, o que corresponde a transferência por contato interrompido ou em ponte interrompida. Para uma posição de entrega maior ainda (Figura 45d), a gota se forma na ponta do arame, se destacando por ação da gravidade, sendo essa transferência metálica por voo livre ou sem contato.

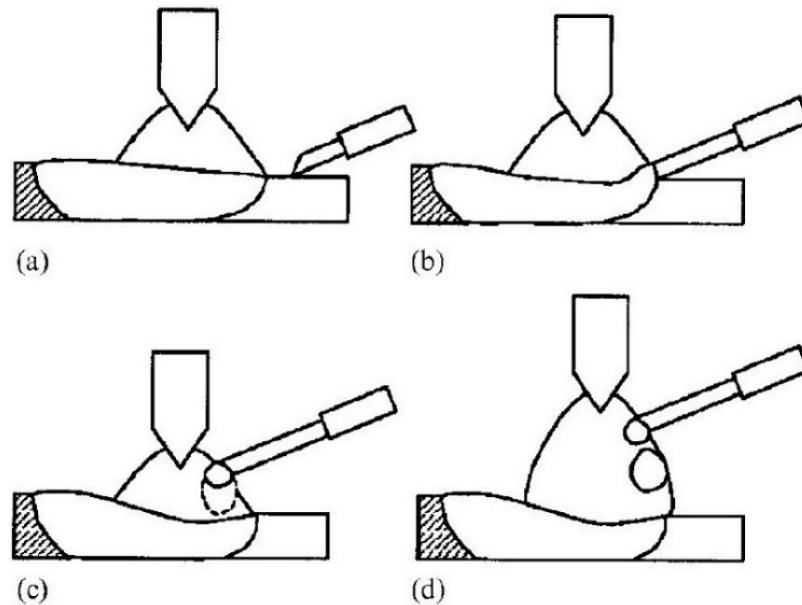


Figura 45: Ilustração esquemática da transferência metálica durante o processo GTAW com alimentação de arame frio. (a) Fusão de Arame Intermitente. (b) Transferência por contato ininterrupto ou em ponte ininterrupta. (c) Transferência por contato interrompido ou em ponte interrompida. (d) Transferência por voo livre (ou sem contato)

Fonte: Yudodibroto et al. (2004)

Yang et al. (2018) explicaram como a transferência metálica ocorre na soldagem GTAW com alimentação automática de arame a partir das forças que atuam no metal líquido que se forma na ponta do arame durante o processo. Assim, considerando-se que as principais forças são as de tensão superficial (F_σ), da gravidade (F_g) e do arco (F_a), modelos físicos foram propostos para cada modo de transferência metálica. Na Figura 46, apresenta-se o balanço de forças para a transferência por contato ininterrupto (Figura 45b), em que um ponte líquida se forma entre o arame e a poça de fusão. As forças F_g , $F_{\sigma 2}$ e $F_{\sigma 4}$ visam destacar o metal fundido da ponta do arame e as forças $F_{\sigma 1}$ e $F_{\sigma 3}$ resistem a esse destacamento. Visto que a ponte líquida permanece estável durante toda deposição do cordão de solda, considera-se que ela está em equilíbrio estático ($F_g + F_{\sigma 2} + F_{\sigma 4} = F_{\sigma 1} + F_{\sigma 3}$). Além disso, a partir de cálculos analíticos, Yang et al. (2017) verificaram que F_g é muito menor que as forças F_σ , podendo ser desprezada no

modelo. Na Figura 47, são mostradas as forças que agem no metal fundido na ponta do arame para a transferência por contato interrompido (Figura 45c). Enquanto a gotícula é puxada para baixo pelas forças F_g e F_a , a força F_σ impede seu desprendimento da ponta do arame. Nesse momento, há um equilíbrio estático ($F_g + F_a = F_\sigma$), visto que o metal fundido permanece preso ao arame. Ao crescer e tocar a poça de fusão, além de F_g estar maior, surge uma nova força de tensão superficial que também puxa a gotícula para a poça de fusão. Assim, ocorre um desequilíbrio no balanço de forças e a gotícula se destaca, ocorrendo a transferência metálica. Por último, na Figura 48, exibe-se o modelo de forças para a transferência por voo livre (Figura 45d). O processo é bem semelhante aquele apresentado para o modo contato interrompido, a diferença está que a gotícula formada na ponta do arame não toca a poça de fusão, ela se destaca exclusivamente pela ação da gravidade (F_g), que cresce à medida que o volume da gotícula aumenta.

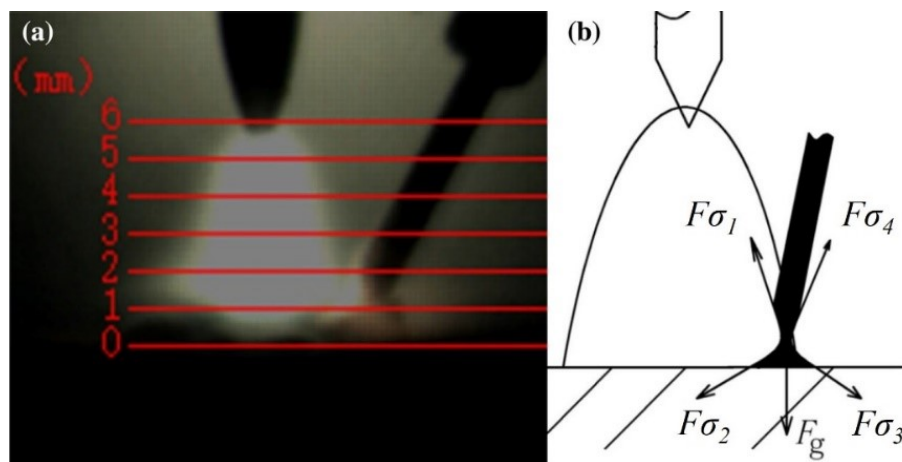


Figura 46: Transferência por contato ininterrupto: (a) imagem do processo e (b) modelo de forças

Fonte: Yang et al. (2018)

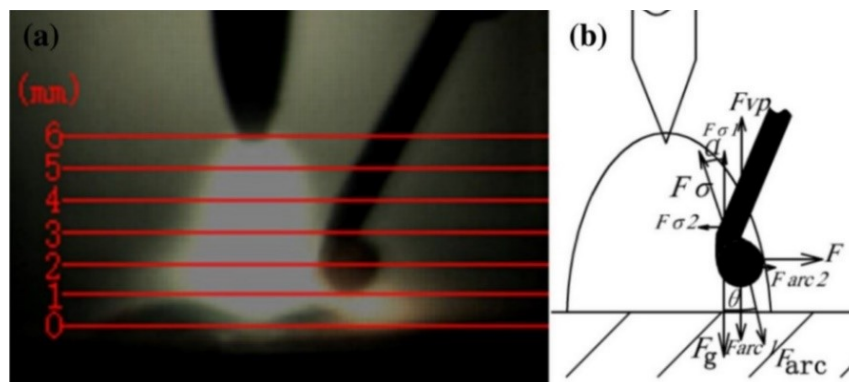


Figura 47: Transferência por contato interrompido: (a) imagem do processo e (b) modelo de forças

Fonte: Yang et al. (2018)

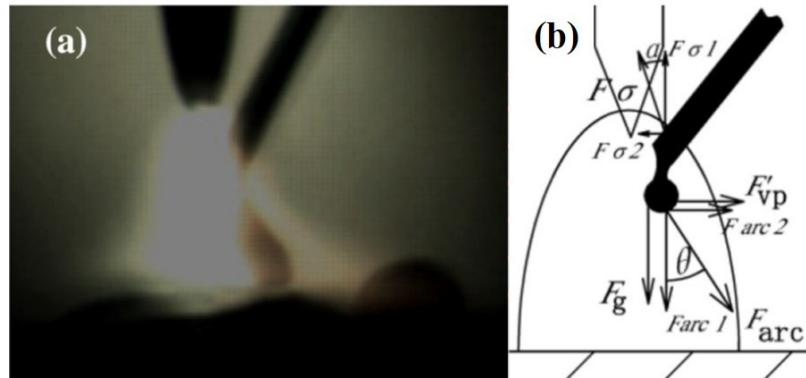


Figura 48: Transferência por voo livre: (a) imagem do processo e (b) modelo de forças (adaptada pelo autor)

Fonte: Yang et al. (2018)

Os modelos de forças encontrados na literatura que explicam o fenômeno de transbordamento de metal fundido durante a deposição da camada de solda geralmente consideram a soldagem GMAW como sendo o processo base da manufatura aditiva e que a transferência metálica ocorre a partir do impacto de gotículas metálicas destacadas da ponta do arame na poça de fusão. Entretanto, para a manufatura aditiva baseada no processo GTAW, normalmente a transferência metálica ocorre por contato ininterrupto (Figura 45b e 46), ou seja, de forma suave. Neste trabalho, esse fator será levado em consideração.

3. METODOLOGIA

A execução deste trabalho foi dividida em 4 partes:

- 1°. Desenvolvimento de uma bancada de testes integrada com um oscilador magnético de arco elétrico para fabricação de paredes finas (multicamadas de passe único) por manufatura aditiva baseada na soldagem GTAW;
- 2°. Fabricação de paredes finas de aço e titânio com e sem a aplicação de oscilação magnética do arco elétrico;
- 3°. Análise da geometria das paredes produzidas;
- 4°. Análise do comportamento do arco elétrico, da poça de fusão e da transferência metálica durante a deposição da camada de solda.

3.1. Desenvolvimento da Bancada de Testes

Para o estudo da influência da oscilação magnética do arco elétrico na geometria de paredes finas fabricadas por manufatura aditiva baseada na soldagem GTAW, uma bancada de testes foi construída. Este sistema de manufatura aditiva é composto pelos seguintes subsistemas:

- Sistema para movimentação da tocha de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) ou GTAW;
- Alimentador automático de arame;
- Oscilador magnético de arco elétrico.

3.1.1. Sistema para movimentação da tocha de soldagem TIG

O sistema para movimentação da tocha TIG possui:

- 1 Mesa deslizante;
- 2 Motores CC;
- 1 Circuito eletrônico de controle;

- 2 Circuitos eletrônicos de acionamento para os motores;
- 1 Suporte para sustentação da tocha TIG;
- 4 Sensores de fim de curso;
- 1 Sensor de posição;
- 1 Sensor para detectar a abertura do arco elétrico.

Esse sistema permite o controle das seguintes variáveis:

- Sentido e direção de deslocamento da tocha TIG em relação ao substrato – horizontal (direita ou esquerda) e vertical (para cima ou para baixo);
- Velocidade de soldagem – 0 a 7 mm/s;
- Altura da tocha TIG (mm);
- Tempo entre a abertura do arco e a tocha começar a se deslocar (s);

A velocidade de soldagem máxima requisitada para o sistema de movimentação da tocha TIG foi definida em função dos valores utilizados em trabalhos encontrados na literatura que envolvem soldagem TIG com alimentação automática de arame frio (Tabela 1).

Tabela 1: Valores de velocidade de soldagem utilizados por outros autores.

Autores	Velocidade de Soldagem (mm/s)
Baufeld et al. (2009)	5
Skiba et al. (2009)	4,2
Baufeld et al. (2010)	6,7
Bonaccorso et al. (2011)	2,5
Baufeld (2012)	5
Guo et al. (2016)	3,3
Ayarkwa et al. (2017)	5

3.1.2. Alimentador Automático de Arame

O alimentador automático de arame possui:

- 1 Motor CC;
- 1 Circuito eletrônico de controle;
- 1 Circuito eletrônico de acionamento;
- 1 Sensor de velocidade;
- 1 Tracionador de arame;
- 1 Conduíte;
- 1 Bico de saída do arame;
- 1 Carretel de arame com freio.

Esse sistema permite o controle das seguintes variáveis:

- Velocidade de alimentação – 0 a 35 mm/s;
- Frequência de pulsação do arame (1/2 período avançando e 1/2 período parado) – 0 a 2 Hz;
- Sentido de alimentação – Avanço e Recuo.

Os valores máximos de velocidade de alimentação e frequência de pulsação do arame requisitados para este sistema foram definidos com base em trabalhos encontrados na literatura que envolvem soldagem TIG com alimentação automática de arame frio (Tabela 2 e 3).

Tabela 2: Valores de frequência de pulsação do arame utilizados por outros autores.

Autores	Frequência de Pulsação do Arame (Hz)
Silva et al. (2018)	2

Tabela 3: Valores de velocidade de alimentação de arame e diâmetros de arame utilizados por outros autores.

Autores	Velocidade de Alimentação de Arame (mm/s)	Diâmetro do Arame (mm)
Yudodibroto et al. (2004)	5	1,0
Baufeld (2012)	25	1,2
Guo et al. (2016)	33,3	1,2
Wu et al. (2017)	16,6	1,2

3.1.3. Oscilador Magnético de Arco Elétrico

O oscilador magnético de arco elétrico desenvolvido foi baseado naquele apresentado por Chen et al. (1990) e possui os seguintes elementos:

- 1 Microcontrolador;
- 2 Conversores digital-analógico;
- 2 Amplificadores de potência;
- 2 Bobinas eletromagnéticas.

Esse equipamento permite o controle das seguintes variáveis:

- Frequência de oscilação do arco – 0 a 50 Hz;
- Amplitude de deflexão do arco – 0 a 6 mm;
- Padrão de oscilação – Transversal, longitudinal e circular;
- Forma de onda do sinal elétrico – Senoidal, quadrado e dente de serra.

Os valores máximos de frequência de oscilação e amplitude de deflexão do arco foram definidos com base em trabalhos encontrados na literatura (Tabela 4).

Tabela 4: Valores de frequência de oscilação e amplitude de deflexão do arco utilizados por outros autores.

Autores	Frequência de Oscilação (Hz)	Amplitude de Deflexão (mm)
Reddy et al. (1997)	50	1
Janaki Ram et al. (1999)	20	0,8
Sundaresan et al. (1999)	20	0,6
Biradar et al. (2012)	1,5	1,4
Mahajan et al. (2012)	1,5	0,7
Juliani (2014)	1,5	6

3.2. Fabricação das Paredes

A fabricação das paredes ocorreu em três etapas, nas quais mantiveram-se constante os parâmetros de soldagem e variaram-se os parâmetros de oscilação do arco elétrico. As condições de oscilação adotadas em cada etapa são exibidas na Tabela 5. Na Etapa 1, paredes finas de aço (SAE 1010) foram construídas sob duas diferentes condições, sem (S1) e com (S2) oscilação magnética do arco elétrico. A princípio, escolheu-se o padrão de oscilação longitudinal para que o arco não defletisse em direção as laterais da parede, o que poderia aumentar o transbordamento da poça de fusão, e a frequência de 1 Hz para que fosse possível visualizar o comportamento da poça de fusão e do arco elétrico sem auxílio de uma câmera. A escolha pela forma de onda dente de serra decrescente será explicada com mais detalhes posteriormente. Para comprovar estatisticamente que a oscilação magnética é capaz de afinar as paredes, três amostras para cada condição foram fabricadas.

Em seguida, na Etapa 2, quatro paredes finas de titânio (Ti6Al4V) foram fabricadas e, para cada delas, adotou-se uma condição diferente, sendo uma sem (T1) e as outras três com oscilação (T2, T3 e T4). Nessa segunda etapa, além de avaliar a geometria das paredes, investigaram-se também os efeitos de diferentes padrões e frequências de oscilação no comportamento do arco elétrico, da poça de fusão e da transferência metálica durante a deposição da camada de solda por meio de câmeras adequadas para monitorar o processo de soldagem, cujos detalhes operacionais e dados técnicos serão apresentados mais adiante. Compararam-se os efeitos da baixa frequência (1 Hz) com os da alta frequência (10 Hz) de oscilação longitudinal na geometria da parede e, de maneira arbitrária, avaliou-se também a influência do padrão de oscilação circular na estabilidade do processo e na geometria da parede. A câmera utilizada para filmar a poça de fusão e a transferência metálica esteve disponível somente após as paredes já terem sido construídas. Assim, para que a filmagem ocorresse, fabricou-se uma quinta parede e, para cada camada depositada, adotou-se uma das condições estabelecidas para a Etapa 2.

Finalmente, na Etapa 3, fabricaram-se mais três paredes finas de titânio, sendo que, para cada uma delas, empregou-se uma condição diferente (T5, T6 e T7). As condições T5 e T6 são iguais a T1 e T3, respectivamente, e a condição T7 difere de T4 apenas na frequência de oscilação. Nessa última etapa, filmou-se o comportamento da poça de fusão durante a deposição de todas as camadas das três paredes fabricadas para comprovar hipóteses do modelo proposto nessa tese.

Tabela 5: Condições de Oscilação

Etapa	Condição	Frequência (Hz)	Amplitude (mm)	Padrão	Forma de Onda
1	S1	-	-	-	-
	S2	1	6	Longitudinal	Dente de Serra Decrescente
2	T1	-	-	-	-
	T2	1	3,5	Longitudinal	Dente de Serra Decrescente
	T3	10	3,5	Longitudinal	Dente de Serra Decrescente
	T4	5	3,5	Circular	-
	T5	-	-	-	-
3	T6	10	3,5	Longitudinal	Dente de Serra Decrescente
	T7	10	3,5	Circular	-

A quantidade e o comprimento das camadas depositadas para cada etapa são informados na Tabela 6. Os consumíveis utilizados (substrato, arame e gás) para a fabricação das paredes de aço (Etapa 1) e titânio (Etapa 2 e 3) são apresentados na Tabela 7.

Tabela 6: Quantidade e comprimento das camadas

Parâmetro	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
Quantidade de Camadas	20	12	15
Comprimento da Camada	85 mm	150 mm	150 mm

Tabela 7: Consumíveis

Consumível	Etapa 1	Etapas 2 e 3
Substrato	SAE 1010	ASTM B265
Dimensões do Substrato	6,35 mm X 31,75 mm X 100 mm	6 mm X 70 mm X 200 mm
Arame	AWS 5.18 ER70S-6	ASTM B863 Grau 5
Diâmetro do Arame	0,8 mm	1,2 mm
Gás de Proteção	Argônio puro (99,9%)	Argônio puro (99,9%)

Os parâmetros de soldagem estabelecidos neste trabalho (Tabela 8) foram aqueles que garantiram a partir de pré-testes uma primeira camada contínua e homogênea ao longo de seu comprimento (Figura 49). Os parâmetros definidos para a construção das paredes de titânio foram os mesmos adotados por Wu et al. (2017). Para as paredes de aço (Etapa 1), a alimentação

de arame foi pulsada (frequência de 1 Hz, 1/2 segundo parado e 1/2 segundo avançando), a tocha de soldagem foi inclinada 15° em relação a posição vertical (Figura 50a) e, para a condição S2 (Tabela 5), iniciou-se a oscilação magnética a partir da quarta camada, pois ao iniciar a oscilação desde o primeiro cordão, o arame de aço colidia com a superfície sólida abaixo da poça de fusão, desestabilizando o processo, possivelmente porque a poça se tornava mais rasa. Trabalhou-se com alimentação de arame pulsada para diminuir o volume da poça de fusão e inclinou-se a tocha de soldagem para inibir o defeito de descontinuidade do tipo “*humping*” na primeira camada de solda. Para as paredes de titânio (Etapas 2 e 3), a alimentação de arame foi contínua, a tocha permaneceu na posição vertical (Figura 50b) e, para as condições T2, T3, T4, T6 e T7 (Tabela 5), aplicou-se a oscilação magnética desde a primeira camada, já que o processo permaneceu estável. Para todas as paredes produzidas neste trabalho, o sentido de deposição das camadas foi sempre o mesmo, o arame foi introduzido na frente da poça de fusão (Figura 50), a transferência metálica foi por contato ininterrupto e as posições da tocha de soldagem e do bico de saída do arame foram mantidas fixas durante todo o processo.

Tabela 8: Parâmetros de Soldagem

Parâmetro	Etapa 1	Etapa 2 e 3
Comprimento de arco	5 mm	3 mm
Velocidade de Soldagem	96 mm/min	95 mm/min
Fluxo de Gás	10 L/min	10 L/min
Corrente Contínua	90 A	110 A
Velocidade de Alimentação de Arame	1020 mm/min	1000 mm/min
Tempo Interpasse	60 s	125 s
Polaridade do Eletrodo	CC -	CC -
Eletrodo	W - 2% Tório	W - 2% Tório
Diâmetro do Eletrodo	1,6 mm	2,4 mm
Ângulo da Ponta do Eletrodo	30°	60°

Para garantir que o comprimento de arco fosse o mesmo para todas as camadas depositadas, controlava-se a altura da tocha de soldagem em relação a superfície da parede ou do substrato com auxílio de um gabarito. Conforme apresentado na Figura 51, utilizava-se como gabarito uma chave Allen. Após a primeira camada depositada, o controle da altura da tocha era feito sempre na metade do comprimento da parede.

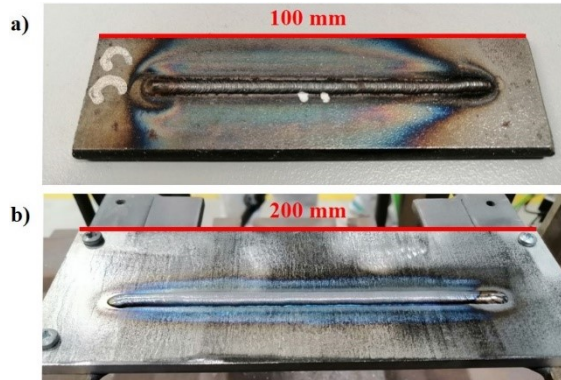


Figura 49: Primeira camada de (a) aço e (b) titânio

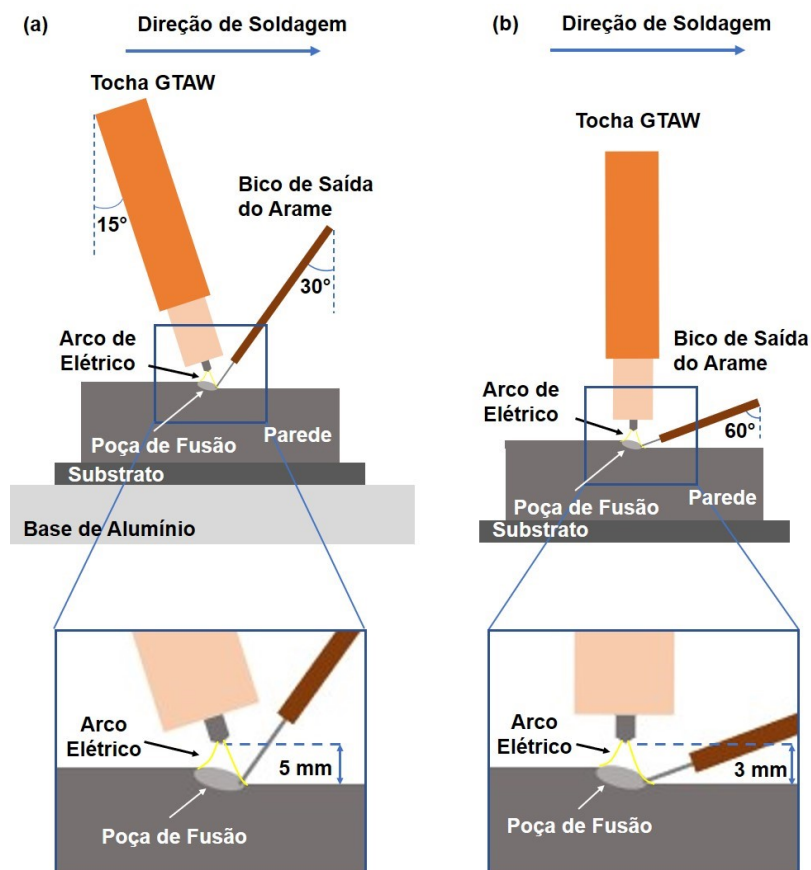


Figura 50: As posições e os ângulos da tocha TIG e do bico de saída do arame para a fabricação das paredes de (a) aço e (b) titânio

O movimento do arco elétrico quando a oscilação longitudinal foi aplicada é ilustrado na Figura 52a. Uma vez que o sinal elétrico aplicado na bobina eletromagnética foi dente de serra decrescente (Figura 52b), a deflexão para frente, ou seja, no sentido de deposição da camada (de $-A$ até $+A$), foi rápida e a deflexão para trás, isto é, em sentido contrário ao de deposição da camada (de $+A$ até $-A$), foi lenta. Dessa forma, para baixas frequências de

oscilação, no movimento de avanço do arco, a poça de fusão ganha velocidade, sendo lançada para frente, ao invés de fluir pelas laterais da parede. Já no movimento de recuo do arco, a poça é lançada para trás com menor intensidade, para que não sofra uma desaceleração brusca e favoreça o transbordamento. Para a construção das paredes de aço, em que a alimentação de arame foi pulsada, o arame foi inserido na poça de fusão apenas quando o arco recuava da posição 0 para -A (Figura 52c). Para a fabricação das paredes de titânio, conforme já mencionado, a alimentação de arame foi contínua (Figura 52d).

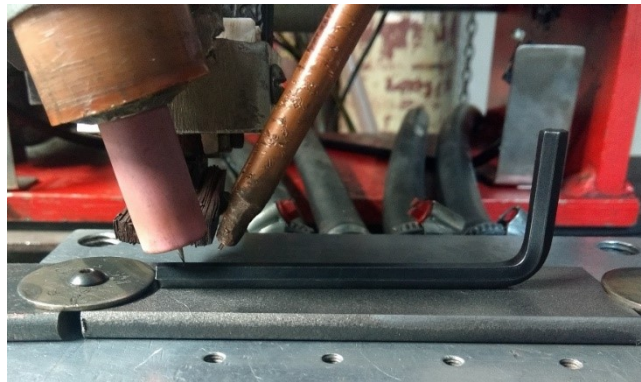


Figura 51: Controle do comprimento de arco realizado com auxílio de uma chave Allen.

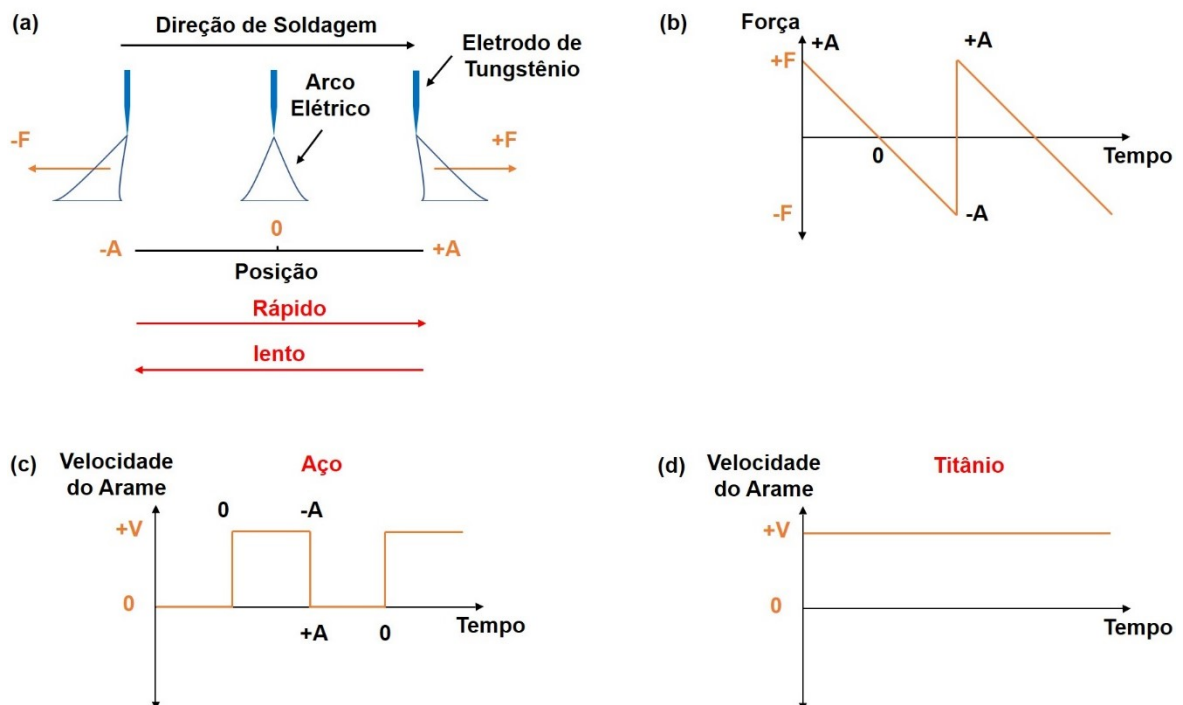


Figura 52: (a) Movimento do arco elétrico. (b) Gráfico força magnética versus tempo. (c) Gráfico velocidade do arame versus tempo para as paredes de aço. (d) Gráfico velocidade do arame versus tempo para as paredes de titânio.

As paredes de aço foram fabricadas no LRSS da UFMG, Brasil, utilizando a bancada de testes desenvolvida e mostrada na Figura 53. Já as paredes de titânio foram produzidas no Laboratório de Soldagem da UOW, Austrália, por meio de um sistema de manufatura aditiva baseada na soldagem GTAW apresentada na Figura 54. Ambas as impressoras de parede fina são compostas por uma fonte soldagem GTAW, um mecanismo para tração da tocha de soldagem, um alimentador automático de arame e um oscilador magnético. Para produção das paredes de aço, a bancada de testes contava ainda com uma base de alumínio refrigerada à água, que foi outro mecanismo adotado para diminuir o volume da poça de fusão. As fontes de soldagem utilizadas na UFMG e na UOW foram uma Kemppi MasterTIG AC/DC 2500W e uma Kemppi MasterTIG MLS 2000, respectivamente. O alimentador de arame utilizado na UOW foi o CK Worldwide WF-3.

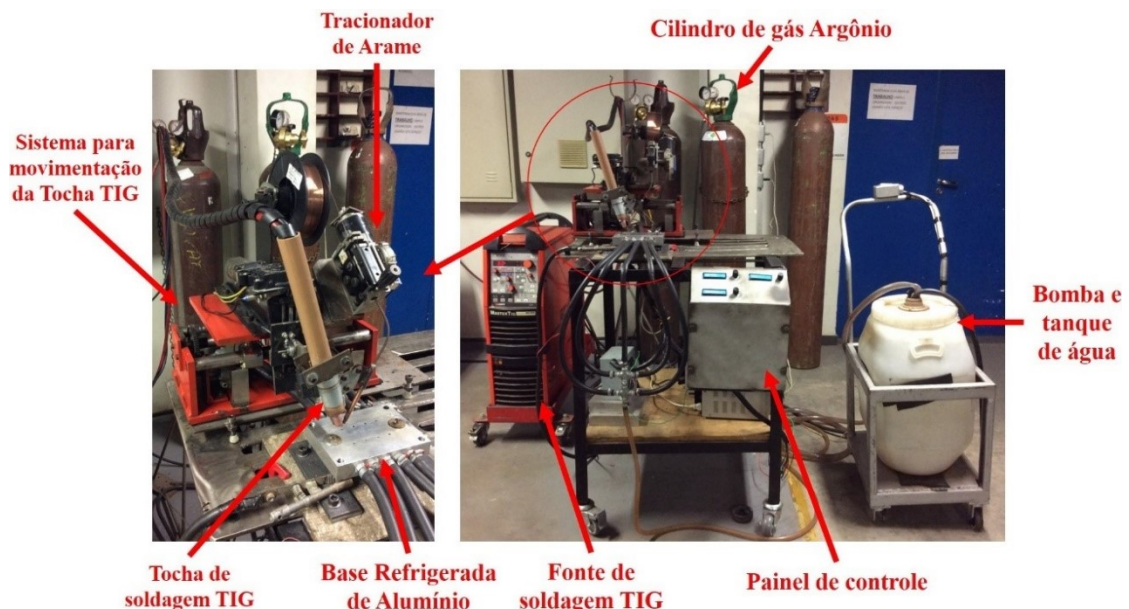


Figura 53: Bancada de testes construída no LRSS da UFMG

3.3. Análise Geométrica

Amostras da seção transversal com 5 mm de espessura, retiradas da metade do comprimento de cada parede, foram embutidas a quente, lixadas, polidas e atacadas quimicamente. As amostras de aço e titânio foram atacadas com os reagentes Nital e Kroll, respectivamente. As macrografias foram feitas com a câmera Nikon D5300 e as medidas de LTP, LEP, ATP e das áreas A, B, C (Figura 14) foram feitas com o software Image J[®]. Gráficos

foram construídos para auxiliar na análise dos dados. A largura e a altura total das extremidades das paredes produzidas também foram verificadas com auxílio de um paquímetro. As regiões da parede onde as medições foram feitas são apresentadas na Figura 55. Além disso, mas apenas na Etapa 1, mediu-se a altura da parede na metade de seu comprimento a cada camada depositada utilizando um encoder indutivo instalado na bancada de testes.

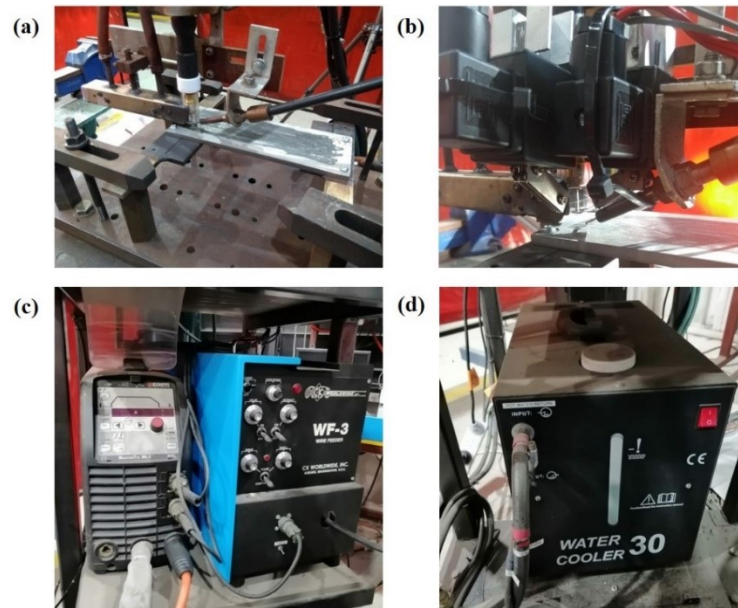


Figura 54: Sistema de manufatura aditiva baseada no processo GTAW da UOW. (a) Tocha GTAW e bico de saída do arame, (b) bobinas eletromagnéticas, (c) Fonte de Soldagem e Alimentador de Arame, (d) Sistema de refrigeração da Tocha GTAW

3.4. Filmagem do Processo e Análise do Comportamento do Arco Elétrico, da Poça de Fusão e da Transferência Metálica

Durante a fabricação das paredes de titânio, o comportamento do arco elétrico, da poça de fusão e da transferência metálica foi avaliado através de imagens e vídeos produzidos pelas duas câmeras mostradas na Figura 56. Foram utilizadas uma câmera de alta velocidade MotionPro X3PLUS (Figura 56a), que operou com uma taxa de 1000 quadros por segundo, para observar o comportamento do arco elétrico, e uma câmera Xiris XVC-1100 (Figura 56b), que trabalhou com uma taxa de 60 quadros por segundo, para investigar o comportamento da poça de fusão e o modo de transferência metálica. Estas câmeras foram posicionadas lateralmente, como mostrado na Figura 56c, de forma que permitisse uma visualização nítida do arco elétrico, da poça de fusão e do arame sendo introduzido na poça. As especificações

técnicas das câmeras MotionPro X3PLUS e Xiris XVC-1100 estão em Anexos A e B, respectivamente.

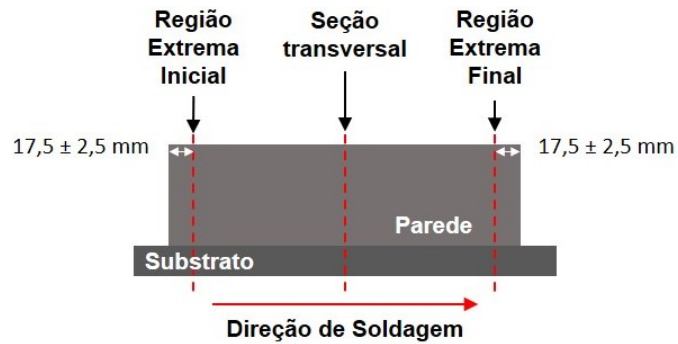


Figura 55: Regiões de medição na parede

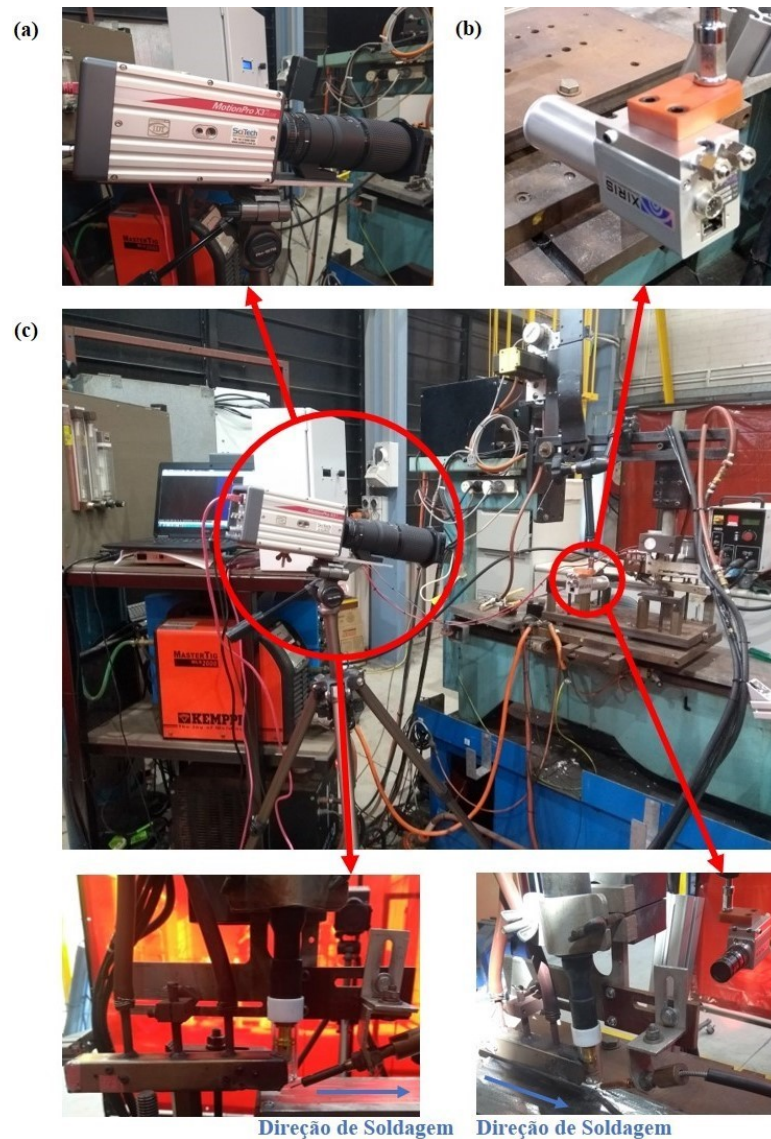


Figura 56: (a) Câmera de alta velocidade, (b) câmera para soldagem e (c) posicionamento das câmeras

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Bancada de Testes

4.1.1. Sistema para Movimentação da Tocha TIG

O sistema para movimentação da tocha TIG, apresentado nas Figuras 57 e 58, é composto por uma mesa deslizante; um suporte de sustentação para a tocha de soldagem TIG, a bobina eletromagnética e o bico de saída do arame; dois motores elétricos de corrente contínua; um circuito eletrônico de controle e dois circuitos eletrônicos de acionamento para os motores; três fontes de alimentação; quatro sensores de fim de curso; um sensor de luminosidade; e um enconder indutivo.

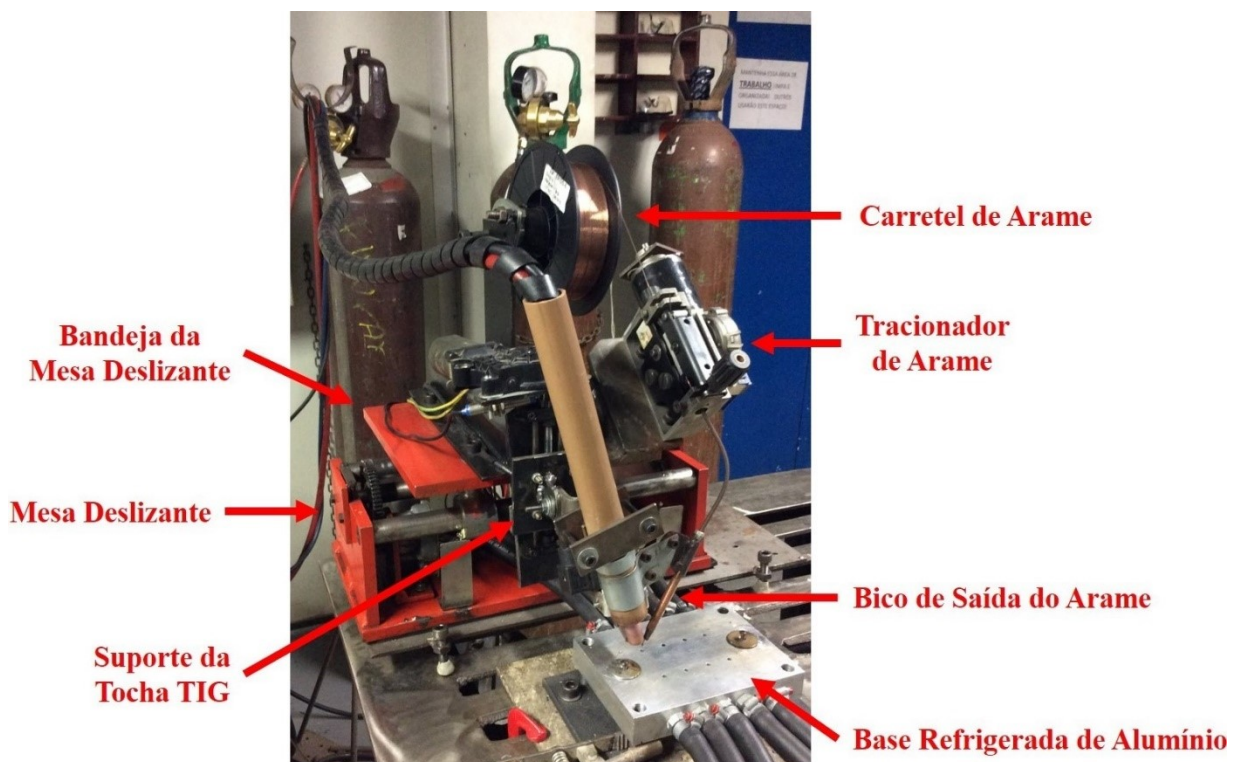


Figura 57: Sistema para movimentação da tocha TIG

Na Figura 59, exibem-se o suporte que sustenta a tocha de soldagem TIG, o bico de saída do arame e a bobina eletromagnética. Conforme mostrado na Figura 60, o suporte apresenta três graus de liberdade, sendo duas rotações, uma paralela e outra perpendicular a

direção de soldagem, e um translação na vertical. Esse suporte pode se deslocar em relação ao substrato tanto na horizontal quanto na vertical, o que permite que a deposição de camadas de solda seja uma sobre a outra. A movimentação é feita por dois motores elétricos de corrente contínua, um de 24W (vertical) e outro de 48W (Horizontal) acoplados a dois sistemas mecânicos independentes compostos de fuso, engrenagens e guias. Estes motores são exibidos na Figura 61.

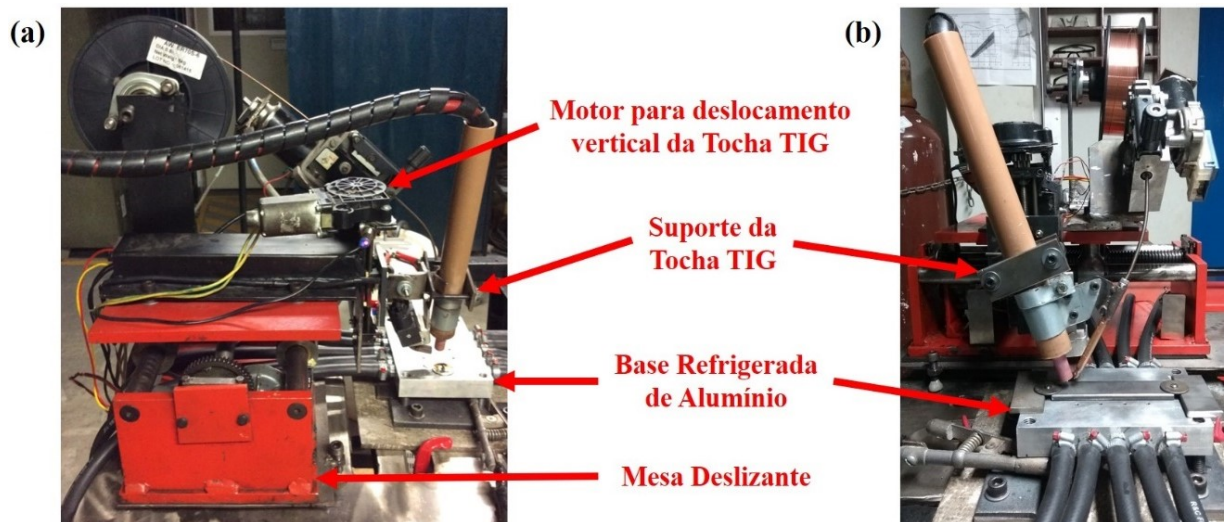


Figura 58: Vistas (a) lateral e (b) frontal do sistema para movimentação da tocha TIG

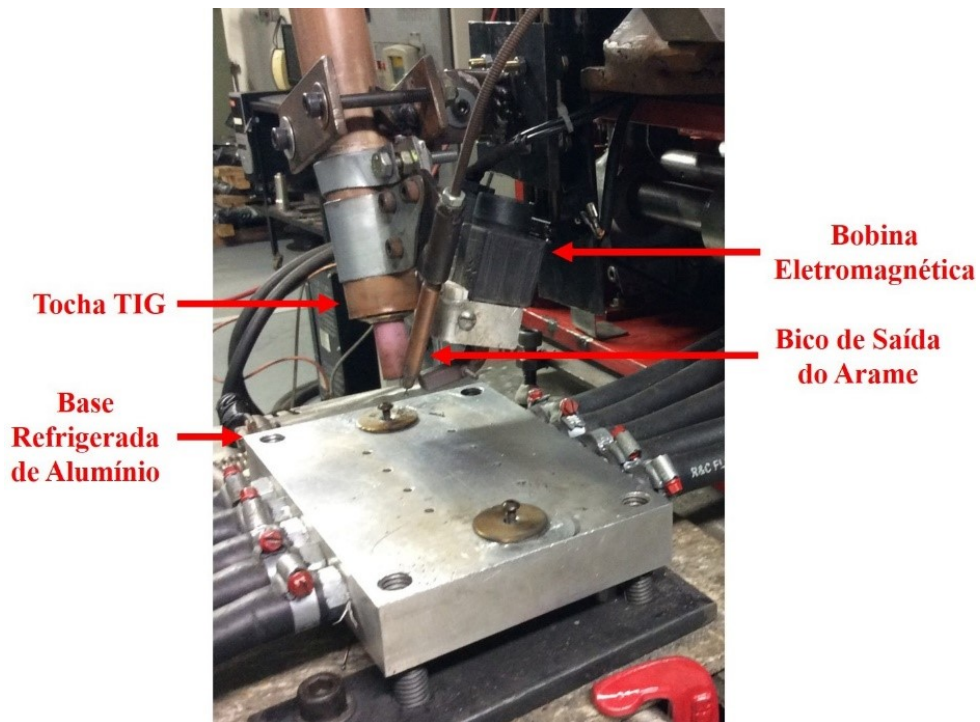


Figura 59: Suporte de sustentação da tocha TIG, da bobina eletromagnética e do bico de saída do arame

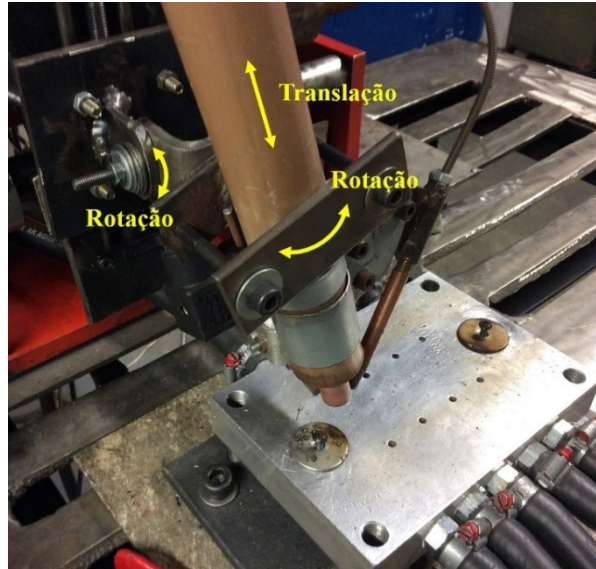


Figura 60: Graus de liberdade do suporte da tocha TIG.

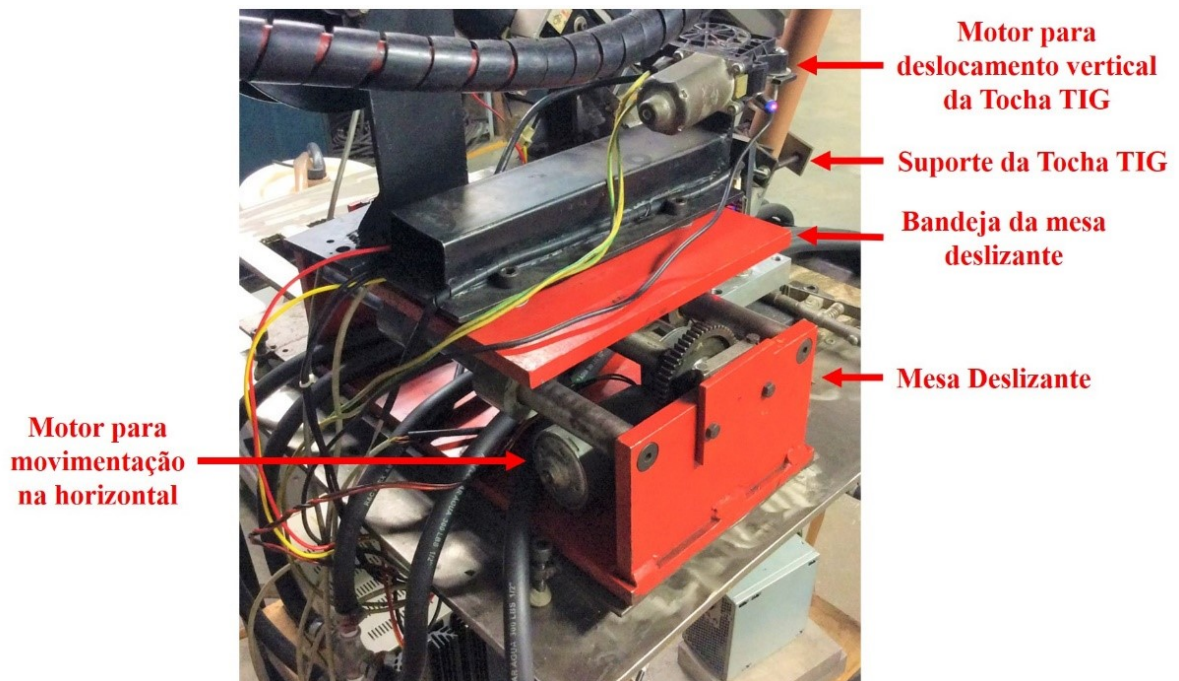


Figura 61: Mesa deslizante e motores para movimentação da tocha TIG

Os motores são controlados pela placa de eletrônica mostrada na Figura 62, cujo circuito está em Apêndice A. Ela é composta por um microcontrolador (PIC18F4550), responsável por controlar, além do sentido de rotação, a velocidade dos motores, a partir de sinais PWM que são enviados para as pontes H que acionam os motores; dois encoders, um rotativo (Keyes KY-040) e um indutivo (LJ12A3-4-Z/BY, Figura 63). O primeiro é utilizado pelo usuário para definir os parâmetros de controle dos motores (velocidade e posição) e o segundo é utilizado

para controle de posição do suporte de sustentação na vertical; uma tela de LCD, para que usuário possa obter informações sobre as etapas do processo; quatro sensores de fim de curso, responsáveis por delimitar as posições iniciais e finais do suporte de sustentação na vertical e na horizontal; e um sensor de luminosidade LDR (Figura 63), para monitorar a abertura do arco elétrico. A placa eletrônica é alimentada por uma fonte de 9V / 3A, e um regulador de tensão L7805 converte esses 9V em 5V para alimentar o microcontrolador. Como o encoder indutivo precisa ser alimentado com 12V, uma fonte de alimentação de 12V / 5A é também inserida no circuito. Na placa de controle dos motores existem dois canais de comunicação, um para o oscilador magnético e outro para o alimentador automático de arame, para que o deslocamento da tocha TIG, a oscilação magnética do arco elétrico e a alimentação de arame ocorram em sincronismo. A programação do microcontrolador foi feita em linguagem C na plataforma MPLAB e o código encontra-se em Apêndice B.

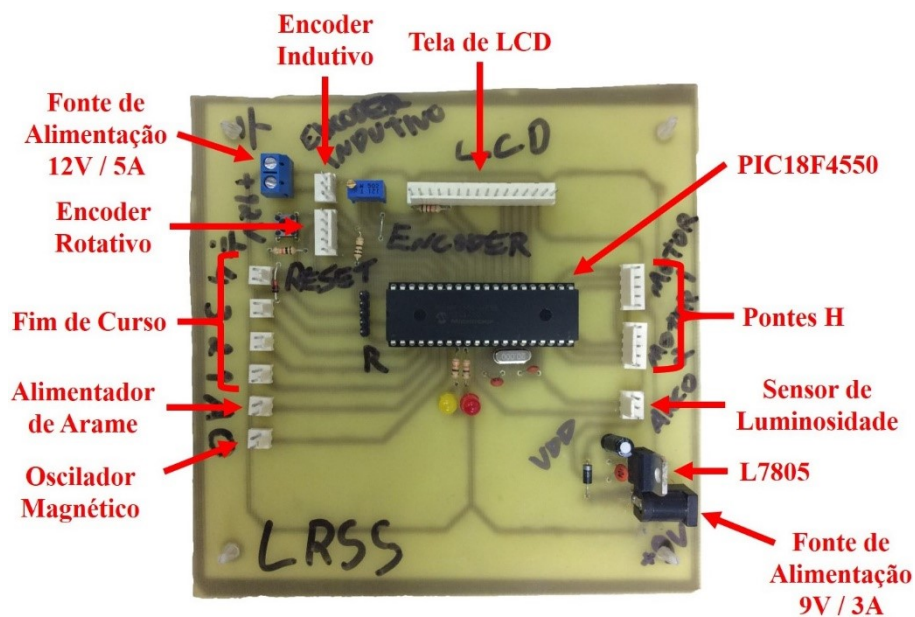


Figura 62: Placa de controle dos motores

As placas eletrônicas das pontes H utilizadas para acionar os motores responsáveis pelo deslocamento da tocha TIG na horizontal e na vertical são apresentadas nas Figuras 64 e 65, respectivamente. Para o movimento na vertical, é utilizado o circuito integrado L298N, pois o motor drena menos de 2A, e para o movimento na horizontal, são utilizados os transistores de potência TIP127 e TIP122, pois o motor drena mais de 2A de corrente. Os circuitos eletrônicos dessas pontes H estão em Apêndice A. Os motores de deslocamento horizontal e vertical são alimentados por uma fonte de 16V / 3A e outra de 12V / 5A, respectivamente.

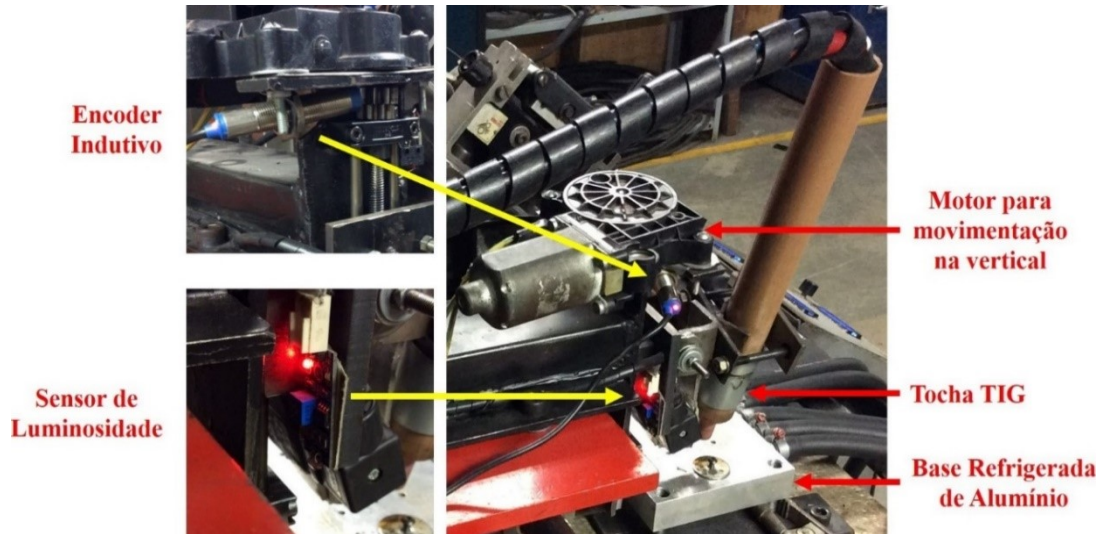


Figura 63: Encoder Indutivo e Sensor de Luminosidade

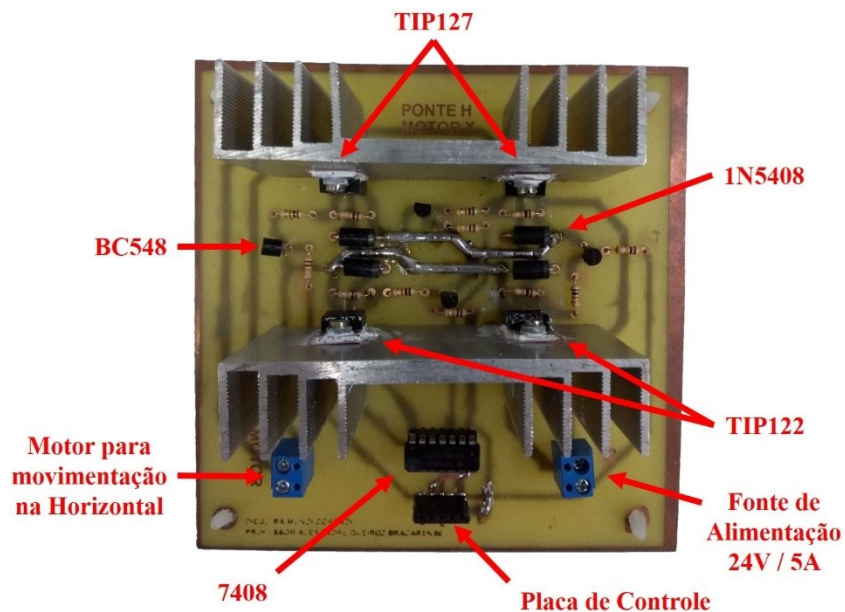


Figura 64: Ponte H do motor que movimenta a tocha TIG na Horizontal

Logo que o usuário define a velocidade de deslocamento da tocha TIG, o valor selecionado é salvo na memória EEPROM do microcontrolador. Assim, na próxima vez, se o valor de velocidade desejado for o mesmo, não será necessário redefini-lo. O deslocamento horizontal da tocha de soldagem tem início quando o sensor de luminosidade detecta que o arco elétrico foi aberto e é interrompido quando o sensor de fim de curso é acionado. Em seguida, deve-se iniciar a elevação da tocha, cuja altura em relação ao substrato é medida pelo encoder indutivo e mostrada na tela de LCD. Ao atingir a altura desejada, deve-se interromper a subida da tocha. Inicia-se e interrompe-se o deslocamento vertical da tocha pressionando o encoder

rotativo, que também funciona como botão de retorno rápido e está localizado no painel de controle (Figura 66). Na sequência, a tocha desloca-se horizontalmente em direção a posição de início de deposição do cordão de solda. Assim que o sensor fim de curso é acionado, a tocha TIG tem seu movimento interrompido e permanece parada até que o arco elétrico reabra para a deposição da camada seguinte.

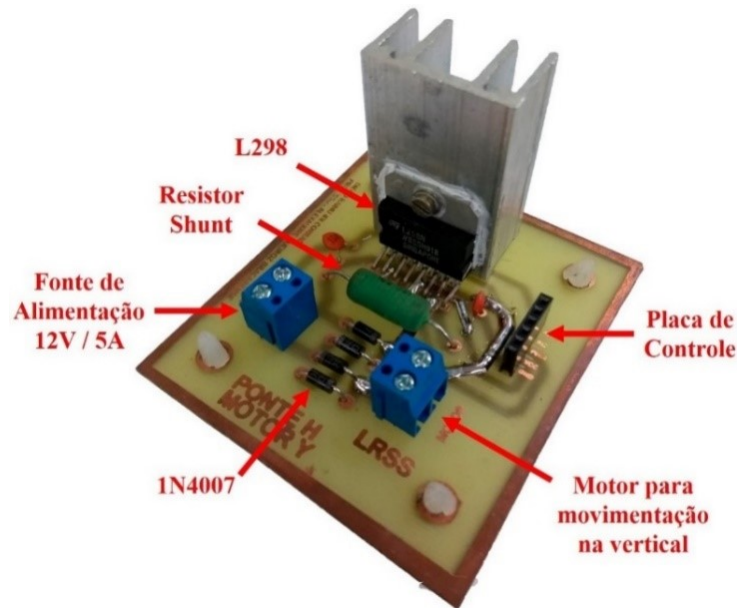


Figura 65: Ponte H do motor que movimenta a tocha TIG na vertical

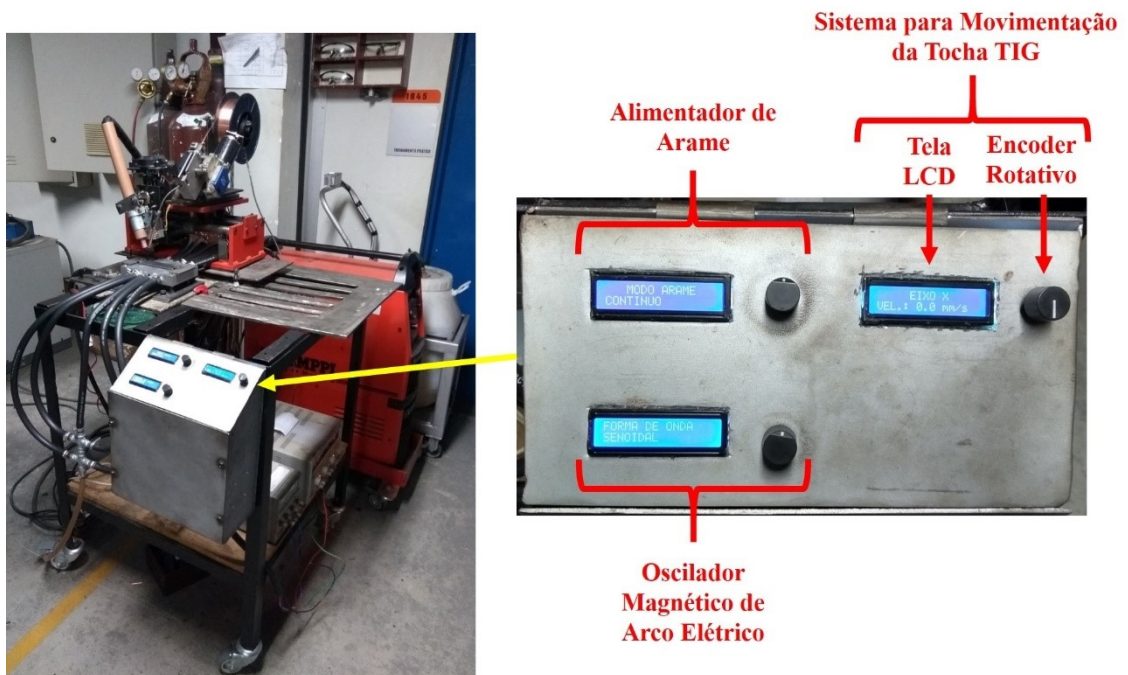


Figura 66: Painel de controle

4.1.2. Alimentador Automático de Arame

O alimentador automático de arame, que pode ser visto na Figura 67, é um sistema composto por um motor de corrente contínua acoplado em um tracionador de arame, um circuito eletrônico de controle, um encoder capacitivo, um conduíte metálico, um bico de saída do arame e um carretel de arame com freio. Com este sistema é possível realizar a alimentação do arame de forma contínua ou pulsada e definir se o sentido é de avanço ou de recuo. Na alimentação pulsada, o arame apresenta um movimento alternado entre avanço e interrupção.

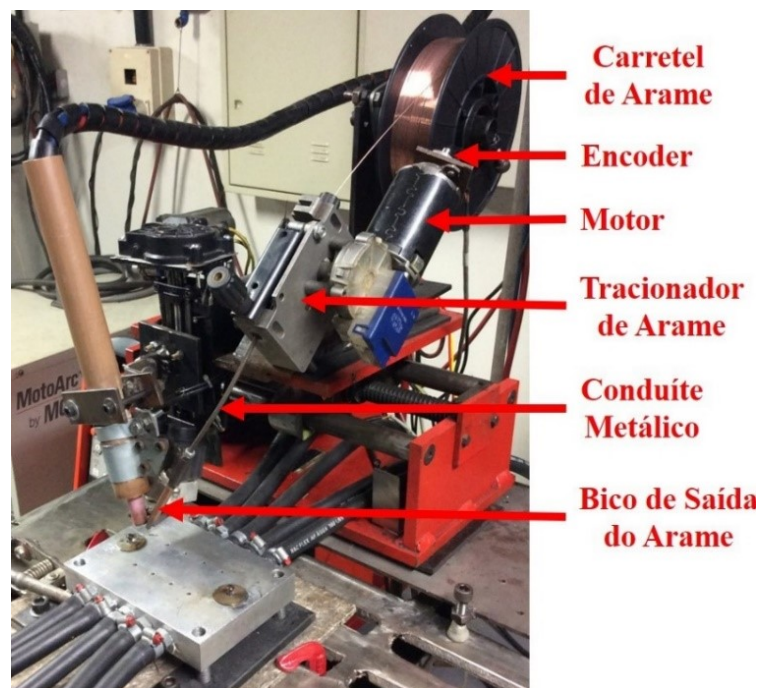


Figura 67: Alimentador de arame

Como mostrado na Figura 68, o bico de saída do arame apresenta três graus de liberdade, sendo possível movimentá-lo na vertical, girá-lo em torno do eixo da tocha TIG e alterar o ângulo de incidência do arame na poça de fusão.

O controle da alimentação de arame é feito pela placa eletrônica apresentada na Figura 69, cujo circuito está em Apêndice A. Ela é composta por um microcontrolador (PIC18F2550), responsável por controlar a velocidade, o sentido de alimentação e a frequência de pulsação do arame; uma ponte H (L298N), que é o circuito de potência capaz de acionar o motor do alimentador de arame; um encoder capacitivo (AMT-102), para que o controle da velocidade de alimentação do arame seja em malha fechada; um encoder rotativo (Keyes KY-040),

utilizado pelo usuário para definir os parâmetros de controle (velocidade, sentido de alimentação e frequência de pulsação do arame); e uma tela de LCD, por onde o usuário recebe informações sobre o processo de alimentação. O motor do alimentador de arame é energizado por fonte de alimentação de 12V / 2A e a placa de controle é alimentada por uma fonte de 9V / 1A. Um regulador de tensão L7805 é utilizado para converter a tensão de 9V para 5V, que é a tensão exigida pelo microcontrolador. A programação do microcontrolador foi feita em linguagem C na plataforma MPLAB e o código encontra-se em Apêndice B.

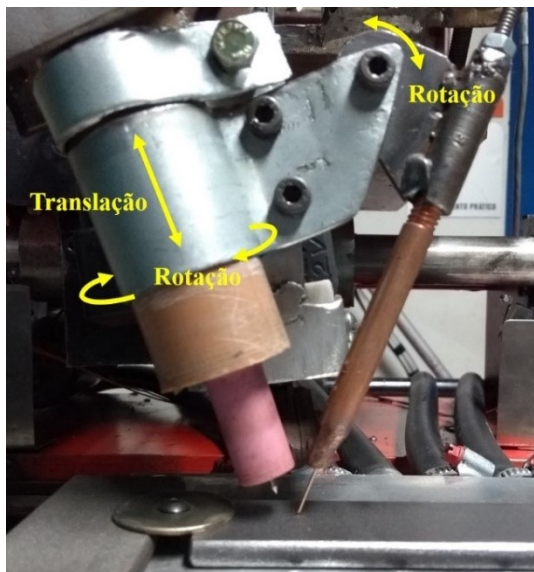


Figura 68: Bico de saída do arame

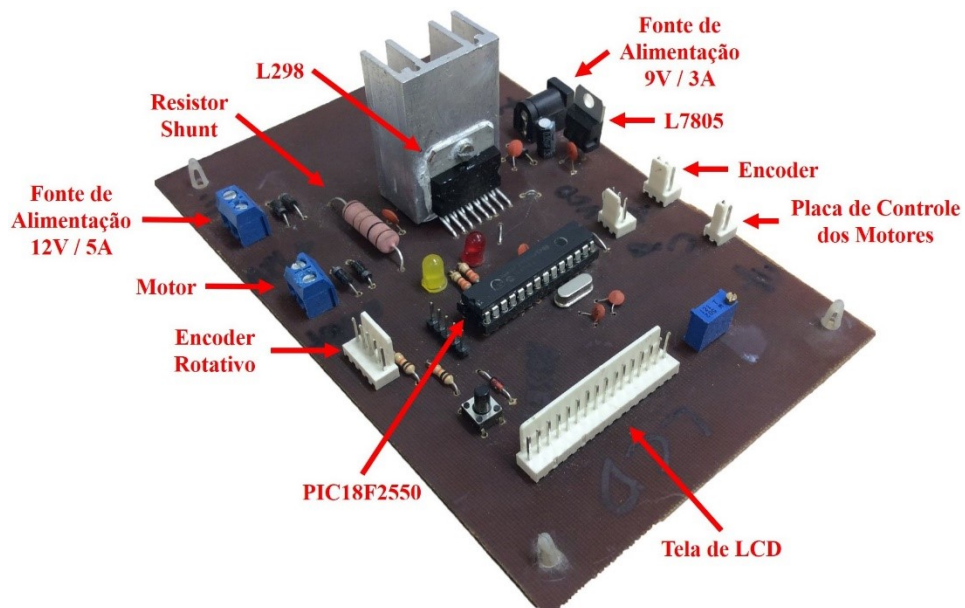


Figura 69: Placa de controle do alimentador de arame

Após o usuário definir os parâmetros da alimentação do arame (velocidade e frequência de pulsação), estes são salvos na memória EEPROM do microcontrolador, para que em uma próxima ocasião não seja necessário reprogramar o sistema, caso a condição de alimentação seja a mesma que aquela estabelecida anteriormente. Em seguida, o microcontrolador recebe tais parâmetros e, após receber o sinal de comando da placa de controle dos motores para iniciar a alimentação de arame, envia um sinal PWM para a ponte H, que aciona o motor do tracionador de arame.

Em razão de alguma imperfeição que possa existir na superfície do arame, como desgaste ou deformação, ou algum defeito de fabricação, como uma pequena variação no diâmetro do arame ao longo de seu comprimento, o atrito entre o arame e a superfície interna do condúite metálico pode variar e conseqüentemente afetar a velocidade. Assim, para garantir que a velocidade de alimentação do arame não varie durante o processo, o controle da velocidade é feito em malha fechada a partir de um controlador PI (Proporcional Integral). Para projetar esse controlador de início levantou-se a curva apresentada na Figura 70, que relaciona a velocidade do motor em regime permanente (*VP*), medida pelo encoder (com resolução de 1024 PPR – Pulsos Por Rotação) e dada em pulsos a cada 12 ms (período amostral), com o *duty cycle* (*DC*) do sinal PWM gerado pelo microcontrolador presente no circuito de controle do alimentador de arame. Essa primeira análise foi feita a vazio, ou seja, sem carga no eixo do motor. Analisando o gráfico gerado (Figura 70), observa-se uma relação linear entre o *DC* e a *VP*. A partir da função que correlaciona estes dois parâmetros (Equação 3), obtida por regressão linear, sabe-se qual valor de *DC* é necessário no sinal PWM produzido pelo microcontrolador para que determinada *VP* seja imposta no processo.

$$DC = 1,43 \times VP + 457,91 \quad R^2 = 0,98 \quad (3)$$

O segundo passo foi levantar a curva do regime transiente do motor (Figura 71). Isso foi feito aplicando um sinal degrau de entrada de 12 V no motor, o que corresponde a um *DC* de 100% no sinal PWM para este sistema. Analisando essa curva, considerou-se o modelo do motor como sendo de primeira ordem com constante de tempo igual a 210 ms (Figura 72).

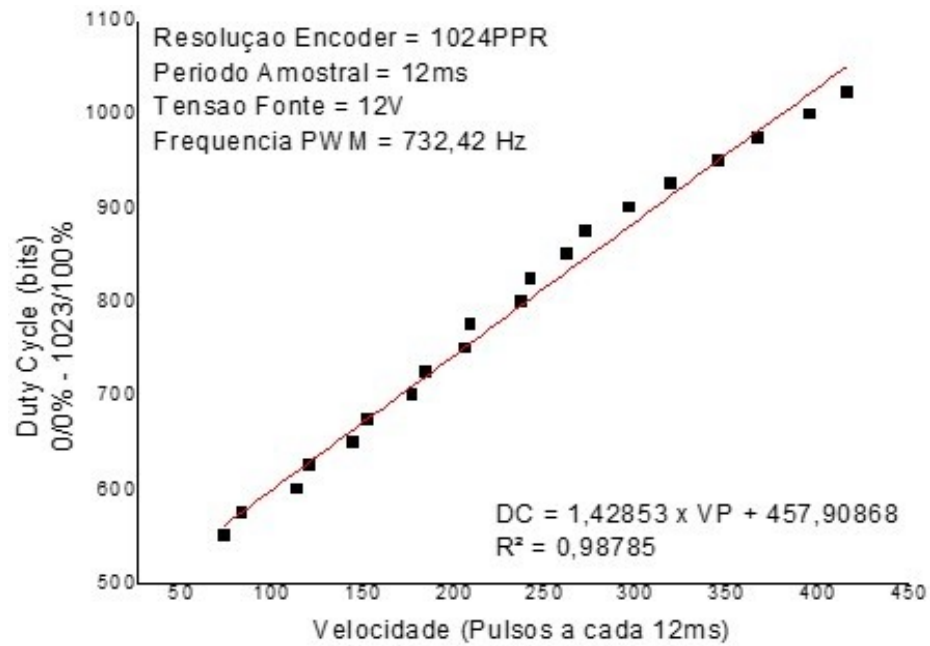


Figura 70: Gráfico Velocidade do Motor versus Duty Cycle

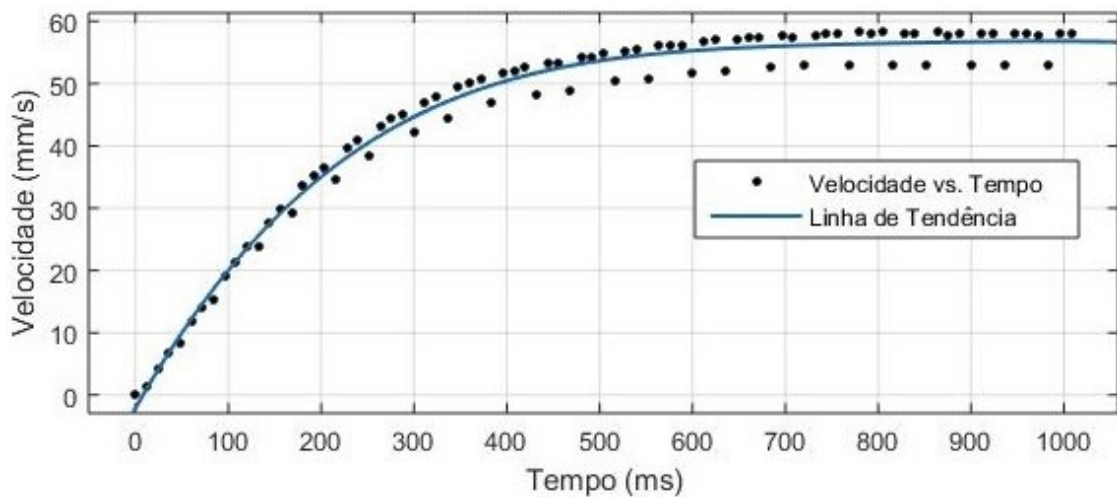


Figura 71: Regime Transiente

A partir do método de alocação de polos, utilizando funções do MATLAB®, e, em seguida, um ajuste fino na prática, os valores das constantes KP e KI foram estabelecidas como sendo 9 e 150, respectivamente. Um diagrama de blocos do sistema em malha fechada projetado é apresentado na Figura 73 e um gráfico da velocidade de alimentação do arame em função do tempo, que foi obtido experimentalmente durante o processo de soldagem, ou seja, já considerando a carga no eixo do motor, é mostrado na Figura 74. Após o controle implementado no sistema, a velocidade variou 0,05 mm/s, o que é aceitável no processo.

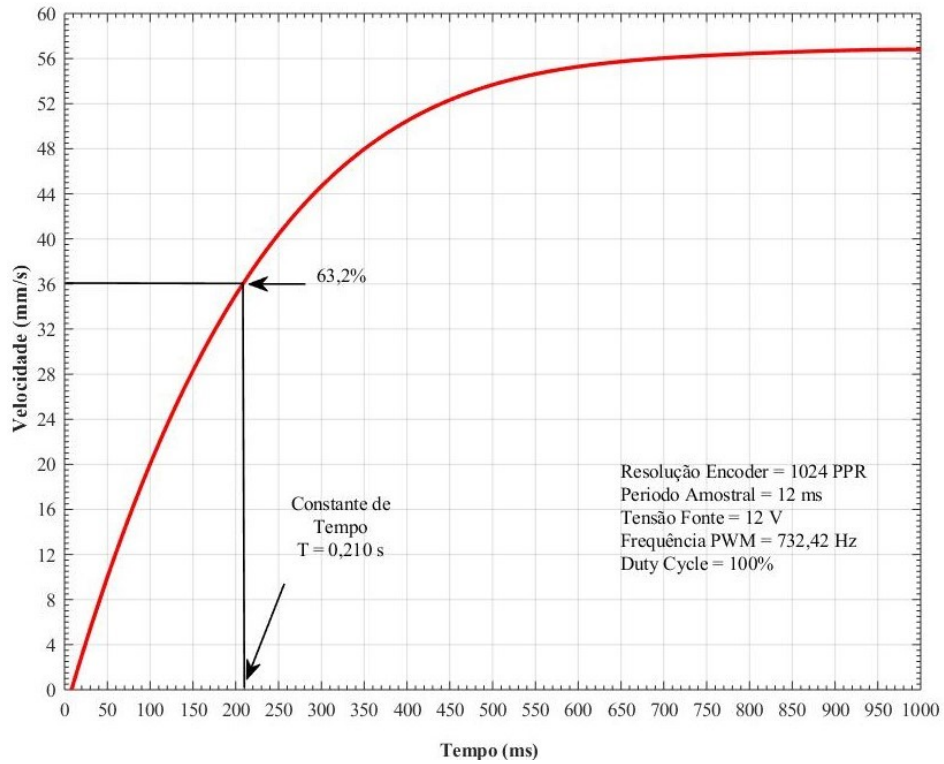


Figura 72: Constante de tempo

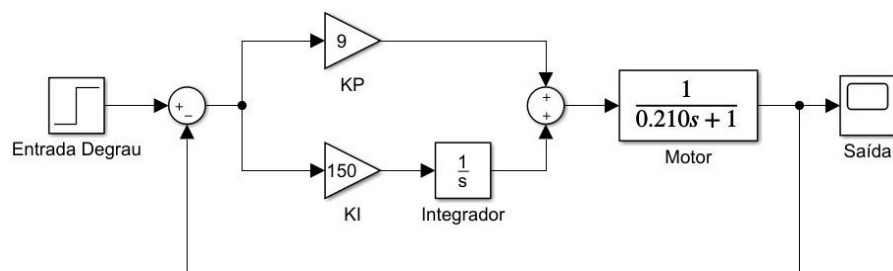


Figura 73: Diagrama de blocos do sistema em malha fechada

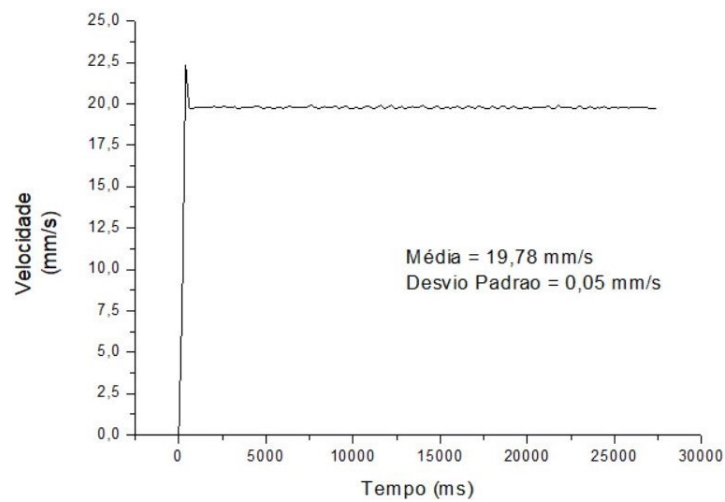


Figura 74: Gráfico velocidade versus tempo

4.1.3. Oscilador Magnético de Arco Elétrico

Na Figura 75, exibe-se um diagrama esquemático com os principais elementos que compõem o oscilador magnético de arco elétrico desenvolvido e as variáveis de entrada e saída. Este sistema possui um microcontrolador (PIC18F2550), dois conversores digital-analógico (MCP4725), dois amplificadores de potência (constituídos por um amplificador operacional LM741, para amplificar a tensão, e um amplificador Classe B Push-Pull, para amplificar a corrente) e duas bobinas eletromagnéticas (12W). As variáveis de entrada são: Padrão de Oscilação (Transversal, Longitudinal e Circular); Forma de Onda, mas apenas para as oscilações transversal e longitudinal, (Seno, Quadrado, e Dente de Serra Crescente e Decrescente); frequência (0 a 50 Hz) e amplitude de oscilação (0 a 12V). Como variável de saída, campo magnético é produzido em cada bobina.

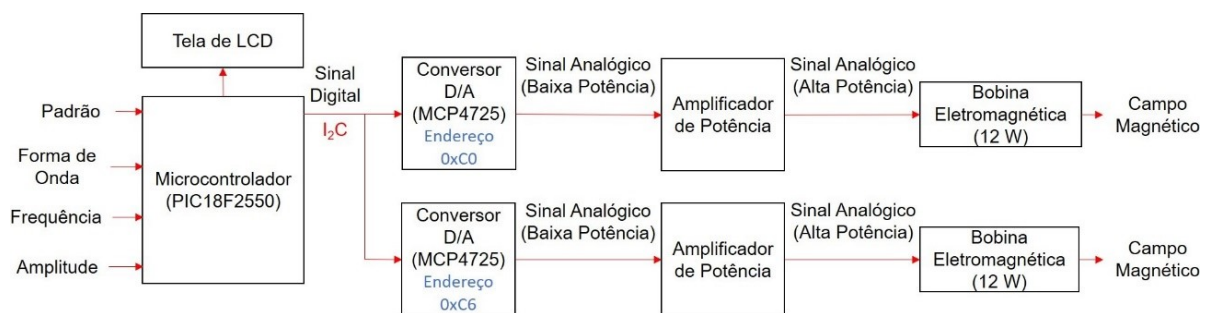


Figura 75: Diagrama esquemático do oscilador magnético desenvolvido

Para este oscilador magnético, duas placas eletrônicas foram construídas, e os circuitos eletrônicos de ambas as placas estão em Apêndice A. Na Placa 1 (Figura 76) encontra-se o microcontrolador, uma tela de LCD e um dos amplificadores de potência, e na Placa 2 (Figura 77) localiza-se o outro amplificador de potência, os dois conversores digital-analógico e um encoder rotativo. Cada placa possui dois conectores, por onde elas se comunicam. Apesar de o sistema ser alimentado por uma fonte de 9V / 1A, um regulador de tensão L7805 converte os 9V para 5V, que é a tensão de alimentação exigida pelo microcontrolador. Para energizar as bobinas, uma fonte simétrica que varia de -18V a +18V / 5A é também conectada à placa. A programação do microcontrolador foi feita em linguagem C na plataforma MPLAB e seu código encontra-se em Apêndice B.

Assim que o usuário define os parâmetros de oscilação, o microcontrolador os salva na memória EEPROM, para que na próxima vez não seja necessário reconfigurar o sistema, caso as variáveis desejadas sejam as mesmas. Em seguida, após receber o comando da placa de controle dos motores para iniciar a oscilação do arco elétrico, o microcontrolador começa a transmissão do sinal digital via comunicação I²C (*Inter-Integrated Circuit*) para um dos conversores analógicos. Esse sinal é um conjunto de vetores que representa o período de onda do sinal elétrico desejado. Cada vetor é composto por 24 bits, em que os 8 primeiros são o endereço do conversor digital-analógico que receberá o sinal e os 16 restantes representam um dos pontos do período de onda que foi discretizado em 128 pontos, conforme ilustrado na Figura 78. Após o envio do 128º vetor, a transmissão recomeça do 1º. A taxa com que o microcontrolador envia os vetores para o conversor D/A é o quociente da divisão da frequência de oscilação definida pelo usuário por 128. O conversor digital-analógico gera o sinal analógico de baixa potência que é amplificado pelo amplificador de potência e, posteriormente, entregue a bobina eletromagnética, que converte o sinal elétrico em magnético. O processo se encerra quando a placa de controle dos motores envia o comando.

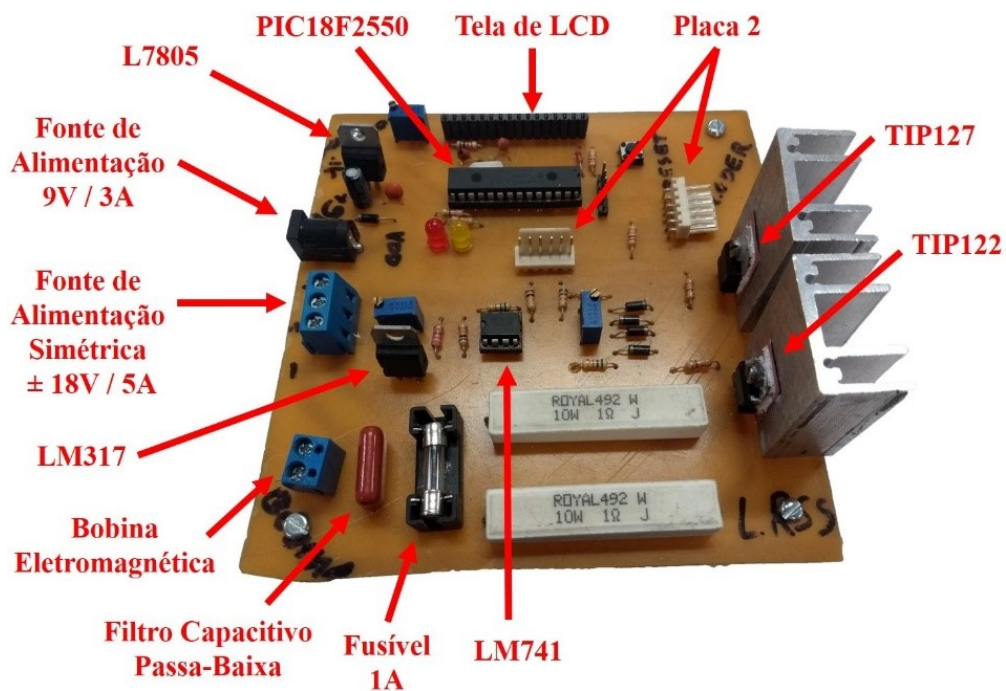


Figura 76: Placa 1 do oscilador magnético

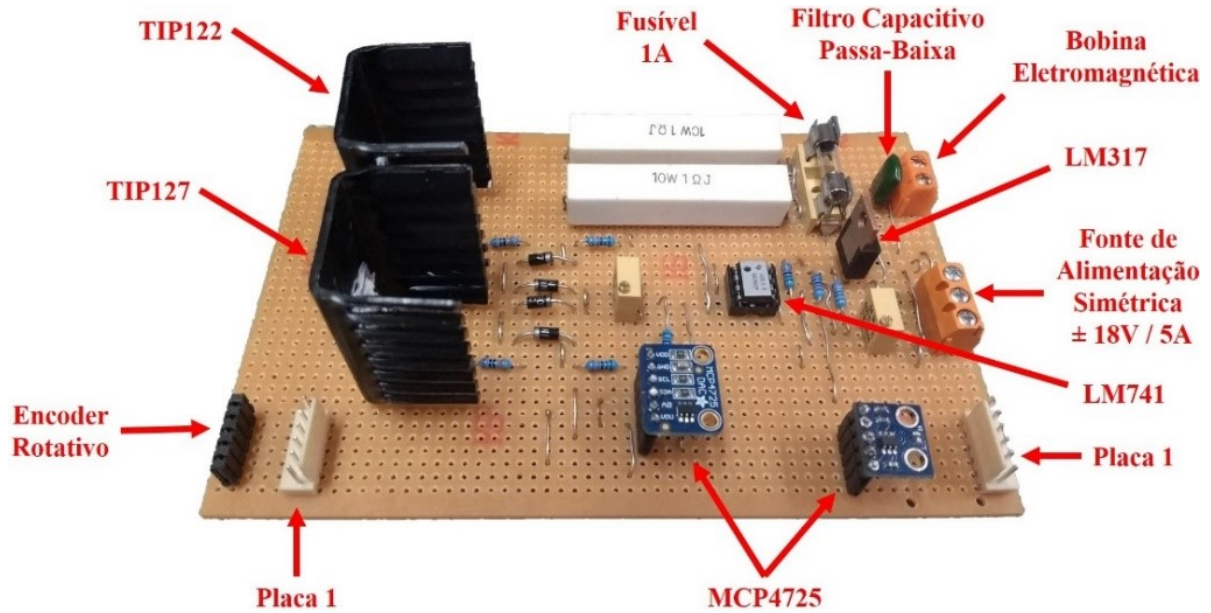


Figura 77: Placa 2 do oscilador magnético

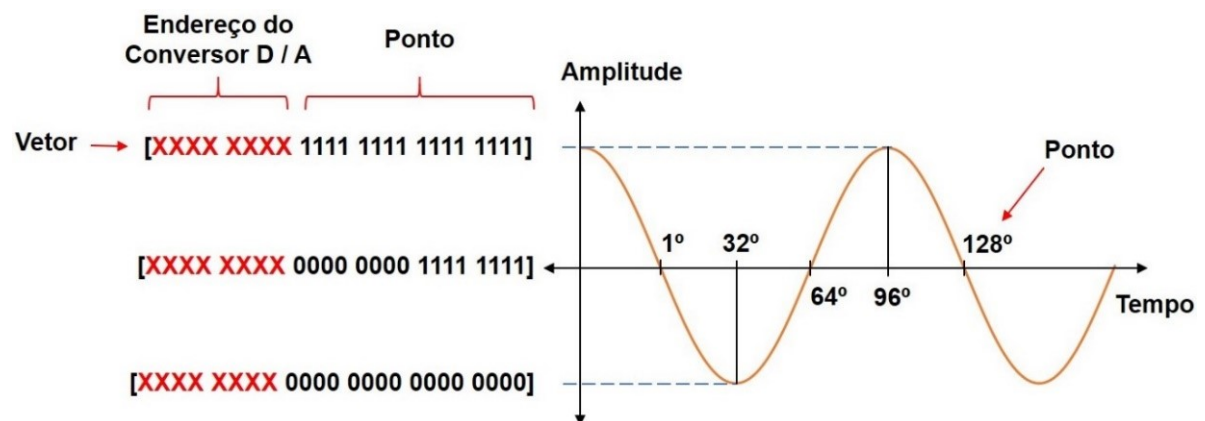


Figura 78: Sinal de onda discretizado

Embora tenha sido utilizado o mesmo sistema para oscilar o arco elétrico tanto na UFMG, Brasil, quanto na UOW, Austrália, na primeira empregou-se apenas uma bobina eletromagnética (Figura 79), enquanto na segunda utilizaram-se duas (Figura 80). As três bobinas utilizadas são idênticas e possuem as características elétricas informadas na Tabela 9. A bobina utilizada na UFMG (Figura 79) foi a mesma utilizada por Juliani (2014) em seu trabalho de mestrado. Segundo Juliani (2014), a uma distância de 25 mm da ponta do núcleo Fe-Si, essa bobina produz uma intensidade de campo magnético máxima de 2 mT. Para as condições experimentais apresentadas na Tabela 10, ele verificou uma deflexão no arco elétrico de 6 mm no processo de soldagem GTAW. O fabricante desta bobina é a empresa Parker Hannifin Corporation.

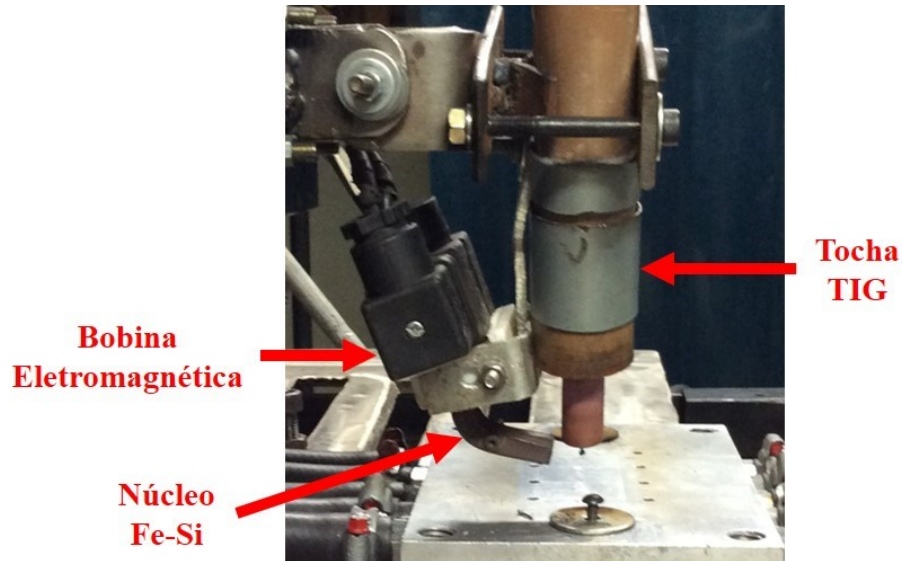


Figura 79: Bobina eletromagnética utilizada na bancada de testes desenvolvida na UFMG, Brasil

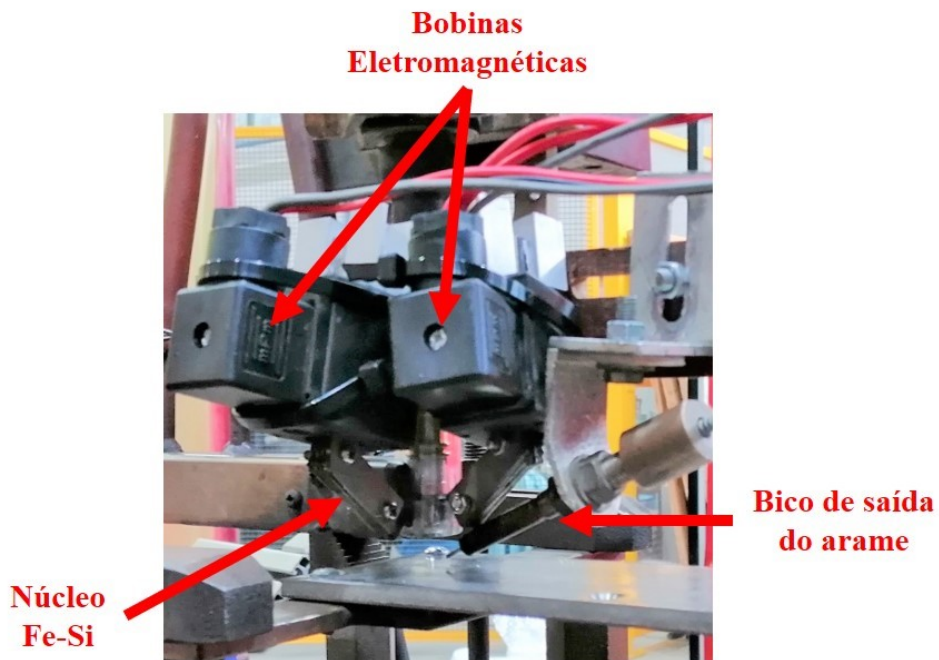


Figura 80: Bobinas eletromagnéticas utilizadas na Universidade de Wollongong, Austrália

Tabela 9: Propriedades elétricas da bobina eletromagnética.

Propriedades	Magnitude
Resistência (Ω)	12,7
Indutância (mH)	49,1
Potência Máxima (W)	12
Tensão Nominal Máxima (V)	12

Tabela 10: Condições experimentais adotadas por Julian (2014)

Parâmetro	Valor
Corrente de Soldagem (A)	100
Comprimento do Arco (mm)	5
Distância entre a ponta do núcleo da bobina e o eletrodo de tungstênio (mm)	25
Intensidade máxima de campo magnético (mT)	2
Forma de Onda	Senoidal
Frequência de Oscilação (Hz)	1

Fonte: Juliani, 2014

Por ser uma carga indutiva, a bobina eletromagnética se comporta conforme a Lei de Lenz, que diz que todo indutor, inicialmente, tende a se opor a qualquer variação de corrente elétrica que o atravessa e, após um determinado tempo, age como um condutor de eletricidade comum. Esse determinado tempo, também chamado de tempo de acomodação, além de dividir o comportamento da bobina em dois regimes, um transiente e outro permanente, define a frequência máxima de oscilação da bobina eletromagnética. Para descobrir o valor do tempo de acomodação basta conhecer o comportamento da corrente elétrica que passa pela bobina em função do tempo. O circuito elétrico composto por uma fonte de tensão contínua e um eletroímã é um circuito resistor-indutor, cuja modelo matemático é representado pela Equação 4:

$$Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} = E \quad (4)$$

onde R e L são a resistência (Ω) e a indutância (H) do eletroímã, respectivamente, E é a tensão contínua (V) e $i(t)$ é a corrente elétrica (A) em função do tempo $t(s)$. Ao resolver essa equação diferencial, utilizando os valores presentes na Tabela 9, obtém-se o gráfico exibido na Figura 81. Para uma acomodação de 99,3%, o tempo de acomodação ($t_{\text{acomodação}}$), que é calculado pela Equação 5 (Ogata, 2003), vale 0,01933s. Esse é o tempo mínimo que a corrente elétrica precisa para passar pelo regime transiente e entrar no regime permanente, ou seja, atingir o valor desejado para produzir determinada intensidade de campo magnético. A frequência máxima de oscilação é o inverso do tempo de acomodação e, portanto, vale aproximadamente 52Hz, o que atende as condições pré-estabelecidas para o oscilador magnético de arco elétrico. Caso a

frequência de oscilação seja acima desse valor, a corrente elétrica não conseguirá atingir o regime permanente antes de inverter o sentido novamente.

$$t_{acomodação} = 5 \times \frac{L}{R} \quad (5)$$

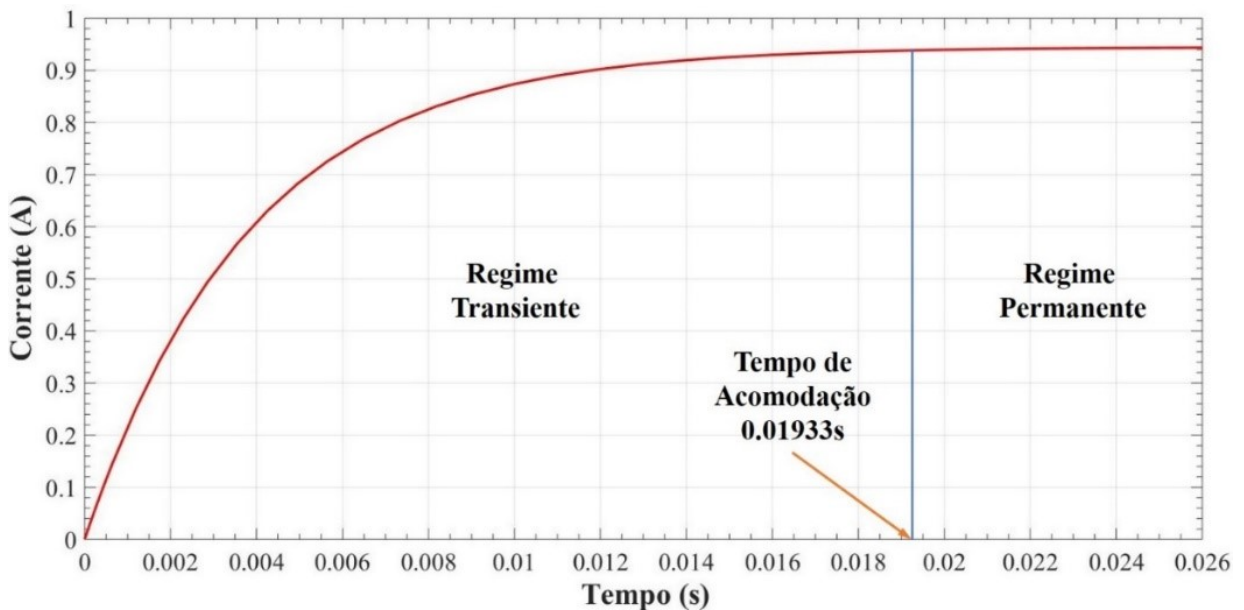


Figura 81: Gráfico da corrente em função do tempo no eletroímã

O sinal elétrico gerado pelo oscilador magnético e entregue a bobina eletromagnética foi observado por um osciloscópio. Na Figura 82, exibem-se as formas de onda produzidas em frequência de 10 Hz. O sinal em amarelo corresponde ao sinal gerado pelo conversor digital/analogico e o sinal em verde, ao sinal amplificado e entregue a bobina eletromagnética. A distorção do sinal, observada principalmente na onda quadrada (Figura 82a), se deve ao fato de a bobina eletromagnética ser um indutor e estar sujeita a Lei de Lenz.

O padrão de oscilação depende da posição da bobina eletromagnética em relação à tocha de soldagem, o que define a direção de B e, portanto, F_B (Figura 32). Na Figura 83, mostra-se a posição da bobina para as oscilações longitudinal (Figura 83a), transversal (Figura 83b) e circular (Figura 83c). O campo magnético para as oscilações longitudinal e transversal é perpendicular e paralelo à direção de soldagem, respectivamente. Para a oscilação circular, é necessário produzir simultaneamente campos magnéticos paralelos e perpendiculares à direção de soldagem com auxílio de duas bobinas. Na Figura 83d, são ilustrados os sinais elétricos aplicados em ambas as bobinas, que são ondas senoidais com as mesmas frequências e

amplitudes. Entretanto, os dois sinais estão atrasados um em relação ao outro em $1/4$ de período. Para transformar essa oscilação circular em elíptica ou lemniscata basta alterar a amplitude ou a frequência, respectivamente, de um dos sinais senoidais aplicados nas bobinas.

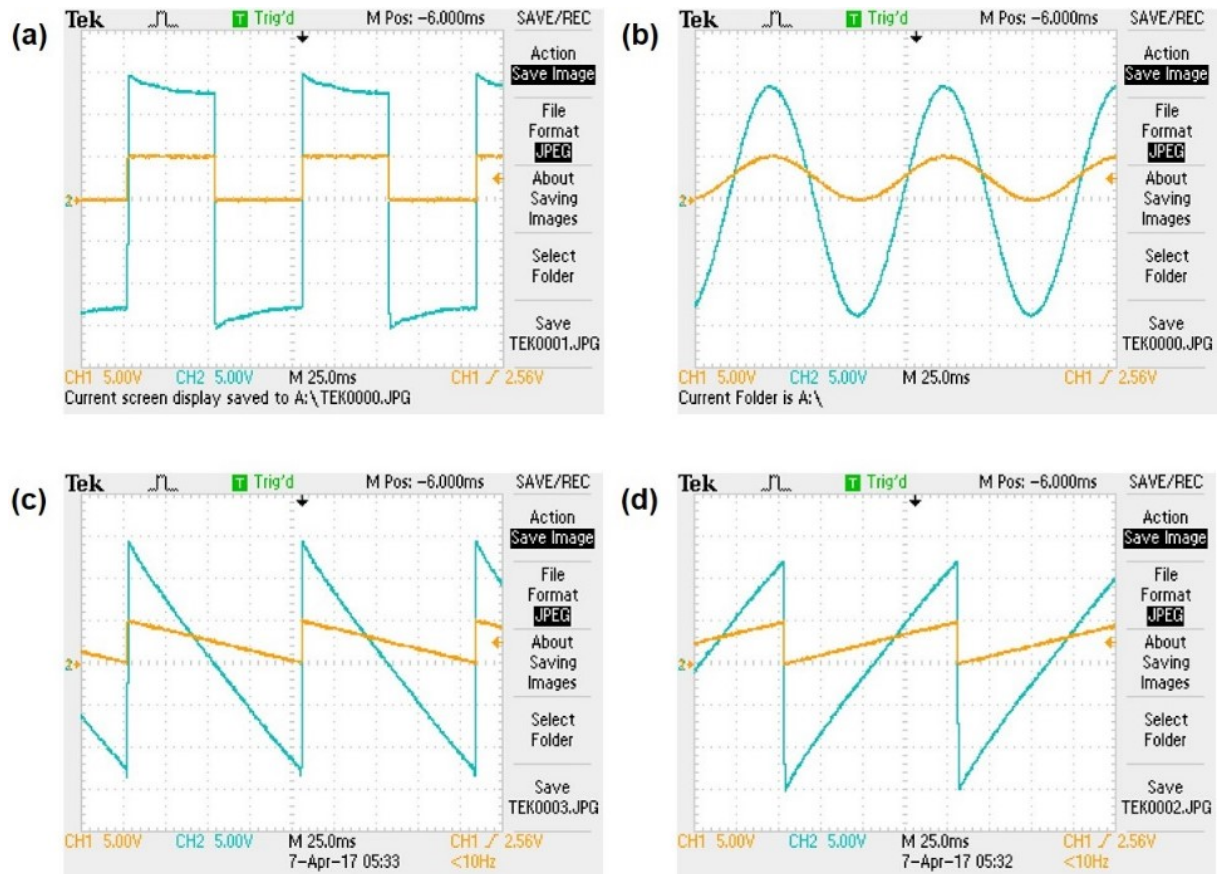


Figura 82: Sinal elétrico gerado. a) Onda quadrada. b) Onda Senoidal. c) Onda dente de serra decrescente. c) Onda dente de serra crescente

4.1.4. Testes Preliminares

Na Figura 84, são apresentados 10 cordões de solda que foram depositados utilizando a bancada de testes desenvolvida e, na Tabela 11, encontram-se os valores de corrente de soldagem, velocidade de soldagem e velocidade de alimentação de arame estabelecidos para cada um deles. Os demais parâmetros de soldagem foram os mesmos definidos para a produção das paredes de aço.

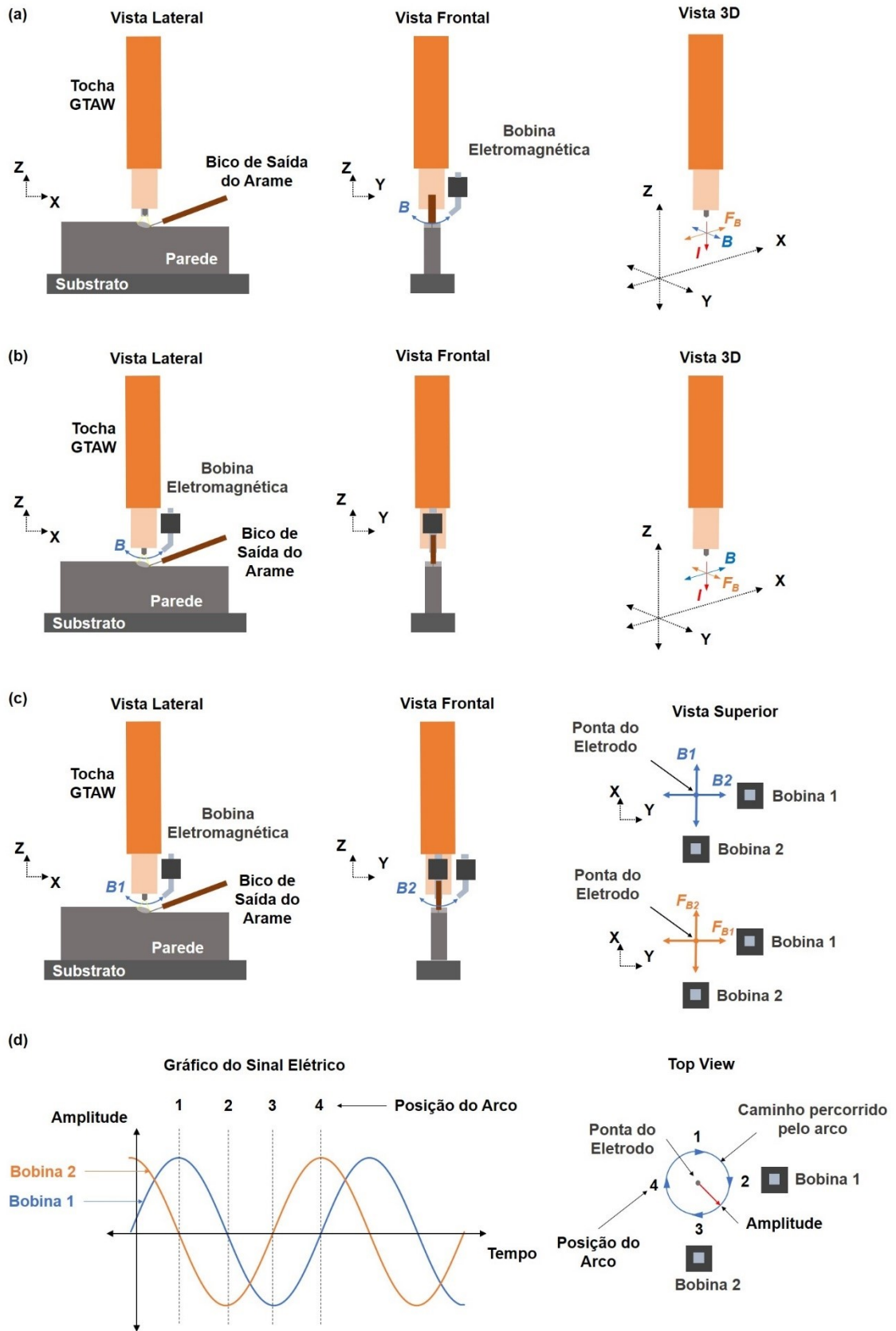


Figura 83: Posicionamento das bobinas eletromagnéticas para as oscilações (a) circular, (b) transversal e (c) longitudinal. (d) Sinais elétricos aplicados nas bobinas para a oscilação circular

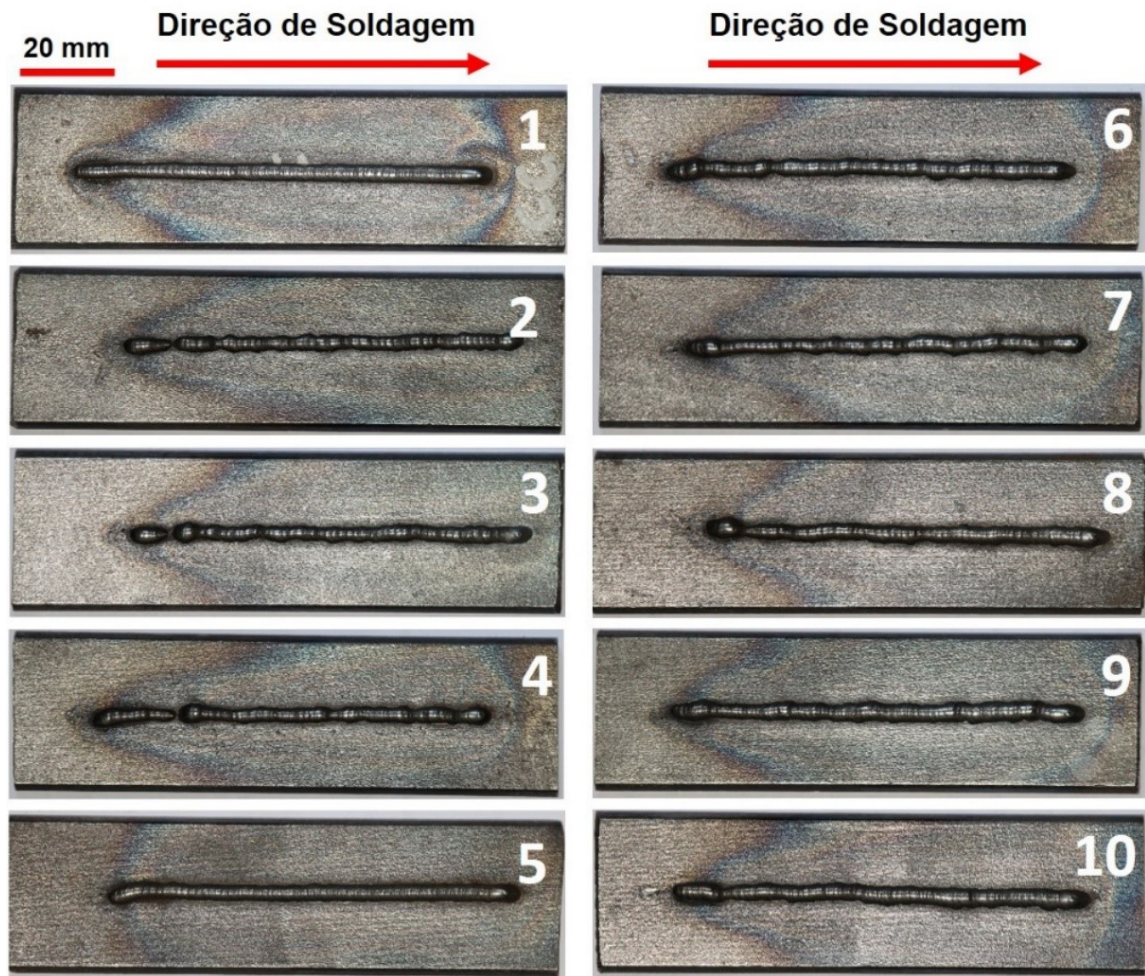


Figura 84: Cordões sobre chapa depositados

Tabela 11: Parâmetros de soldagem para os 10 cordões depositados

Cordão	Corrente de Soldagem (A)	Velocidade de Soldagem (mm/min)	Velocidade de Alimentação de Arame (mm/s)
1	90	1020	96
2	90	1020	96
3	90	960	96
4	90	960	102
5	95	960	107
6	95	960	107
7	95	960	104
8	95	960	102
9	100	960	107
10	100	1020	107

Avaliando-se apenas o aspecto visual das camadas depositadas, nota-se que apenas os cordões 1 e 5 apresentam um aspecto contínuo e homogêneo, enquanto os demais cordões apresentam descontinuidades e variações de largura ao longo do comprimento. Ao comparar os cordões 1 e 5 com os cordões 2 e 6, respectivamente, observa-se que, apesar de apresentarem aspectos visuais diferentes, não houve variação nos parâmetros de soldagem. O fator principal responsável por essa diferença de aparências é o modo de transferência metálica. Para os cordões 1 e 5, o arame era introduzido diretamente na poça de fusão (contato ininterrupto, Figuras 45b e 46), enquanto para os cordões 2 e 6, o arame era introduzido primeiramente na coluna do arco, para se fundir e depois tocar a poça de fusão (contato interrompido, Figuras 45c e 47), sendo essa última condição de deposição de arame instável. Portanto, para os demais cordões de solda que apresentam os mesmos defeitos, a causa foi a mesma.

A busca pelos parâmetros e condições de soldagem para fabricação das paredes de aço levou em consideração apenas o aspecto visual do cordão de solda, não objetivando determinada característica geométrica de cordão. Os parâmetros e condições de soldagem para fabricação do cordão 1 foram os adotados para a produção das paredes de aço. Para avaliar a repetibilidade do sistema, mais 2 cordões foram depositados com as mesmas condições de processo do cordão 1. Conforme apresentado na Figura 85, os três cordões apresentaram um aspecto contínuo e homogêneo como esperado e aceitável para o trabalho.



Figura 85: 3 Cordões 1

4.2. Geometria da Parede

4.2.1. Paredes de Aço

As macrografias da seção transversal das paredes de aço são apresentadas na Figura 86. É nítido que as paredes afinaram quando a oscilação magnética do arco elétrico foi aplicada. Os valores e os gráficos de Largura Total da Parede (LTP) e Largura Efetiva da Parede (LEP) são apresentados na Tabela 12 e na Figura 87, respectivamente. Quando a oscilação magnética do arco elétrico foi aplicada, LTP e LEP diminuíram em aproximadamente 14% e 8%, respectivamente. As larguras totais das regiões extremas de cada parede produzida são apresentadas na Figura 88. Nota-se que o início e o final das paredes também se tornaram mais finos com a oscilação magnética longitudinal do arco elétrico.

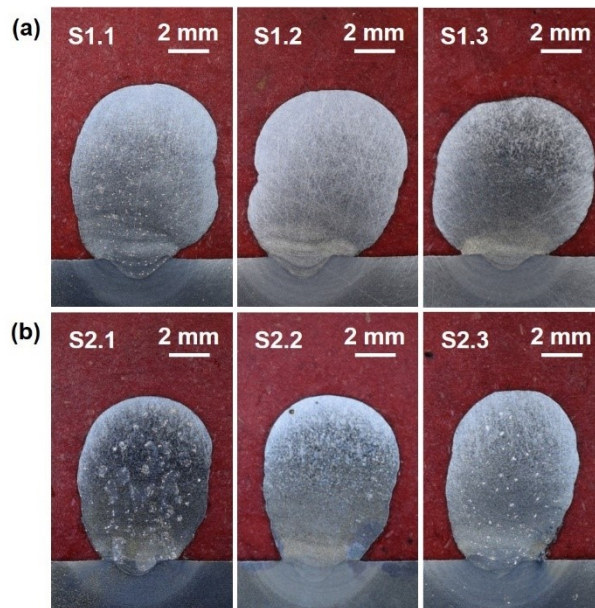


Figura 86: Macrografias da seção transversal das paredes de aço produzidas (a) sem e (b) com oscilação magnética do arco elétrico

Tabela 12: LTP e LEP para as paredes de aço.

Amostra	LTP Média (mm)	LTP Desvio Padrão (mm)	LEP Média (mm)	LEP Desvio Padrão (mm)
S1	7,8	0,4	4,1	0,3
S2	6,7	0,1	3,8	0,3

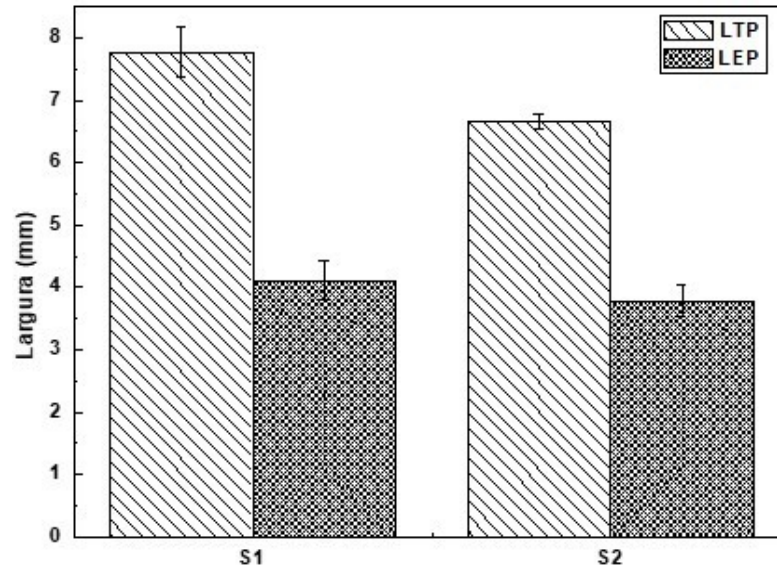


Figura 87: LTP e LEP para as paredes de aço.

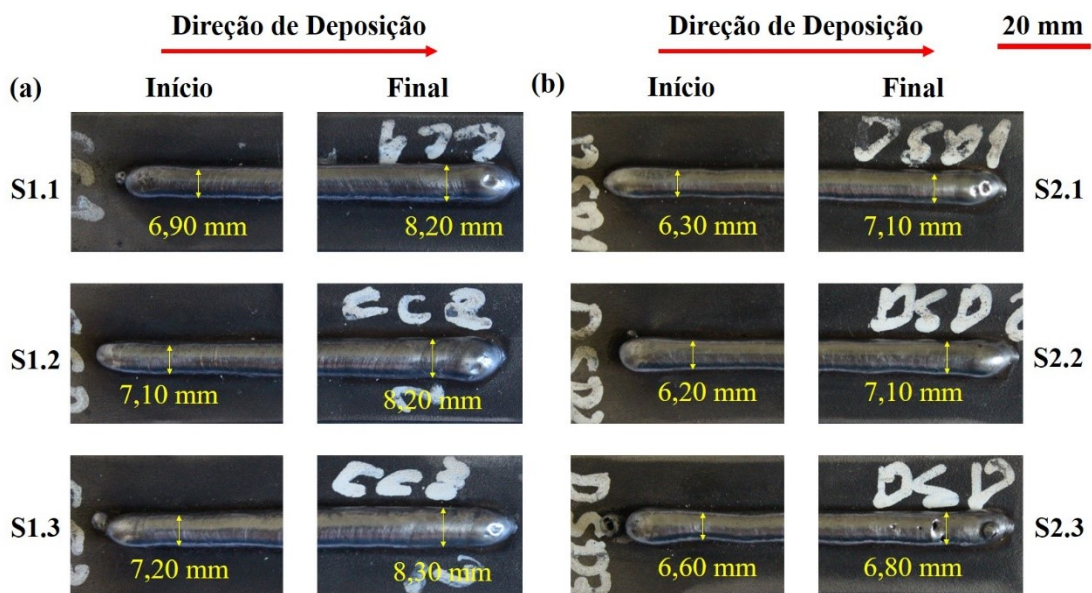


Figura 88: Larguras totais das regiões extremas das paredes de aço produzidas (a) sem e (b) com oscilação magnética do arco elétrico

Na Tabela 13 e na Figura 89, encontram-se os valores e os gráficos, respectivamente, de Altura Total da Parede (ATP). Verifica-se que ATP não sofreu alteração com a oscilação magnética do arco elétrico. Também não foram observadas variações nítidas nas alturas totais das regiões iniciais e finais, como mostrado na Figura 90.

Tabela 13: ATP para as paredes de aço.

Amostra	ATP Média (mm)	ATP Desvio Padrão (mm)
S1	8,2	0,4
S2	8,2	0,1

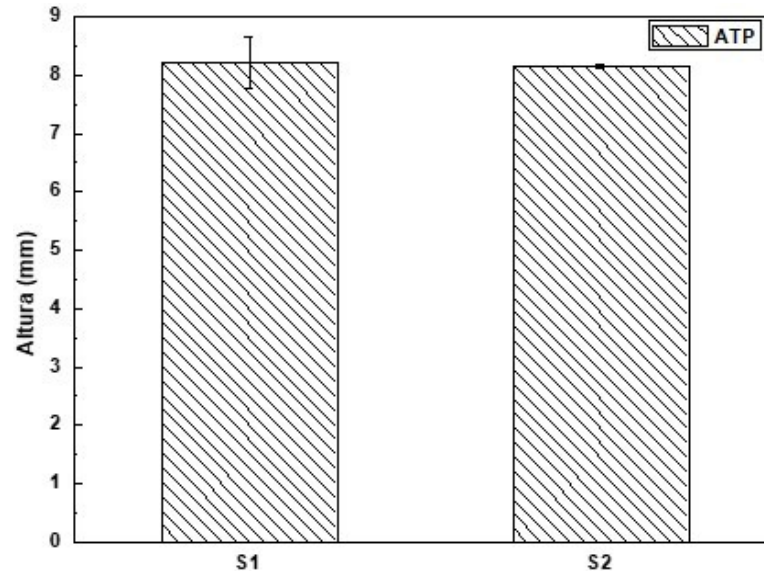


Figura 89: ATP para as paredes de aço

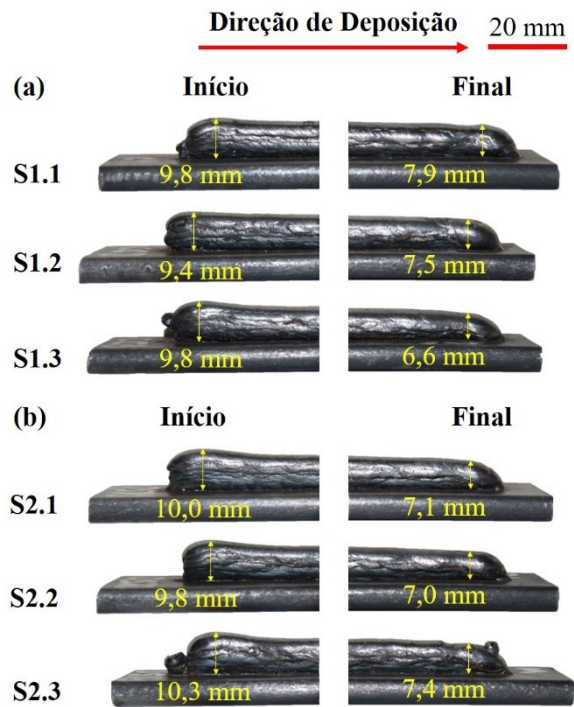


Figura 90: Alturas totais das regiões extremas das paredes de aço produzidas (a) sem e (b) com oscilação magnética do arco elétrico

Observa-se nas Figuras 88 e 90 que a largura e a altura das paredes de aço variam ao longo do comprimento da parede. Esse tipo de defeito geométrico já havia sido abordado por Zhang et al. (2003), Xiong et al. (2016) e Hu et al. (2018). Segundo tais autores, esse problema é comum em estruturas multicamadas de passe único cujas camadas foram depositadas em único sentido. De acordo com Zhang et al. (2003), a temperatura superficial da peça aumenta e a taxa de transferência de calor por condução diminui à medida que a camada de solda é depositada. Assim, o cordão de solda tende a ser mais alto no início do que no final. Além disso, conforme Xiong et al. (2016), o metal fundido tende a fluir em sentido contrário ao de deposição da camada devido à pressão do arco sobre a poça de fusão. Como consequência, o cordão de solda tende a ser mais largo no início do que no final. Uma vez que o erro geométrico aumenta com o número de camadas depositadas, a variação da altura e largura da parede ao longo da direção de deposição das camadas torna-se cada vez mais nítida. Assim, ao final do processo de deposição, a parede tende a apresentar um início mais largo e alto do que o final. Segundo Hu et al. (2018), para minimizar esse problema geométrico, a deposição das camadas deve ser alternada ou a corrente e a velocidade de soldagem devem ser diferentes para o início, o meio e o fim do cordão de solda.

Entretanto, para as paredes de aço produzidas, apenas a altura seguiu esse comportamento, um efeito contrário foi observado na largura, ou seja, a parede mostrou-se mais fina no início do que no final. Isso ocorreu por causa da inclinação da tocha de soldagem, que alterou a direção do jato de plasma, fazendo com que o metal fundido fluísse no mesmo sentido de deposição da camada. Na Figura 91, ilustra-se o sentido do fluxo de metal líquido na poça quando a tocha está na posição vertical (Figura 91a) e quando a tocha está inclinada (Figura 91b). A componente F_{ax} é a responsável por fazer o metal fundido fluir no mesmo sentido da deposição da camada quando a tocha está inclinada (Li et al., 2019).

Quando a oscilação magnética do arco elétrico foi aplicada, a variação da largura da parede ao longo da direção de deposição das camadas diminuiu. Para as paredes produzidas sem oscilação (S1), a diferença entre as larguras médias inicial e final foi de 1,1 mm. Já para as paredes fabricadas com oscilação (S2), a diferença caiu para 0,6 mm. O problema foi minimizado porque com a oscilação do arco, o sentido do jato de plasma também variou durante a deposição do cordão de solda e, assim, a poça de fusão ora fluía no mesmo sentido e ora fluía em sentido contrário ao de deposição. Além disso, segundo Wang et al. (2018), a presença de uma força magnética adicional na poça de fusão também dificulta que o metal líquido flua em

sentido contrário ao de deflexão do arco. Portanto, a oscilação magnética longitudinal mostra-se ser uma possível nova alternativa para minimizar esse defeito geométrico.

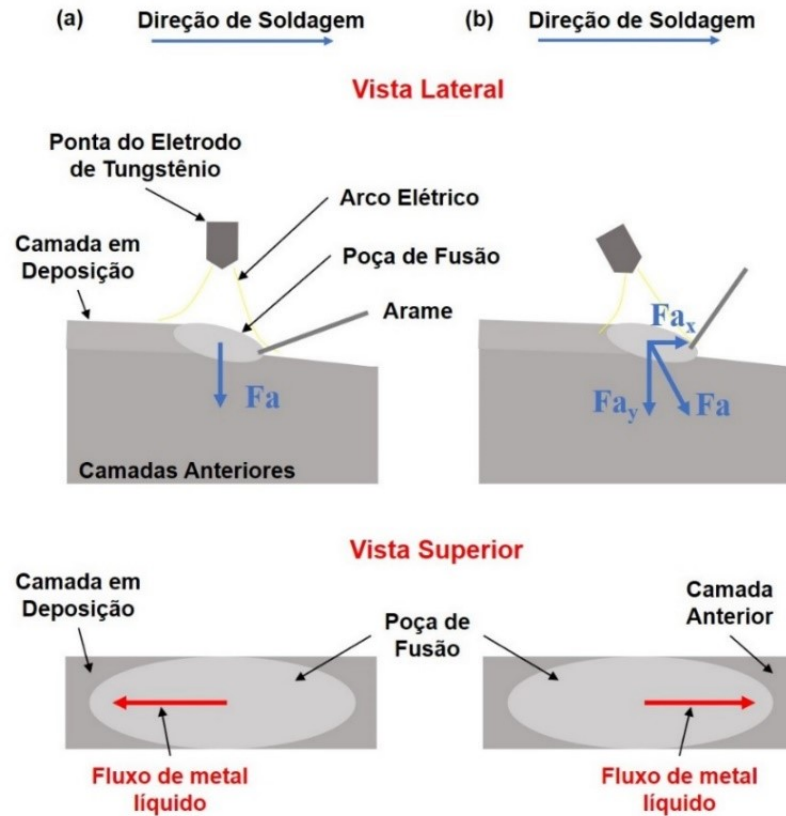


Figura 91: Sentido do fluxo de metal líquido na poça (a) quando a tocha está na posição vertical e (b) quando a tocha está inclinada

O gráfico da altura versus o número de camadas depositadas para as paredes de aço é mostrado na Figura 92. Da primeira até a terceira camada, o crescimento da parede apresentou um comportamento parabólico porque a transferência de calor por condução no início da construção da parede é mais eficaz do que no final (Zhao et al., 2011). Da quarta até a vigésima camada, o crescimento da parede apresentou um comportamento linear, o que significa que a taxa de transferência de calor por condução parou de diminuir com o número de camadas depositadas. Conforme observado, as curvas S1 e S2 foram as mesmas, o que era esperado visto que ATP não variou com a oscilação magnética (Tabela 13 e Figura 89). A região linear do gráfico para S1 e S2 é representada pela Equação 6. Para esta equação, $A(C)$ é a altura da parede (mm) e C é o número da camada. O coeficiente angular é a espessura da camada em mm. Portanto, a partir da quarta camada, a espessura da camada no meio da parede permanece constante e igual a 0,34 mm.

$$A(C) = 0,34 \times C + 2,05 \quad R^2 = 0,99836 \quad (6)$$

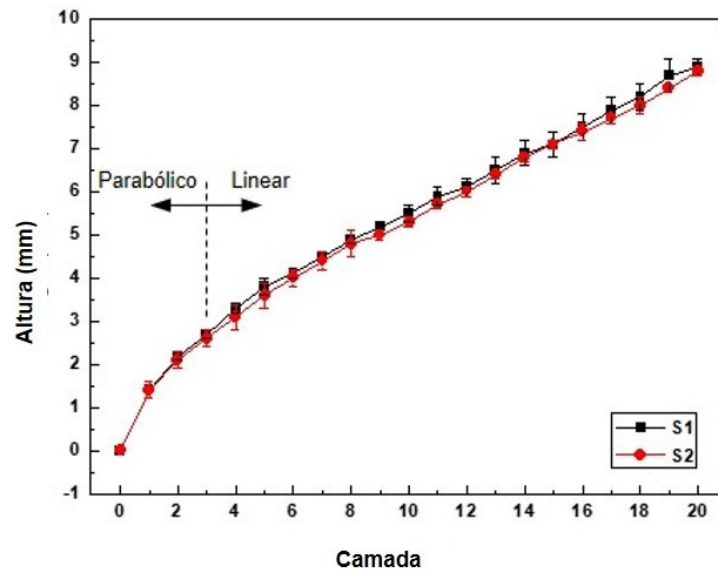


Figura 92: Gráfico de altura versus número de camadas

Os valores e os gráficos de Eficiência de Deposição (ED) para as paredes de aço são apresentados na Tabela 14 e na Figura 93, respectivamente. Quando a oscilação magnética do arco elétrico foi aplicada, ED aumentou em 9%.

Tabela 14: ED para as paredes de aço

Amostra	ED Média (%)	ED Desvio Padrão (%)
S1	61	2
S2	67	3

4.2.2. Paredes de Titânio

As macrografias da seção transversal das paredes de titânio produzidas na Etapa 2 são mostradas na Figura 94 e os valores de LTP, LEF, ATP e ED são apresentados na Tabela 15. Quando a oscilação magnética do arco elétrico foi aplicada, a largura diminuiu como esperado. Ao comparar T2, T3 e T4 com T1, LTP diminuiu em 6%, 8% e 7%, respectivamente, e LEP diminuiu em 3%, 15% e 16%, respectivamente. Ao contrário das paredes de aço, as paredes de titânio cresceram em altura quando a oscilação magnética do arco elétrico foi aplicada. Comparando T2, T3 e T4 com T1, ATP aumentou em 9%, 14% e 18%, respectivamente.

Provavelmente, um dos fatores que influenciou nessa diferença de comportamento entre as paredes de aço e titânio foi a condição de alimentação de arame. Para as paredes de aço, que foram fabricadas com alimentação de arame pulsada (Figura 52c), de início, o material de adição era depositado enquanto o arco recuava e, depois, espalhado sobre a superfície da parede enquanto o arco avançava. Ao espalhar-se, a poça de fusão se tornava mais fina e alongada, mas sem ter ganho de espessura, por não haver adição de material. Para as paredes de titânio, que foram fabricadas com alimentação de arame contínua (Figura 52d), no movimento de avanço do arco, a poça de fusão também se espalhava sobre a superfície da parede, tornando-se mais fina e alongada, porém tendo ganho de espessura, já que material continuava sendo adicionado. As propriedades físicas de ambos os materiais também podem ter influenciado.

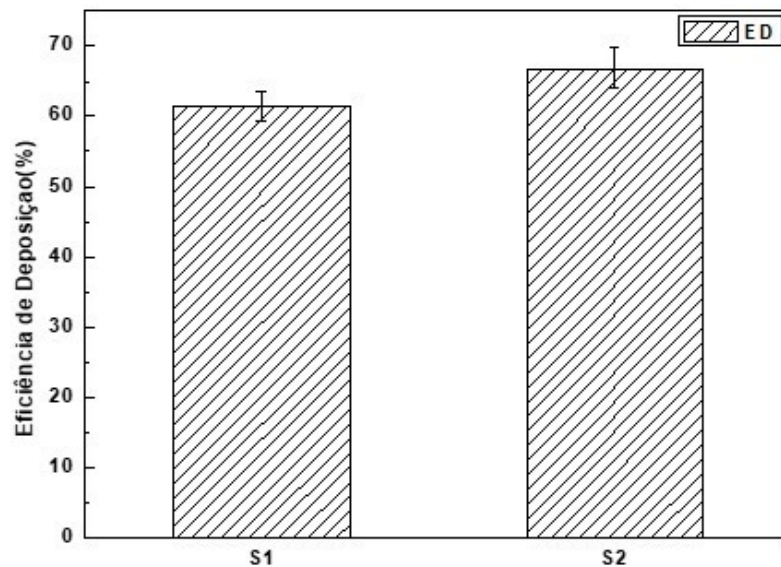


Figura 93: ED para as paredes de aço.

Entre as paredes produzidas com oscilação magnética (T2, T3 e T4), a eficiência de deposição aumentou somente para T2. Comparando T2 com T1, ED aumentou em 2% e comparando T3 e T4 com T1, ED diminuiu em 8% e 6%, respectivamente. Diferentemente para T2, ED diminuiu para T3 e T4 porque LEP diminuiu muito mais para T3 e T4 do que para T2, e LTP diminuiu aproximadamente o mesmo para T2, T3 e T4. Como resultado, as áreas B e C (Figura 14) são maiores para T3 e T4 do que para T2, o que significa que mais material será removido por usinagem de T3 e T4 do que de T2 durante a fase de acabamento superficial. Visto que LEP corresponde a largura das camadas inferiores, a solução é aplicar a oscilação magnética do arco elétrico depois que as primeiras camadas estiverem concluídas. Uma vez que

a transferência de calor por condução da poça para o substrato é mais eficiente no início do que no final da fabricação da parede, para as primeiras camadas depositadas, o fenômeno de transbordamento da poça de fusão ocorre com baixa intensidade, o que torna dispensável qualquer medida de controle no início da construção da parede. Ao aplicar a oscilação magnética desde a deposição da primeira camada, a largura da base da parede se torna mais fina do que o necessário.

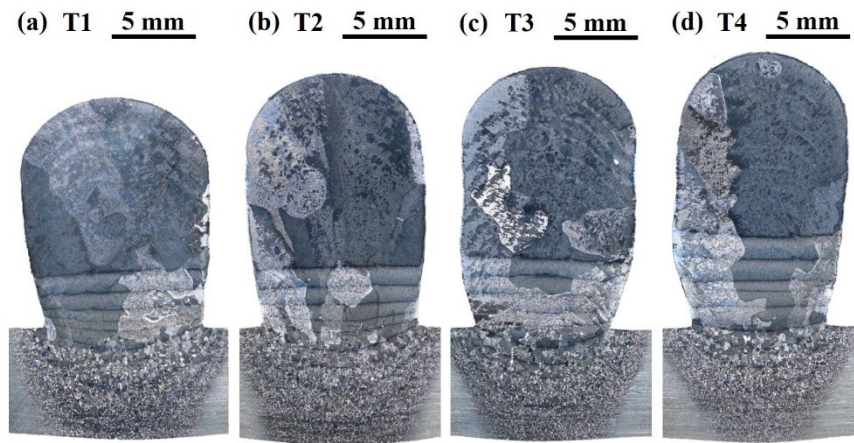


Figura 94: Macrografias das paredes de titânio produzidas na Etapa 2. (a) Sem oscilação magnética – T1. (b) Com oscilação magnética longitudinal 1 Hz – T2. (c) Com oscilação magnética longitudinal 10 Hz – T3. (d) Com oscilação magnética circular 5 Hz – T4

Tabela 15: Parâmetros geométricos das paredes de titânio produzidas na Etapa 2.

Material	Amostra	LTP (mm)	LEF (mm)	ATP (mm)	ED (%)
Titânio	T1	11,0	9,1	13,2	90
	T2	10,3	8,9	14,4	91
	T3	10,1	7,7	15,0	83
	T4	10,2	7,7	15,6	84

As larguras e as alturas totais das regiões extremas de cada parede de titânio produzida na Etapa 2 são mostradas nas Figuras 95 e 96, respectivamente. As variações de altura e largura ao longo do comprimento das paredes de titânio não são expressivas como aquelas verificadas para as paredes de aço, possivelmente uma das causas é porque foram depositadas menos camadas. Depositando-se mais camadas o erro geométrico deve se tornar mais nítido. Apesar disso, para as paredes fabricadas sob as condições de oscilação T1 e T2, há uma leve tendência do início ser mais largo que o final.

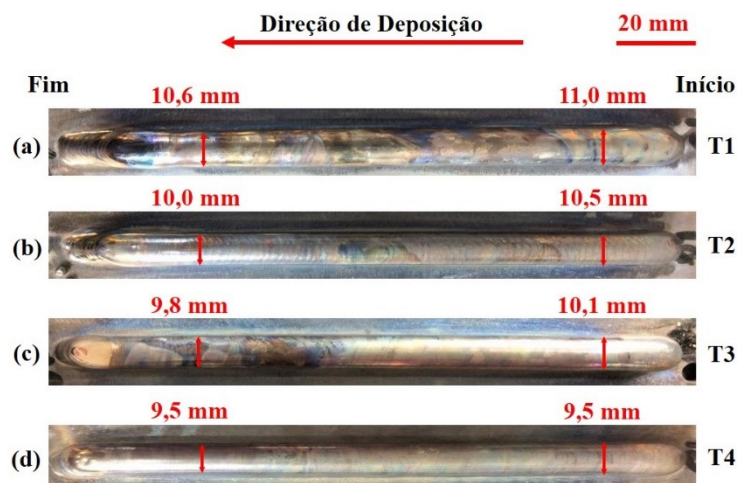


Figura 95: Larguras totais das regiões extremas das paredes de titânio produzidas na Etapa 2. (a) Sem oscilação magnética – T1. (b) Com oscilação magnética longitudinal 1 Hz – T2. (c) Com oscilação magnética longitudinal 10 Hz – T3. (d) Com oscilação magnética circular 5 Hz – T4

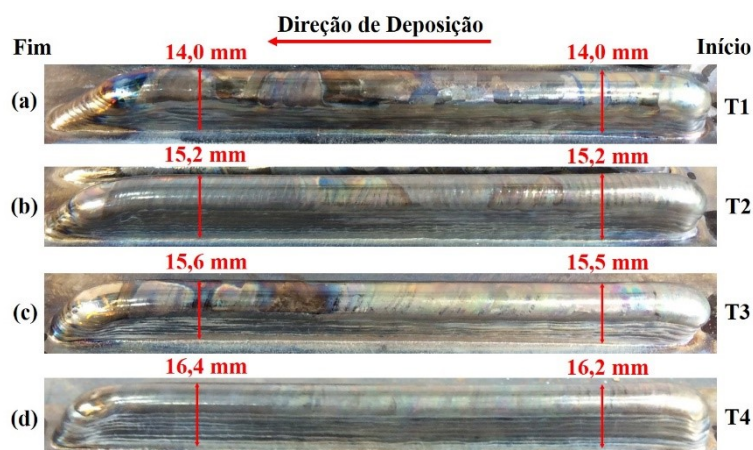


Figura 96: Alturas totais das regiões extremas das paredes de titânio produzidas na Etapa 2. (a) Sem oscilação magnética – T1. (b) Com oscilação magnética longitudinal 1 Hz – T2. (c) Com oscilação magnética longitudinal 10 Hz – T3. (d) Com oscilação magnética circular 5 Hz – T4. As paredes têm 12 camadas cada e as fotos foram tiradas em perspectiva para tentar evidenciar as camadas.

4.2.3. Influência das Propriedades Físicas dos Materiais no Fenômeno de Transbordamento da Poça de Fusão

O problema do transbordamento da poça de fusão ocorre principalmente por causa do calor acumulado e da ação da gravidade, cujas intensidades com que afetam a geometria da parede dependem das propriedades físicas do material. Se comparar duas paredes multicamadas de passe único produzidas com o mesmo número de camadas, a mesma quantidade de energia

e o mesmo volume de material por camada depositada, mas feitas de materiais diferentes, será verificado que o colapso de metal fundido afeta a geometria das duas peças de maneiras distintas, sendo mais suave para um material e mais agressivo para o outro. Na Tabela 16, encontram-se algumas propriedades do aço com baixo teor de carbono e da liga de titânio Ti6Al4V, que foram os materiais utilizados nesse trabalho. Verifica-se que o aço é mais denso do que o titânio, o que indica que a força da gravidade é mais prejudicial para a parede de aço. À temperatura ambiente, a condutividade térmica do aço é maior do que a do titânio e, portanto, o acúmulo de calor é maior na parede de titânio. Em relação ao calor específico, nota-se que para aumentar a temperatura do titânio, precisa-se de mais energia, isso porque o calor específico do aço é o menor entre os dois materiais. Quanto maior o ponto de fusão, mais rápido o material irá se solidificar e evitar o transbordamento, assim, nesse quesito, o titânio está em vantagem em relação ao aço, já que possui ponto de fusão maior. Ao comparar a resistividade elétrica desses dois materiais, conclui-se que a produção de calor por efeito joule é maior no titânio do que no aço, já que o titânio tem maior resistividade elétrica. Com base nesta breve análise e considerando que cada propriedade física tem a mesma importância no problema, verifica-se que o titânio apresenta maior resistência contra o transbordamento da poça de fusão do que o aço, visto que dentre as cinco propriedades, este se beneficia em três, sendo elas: densidade, calor específico e ponto de fusão.

Tabela 16: Propriedades físicas do aço com baixo teor de carbono e do titânio

Propriedades Físicas	Aço 1020	Titânio Ti6Al4V
Densidade (g/cm ³)	7,85	4,43
Condutividade Térmica (W/m·K)	51,9	6,7
Calor Específico (J/Kg·K)	486	610
Ponto de Fusão (°C)	1515	1668
Resistividade Elétrica ($\Omega \cdot m$)	$1,60 \times 10^{-7}$	$17,1 \times 10^{-7}$

Fonte: Callister Jr., 2018

4.3. Estabilidade do Processo

Uma vez que a geometria da parede sofre alteração quando a oscilação magnética é aplicada e as dimensões da camada depositada dependem do formato da poça de fusão, os efeitos da oscilação magnética do arco elétrico nos elementos que afetam o metal fundido, tais

como as características do arco, modo de transferência metálica, velocidade de solidificação e o fluxo de metal líquido, foram investigados.

4.3.1. Características do Arco Elétrico

O comportamento do arco elétrico para as condições de oscilação T1, T2, T3 e T4 pode ser visto na Figura 97. Quando a oscilação magnética não foi aplicada (T1 – Figura 97a), o arco permaneceu estático e estável. Entretanto, ao empregar a oscilação magnética (T2, T3 e T4 – Figuras 97b, 97c e 97d, respectivamente), o arco teve um comportamento dinâmico e defletiu durante a deposição da camada de solda. Em razão disso, o calor e a pressão do arco foram distribuídos sobre uma área maior, como observado por Wang et al. (2017), Wang et al. (2018) e Sun et al. (2016). A Figura 98 ilustra o aumento da área de contato do arco elétrico com a peça causado pela oscilação magnética. Verifica-se que o arco atua na maior área quando a oscilação é circular. Além disso, o comprimento de arco também sofreu alterações por causa da deflexão. No caso da oscilação longitudinal (Figuras 97b e 97c), o comprimento de arco variou periodicamente, sendo máximo quando o arco estava defletido para as posições extremas. Para oscilação circular (Figura 97d), o comprimento de arco aumentou, mas não variou durante a oscilação.

4.3.2. Transferência Metálica e Superfície da Poça de Fusão

As características do modo de transferência metálica e a deformação na superfície da poça de fusão para as condições de oscilação T1, T2, T3 e T4 podem ser vistas na Figura 99. Quando a oscilação magnética do arco elétrico não foi aplicada (T1 – Figura 99a), o processo se manteve estável, o modo de transferência metálica foi por contato ininterrupto e a deformação na superfície da poça de fusão por baixo do arco elétrico estava nítida. Para T2 (Figura 99b), a perturbação no modo de transferência metálica ocorria apenas quando o arco elétrico defletia para frente, ou seja, no sentido de deposição do cordão de solda, e, como consequência, a largura da ponte líquida diminuía à medida que o arco elétrico se aproximava do arame. Caso a amplitude de oscilação fosse maior, o modo de transferência metálica alteraria de contato ininterrupto para contato interrompido. Para T3 (Figura 99c), o processo permaneceu estável, o modo de transferência metálica foi por contato ininterrupto e a deformação da poça

de fusão foi menor do que para T1. Para T4 (Figura 99d), a perturbação na transferência metálica ocorria quando o arco se aproximava do arame e, como resultado, a largura da ponte líquida diminuía. A superfície da poça de fusão também apresentou menor deformação quando comparado com T1. Por causa do movimento circular do arco, o meio da superfície da poça de fusão permanece livre da pressão do arco (Figura 98). Por fim, observou-se que quanto maior a frequência de oscilação mais estável foi a transferência metálica. A perturbação na transferência metálica ocorre quando o arco elétrico oscila com baixa frequência e elevada amplitude.

Para a fabricação das paredes de aço, como a alimentação de arame foi pulsada, o modo da transferência metálica foi por contato interrupto. Segundo Silva et al. (2018), na alimentação contínua, assim que é estabelecido a transferência metálica por contato ininterrupto, ou seja, a formação da ponte líquida, o arame e a poça de fusão atingem um equilíbrio térmico. Já na condição pulsada, o arame se resfria ao recuar e consegue roubar mais calor da poça ao avançar. Portanto, a alimentação pulsada pode estar contribuindo para acelerar a solidificação da poça de fusão e, portanto, minimizar o fenômeno de transbordamento.

4.3.3. Poça de Fusão

O comportamento poça de fusão foi diferente para cada condição de oscilação adotada. Quando a oscilação magnética não foi aplicada (T1), a poça de fusão permaneceu estável e nenhuma perturbação foi observada. Já quando a oscilação magnética foi aplicada (T2, T3 e T4), o comportamento dinâmico do arco elétrico possivelmente causou algum distúrbio no metal fundido e aumentou as convecções no interior da poça de fusão. Segundo Janakiram et al. (1999), as forças magnéticas externas amplificam as forças de Lorentz na poça de fusão e aumentam as convecções no metal fundido. Na literatura, esse efeito é chamado de agitação eletromagnética (“*Electromagnetic Stirring*”). De acordo com Ou et al. (2018), essa agitação mistura metal líquido quente e frio, o que ajuda a poça de fusão a se resfriar e a se solidificar mais rápido. Para T3 e T4, em resposta à alta frequência de oscilação, 10 e 5 Hz, respectivamente, a poça de fusão se mostrou estável e as variações na superfície foram devidas às mudanças de posição do arco elétrico durante a deposição da camada de solda. Uma vez que T2 esteve sujeito a baixas frequências de oscilação, o movimento da poça de fusão durante a deposição da camada de solda foi mais evidente e seu comportamento será explicado adiante.

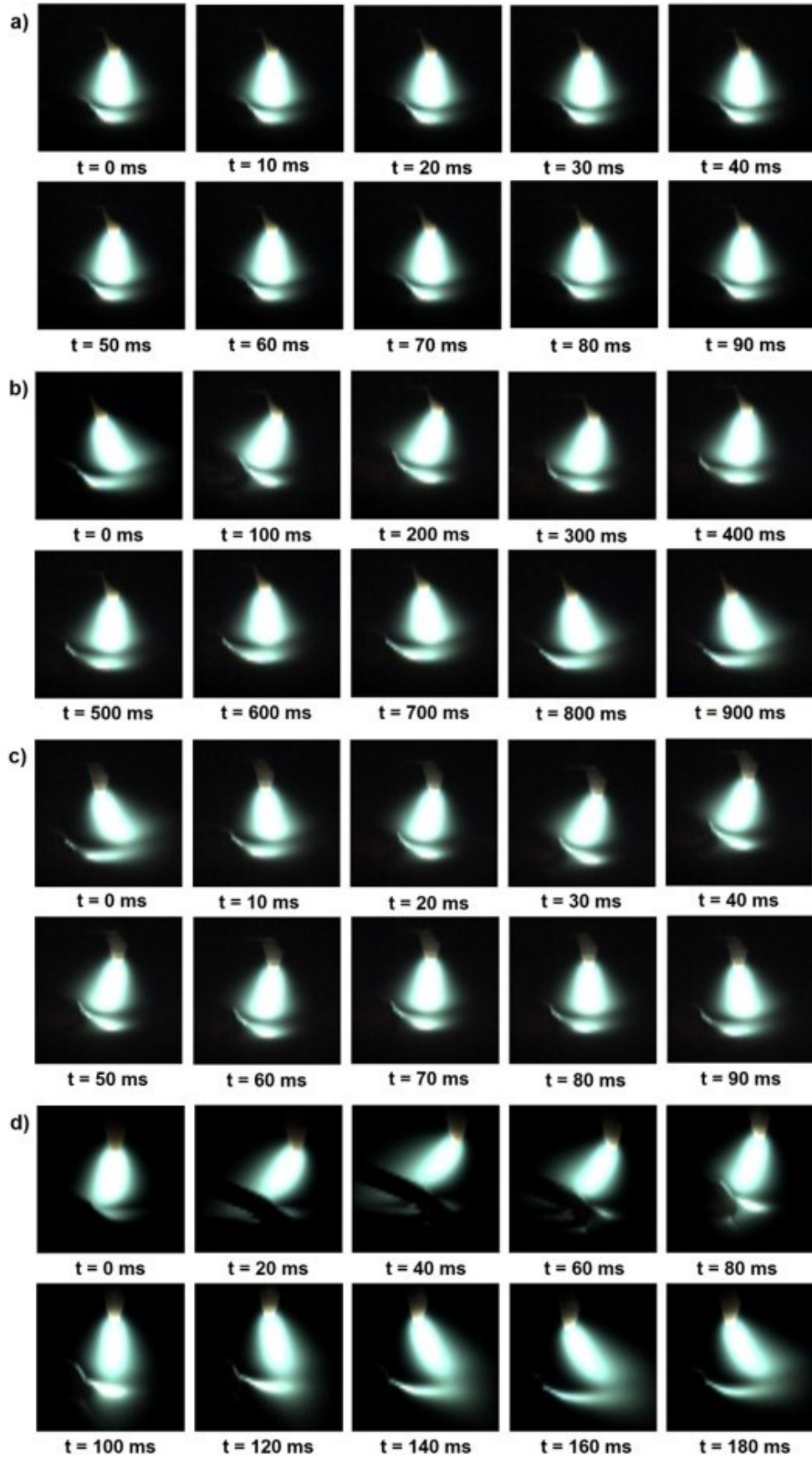


Figura 97: Comportamento do arco elétrico para (a) T1, (b) T2, (c) T3 e (d) T4

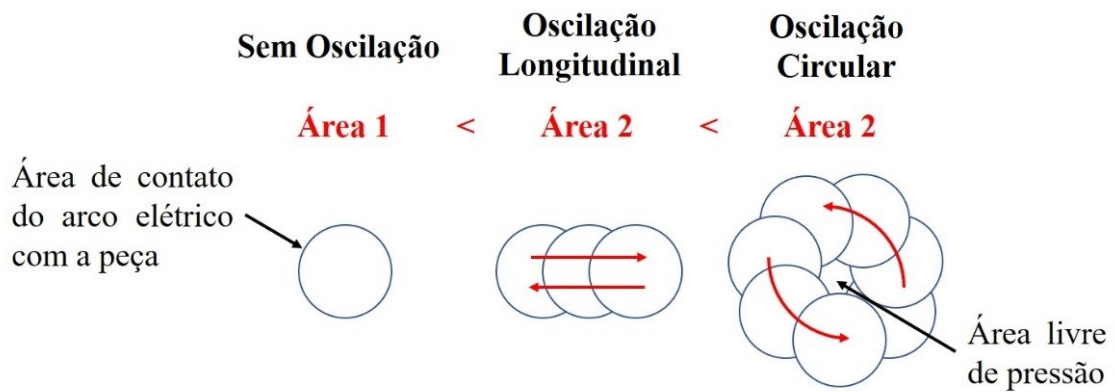


Figura 98: Representação esquemática da área de contato do arco elétrico com a peça em função do padrão de oscilação adotado



Figura 99: Comportamento do modo de transferência metálica para (a) T1, (b) T2, (c) T3 e (d) T4

Na Figura 100, exibe-se o comportamento da poça de fusão sem (Figuras 100a e c) e com (Figuras 100b e d) oscilação longitudinal (em baixa frequência). O estudo apresentado por

Kou e Le (1985) sugere que quando o arco deflete para frente, no sentido de deposição do cordão de solda (Figura 100b), a velocidade de soldagem aumenta. A velocidade de soldagem resultante (w) é a soma da velocidade de deslocamento da tocha de soldagem (v) e a velocidade com que o arco deflete (u). Como consequência, a poça de fusão se torna mais alongada e fina, conforme Bonaccorso et al. (2011), e o metal líquido flui direto para trás, em sentido contrário ao de deposição do cordão de solda (Figura 100d), ao invés de fluir primeiramente para os lados (Figura 100c), como descrito por Wang et al. (2018). Além disso, a velocidade máxima de solidificação da poça de fusão ($R_{máx}$) aumenta, já que $R_{máx}$ é igual a velocidade de soldagem.

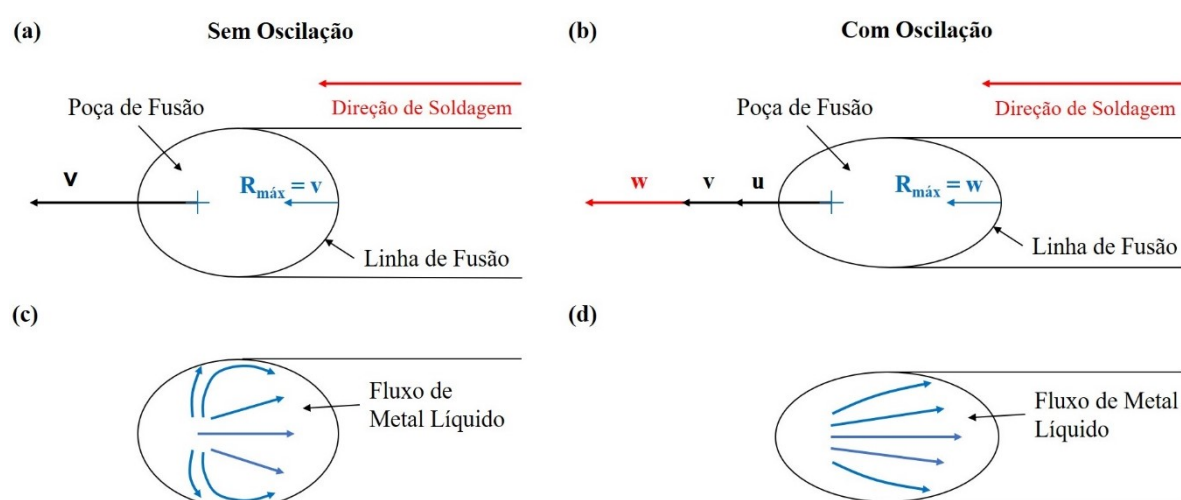


Figura 100: Influência da oscilação longitudinal (em baixa frequência) na velocidade de soldagem e fluxo de metal líquido

Quando o arco elétrico defletia para trás, ou seja, em sentido contrário ao de deposição do cordão de solda, o movimento era lento (Figura 52a) e, portanto, a influência na velocidade de soldagem era menor. Além disso, para a fabricação das paredes de aço, a adição de arame ocorria apenas nesse instante (Figura 52c). Assim, a introdução de arame frio na poça de fusão ajudava a remover calor e a acelerar a solidificação do metal fundido, o que minimizava o transbordamento durante esse movimento de recuo do arco. De acordo com Hejripour et al. (2018), na superfície da poça de fusão, há dois fluxos de metal fundido, um em direção ao arame e outro em direção a borda da poça de fusão (Figura 101). Para a fabricação das paredes de aço, o fluxo em direção ao arame surgia apenas quando o arco elétrico recuava (de 0 a $-A$, Figura 52a), pois a adição de arame acontecia apenas neste momento. Nesse instante, o fluxo de metal fundido era minimizado nas bordas, o que contribuía para diminuir o transbordamento da poça de fusão, já que parte do metal fundido fluía em direção ao arame.

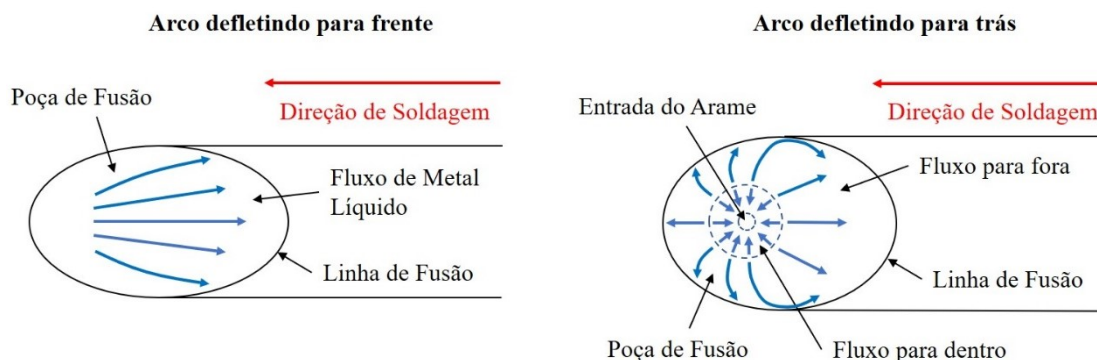


Figura 101: Diagrama esquemático mostrado o fluxo de metal fundido na poça de fusão quando o arco elétrico defletia no mesmo sentido e em sentido contrário ao de soldagem durante a fabricação das paredes de aço

Nas Figuras 102 e 103, exibem-se imagens e representações esquemáticas, respectivamente, da poça de fusão quando o arco está totalmente defletido no mesmo sentido (102a e 103a) e em sentido contrário ao de deposição do cordão de solda (102b e 103b). Visto que a poça de fusão acompanha o movimento oscilatório do arco elétrico, quando este deflete no sentido de deposição, a poça de fusão avança em direção a uma região mais fria sobre a superfície da camada depositada anteriormente, o que ajuda o metal fundido a perder calor e a se solidificar mais rapidamente. Quando o arco elétrico deflete em sentido contrário ao de deposição, a poça de fusão recua, favorecendo o transbordamento, mas deixa a sua frente uma porção já solidificada. Assim, ao avançar novamente, a poça de fusão é suspensa por essa porção sólida, o que contribui com o ganho de altura da parede.

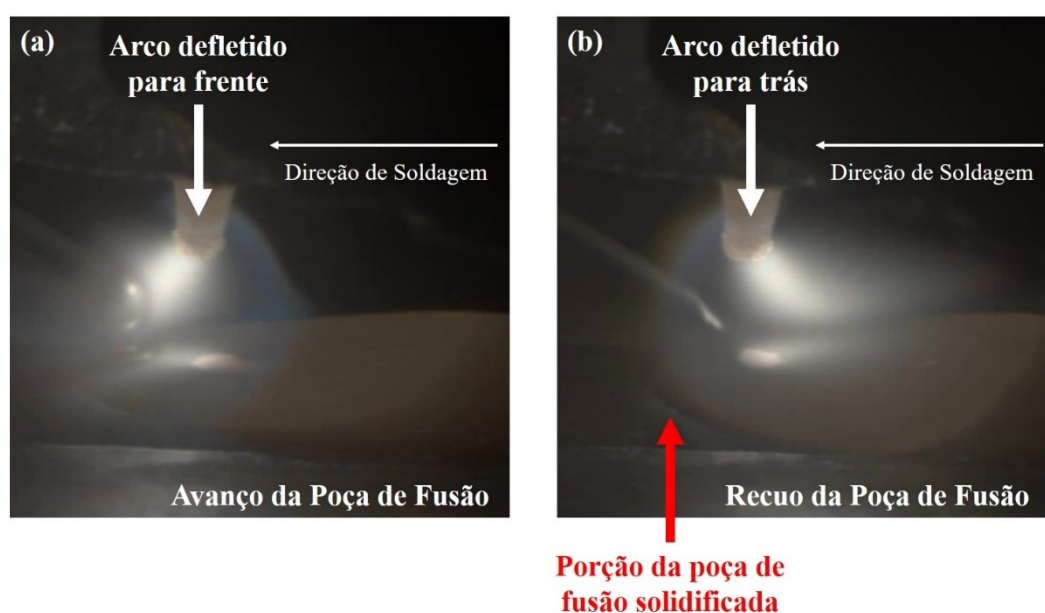


Figura 102: Movimentos de (a) avanço e (b) recuo da poça de fusão

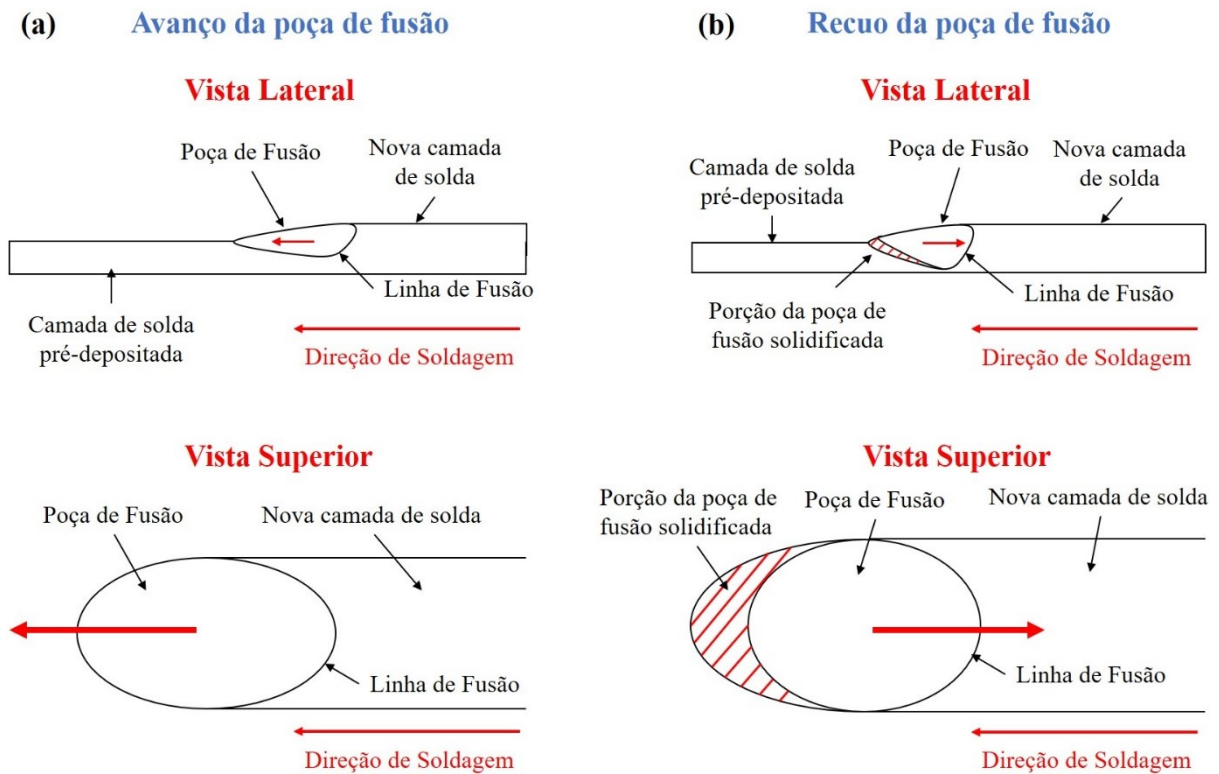


Figura 103: Diagrama esquemático dos movimentos de (a) avanço e (b) recuo da poça de fusão

4.4. Forças na Poça de Fusão

Com base nos estudos de Xiong et al. (2017), Li et al. (2018), Zhang et al. (2019) e Li et al. (2020), as principais forças que agem na poça de fusão durante a deposição da camada de solda na manufatura aditiva baseada nos processos de soldagem a arco elétrico são F_g (Força da Gravidade), F_a (Força do Arco), F_d (Força de Impacto das Gotículas Metálicas), F_σ (Força de Tensão Superficial), F_b (Força de Empuxo), F_η (Força de Atrito Viscoso) e F_N (Força de Reação Normal à Superfície). Considerando estas forças como concentradas e agindo no centro de gravidade da poça de fusão, um modelo simplificado é obtido e apresentado na Figura 104. A Força Resultante (F_R), calculada pela Equação 7, faz com que o metal fundido flua pelas laterais da parede. Com base nessa análise, o problema do transbordamento da poça de fusão pode ser minimizado aumentando as forças de contenção (F_σ , F_b , F_N e F_η) e diminuindo as forças de colapso (F_g , F_a e F_d).

$$F_R = F_g + F_a + F_d - (F_\sigma + F_b + F_N + F_\eta) \quad (7)$$

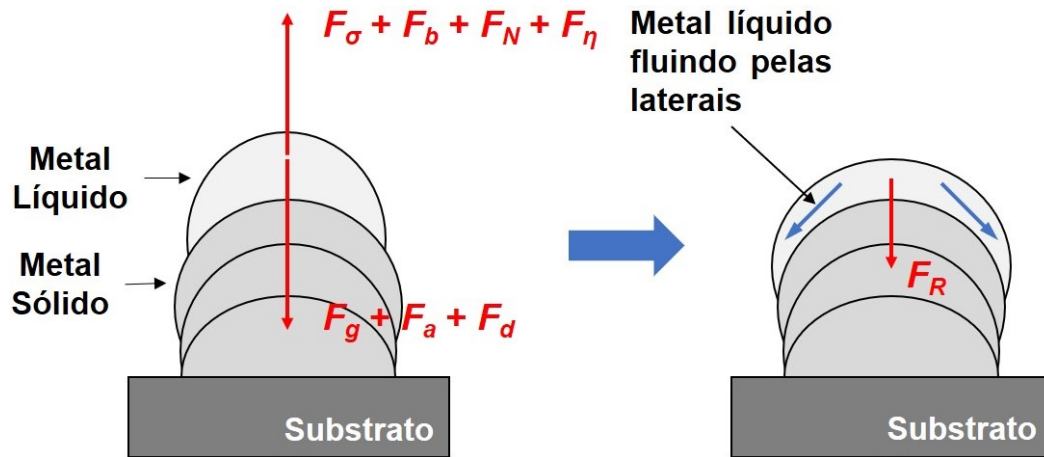


Figura 104: As forças que agem na poça de fusão e o fenômeno de transbordamento

Contudo, este modelo de forças não considera os efeitos da oscilação magnética no comportamento do arco elétrico, da poça de fusão e da transferência metálica durante o processo de deposição. Assim, baseando-se nos resultados encontrados para a geometria da parede, nas observações do processo feitas a partir das filmagens e em trabalhos encontrados na literatura, um novo modelo é sugerido. Primeiramente, será abordada a influência da oscilação magnética nas forças de colapso (F_a , F_g e F_d) e, por fim, o modelo proposto será apresentado.

4.4.1. Influência da Oscilação Magnética do Arco Elétrico na Força do Arco

Conforme Li et al. (2020), Li et al. (2019) e Su e Chen (2019), ao inclinar a tocha de soldagem, altera-se a direção do jato de plasma e, conseqüentemente, de F_a . A mesma análise é sugerida para explicar a influência da oscilação magnética do arco em F_a , visto que ao defletir o arco elétrico por força magnética também se altera a direção do jato de plasma, como mostrado na Figura 105. Assim, F_a pode ser decomposta em uma componente vertical (F_{a_y}), responsável pelo colapso de metal fundido e pela penetração da solda, e outra horizontal (F_{a_x}), responsável por empurrar a poça de fusão no sentido da deflexão do arco. Tais componentes podem ser calculadas pelas Equações 8 e 9.

$$F_{a_y} = F_a \times \cos \theta \quad (8)$$

$$F_{a_x} = F_a \times \sin \theta \quad (9)$$

onde θ é o ângulo de inclinação.

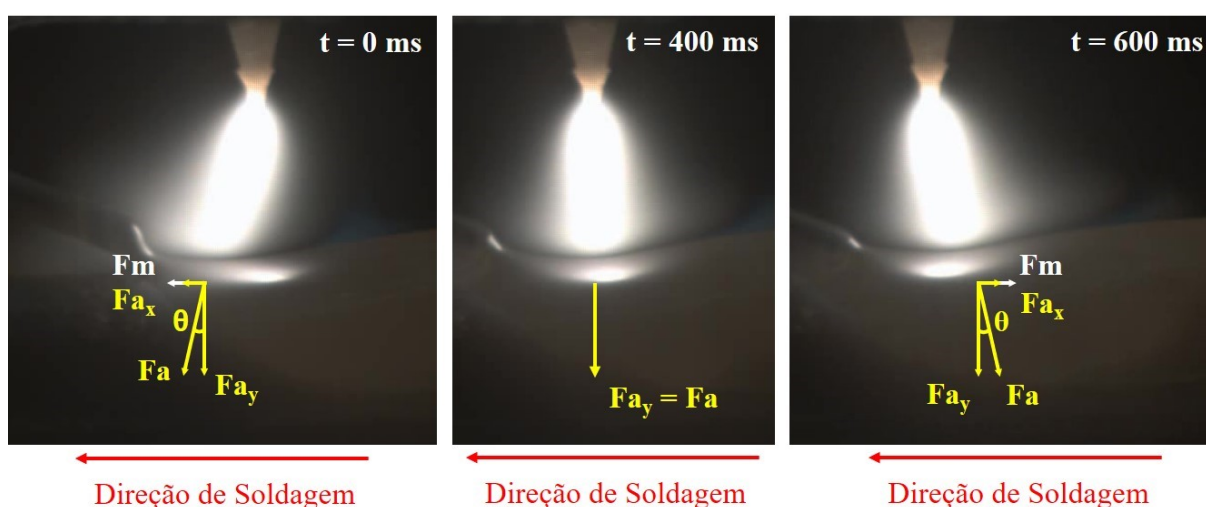


Figura 105: Variação da direção de F_a durante a oscilação longitudinal

O valor de F_{a_y} se modifica durante o ciclo de oscilação do arco elétrico. Para a oscilação longitudinal, F_{a_y} varia de um valor mínimo, quando o arco está defletido ao máximo (θ máximo), até o valor de F_a , quando o arco não está defletido (θ nulo). Para a oscilação circular, F_{a_y} é menor que F_a e se mantém constante durante a oscilação. Assim, o valor médio de F_{a_y} durante a oscilação é sempre menor que o valor de F_a . Portanto, a força do arco sobre a poça de fusão é aliviada quando a oscilação magnética do arco elétrico é aplicada, minimizando, assim, o transbordamento da poça de fusão.

O comprimento de arco e , conseqüentemente, a tensão de soldagem sofrem alterações durante o processo quando a oscilação magnética do arco elétrico é aplicada. Quando o arco elétrico está defletido, ele apresenta um maior comprimento e , portanto, uma maior tensão de soldagem. Kang e Na (2002) utilizaram a oscilação magnética na soldagem GTAW e obtiveram o gráfico da variação de tensão com a deflexão do arco, conforme apresentado na Figura 106. Observa-se que a diferença entre a tensão máxima (arco totalmente defletido para esquerda ou direita) e tensão mínima (arco não-defletido no centro), para as condições adotadas, foi de 2V. Segundo Fan e Shi (1996) a distribuição da pressão do arco é afetada significativamente pelo comprimento de arco, a pressão máxima aumenta com a diminuição do comprimento de arco, como exibido na Figura 107. Portanto, com base nessa análise, o arco elétrico tem sua pressão reduzida quando defletido.

De acordo com Wang et al. (2017), a distribuição de pressão se torna menos concentrada por causa do movimento oscilatório do arco de soldagem e a máxima pressão do arco sobre a poça de fusão diminui (Figuras 40 e 41).

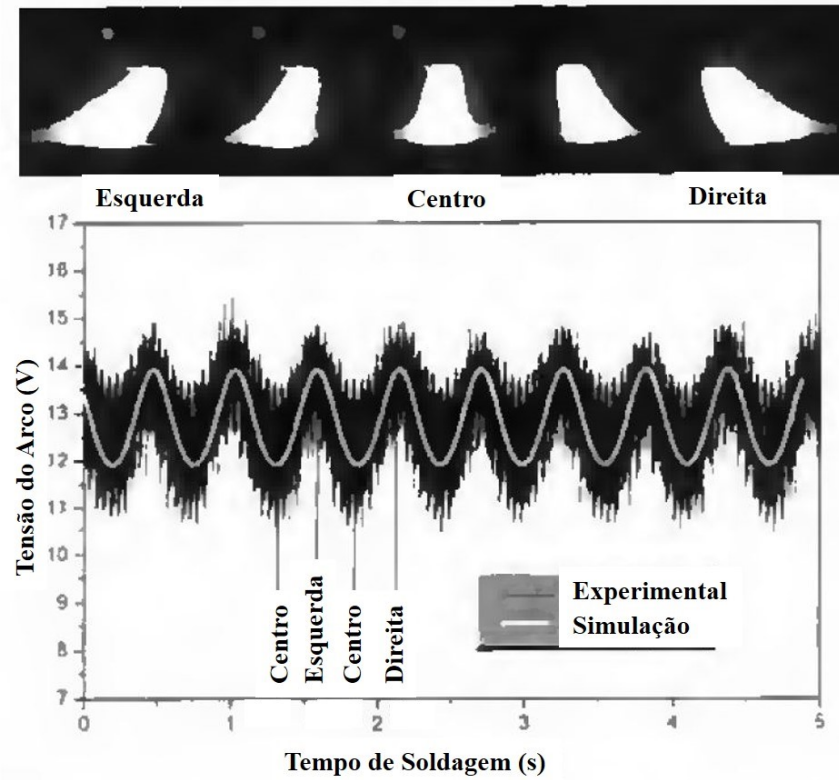


Figura 106: Variação do comprimento de arco com a oscilação magnética (adaptado pelo autor)

Fonte: Kang e Na (2002)

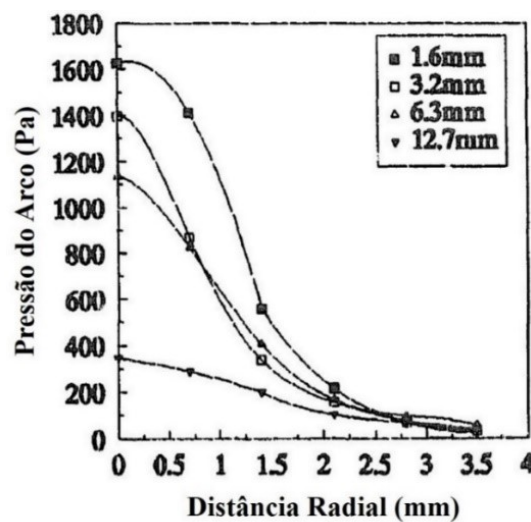


Figura 107: Distribuição de pressão do arco em função do comprimento do arco (adaptado pelo autor)

Fonte: Fan e Shi (1996)

A força adicional eletromagnética (F_m) que surge na poça de fusão quando a oscilação magnética do arco elétrico é aplicada durante o processo (Wang et al., 2018) também é apresentada na Figura 105. Os movimentos de avanço e recuo da poça de fusão observados e descritos anteriormente para a oscilação longitudinal com frequência de 1 Hz (Figuras 101 e 103) são causados por F_m e F_{ax} .

4.4.2. Influência da Oscilação Magnética do Arco Elétrico na Força da Gravidade

Segundo Zhao et al. (2011), algumas das camadas pré-depositadas de uma parede fina em construção são refundidas durante a deposição de uma nova camada e, assim, o volume e o peso da poça de fusão aumentam com o crescimento da parede. De acordo com Xiong et al. (2015), isso ocorre porque a penetração da solda é profunda o suficiente para afetar as camadas anteriores. Conforme apresentado na Figura 108, para as paredes de titânio produzidas na Etapa 2, quando a oscilação magnética do arco elétrico foi empregada, a largura da ZTA (Zona Termicamente Afetada) na parte inferior do substrato reduziu, o que confirma que a penetração da solda tende a diminuir com a aplicação da oscilação magnética. Sun et al. (2016) e Wang et al. (2018) já haviam observado que a profundidade de penetração diminui quando a oscilação magnética é utilizada na soldagem de junta com chanfro estreito (Figura 42 e 43). Schwedersky et al. (2017) também verificou isso na soldagem autógena GTAW com oscilação mecânica longitudinal do arco elétrico. Com auxílio de uma câmera termográfica, os autores obtiveram as zonas térmicas do lado oposto da chapa para as condições sem (Figura 109a) e com (Figura 109b) oscilação e verificaram que a área da zona térmica da soldagem com oscilação é menor que a da soldagem sem oscilação, o que indica que o calor tende a penetrar menos na chapa na soldagem com oscilação longitudinal. Como mostrado na Figura 110, para as paredes de titânio produzidas na Etapa 3, quando a oscilação magnética do arco elétrico foi empregada durante a deposição da camada de solda, a altura e o volume da poça de fusão diminuíram. Consequentemente, F_g também diminuiu, uma vez que essa força é igual ao produto do volume pelo peso específico do metal líquido. Portanto, quando a oscilação magnética do arco elétrico é aplicada no processo de construção da parede, a profundidade de penetração da solda diminui, menos camadas pré-depositadas são afetadas, a poça de fusão se torna menos volumosa e o problema do transbordamento de metal fundido é minimizado.

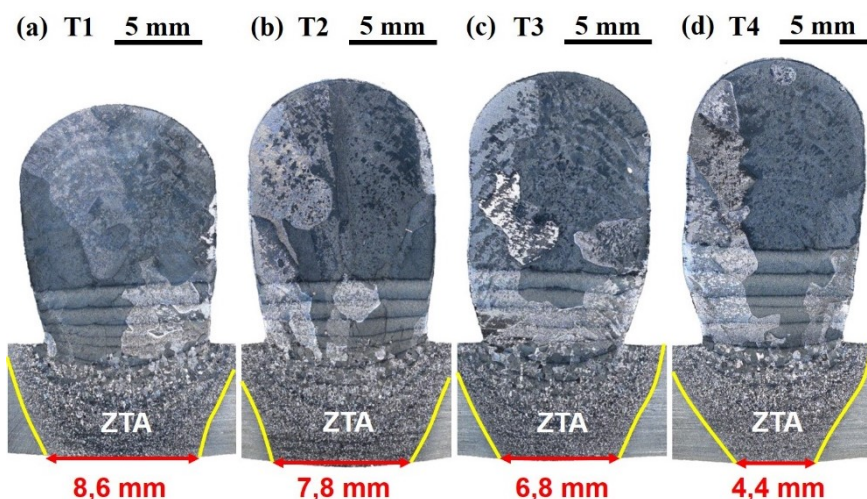


Figura 108: Largura da ZTA na base do substrato das paredes de titânio produzidas na Etapa 2. (a) Sem oscilação magnética – T1. (b) Com oscilação magnética longitudinal 1 Hz – T2. (c) Com oscilação magnética longitudinal 10 Hz – T3. (d) Com oscilação magnética circular 5 Hz – T4

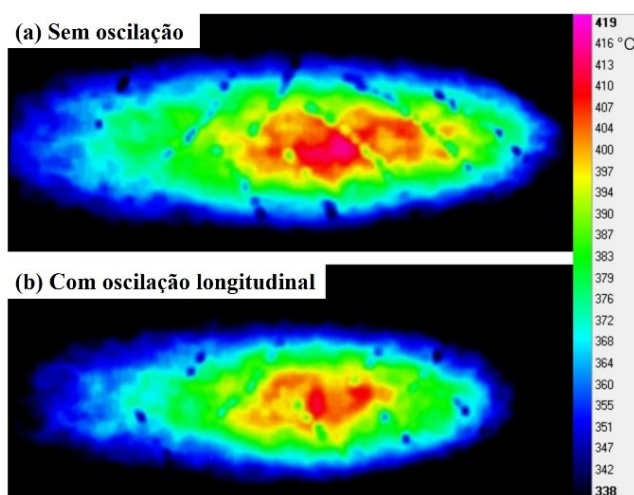


Figura 109: Zonas térmicas do lado oposto da chapa para as condições (a) sem e (b) com oscilação mecânica longitudinal do arco elétrico (adaptado pelo autor)

Fonte: Schwedersky et al. (2017)

A profundidade de penetração da solda diminui porque a oscilação magnética desconcentra o calor do arco na chapa ou, em outras palavras, diminui a potência específica do processo de soldagem, como observado por Yamamoto et al. (2007). Segundo Kou e Le (1983), a distribuição de densidade de potência influencia na penetração da solda, como mostrado na Figura 111. Quanto maior for a concentração de energia, maior será a penetração da solda. A diminuição da potência específica reduz a eficiência de fusão da fonte de calor, que no caso é o arco elétrico (Kou, 2003).

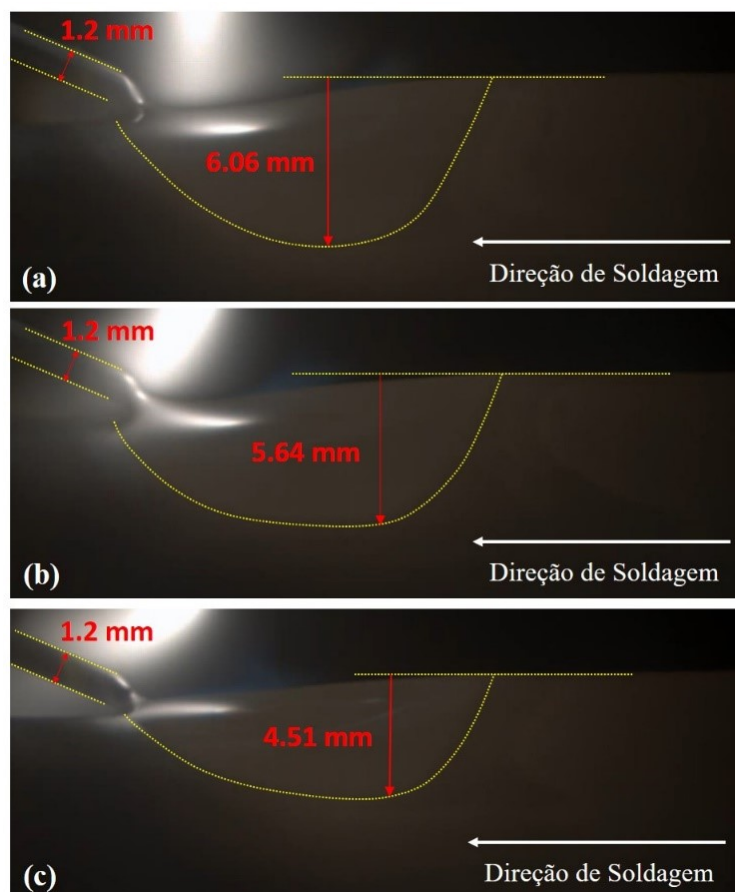


Figura 110: Altura da poça de fusão durante a deposição da 6ª camada na Etapa 3. (a) Sem oscilação magnética – T5. (b) Com oscilação magnética longitudinal 10 Hz – T6 . (c) com oscilação magnética circular 10 Hz – T7

A relação entre a potência específica e a penetração da solda também pode ser explicada pelo modelo matemático apresentado por Nguyen (2004). Considerando o arco elétrico de soldagem como uma fonte de calor plana instantânea, a temperatura (T) de qualquer ponto na peça localizado a uma distância z da superfície pode ser calculada pela Equação 10 (Nguyen, 2004):

$$T - T_0 = (q/\rho c \sqrt{\pi a t}) \exp(-z^2/4at) \quad (10)$$

onde q é a potência específica, a é a difusividade térmica do material da peça, ρ é a densidade, c é o calor específico do material, t é o tempo e T_0 é a temperatura inicial. De acordo com essa equação, mantendo-se todos os parâmetros constante e variando-se apenas a potência específica (q), diminui-se a temperatura em um ponto qualquer na peça localizado a uma distância z da superfície. Uma vez que que profundidade de penetração corresponde a máxima distância z em

que a temperatura está acima do ponto de fusão do material, ao diminuir a potência específica e, conseqüentemente, a temperatura, a máxima distância z e a profundidade de penetração da solda também diminuem.

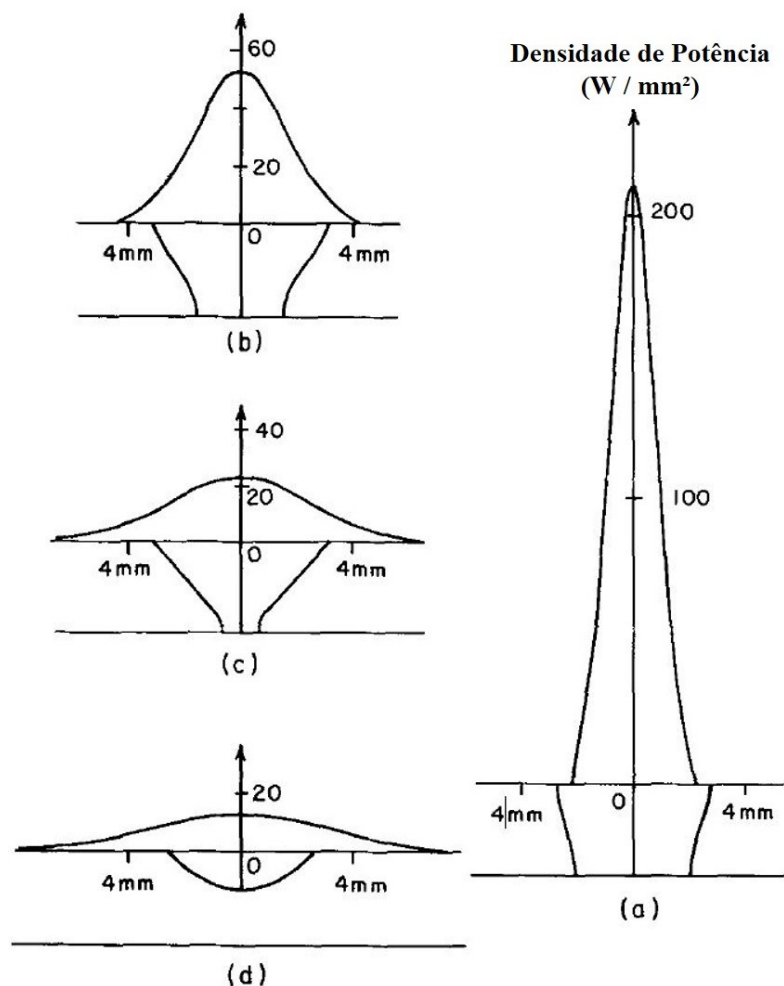


Figura 111: Influência da distribuição de densidade de potência na profundidade de penetração da solda
(adaptado pelo autor)

Fonte: Kou e Le (1983)

Com base nas medidas de largura da ZTA e altura da poça de fusão apresentadas nas Figuras 108 e 110, respectivamente, deduz-se que a menor potência específica corresponde a oscilação circular por produzir a menor profundidade de penetração. Além disso, ao comparar as larguras da ZTA das paredes T2 e T3, infere-se que quanto maior a frequência de oscilação menor a potência específica, o que coincide com as observações feitas por Corradi et al. (2015).

Além da redução da potência específica, a desconcentração da pressão do arco (Wang et al., 2017) e a diminuição da força do arco quando a oscilação magnética é aplicada também

contribuem. Wu et al. (2016) aplicaram campo magnético estático e perpendicular à direção de soldagem durante a deposição de cordões sobre chapa com o processo GMAW. Assim, o arco elétrico permaneceu defletido para frente, ou seja, no sentido de deposição do cordão de solda enquanto a camada de solda se formava. A partir de macrografias da seção transversal, verificou-se que quanto maior a intensidade do campo magnético e, conseqüentemente, a amplitude de deflexão, menor a penetração e maior a largura do cordão de solda (Figura 112). Já que a direção do jato de plasma é alterada com a deflexão do arco elétrico, a ação de “escavar” do arco e o impacto das gotículas sobre o metal fundido durante a transferência metálica enfraquecem. Como a poça de fusão se torna mais rasa, o calor é transferido na transversal, o que causa o aumento da largura do cordão. Efeito semelhante àquele observado por Su e Chen (2019) e Li et al. (2019) para a tocha inclinada (Figuras 20 e 21). O fato do meio da superfície da poça de fusão permanecer livre de pressão durante a oscilação circular (figura 98) também contribui para diminuição da penetração da solda (Figuras 108 e 110).

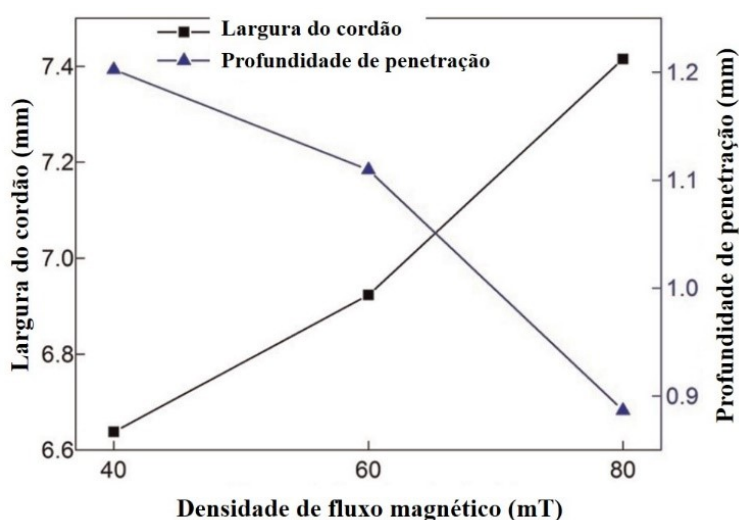


Figura 112: Influência da intensidade de campo magnética na largura e profundidade de penetração da solda (adaptado pelo autor)

Fonte: Wu et al. (2016)

4.4.3. Influência da Oscilação Magnética na Força Resultante da Transferência Metálica

Neste trabalho, a transferência metálica adotada para a construção das paredes foi por contato ininterrupto, por apresentar o comportamento mais estável durante a deposição do cordão de solda pelo processo GTAW. Neste modo de transferência, forma-se uma ponte

líquida entre o arame sólido e a poça de fusão, conforme apresentado na Figura 113a, e não há impacto de gotículas metálicas na poça de fusão, o que contribui com a redução da profundidade de penetração conforme observado por Yang et al. (2017). Portanto, a força F_d , presente nos modelos de força de Xiong et al. (2017), Li et al. (2018), Zhang et al. (2019) e Li et al. (2020) por considerar que a transferência metálica ocorre por impacto de gotículas metálicas na poça de fusão, deve ser desconsiderada do modelo de forças proposto nessa tese. Na Figura 113b, exibem-se as principais forças que atuam na ponte líquida ($F_{\sigma ap}$ e $F_{\sigma pp}$), conforme Yang et al. (2017), e as reações dessas forças no arame ($F_{\sigma' ap}$) e na poça de fusão ($F_{\sigma' pp}$). Tais forças são de tensão superficial e consistem em dois pares de ação e reação. Na interação entre o arame sólido e a poça de fusão, o par de ação e reação é composto pelas forças $F_{\sigma ap}$ e $F_{\sigma' ap}$. Já na interação entre a ponte líquida e a poça de fusão, o par de ação e reação é formado pelas forças $F_{\sigma pp}$ e $F_{\sigma' pp}$. Para o modelo de forças proposto nessa tese, deve-se considerar a força de tensão superficial $F_{\sigma' pp}$ em vez de F_d , por ser a força que atua na poça de fusão para as condições de soldagem adotadas. Nota-se que o sentido de $F_{\sigma' pp}$ é oposto ao do transbordamento e, por isso, não contribui com o problema.

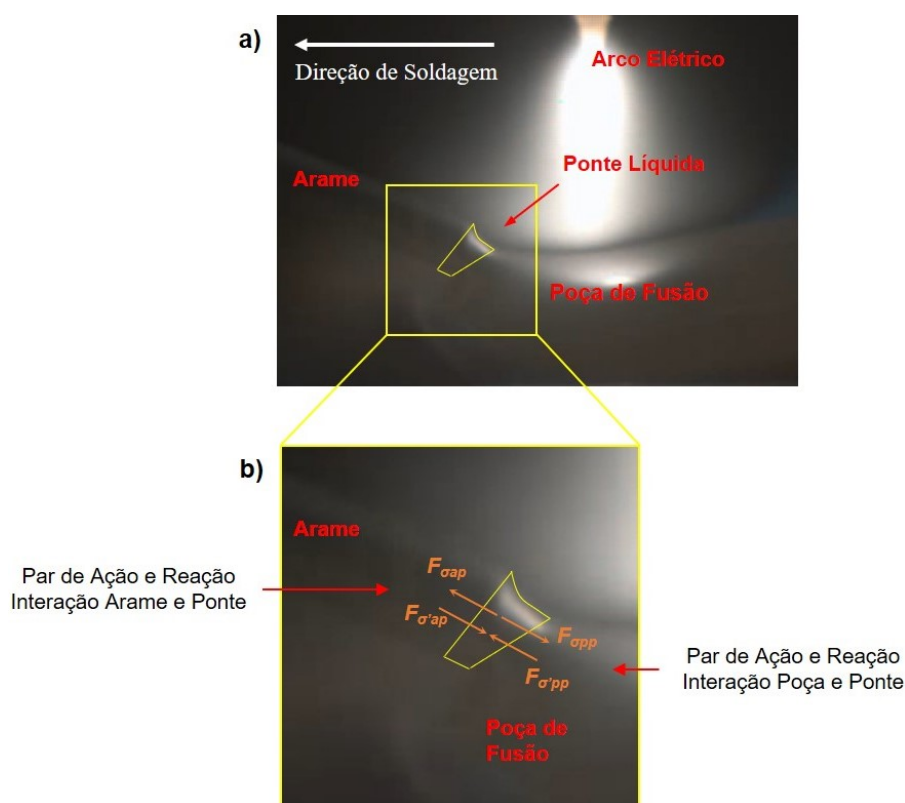


Figura 113: (a) Ponte líquida entre o arame e a poça de fusão e (b) Forças que agem na ponte líquida, no arame e na poça de fusão

Segundo Kim e Eagar (1993), o cálculo da força de tensão superficial $F_{\sigma'pp}$ é feito com a Equação 18:

$$F_{\sigma'pp} = 2\pi R_D \sigma \quad (18)$$

onde R_D é o raio da superfície de contato e σ a tensão superficial. De acordo com essa equação, a força $F_{\sigma'pp}$ enfraquece quando a largura da ponte líquida, que equivale a duas vezes R_D , diminui. Assim, quando o arco elétrico deflete em direção ao arame, causando a perturbação e diminuição da ponte líquida (Figuras 99b e d), a força $F_{\sigma'pp}$ é reduzida.

4.4.6. Modelo de Forças Proposto

Os modelos de forças propostos que consideram os efeitos das oscilações magnéticas longitudinal e circular do arco elétrico no processo de deposição são exibidos nas Figuras 114 e 115, respectivamente. Nestes modelos, as forças de contenção são: F_σ , $F_{\sigma'pp}$, F_N , F_b e F_η , e as forças de colapso são: F_g e F_{a_y} ou F_a . Para a oscilação em baixa frequência, as forças F_m e F_{a_x} são responsáveis por movimentar o metal fundido na direção de deflexão do arco elétrico, conforme descrito anteriormente. Quando o arco elétrico deflete no sentido de deposição do cordão de solda (Figura 114a), F_m e F_{a_x} aumentam a velocidade da poça de fusão, o que diminui sua largura e a leva para uma região mais fria da superfície da parede. Entretanto, quando arco deflete em sentido contrário ao de deposição do cordão de solda (Figura 114c), F_m e F_{a_x} são responsáveis por diminuir a velocidade da poça de fusão. Na ausência de deflexão do arco (Figura 114b), a força resultante não apresenta componente horizontal, o que aumenta seu poder de colapsar o metal fundido. Para a oscilação circular, as forças F_m e F_{a_x} podem direcionar o metal fundido para as laterais da parede (Figuras 115b e d), o que supostamente deveria favorecer o transbordamento da poça de fusão. Entretanto, para as condições adotadas, observou-se que o colapso de metal fundido foi minimizado com a oscilação circular. Possivelmente, porque trabalhou-se com alta frequência (5 e 10 Hz) e os efeitos da desconcentração de calor e pressão do arco elétrico sobre a poça de fusão foram maiores. Já quando as forças F_m e F_{a_x} atuam na direção de soldagem (Figuras 115a e c), o comportamento é o mesmo que aquele descrito para oscilação longitudinal. Além disso, para a oscilação circular, não existe nenhuma condição em que o arco permanece livre de deflexão.

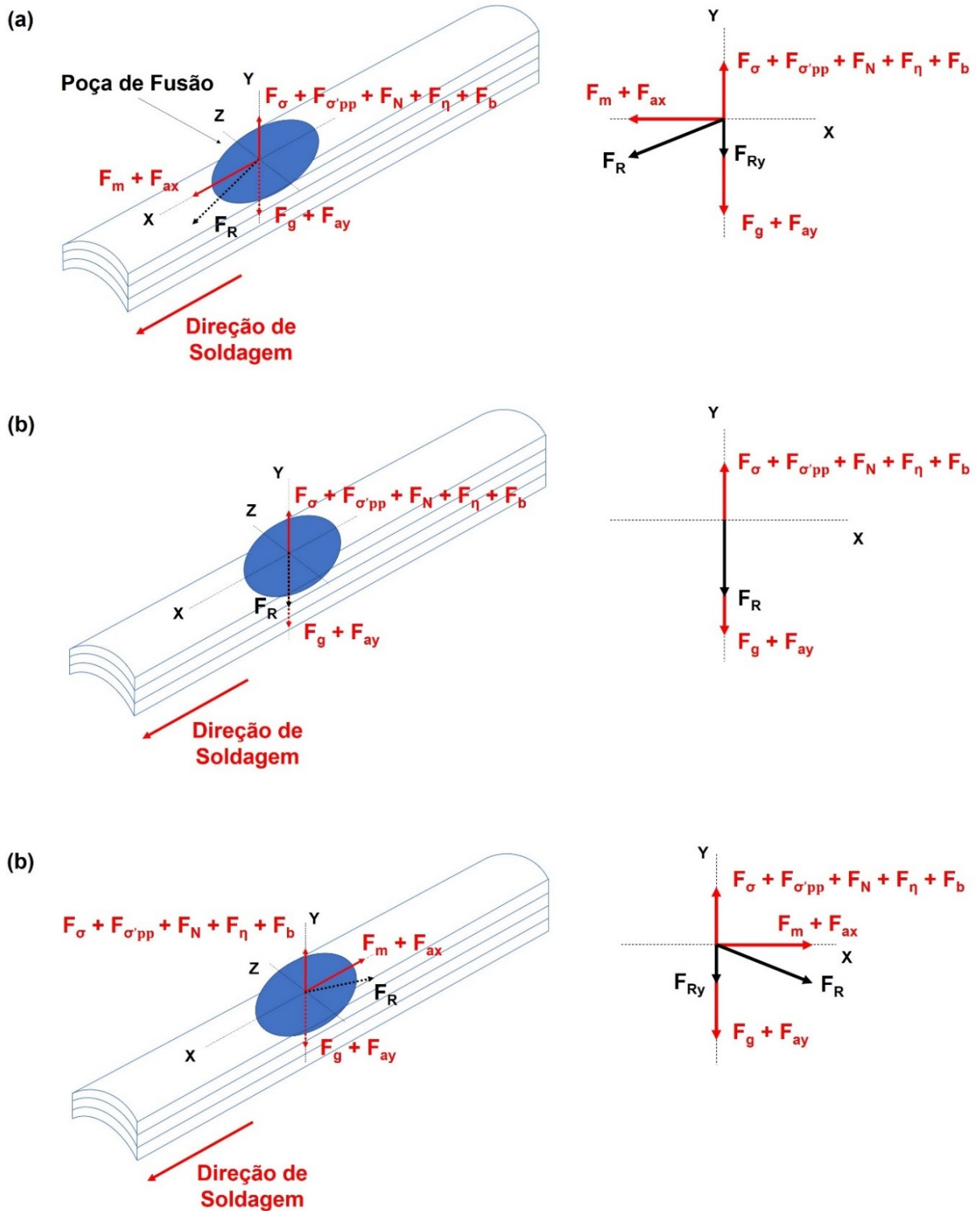


Figura 114: Modelo de forças proposto que considera os efeitos da oscilação longitudinal quando o arco está (a) defletido no sentido de deposição do cordão de solda, (b) sem deflexão e (c) defletido em sentido contrário ao de deposição do cordão de solda

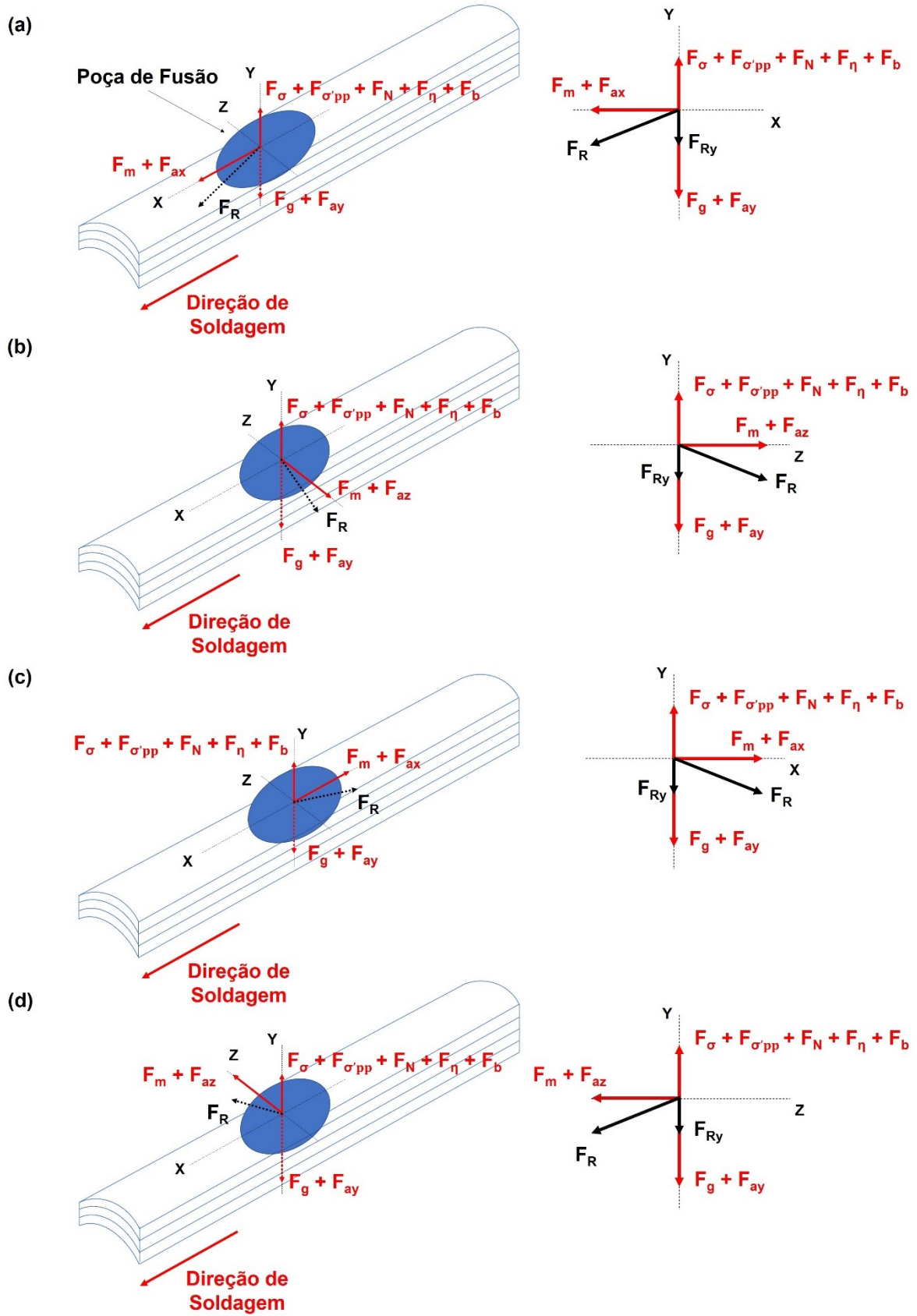


Figura 115: Modelo de forças proposto que considera os efeitos da oscilação circular quando o arco completa (a) 0, (b) 1/4, (c) 1/2 e (d) 3/4 do período de oscilação.

4.5. Considerações Finais

Neste trabalho, um novo método para minimizar o problema do transbordamento da poça de fusão durante a deposição de cordões de solda para fabricação de paredes multicamadas de passe único foi apresentado. Ao aplicar a oscilação magnética do arco elétrica, obtiveram-se paredes mais finas e com menor variação de largura ao longo do comprimento. Além disso, para certas condições, aumentou-se a eficiência de deposição do processo. Com essa técnica, conseguiu-se diminuir o impacto da pressão e do calor do arco elétrico nas camadas previamente depositadas. O aumento de velocidade da poça de fusão enquanto o arco defletia no sentido de deposição em baixas frequências também foi um fator que contribuiu com o afinamento da parede.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados e discutidos, as principais conclusões deste trabalho são:

- 1) Com a bancada de testes desenvolvida, paredes finas foram produzidas de forma estável, atendendo as condições exigidas. Trabalhos futuros poderão ser realizados utilizando este mesmo sistema de manufatura aditiva.
- 2) A oscilação magnética do arco elétrico pode minimizar o fenômeno de transbordamento da poça de fusão, tornar as paredes mais finas e a distribuição de material ao longo do comprimento da parede mais homogênea e, para determinadas condições, aumentar a eficiência de deposição do processo.
- 3) Para as condições de soldagem adotadas, quando a oscilação magnética foi aplicada, as paredes de aço afinaram, mas não cresceram em altura. Já as paredes de titânio, afinaram e cresceram em altura.
- 4) Para as paredes de titânio construídas com oscilação longitudinal e frequência de 10 Hz e com oscilação circular e frequência de 5 Hz, a eficiência de deposição diminuiu, embora as paredes tenham afinado e crescido em altura.
- 5) Quando a oscilação magnética do arco elétrico é aplicada, a profundidade de penetração da solda diminui. Assim, menos camadas pré-depositadas são refundidas e o volume e o peso da poça de fusão diminuem, o que contribui para minimizar o transbordamento da poça de fusão.
- 6) A componente vertical da força do arco varia em módulo durante o ciclo de oscilação do arco elétrico. Por causa disso, o valor médio dessa componente durante a oscilação é sempre menor que o valor total da força do arco. Portanto, a força média do arco sobre a poça de fusão diminui quando a oscilação magnética do arco elétrico é aplicada, o que contribui para minimizar o transbordamento da poça de fusão.

7) Para frequência de oscilação de 1 Hz, a força eletromagnética adicional e a componente horizontal da força do arco movimentam o metal fundido na direção de deflexão do arco elétrico. Quando o arco deflete no sentido de deposição da camada de solda, essas duas forças contribuem para aumentar a velocidade da poça de fusão, tornando-a mais fina e aumentando sua velocidade máxima de solidificação. Já quando o arco deflete em sentido contrário ao de deposição do cordão de solda, a poça de fusão recua, favorecendo o transbordamento.

8) Para frequência de oscilação de 1 Hz, quando o arco elétrico deflete no sentido de deposição da camada de solda, o metal fundido é lançado e espalhado em uma região mais fria da superfície da peça, o que ajuda a diminuir o tempo de solidificação da poça de fusão. Além disso, um pequeno ressalto se forma à frente da poça de fusão, que ajudará a elevar o metal fundido no próximo movimento de avanço da poça. Ambos os efeitos contribuem para minimizar o fenômeno de transbordamento.

9) Para a oscilação circular com frequências de 5 e 10 Hz, embora o arco elétrico defleta em direção as laterais da parede, o fenômeno de transbordamento é minimizado e as paredes se tornam mais finas.

10) Na manufatura aditiva baseada na soldagem GTAW, em que a transferência metálica ocorre por contato ininterrupto, a força de tensão superficial que surge no metal fundido, devido à interação da poça de fusão com a ponte líquida que se forma entre o arame e a poça, apresenta sentido contrário ao do transbordamento e, portanto, não contribui com o problema.

11) A perturbação criada pela oscilação magnética do arco elétrico na transferência metálica durante a deposição do cordão de solda diminui à medida que se aumenta a frequência e diminui-se a amplitude de oscilação do arco elétrico.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1) Validar o modelo de forças proposto nessa tese a partir de métodos experimentais, analíticos e numéricos.
- 2) Investigar a influência da oscilação magnética do arco elétrico no calor acumulado em paredes multicamadas de passe único fabricadas por manufatura aditiva baseada em processos de soldagem a arco elétrico com auxílio de termopares, pirômetro e câmera térmica.
- 3) Avaliar se a oscilação magnética do arco elétrico é também capaz de minimizar o elevado grau de anisotropia característico das peças produzidas por manufatura aditiva baseada na soldagem a arco elétrico.
- 4) Realizar um estudo mais aprofundado sobre o uso da oscilação magnética do arco elétrico para minimizar o problema geométrico em que a largura e a altura variam ao longo do comprimento de paredes multicamadas de passe únicos fabricadas por manufatura aditiva baseada em processos de soldagem a arco elétrico.
- 5) Avaliar a influência da oscilação magnética no fenômeno de transbordamento para outras faixas de frequência e amplitude e outros padrões de oscilação e formas de onda do sinal elétrico.
- 6) Encontrar a frequência mínima de oscilação circular do arco elétrico, a partir da qual o transbordamento começa a diminuir.
- 7) Investigar os efeitos da oscilação magnética do arco elétrico na geometria de paredes multicamadas de passe único produzidas pelo processo GTAW com corrente pulsada.
- 8) Avaliar os efeitos da frequência de alimentação pulsada de arame na geometria de paredes multicamadas de passe único fabricadas pelo processo GTAW.
- 9) Avaliar o grau de importância (ou peso) de cada propriedade física no fenômeno do transbordamento da poça de fusão.

REFERÊNCIAS

ASTM F2792-12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

Ayarkwa K.F., Williams S.W., Ding J. Assessing the effect of TIG alternating current time cycle on aluminium wire + arc additive manufacture. *Additive Manufacturing*, v. 18, p. 186-193, 2017.

Bai X.W., Zhang H.O., Wang G.L. Electromagnetically confined weld-based additive manufacturing. *Procedia CIRP*, v. 6, p. 515-520, 2013.

Bai, X.; Colegrove, P.; Ding, J., Zhou, X.; Diao, C.; Bridgeman, P.; Honnige, J.; Zhang, H., Williams, S. Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in multilayer deposition of PAW-based wire and arc additive manufacturing. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 124, pp. 504-516, 2018.

Baufeld, B. Mechanical Properties of Inconel 718 Parts Manufactured by Shaped Metal Deposition (SMD). *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 21, p. 1416-1421, 2012.

Baufeld, B., Biest, O.V.D., Gault, R. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: Microstructure and mechanical properties. *Materials and Design*, 31(SUPPL. 1), pp. S106-S111, 2010.

Baufeld, B., Van Der Biest, O. Mechanical properties of Ti-6Al-4V specimens produced by shaped metal deposition. *Science and Technology of Advanced Materials*, 10(1),015008, 2009.

Bonaccorso, F.; Cantelli, L.; Muscato, G. An Arc Welding Robot Control for a Shaped Metal Deposition Plant: Modular Software Interface and Sensors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 58, p. 3126-3132, 2011.

Biradar, N.S.; Raman, R. Investigation of Hot Cracking Behavior in Transverse Mechanically Arc Oscillated Autogenous AA2014 T6 TIG Welds. *Metallurgical and Material Transactions A*, v. 43A, n. 9, p. 3179-3191, 2012.

Biradar, N.S.; Raman R. Grain Refinement in Al-Mg-Si Alloy TIG Welds Using Transverse Mechanical Arc Oscillation. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 21, n. 11, p. 2495-2502, 2012.

Callister Jr., W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais, Uma Introdução*. Editora LTC, Rio de Janeiro, 2018.

Chen, X. Q.; Smith, J.S.; Lucas, J. Microcomputer Controlled Arc Oscillator for Automated TIG Welding. *Journal of Microcomputer Applications*, v. 13, p. 347-360, 1990.

Corradi, D. R.; Santos, I. B.; Carneiro, J. R.; Abreu, L. D.; Lasmar, A. A.; Brito, P. P.; Silva, W. M. Influência da Oscilação Eletromagnética do Arco Elétrico na Soldagem Gmaw do Aço Inoxidável Austenítico Aisi 316l. 2015. 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Salvador, BA, Brasil, 2015.

Cunningham, C.R., Flynn, J.M., Shokrani, A., Dhokia, V., Newman, S.T. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 22, pp. 672-686, 2018.

Dinovitzer, M., Chen, X., Laliberte, J., Huang, X., Frei, H. Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure. *Additive Manufacturing*, 26, 138-146, 2019.

Fan, H.G., Shi, Y.W. Numerical simulation of the arc pressure in gas tungsten arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 61(3), 302-308, 1996.

Greene, W. Scotch Plains, NJ. Magnetic Oscillation of Welding Arc. B23K9/073 B23K9/06. US 639779. 12 feb. 1957, 5 jan. 1960. United States Patent and Trademark Office, Alexandria, VA, n. 2920183.

Guo, J., Zhou, Y., Liu, C., Wu, Q., Chen, X., Lu, J. Wire arc additive manufacturing of AZ31 magnesium alloy: Grain refinement by adjusting pulse frequency. *Materials*, 9(10), 823, 2016.

Halliday, D.; Resnick, R.; Walker, J. *Fundamentos de Física*, volume 3: Eletromagnetismo. 10ª edição LTC, Rio de Janeiro, 2020.

Han Q.; Li Y.; Zhang G. Online Control of Deposited Geometry of Multi-Layer Multi-Bead Structure for Wire and Arc Additive Manufacturing. Springer eBook. Springer Nature, 2018.

Hejripour, F., Valentine, D.T., Aidun, D.K. Study of mass transport in cold wire deposition for Wire Arc Additive Manufacturing. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 125, 471–484, 2018.

Henckell P., Günther K., Ali Y., Bergmann J.P., Scholz J., Forêt P. The Influence of Gas Cooling in Context of Wire Arc Additive Manufacturing—A Novel Strategy of Affecting Grain Structure and Size. In: TMS T. (eds) *TMS 2017 146th Annual Meeting & Exhibition Supplemental Proceedings*. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham, 2017.

Hu, Z., Qin, X., Shao, T., Liu, H. Understanding and overcoming of abnormality at start and end of the weld bead in additive manufacturing with GMAW. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(5-8), pp. 2357-2368, 2018.

Huang, J., Yuan, W., Yu, S., Zhang, L., Yu, X., Fan, D. Droplet transfer behavior in bypass-coupled wire arc additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 49, pp. 397-412, 2020.

Janaki Ram, G.; Murugesan, R.; Sundaresan, S. Fusion Zone Grain Refinement in Aluminum Alloy Welds through Magnetic Arc Oscillation and Its Effect on Tensile Behavior. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 8, p. 513-520, 1999.

Jhavar, S.; Jain, N.K.; Paul, C.P. Development of micro-plasma transferred arc (μ -PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 214, p. 1102-1110, 2014.

Juliani, L. Utilização de um sistema de controle por oscilação magnética para a deposição de metal em passe de raiz utilizando o processo GMAW. Dissertação de Mestrado. UFMG. 2014.

Koteswara Rao, S.R.; Madhusudhana Reddy, G.; Kamaraj, M; Prasad Rao, K. Grain Refinement Through Arc Manipulation Techniques in Al-Cu Alloy GTA Welds. *Materials Science and Engineering A*, v. 404, p. 227-234, 2005.

Kang, Y.H., Na, S.J. A study on the modeling of magnetic arc deflection and dynamic analysis of arc sensor. *Welding Journal (Miami, Fla)*, 81(1), pp. 8s-13s, 2002.

Kim, Y.S. & Eagar, T.W. Analysis of Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding, *Welding Journal*, 72(6), p. 269s-278s, 1993a.

Kou, S., 2003. *Welding Metallurgy*, second ed. Wiley-Interscience, pp. 3-4, 2003.

Kou, S., Le, Y. Three-dimensional heat flow and solidification during the autogenous GTA welding of aluminum plates. *Metallurgical Transactions A*, 14(11), 2245-2253, 1983.

Kou, S., Le, Y. Grain structure and solidification cracking in oscillated arc welds of 5052 aluminum alloy. *Metallurgical Transactions A*, 16(7), pp. 1345-1352, 1985.

Kou, S.; Le, Y. Improving weld quality by low-frequency arc oscillation, *Weld. J.* 64(3), 51-55, 1985.

Lancaster, J. F. *The Physics of Welding*, second ed. Pergamon Press, Oxford, pp. 32-41, 1986.

Li, F.; Chen, S., Shi, J.; Zhao, Y.; Tian, H. Thermoelectric cooling-aided bead geometry regulation in wire and arc-based additive manufacturing of thin-walled structures. *Applied Sciences (Switzerland)*, 8(2), 207, 2018.

Li, Y., Huang, X., Horváth, I., Zhang, G. GMAW-based additive manufacturing of inclined multi-layer multi-bead parts with flat-position deposition. *Journal of Materials Processing Technology*, 262, pp. 359-371, 2018.

Li, Y., Xiong, J., Yin, Z. Molten pool stability of thin-wall parts in robotic GMA-based additive manufacturing with various position depositions. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 56, 1-11, 2019.

Li, Y., Qin, X., Wu, Q., Hu, Z., Shao, T. Fabrication of curved overhanging thin-walled structure with robotic wire and arc additive manufacturing (RWAAM). *Industrial Robot*, 47(1), pp. 102-110, 2020.

Liu, W., Jia, C., Guo, M., Gao, J., Wu, C. Compulsively constricted WAAM with arc plasma and droplets ejected from a narrow space. *Additive Manufacturing*, 27, pp. 109-117, 2019.

Lu, X.; Zhou, Y.; Xing, X.; Shao, L.; Yang, Q.; Gao, S. Open-source wire and arc additive manufacturing system: formability, microstructures, and mechanical properties. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.93, p.2145-2154, 2017.

Luo, Y., Li, J., Xu, J., Zhu, L., Han, J., Zhang, C. Influence of pulsed arc on the metal droplet deposited by projected transfer mode in wire-arc additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 259, pp. 353-360, 2018.

Mahajan, S.; Biradar, N.S.; Raman, R.; Mishra, S. Effect of Mechanical Arc Oscillation on the Grain Structure of Mild Steel Weld Metal. *Trans Indian Inst Met*, v.65(2), p.171-177, 2012.

Marques, P.V., Modenesi, P.J., Bracarense, A.Q. *Soldagem: Fundamentos e Tecnologia*. 4ª Edição, Elsevier, Rio de Janeiro, 2017

Martina, F.; Mehnen, J; Williams, S.W.; Colegrove, P.; Wang, F. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 212, p. 1377-1386, 2012.

Minnick, William H. Gas tungsten arc welding handbook. Tinley Park, Illinois: the Goodheart-Wilcox, c.1996. 272p.

Montevecchi, F., Venturini, G., Grossi, N., Scippa, A., Campatelli, G. Heat accumulation prevention in Wire-Arc-Additive-Manufacturing using air jet impingement. *Manufacturing Letters*, 17, p. 14-18, 2018.

Ngo, T. D.; Kashani, A.; Imbalzano, G.; Nguyen, K. T. Q.; Hui, D. Additive Manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B*, v.143, p. 172-196, 2018.

Nguyen, N. T. Thermal Analysis of welds, Series: Developments in Heat Transfer, vol. 14. WIT Press, UK, pp. 33-34, 2004.

Ogata, K. Engenharia de Controle Moderno. São Paulo: Prentice Hall, 4th edition. 2003.

Ogino, Y., Asai, S., Hirata, Y. Numerical simulation of WAAM process by a GMAW weld pool model. *Welding in the World*, 62(2), 393-401, 2018.

Ou, W., Mukherjee, T., Knapp, G.L., Wei, Y., DebRoy, T. Fusion zone geometries, cooling rates and solidification parameters during wire arc additive manufacturing. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, pp. 1084-1094, 2018.

Pan Z.; Ding D.; Wu B.; Cuiuri D.; Li H.; Norrish J. Arc Welding Processes for Additive Manufacturing: A Review. In: Chen S.; Zhang Y.; Feng Z. (eds) *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*. Transactions on Intelligent Welding Manufacturing. Springer, Singapore, 2018.

Reddy, G.M.; Gokhale, A.A.; Rao, K.P. Weld microstructure refinement in a 1441 grade aluminium-lithium alloy. *Journal of materials Science*, v. 32, p.4117-4126, 1997.

Silva, L.J., Souza, D.M., Araújo, D.B., Reis, R.P., Scotti, A. Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(5-6), pp. 2513-2523, 2020.

Silva, R.H.G., Santos Paes, L.E., Okuyama, M.P., Sousa, G.L., Cirino, L.M., Schwedersky, M.B. TIG welding process with dynamic feeding: a characterization approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(9-12), pp. 4467-4475, 2018.

Skiba, T.; Baufeld, B.; Van der Biest, O. Microstructure and Mechanical Properties of Stainless Steel Component Manufactured by Shaped Metal Deposition. *ISIJ International*, v. 49, p. 1588-1591, 2009.

Su, C., Chen, X. Effect of depositing torch angle on the first layer of wire arc additive manufacture using cold metal transfer (CMT). *Industrial Robot*, 46(2), pp. 259-266, 2019.

Schwedersky, M.B., Gonçalves e Silva, R.H., Dutra, J.C., de Santana Weizenmann, G., Bonacorso, N.G. Switch back technique enhances the productivity of the TIG welding process. *Welding in the World*, 61(5), pp. 971-977, 2017

Sun, Q., Wang, J., Cai, C., Li, Q., Feng, J. Optimization of magnetic arc oscillation system by using double magnetic pole to TIG narrow gap welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86(1-4), 761-767, 2016.

Sundaresan. S; Janaki Ram, G.D. Use of Magnetic Arc Oscillation for Grain Refinement of Gas Tungsten Arc Welds in α - β Titanium Alloys. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 4, p.151-160, 1999.

Wang, J., Sun, Q., Zhang, T., Zang, S., Liu, Y., Feng, J. Arc characteristics in alternating magnetic field assisted narrow gap pulsed GTAW. *Journal of Materials Processing Technology*, v.254, p.254-264, 2018.

Wang, J., Sun, Q., Feng, J., Wang, S., Zhao, H. Characteristics of welding and arc pressure in TIG narrow gap welding using novel magnetic arc oscillation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(1-4), p.413-420, 2017.

Wang, L., Wu, C., Chen, J., Gao, J. Influence of the external magnetic field on fluid flow, temperature profile and humping bead in high speed gas metal arc welding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v.116, p.1282-1291, 2018.

Wu, B.; Ding, D.; Pan, Z.; Cuiuri, D.; Li, H.; Han, J.; Fei, Z. Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behaviour in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V. *Journal of Materials Processing Tech.*, v.250, p.304-312, 2017.

Wu, H.; Chang, Y.; Lu, L.; Bai, J. Review on magnetically controlled arc welding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.91, p.4263-4273, 2017.

Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Fei, Z. The effects of forced interpass cooling on the material properties of wire arc additively manufactured Ti6Al4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 258, p.97-105, 2018.

Wu, B., Pan, Z., van Duin, S., Li H. Thermal Behavior in Wire Arc Additive Manufacturing: Characteristics, Effects and Control. In: Chen S., Zhang Y., Feng Z. (eds) *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*. *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*. Springer, Singapore, 2019.

Wu, C.S., Yang, F., Gao, J. Effect of external magnetic field on weld pool flow conditions in high-speed gas metal arc welding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 230(1), pp. 188-193, 2016.

Xiong, J.; Li, R.; Lei, Y.; C.; H. Heat propagation of circular thin-walled parts fabricated in additive manufacturing using gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Tech.*, v.251, p.12-19, 2018.

Xiong, J.; Zhang, G.; Qiu, Z.; Li, Y. Vision-sensing and bead width control of a single-bead multi-layer part: material and energy savings in GMAW-based rapid manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, v.41, p.82-88, 2013.

Xiong, J.; Zhang, G. Adaptive control of deposited height in GMAW-based layer additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Tech.*, v.214, p.962-968, 2014.

Xiong, J., Zhang, G., Zhang, W. Forming appearance analysis in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80(9-12), pp. 1767-1776, 2015.

Xiong, J.; Yin, Z.; Zhang, W. Closed-loop control of variable layer width for thin-walled parts in wire and arc additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Tech.*, V.233, p.100-106, 2016.

Xiong, J., Yin, Z., Zhang, W. Forming appearance control of arc striking and extinguishing area in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(1-4), pp. 579-586, 2016.

Xiong, J., Lei, Y., Chen, H., Zhang, G. Fabrication of inclined thin-walled parts in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing with flat position deposition. *Journal of Materials Processing Technology*, 240, pp. 397-403, 2017.

Yamamoto, T., Takeda, K., Toh, T., Tanaka, J. Distribution of heat flux transported by a magnetically driven arc. *Thin Solid Films*, 515(9), 4228-4233, 2007.

Yang, D.; He, C.; Zhang, G. Forming characteristics of thin-wall steel parts by double electrode GMAW based additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Tech.*, v.227, p.153-160, 2016.

Yang, L., He, T., Liu, Y., Zhai, Y., Li, H. Droplet Transfer Behavior of Flux Cored Wire TIG Welding. *Transactions of Tianjin University*, 24(1), pp. 82-90, 2018.

Yudodibroto, B.Y.B.; Hermans, M.J.M; Hirata, Y.; den Ouden, G. Influence of filler wire addition on weld pool oscillation during gas tungsten arc welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, v.9, p.163-168, 2004.

Yu, X.; Lim, Y.C.; Smith, R.; Babu, S.S.; Farson, D.F.; Lippold, J.C.; McCracken, S. Reducing Hot Cracking Tendency of Dissimilar Weld Overlay by Magnetic Arc Oscillation. *Materials Science and Technology*, v.30, p.930-937, 2014.

Zhang, Y., Chen, Y., Li, P., Male, A.T. Weld deposition-based rapid prototyping: A preliminary study. *Journal of Materials Processing Technology*, 135(2-3 SPEC.), 347-357, 2003.

Zhang, S., Zhang, Y., Gao, M., Wang, F., Li, Q., Zeng, X. Effects of milling thickness on wire deposition accuracy of hybrid additive/subtractive manufacturing. *Science and Technology of Welding and Joining*, 24, 375-381, 2019.

Zhao, Y., Jia, Y., Chen, S., Shi, J., Li, F. Process planning strategy for wire-arc additive manufacturing: Thermal behavior considerations. *Additive Manufacturing* 32,100935, 2020.

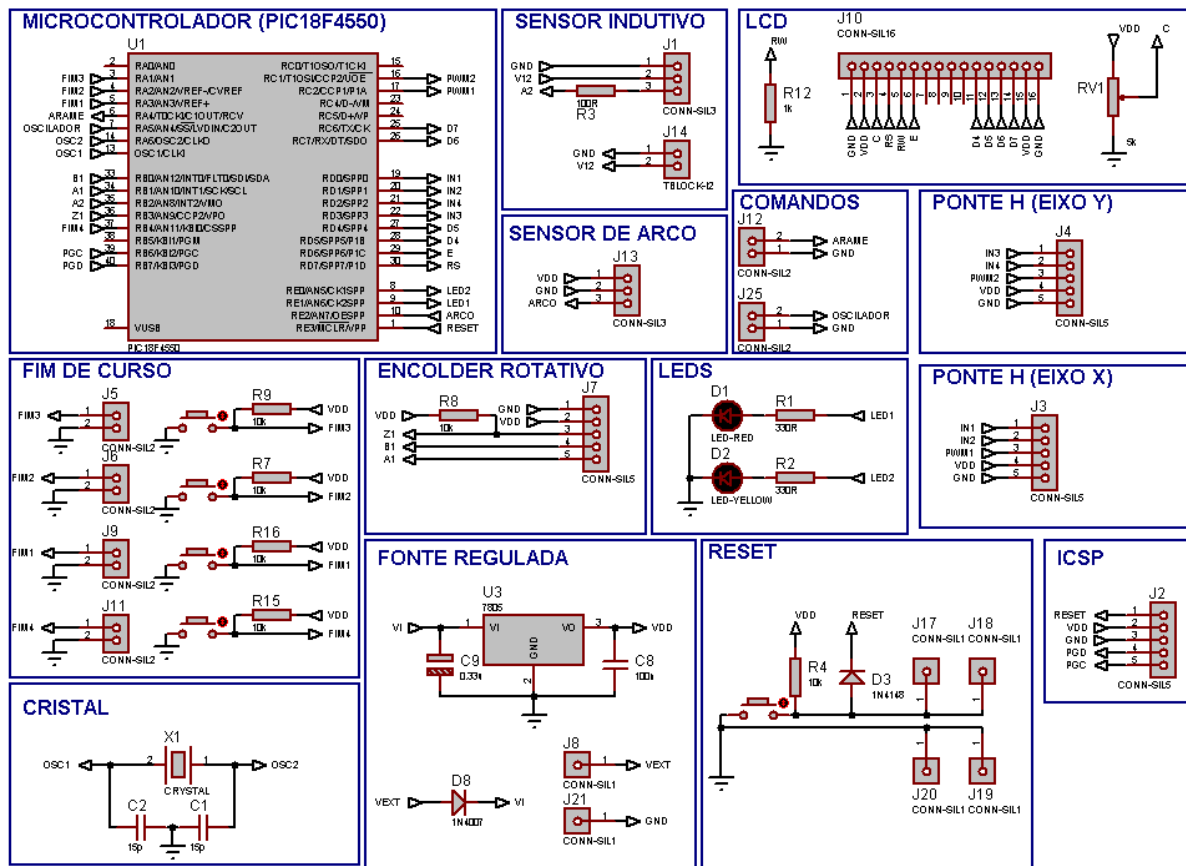
Zhao, H.; Zhang, G.; Yin, Z.; Wu, L. A 3D dynamic analysis of thermal behaviour during single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 211, pp. 488-495, 2011.

Zhu, L., Luo, Y., Han, J., Zhang, C., Xu, J., Chen, D. Energy characteristics of droplet transfer in wire-arc additive manufacturing based on the analysis of arc signals. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 134, 804-813, 2019.

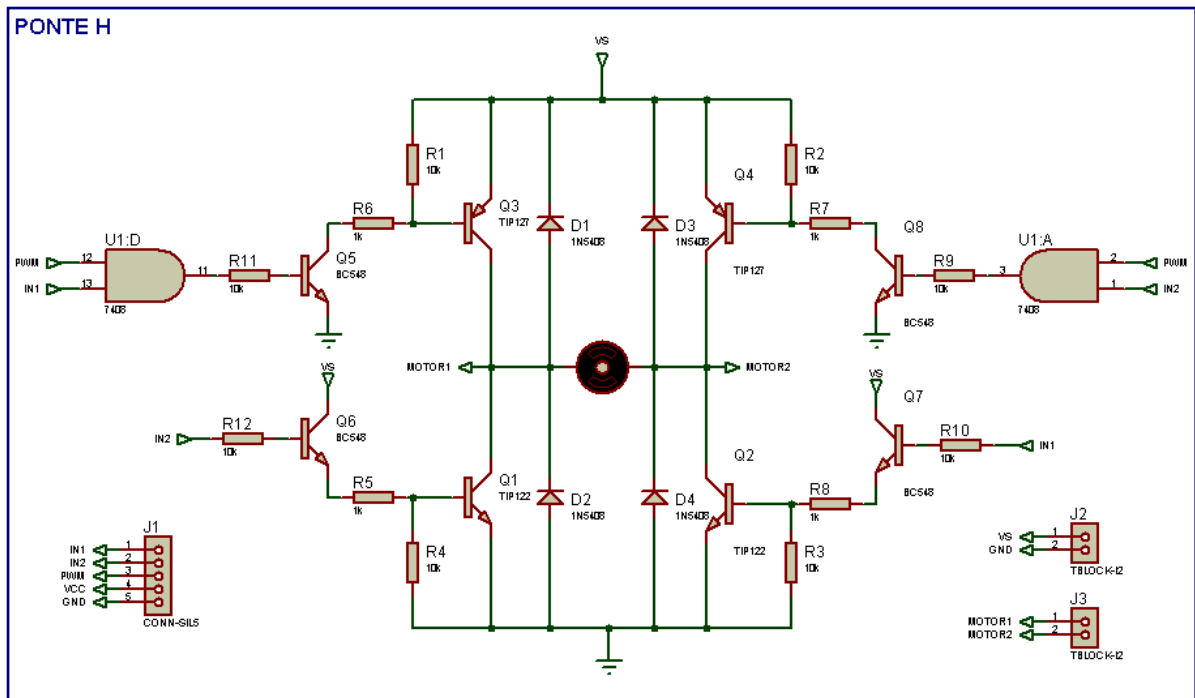
APÊNDICES

APÊNDICE A – CIRCUITOS ELETRÔNICOS

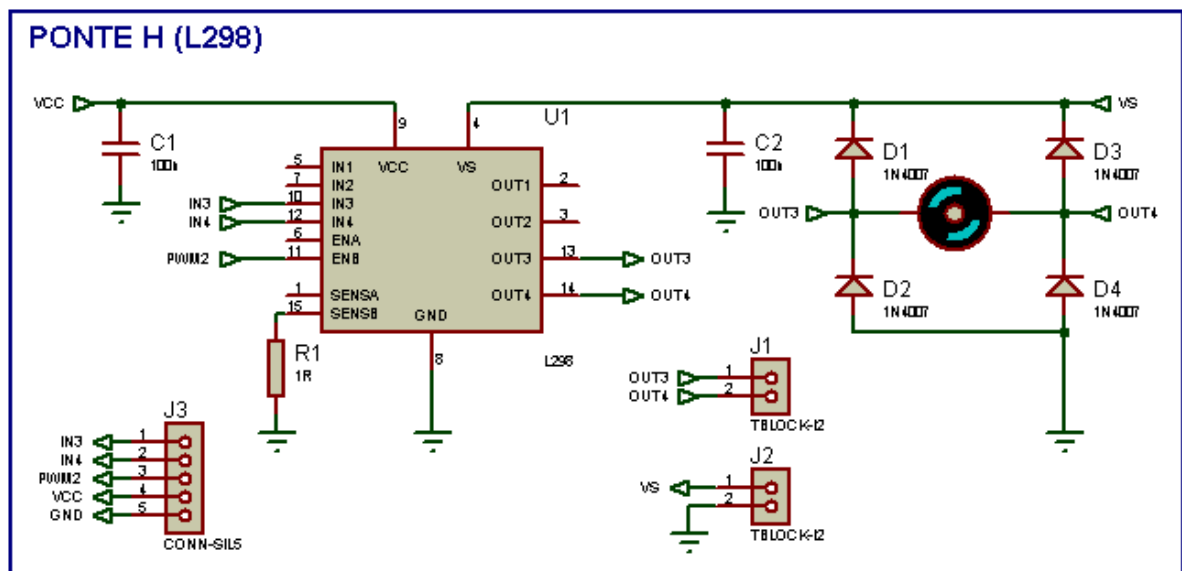
A.1 CONTROLADOR DOS MOTORES



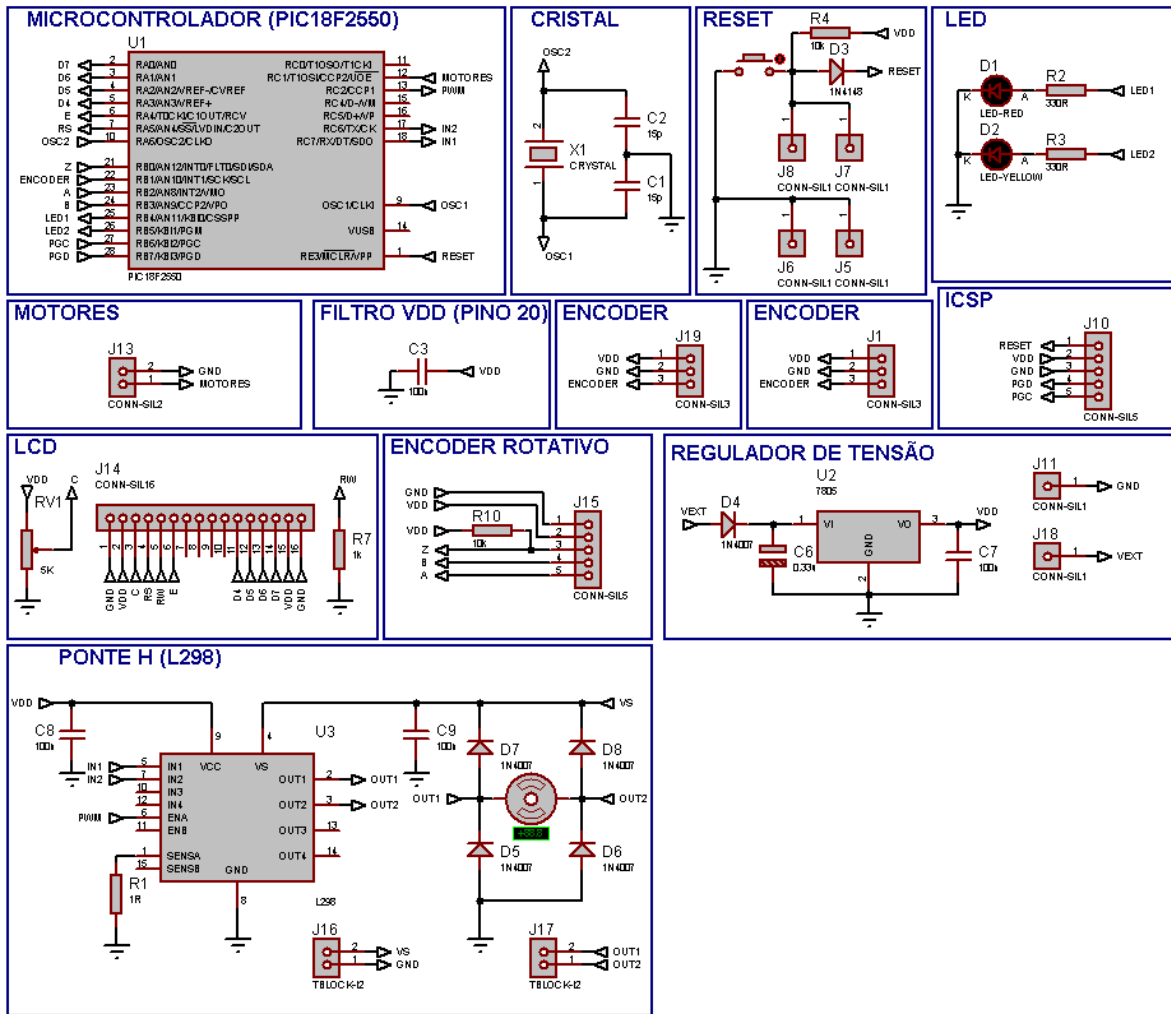
A.2 PONTE H PARA DESLOCAMENTO HORIZONTAL DA TOCHA GTAW



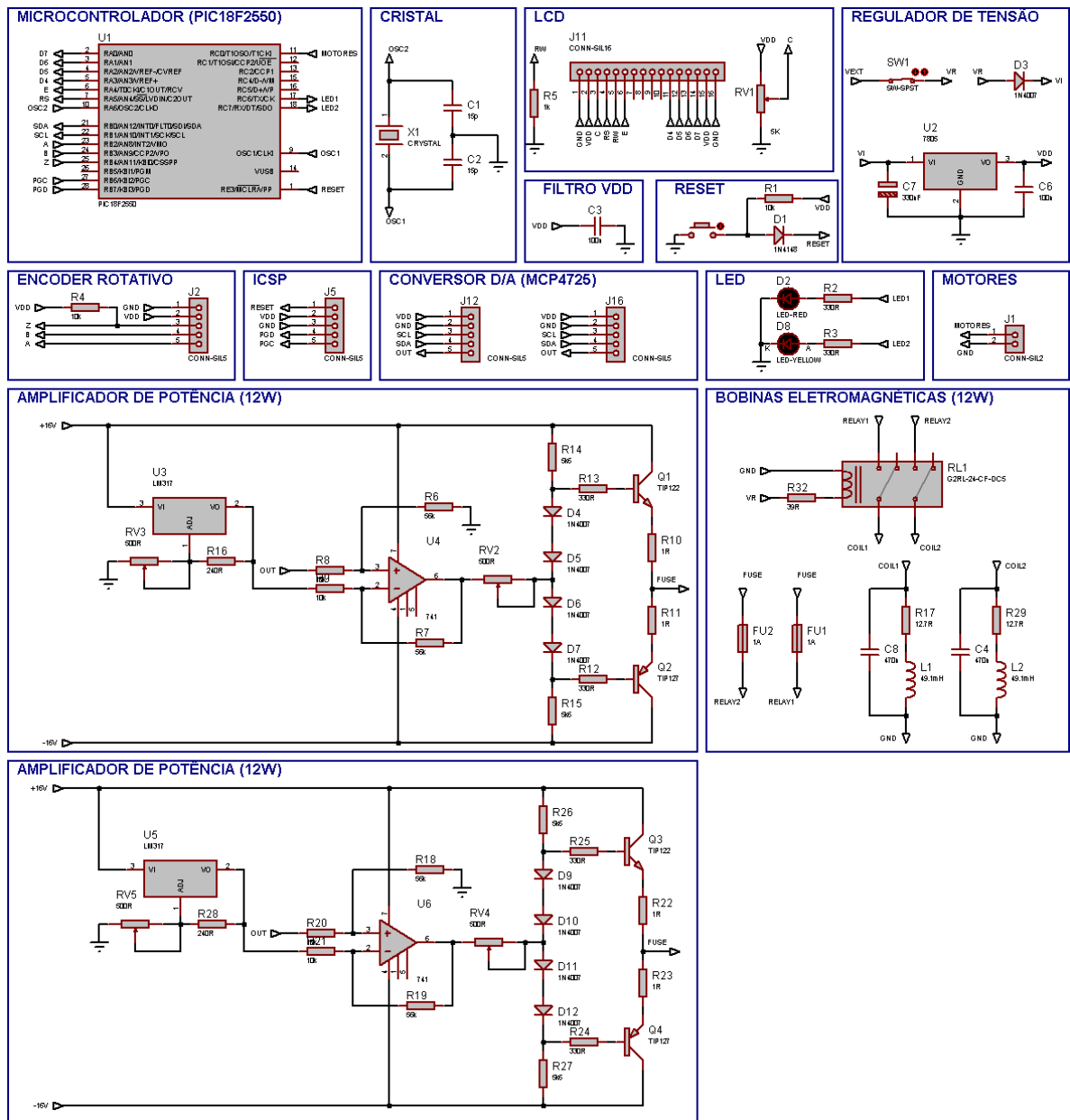
A.3 PONTE H PARA DESLOCAMENTO VERTICAL DA TOCHA GTAW



A.4 ALIMENTADOR DE ARAME



A.5 OSCILADOR MAGNÉTICO DE ARCO ELÉTRICO



APÊNDICE B – CÓDIGOS DE PROGRAMAÇÃO

B.1 CONTROLADOR DOS MOTORES

```

/** INCLUDES *****/
#include <p18cxxx.h>
#include <timers.h>
#include <pwm.h>
#include <delays.h>
#include <eep.h>
#include "displayLCD.h"
#include "TimeDelay.h"

/** BITS DE CONFIGURAÇÃO DO PIC18F4550 *****/
#pragma config FOSC = HSPLL_HS // Habilita PLL, CPU e USB com cristal de alta velocidade (High
Speed)
#pragma config PLLDIV = 5 // Oscilador de entrada de 20 MHz
#pragma config CPUDIV = OSC1_PLL2 // Clock CPU = 96MHz PLL/2
#pragma config USBDIV = 2 // Clock da USB = 96MHz PLL/2
#pragma config FCMEN = OFF // Fail Safe Clock Monitor
#pragma config IESO = OFF // Mudança do Oscilador int/ext
#pragma config PWRT = OFF // Power up Timer
#pragma config BOR = OFF // Brown-out Reset
#pragma config BORV = 3 // Tensão de Brown-out Reset = 2.05V
#pragma config VREGEN = OFF // Regulator Interno da USB de 3,3V
#pragma config WDT = OFF // Watch Dog Timer
#pragma config WDTPS = 32768 // Postcaler do Watch Dog Timer
#pragma config MCLRE = ON // Master Clear Reset pino RE3
#pragma config LPT1OSC = OFF // Timer1 em Low-Power Oscilator
#pragma config PBADEN = OFF // PORTB<4:0> Analogicas no Reset
#pragma config CCP2MX = ON // CCP2 Mux ligado a RC1(ON) ou RB3(OFF)
#pragma config STVREN = ON // Stack Full / Overflow Reset
#pragma config LVP = OFF // Single Supply ICSP, Low-Voltage ICSP
#pragma config DEBUG = OFF // Pinos RB6 e RB7 dedicados para In Circuit Debug
#pragma config ICPRT = ON // Pinos RB6 e RB7 dedicados para gravação ICSP
#pragma config XINST = OFF // Instruções Extendidas
// Proteção contra Leitura Externa dos Blocos da Flash
#pragma config CP0 = OFF // Bloco0
#pragma config CP1 = OFF // Bloco1

```

```

#pragma config CP2 = OFF // Bloco2
#pragma config CP3 = OFF // Bloco3
#pragma config CPB = OFF // Bloco Boot
#pragma config CPD = OFF // EEPROM
// Proteção contra Escrita nos Blocos da Flash
#pragma config WRT0 = OFF // Bloco0
#pragma config WRT1 = OFF // Bloco1
#pragma config WRT2 = OFF // Bloco2
#pragma config WRT3 = OFF // Bloco3
#pragma config WRTB = OFF // Bloco Boot
#pragma config WRTC = OFF // Bits de Configuração
#pragma config WRTD = OFF // EEPROM
// Proteção contra Leitura do Bloco via TBLRD localizadas em outros blocos
#pragma config EBTR0 = OFF // Bloco0
#pragma config EBTR1 = OFF // Bloco1
#pragma config EBTR2 = OFF // Bloco2
#pragma config EBTR3 = OFF // Bloco3
#pragma config EBTRB = OFF // Bloco Boot
/** D E F I N E S *****/
//PONTE H
#define IN3 PORTDbits.RD3
#define IN4 PORTDbits.RD2
#define IN1 PORTDbits.RD0
#define IN2 PORTDbits.RD1
//SENSOR DE LUMINOSIDADE
#define ARCO PORTEbits.RE2
//FINS DE CURSO
#define FIM1 PORTAbits.RA3
#define FIM2 PORTAbits.RA2
#define FIM3 PORTAbits.RA1
#define FIM4 PORTBbits.RB4
//ENCODER ROTATIVO
#define Z1 PORTBbits.RB3
#define A1 PORTBbits.RB1
#define B1 PORTBbits.RB0
//ENCODER INDUTIVO
#define A2 PORTBbits.RB2
//LEDS
#define LED_VERMELHO PORTEbits.RE0

```

```

#define LED_AMARELO PORTEbits.RE1
//COMANDOS
#define ARAME PORTAbits.RA4
#define OSCILADOR PORTAbits.RA5
/** V A R I A V E I S   G L O B A I S   * * * * * */
int i = 0;
int C = 0;
float v;
char ESTADO;
unsigned int DC;
float ALTURA;
char PERIODO;
float H = 5;
float altura = 0;
/** P R O T O T I P O S   P R I V A D O S   * * * * * */
void ConfiguraSistema(void);
void ConfiguraInterrupcao(void);
void ConfiguraPWM(void);
void Tratamento_High_Interrupt(void);
void Tratamento_Low_Interrupt(void);
/** F U N C O E S   * * * * * */
void main(void)
{
    ConfiguraSistema(); //Configura as portas e periféricos do PIC
    ARAME = 0;        //INTERROMPE ARAME
    OSCILADOR = 0;    //INTERROMPE OSCILAÇÃO MAGNÉTICA
    LED_VERMELHO = 1; //ACENDE LED VERMELHO
    LED_AMARELO = 1;  //ACENDE LED AMARELO
    //Busca na memória EEPROM o último valor de velocidade definido
    v = Read_b_eep(0)/10.0;
    //LCD
    PosicaoCursorLCD(1,1);
    EscreveFraseRomLCD("  EIXO X  ");
    PosicaoCursorLCD(2,1);
    EscreveFraseRomLCD("VEL.: ");
    EscreveFloatLCD(v,1);
    EscreveFraseRomLCD(" mm/s");
    EscreveFraseRomLCD("  ");
    while(Z1);
}

```



```

DelayMs(500); // Debounce
//Converte velocidade em mm/s para DutyCycle em bits
DC = (int)(250*v);
//Salva na memória EEPROM o último valor de velocidade definido
v = v * 10.0;
Busy_eep ();
Write_b_eep (0,v);
v = v / 10.0;
//INT1 - ENCODER ROTATIVO
INTCON3bits.INT1IE=0; // Desabilita interrupção externa INT1
while(1)
{
    //LCD
    PosicaoCursorLCD(1,1);
    EscreveFraseRomLCD("AGUARDANDO ");
    EscreveInteiroLCD(i);
    EscreveFraseRomLCD("C");
    PosicaoCursorLCD(2,1);
    EscreveFloatLCD(v,1);
    EscreveFraseRomLCD("mm/s ");
    EscreveFloatLCD(H,3);
    EscreveFraseRomLCD("mm ");
    //SENSOR DE LUMINOSIDADE
    C = 0;
    while(C < 2) //Espera 1s antes de acionar o sistema
    {
        if(ARCO)
        {
            C = 0;
        }
        else
        {
            C++;
            DelayMs(500);
        }
    }
    ARAME = 1; //ACIONA ARAME
    OSCILADOR = 1; //ACIONA OSCILAÇÃO MAGNÉTICA

```

```

//ACIONA EIXO X
IN3 = 1;
IN4 = 0;
SetDCPWM2(DC);
//LCD
PosicaoCursorLCD(1,1);
EscreveFraseRomLCD(" ACIONOU EIXO X ");
while(FIM2);
ARAME = 0; //INTERROMPE ARAME
OSCILADOR = 0; //INTERROMPE OSCILAÇÃO MAGNÉTICA
//PARA EIXO X
IN3 = 1;
IN4 = 1;
SetDCPWM2(0);
//LCD
PosicaoCursorLCD(1,1);
EscreveFraseRomLCD(" PAROU EIXO X ");
DelayMs(1000);
//LCD
PosicaoCursorLCD(1,1);
EscreveFraseRomLCD("AGUARDANDO... ");
while(Z1);
DelayMs(500); // Debounce
//ACIONA EIXO X
IN3 = 0;
IN4 = 1;
SetDCPWM2(1023);
//LCD
PosicaoCursorLCD(1,1);
EscreveFraseRomLCD(" ACIONOU EIXO X ");
while(Z1 && FIM1);
//PARA EIXO X
IN3 = 1;
IN4 = 1;
SetDCPWM2(0);
//LCD
PosicaoCursorLCD(1,1);
EscreveFraseRomLCD(" PAROU EIXO X ");
DelayMs(500); // Debounce

```

```

while(Z1);
DelayMs(500); // Debounce
INTCON3bits.INT2IE=1; // Habilita interrupção externa INT2
//LCD
PosicaoCursorLCD(1,1);
EscreveFraseRomLCD(" ACIONOU EIXO Y ");
PosicaoCursorLCD(2,1);
EscreveFraseRomLCD("ALTURA: ");
EscreveFloatLCD(H,3);
EscreveFraseRomLCD(" mm");
EscreveFraseRomLCD(" ");
//INICIA SUBIDA EIXO Y
SetDCPWM1(1023);
IN1 = 1;
IN2 = 0;
while(Z1);
//while(H < altura)
//FREIA EIXO Y
IN1 = 1;
IN2 = 1;
SetDCPWM1(0);
INTCON3bits.INT2IE=0; // Desabilita interrupção externa INT2
//LCD
PosicaoCursorLCD(1,1);
EscreveFraseRomLCD(" PAROU EIXO Y ");
DelayMs(1000);
//RETORNO EIXO X
IN3 = 0;
IN4 = 1;
SetDCPWM2(1023);
//LCD
PosicaoCursorLCD(1,1);
EscreveFraseRomLCD(" ACIONOU EIXO X ");
while(FIM1);
//FREIA EIXO X
IN3 = 1;
IN4 = 1;
SetDCPWM2(0);

```

```

//LCD
PosicaoCursorLCD(1,1);
EscreveFraseRomLCD(" PAROU EIXO X ");
DelayMs(1000);
    }//end while(1)
} //end main
void ConfiguraSistema(void)
{
    ADCON1 |= 0x0F;    // configura todas as portas como digitais
    TRISCbits.TRISC1=0; // PWM1
    TRISCbits.TRISC2=0; // PWM2
    TRISDbits.TRISD0=0; // IN1
    TRISDbits.TRISD1=0; // IN2
    TRISDbits.TRISD3=0; // IN3
    TRISDbits.TRISD2=0; // IN4
    TRISEbits.TRISE2=1; // ARCO
    TRISEbits.TRISE0=0; // LED_VERMELHO
    TRISEbits.TRISE1=0; // LED_AMARELO
    TRISAbits.TRISA3=1; // FIM1
    TRISAbits.TRISA2=1; // FIM2
    TRISAbits.TRISA1=1; // FIM3
    TRISBbits.TRISB4=1; // FIM4
    TRISBbits.TRISB1=1; // A1
    TRISBbits.TRISB0=1; // B1
    TRISBbits.TRISB3=1; // Z1
    TRISBbits.TRISB2=1; // A2
    TRISAbits.TRISA4=0; // ARAME
    TRISAbits.TRISA5=0; // OSCILADOR
    ConfiguraLCD(); // Configura o LCD
    ConfiguraInterrupcao(); // Configura Interrupção
    ConfiguraPWM(); // Configura PWM
} //end ConfiguraSistema
void ConfiguraInterrupcao(void)
{
    RCONbits.IPEN=1; // Habilita os níveis de prioridade nas interrupções
    INTCONbits.GIEL=0; // Desabilita interrupções de alta prioridade
    INTCONbits.GIEH=0; // Desabilita interrupções de baixa prioridade
    //INT1 - ENCODER ROTATIVO
    INTCON3bits.INT1IF=0; // Garantir flag inicial da interrupção em zero.

```

```

INTCON3bits.INT1IP=0; // Interrupção selecionada como de BAIXA Prioridade
INTCON2bits.INTEDG1=1; // Interrupção INT1 é percebida na borda de SUBIDA
INTCON3bits.INT1IE=1; // Habilita interrupção externa INT1
//INT2 - ENCODER INDUTIVO
INTCON3bits.INT2IF=0; // Garantir flag inicial da interrupção em zero.
INTCON3bits.INT2IP=0; // Interrupção selecionada como de BAIXA Prioridade
INTCON2bits.INTEDG2=1; // Interrupção INT2 é percebida na borda de SUBIDA
INTCON3bits.INT2IE=0; // Desabilita interrupção externa INT2
//PORTB - FIM4
INTCONbits.RBIF=0; // Garantir flag inicial da interrupção em zero.
INTCON2bits.RBIP=1; // Seleciona ALTA prioridade para interrupção do PORTB
INTCON2bits.RBPU=1; // Desabilita pull-up dos pinos de RB7 a RB4
INTCONbits.RBIE=1; // Habilita interrupção de mudança de estado
// nos pinos do PORTB de RB7 a RB4
INTCONbits.GIEL=1; // Habilita interrupções de alta prioridade
INTCONbits.GIEH=1; // Habilita interrupções de baixa prioridade
}
void ConfiguraPWM(void)
{
// FREQUÊNCIA = 1 / PERIODO - PERIODO = 0 a 255
PERIODO = 255; // FREQUÊNCIA = 3kHz / PERIODO = 255
OpenTimer2(TIMER_INT_OFF &
T2_PS_1_16 &
T2_POST_1_1 );
OpenPWM1(PERIODO);
SetDCPWM1(0);
OpenPWM2(PERIODO);
SetDCPWM2(0);
IN1 = 1;
IN2 = 1;
IN3 = 1;
IN4 = 1;
}
#pragma interrupt Tratamento_High_Interrupt
void Tratamento_High_Interrupt(void)
{
if(INTCONbits.RBIF)
{
//FIM DE CURSO SUPERIOR

```

```

if(FIM4 == 0)
{
  //FREIA EIXO Y
  IN1 = 1;
  IN2 = 1;
  SetDCPWM1(0);
  //FREIA EIXO X
  IN3 = 1;
  IN4 = 1;
  SetDCPWM2(0);
  ARAME = 0;      //INTERROMPE ARAME
  OSCILADOR = 0;  //INTERROMPE OSCILAÇÃO MAGNÉTICA
  //LCD
  PosicaoCursorLCD(1,1);
  EscreveFraseRomLCD("AGUARDANDO PARA ");
  PosicaoCursorLCD(2,1);
  EscreveFraseRomLCD("ZERAR EIXOS  ");
  while (Z1);
  DelayMs(500); // Debounce
  //RETONA EIXO Y
  IN1 = 0;
  IN2 = 1;
  SetDCPWM1(1023);
  //LCD
  PosicaoCursorLCD(1,1);
  EscreveFraseRomLCD("  RETORNANDO ");
  PosicaoCursorLCD(2,1);
  EscreveFraseRomLCD("  EIXO Y  ");
  while(FIM3 && Z1);
  //FREIA EIXO Y
  IN1 = 1;
  IN2 = 1;
  SetDCPWM1(0);
  //LCD
  PosicaoCursorLCD(1,1);
  EscreveFraseRomLCD(" FREIOU EIXO Y ");
  PosicaoCursorLCD(2,1);
  EscreveFraseRomLCD("          ");
  DelayMs(1000);

```

```

//ZERA O EIXO X
IN3 = 0;
IN4 = 1;
SetDCPWM2(1023);
PosicaoCursorLCD(2,1);
EscreveFraseRomLCD("RETONANDO EIXO X");
while(FIM1);
//FREIA O EIXO X
IN3 = 1;
IN4 = 1;
SetDCPWM2(0);
//LCD
PosicaoCursorLCD(1,1);
EscreveFraseRomLCD(" POSICAO ORIGEM ");
PosicaoCursorLCD(2,1);
EscreveFraseRomLCD("          ");
DelayMs(1000);
Reset();
}
INTCONbits.RBIF=0;
}
} // end Tratamento_High_Interrupt
#pragma interruptlow Tratamento_Low_Interrupt
void Tratamento_Low_Interrupt(void)
{
//INT1 - ENCODER ROTATIVO
if(INTCON3bits.INT1IF)
{
ESTADO = A1;

if(B1 == ESTADO)
{
v = v + 0.1;
if(v > 4.0)
{
v = 0.0;
}
}
}
else

```

```

    {
        v = v - 0.1;
        if(v < 0)
        {
            v = 4.0;
        }
    }
//LCD
PosicaoCursorLCD(2,1);
EscreveFraseRomLCD("VEL.: ");
EscreveFloatLCD(v,1);
EscreveFraseRomLCD(" mm/s");
EscreveFraseRomLCD("    ");
INTCON3bits.INT1IF=0; // Garantir flag inicial da interrupção em zero.
}
//INT2 - ENCODER INDUTIVO
if(INTCON3bits.INT2IF)
    {
        H = H + 0.125;
        //LCD
        PosicaoCursorLCD(2,1);
        EscreveFraseRomLCD("ALTURA: ");
        EscreveFloatLCD(H,3);
        EscreveFraseRomLCD("mm");
        EscreveFraseRomLCD("    ");
        INTCON3bits.INT2IF=0; // Garantir flag inicial da interrupção em zero.
    }
} //end Tratamento_Low_Interrupt
#pragma code high_vector = 0x08
void _high_ISR(void)
{
    _asm goto Tratamento_High_Interrupt_endasm
}
#pragma code low_vector = 0x18
void _low_ISR(void)
{
    _asm goto Tratamento_Low_Interrupt_endasm
}
/** FIM DO ARQUIVO main.c *****/

```


B.2 ALIMENTADOR DE ARAME (ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA)

```

/** INCLUDES *****/
#include <p18cxxx.h>
#include <delays.h>
#include <timers.h>
#include <pwm.h>
#include <cep.h>
#include "displayLCD.h"
#include "TimeDelay.h"

/** BITS DE CONFIGURAÇÃO DO PIC18F2550 *****/
#pragma config FOSC = HSPLL_HS // Habilita PLL, CPU e USB com cristal de alta velocidade (High
Speed)
#pragma config PLLDIV = 5 // Oscilador de entrada de 20 MHz
#pragma config CPUDIV = OSC1_PLL2 // Clock CPU = 96MHz PLL/2
#pragma config USBDIV = 2 // Clock da USB = 96MHz PLL/2
#pragma config FCMEN = OFF // Fail Safe Clock Monitor
#pragma config IESO = OFF // Mudança do Oscilador int/ext
#pragma config PWRT = OFF // Power up Timer
#pragma config BOR = OFF // Brown-out Reset
#pragma config BORV = 3 // Tensão de Brown-out Reset = 2.05V
#pragma config VREGEN = OFF // Regulator Interno da USB de 3,3V
#pragma config WDT = OFF // Watch Dog Timer
#pragma config WDTPS = 32768 // Postcaler do Watch Dog Timer
#pragma config MCLRE = ON // Master Clear Reset pino RE3
#pragma config LPT1OSC = OFF // Timer1 em Low-Power Oscilator
#pragma config PBADEN = OFF // PORTB<4:0> Analogicas no Reset
#pragma config CCP2MX = ON // CCP2 Mux ligado a RC1(ON) ou RB3(OFF)
#pragma config STVREN = ON // Stack Full / Overflow Reset
#pragma config LVP = OFF // Single Supply ICSP, Low-Voltage ICSP
#pragma config DEBUG = OFF // Pinos RB6 e RB7 dedicados para In Circuit Debug
#pragma config ICPRT = ON // Pinos RB6 e RB7 dedicados para gravação ICSP
#pragma config XINST = OFF // Instruções Extendidas

// Proteção contra Leitura Externa dos Blocos da Flash
#pragma config CP0 = OFF // Bloco0
#pragma config CP1 = OFF // Bloco1
#pragma config CP2 = OFF // Bloco2
#pragma config CP3 = OFF // Bloco3
#pragma config CPB = OFF // Bloco Boot

```

```

#pragma config CPD    = OFF    // EEPROM
// Proteção contra Escrita nos Blocos da Flash
#pragma config WRT0   = OFF    // Bloco0
#pragma config WRT1   = OFF    // Bloco1
#pragma config WRT2   = OFF    // Bloco2
#pragma config WRT3   = OFF    // Bloco3
#pragma config WRTB   = OFF    // Bloco Boot
#pragma config WRTC   = OFF    // Bits de Configuração
#pragma config WRTD   = OFF    // EEPROM
// Proteção contra Leitura do Bloco via TBLRD localizadas em outros blocos
#pragma config EBTR0  = OFF    // Bloco0
#pragma config EBTR1  = OFF    // Bloco1
#pragma config EBTR2  = OFF    // Bloco2
#pragma config EBTR3  = OFF    // Bloco3
#pragma config EBTRB  = OFF    // Bloco Boot
/** D E F I N E S *****/
//ENCOLDER ROTATIVO
#define A PORTBbits.RB2
#define B PORTBbits.RB3
#define Z PORTBbits.RB0
//LEDS
#define LED_VERMELHO PORTBbits.RB4
#define LED_AMARELO PORTBbits.RB5
//PONTE H
#define IN1 PORTCbits.RC7
#define IN2 PORTCbits.RC6
//COMANDO
#define COMANDO PORTCbits.RC1
/** V A R I A V E I S   G L O B A I S *****/
unsigned int C = 0;           //Contador Auxiliar
unsigned int DC = 0;
int ESTADO;                 //Encoder Rotativo
char PERIODO;               //Período do Sinal PWM
unsigned int Counter = 0;    //Contador de Pulsos
unsigned int OptimalSpeed = 0; //Velocidade Idel
unsigned int ActualSpeed = 0; //Velocidade Real
float F = 0;                //Frequencia em Hz
float V = 0;                //Velocidade Ideal em mm/s
unsigned int LOAD_TMR0;     //Timer

```

```

int Error = 0;           //Erro = Vel. Ideal - Vel. Real
int LastError = 0;      //Erro Anterior
unsigned int DutyCycle = 0; //Duty Cycle
float DeltaTempo = 0.012; //Tempo de Amostragem = 12ms
float P = 0;           //Função Proporcional
float I = 0;           //Função Integral
float Kp = 9;          //Ganho Proporcional
float Ki = 150;        //Ganho Integral
/** PROTOTIPOS PRIVADOS *****/
void ConfiguraSistema(void);
void ConfiguraInterrupcao(void);
void ConfiguraPWM(void);
void Tratamento_High_Interrupt(void);
void Tratamento_Low_Interrupt(void);
/** FUNCOES *****/
void main(void)
{
    ConfiguraSistema(); //Configura as portas e periféricos do PIC
    LED_VERMELHO = 1;
    LED_AMARELO = 1;
    //Busca na memória EEPROM o último valor de velocidade definido
    V = Read_b_eep(1)/10.0;
    //VELOCIDADE DO ARAME
    //LCD
    PosicaoCursorLCD(1,1);
    EscreveFraseRomLCD("VELOCIDADE ARAME");
    PosicaoCursorLCD(2,1);
    EscreveFloatLCD(V,1);
    EscreveFraseRomLCD(" mm/s");
    EscreveFraseRomLCD(" ");
    while(Z);
    DelayMs(500);
    OptimalSpeed = (int)(7.13565*V); //Converte mm/s para pulsos/12ms
    //Salva na memória EEPROM o último valor de velocidade definido
    V = V * 10.0;
    Busy_eep ();
    Write_b_eep (1,V);
    V = V / 10.0;
}

```

```

INTCON3bits.INT2IE=0; //Desabilita interrupção externa INT2
//TIMER0
INTCON2bits.TMR0IP=1; // Seleciona ALTA prioridade para interrupção
LOAD_TMR0 = 64411;      // Período amostral de 12ms
OpenTimer0( T0_16BIT &          // Timer0 usando 16 bits
            T0_SOURCE_INT &     // Fonte de clock interna, o mesmo da CPU
            T0_PS_1_128 &      // Prescaler = 1:128
            TIMER_INT_OFF      // Desabilita interrupção
            );
INTCON3bits.INT1IE=1;      // Habilita interrupção externa INT1
while(1)
{
    //LCD
    PosicaoCursorLCD(1,1);
    EscreveFraseRomLCD("AGUARDANDO... ");
    PosicaoCursorLCD(2,1);
    EscreveFloatLCD(V,1);
    EscreveFraseRomLCD("mm/s ");
    EscreveFraseRomLCD("      ");
    //Define um sentido de rotação
    IN1 = 0;
    IN2 = 1;
    INTCONbits.TMR0IF=0; // Garantir flag inicial da interrupção em zero
    while(COMANDO == 0); //AGUARDANDO COMANDO
    WriteTimer0(LOAD_TMR0); // Valor inicial do contador do TIMER0
    INTCONbits.TMR0IE=1; // Habilita interrupção do TIMER0
    //LCD
    PosicaoCursorLCD(1,1);
    EscreveFraseRomLCD("ALIMENTANDO... ");
    DelayMs(1000);
    while(COMANDO == 1); //INTERROMPER ARAME
    INTCONbits.TMR0IE=0; // Desabilita interrupção do TIMER0
    IN1 = 1;
    IN2 = 1;
    SetDCPWM1(0);
    //ZERA AS VARIÁVEIS DE CONTROLE
    ActualSpeed = 0;
    Error = 0;
    LastError = 0;
}

```

```

Counter = 0;
P = 0;
I = 0;
DutyCycle = 0;
DelayMs(50);
//Retorna um pedaço do arame
IN1 = 1;
IN2 = 0;
SetDCPWM1(1023);
DelayMs(1000);
IN1 = 1;
IN2 = 1;
SetDCPWM1(0);
//LCD
PosicaoCursorLCD(1,1);
EscreveFraseRomLCD(" PROCESSO ");
PosicaoCursorLCD(2,1);
EscreveFraseRomLCD(" INTERROMPIDO ");
DelayMs(1000);
    }//end while(1)
} //end main
void ConfiguraSistema(void)
{
ADCON1 |= 0x0F;    //Configura todas as portas como digitais
TRISBbits.TRISB2=1; //A
TRISBbits.TRISB3=1; //B
TRISBbits.TRISB0=1; //Z
TRISBbits.TRISB4=0; // LED_VERMELHO
TRISBbits.TRISB5=0; // LED_AMARELO
TRISCbits.TRISC2=0; //PWM
TRISCbits.TRISC7=0; //IN1
TRISCbits.TRISC6=0; //IN2
TRISCbits.RC1 = 1; //COMANDO
TRISBbits.RB1 = 1; //ENCODER
ConfiguraLCD(); //Configura o LCD
ConfiguraPWM(); //Configura o PWM
ConfiguraInterrupcao(); //Configura as Interrupções
} //end ConfiguraSistema

```

```

void ConfiguraInterrupcao(void)
{
    RCONbits.IPEN=1;           // Habilita os níveis de prioridade nas interrupções
    INTCONbits.GIEL=0;        // Desabilita interrupções de alta prioridade
    INTCONbits.GIEH=0;        // Desabilita interrupções de baixa prioridade
    //INT1 - ENCODER MOTOR
    INTCON3bits.INT1IP=0;     // Interrupção selecionada como de BAIXA Prioridade
    INTCON2bits.INTEDG1=0;    // Interrupção INT1 é percebida na borda de descida
    INTCON3bits.INT1IF=0;     // Garantir flag inicial da interrupção em zero.
    INTCON3bits.INT1IE=0;     // Desabilita interrupção externa INT1
    //INT2 - ENCODER ROTATIVO
    INTCON3bits.INT2IP=1;     // Interrupção selecionada como de ALTA Prioridade
    INTCON2bits.INTEDG2=0;    // Interrupção INT2 é percebida na borda de descida
    INTCON3bits.INT2IF=0;     // Garantir flag inicial da interrupção em zero.
    INTCON3bits.INT2IE=1;     // Habilita interrupção externa INT2
    INTCONbits.GIEL=1;        // Desabilita interrupções de alta prioridade
    INTCONbits.GIEH=1;        // Desabilita interrupções de baixa prioridade
}

void ConfiguraPWM(void)
{
    //FREQUÊNCIA = 1 / PERIODO - PERIODO = 0 a 255
    PERIODO = 255; // FREQUÊNCIA = 3kHz / PERIODO = 255
    OpenTimer2(TIMER_INT_OFF &
               T2_PS_1_16 &
               T2_POST_1_1 );
    OpenPWM1(PERIODO);
    SetDCPWM1(0);
    IN1 = 1;
    IN2 = 1;
}

//TRATAMENTO DE INTERRUPÇÃO
#pragma interrupt Tratamento_High_Interrupt
void Tratamento_High_Interrupt(void)
{
    //INT2 - ENCODER ROTATIVO
    if(INTCON3bits.INT2IF)
    {
        ESTADO = A;
        if(B != ESTADO)

```

```

{
    V = V + 0.1;
    if(V > 25.0)
    {
        V = 0.0;
    }
}
else
{
    V = V - 0.1;

    if(V < 0.0)
    {
        V = 25.0;
    }
}
PosicaoCursorLCD(2,1);
EscreveFloatLCD(V,1);
EscreveFraseRomLCD(" mm/s");
EscreveFraseRomLCD("      ");
INTCON3bits.INT2IF=0; // Garantir flag inicial da interrupção em zero.
}
else
{
    //TIMER0
    if(INTCONbits.TMR0IF)
    {
        //Controle PI
        ActualSpeed = Counter;
        LastError = Error;
        Error = OptimalSpeed - ActualSpeed;
        P = Kp*Error;
        I = I + Ki*(LastError + Error)*DeltaTempo/2; //Regra Trapezoidal
        DutyCycle = (int)(1.42853 * (P + I) + 457.90868);
        if(DutyCycle >= 550 && DutyCycle <= 1023)
        {
            SetDCPWM1(DutyCycle);
        }
    }
    else

```

```

    {
        if(DutyCycle < 550)
        {
            SetDCPWM1(0);
        }
        else
        {
            SetDCPWM1(1023);
        }
    }
    Counter = 0;
    WriteTimer0(LOAD_TMR0);
    INTCONbits.TMR0IF = 0;
}
}
} // end Tratamento_High_Interrupt
#pragma interruptlow Tratamento_Low_Interrupt
void Tratamento_Low_Interrupt(void)
{
    //INT1 - ENCODER MOTOR
    if(INTCON3bits.INT1IF)
    {
        //Realiza a contagem de pulSos do encoder
        Counter++;
        INTCON3bits.INT1IF = 0;
    }
}
#pragma code high_vector = 0x08
void _high_ISR(void)
{
    _asm goto Tratamento_High_Interrupt_endasm
}
#pragma code low_vector = 0x18
void _low_ISR(void)
{
    _asm goto Tratamento_Low_Interrupt_endasm
}

/** FIM DO ARQUIVO main.c *****/

```


B.3 ALIMENTADOR DE ARAME (ALIMENTAÇÃO PULSADA)

```

/** INCLUDES *****/
#include <p18cxxx.h>
#include <delays.h>
#include <timers.h>
#include <pwm.h>
#include <cep.h>
#include "displayLCD.h"
#include "TimeDelay.h"

/** BITS DE CONFIGURAÇÃO DO PIC18F2550 *****/
#pragma config FOSC = HSPLL_HS // Habilita PLL, CPU e USB com cristal de alta velocidade (High
Speed)
#pragma config PLLDIV = 5 // Oscilador de entrada de 20 MHz
#pragma config CPUDIV = OSC1_PLL2 // Clock CPU = 96MHz PLL/2
#pragma config USBDIV = 2 // Clock da USB = 96MHz PLL/2
#pragma config FCMEN = OFF // Fail Safe Clock Monitor
#pragma config IESO = OFF // Mudança do Oscilador int/ext
#pragma config PWRT = OFF // Power up Timer
#pragma config BOR = OFF // Brown-out Reset
#pragma config BORV = 3 // Tensão de Brown-out Reset = 2.05V
#pragma config VREGEN = OFF // Regulator Interno da USB de 3,3V
#pragma config WDT = OFF // Watch Dog Timer
#pragma config WDTPS = 32768 // Postcaler do Watch Dog Timer
#pragma config MCLRE = ON // Master Clear Reset pino RE3
#pragma config LPT1OSC = OFF // Timer1 em Low-Power Oscilator
#pragma config PBADEN = OFF // PORTB<4:0> Analogicas no Reset
#pragma config CCP2MX = ON // CCP2 Mux ligado a RC1(ON) ou RB3(OFF)
#pragma config STVREN = ON // Stack Full / Overflow Reset
#pragma config LVP = OFF // Single Supply ICSP, Low-Voltage ICSP
#pragma config DEBUG = OFF // Pinos RB6 e RB7 dedicados para In Circuit Debug
#pragma config ICPRT = ON // Pinos RB6 e RB7 dedicados para gravação ICSP
#pragma config XINST = OFF // Instruções Extendidas

// Proteção contra Leitura Externa dos Blocos da Flash
#pragma config CP0 = OFF // Bloco0
#pragma config CP1 = OFF // Bloco1
#pragma config CP2 = OFF // Bloco2
#pragma config CP3 = OFF // Bloco3
#pragma config CPB = OFF // Bloco Boot

```

```

#pragma config CPD    = OFF    // EEPROM
// Proteção contra Escrita nos Blocos da Flash
#pragma config WRT0   = OFF    // Bloco0
#pragma config WRT1   = OFF    // Bloco1
#pragma config WRT2   = OFF    // Bloco2
#pragma config WRT3   = OFF    // Bloco3
#pragma config WRTB   = OFF    // Bloco Boot
#pragma config WRTC   = OFF    // Bits de Configuração
#pragma config WRTD   = OFF    // EEPROM
// Proteção contra Leitura do Bloco via TBLRD localizadas em outros blocos
#pragma config EBTR0  = OFF    // Bloco0
#pragma config EBTR1  = OFF    // Bloco1
#pragma config EBTR2  = OFF    // Bloco2
#pragma config EBTR3  = OFF    // Bloco3
#pragma config EBTRB  = OFF    // Bloco Boot
/** D E F I N E S *****/
//ENCOLDER ROTATIVO
#define A PORTBbits.RB2
#define B PORTBbits.RB3
#define Z PORTBbits.RB0
//LEDS
#define LED_VERMELHO PORTBbits.RB4
#define LED_AMARELO PORTBbits.RB5
//PONTE H
#define IN1 PORTCbits.RC7
#define IN2 PORTCbits.RC6
//COMANDO
#define COMANDO PORTCbits.RC1
/** V A R I A V E I S   G L O B A I S *****/
unsigned int i = 0;           //Contador Auxiliar
unsigned int DC = 0;
int ESTADO;                 //Encoder Rotativo
char PERIODO;               //Período do Sinal PWM
float F = 0;                //Frequencia em Hz
unsigned long int LOAD_TMR0 = 0; //Timer
unsigned int DutyCycle = 0; //Duty Cycle
/** P R O T O T I P O S   P R I V A D O S *****/
void ConfiguraSistema(void);
void ConfiguraInterrupcao(void);

```

```

void ConfiguraPWM(void);
void Tratamento_High_Interrupt(void);
void Tratamento_Low_Interrupt(void);
/** F U N C O E S *****/
void main(void)
{
    ConfiguraSistema(); //Configura as portas e periféricos do PIC
    LED_VERMELHO = 1;
    LED_AMARELO = 1;
    //Busca na memória EEPROM o último valor de frequência definido
    F = Read_b_eep(0)/10.0;
    //FREQUENCIA ARAME
    //LCD
    PosicaoCursorLCD(1,1);
    EscreveFraseRomLCD("FREQUENCIA ARAME");
    PosicaoCursorLCD(2,1);
    EscreveFloatLCD(F,1);
    EscreveFraseRomLCD(" Hz");
    EscreveFraseRomLCD(" ");
    while(Z);
    DelayMs(500);
    LOAD_TMR0 = (int)(65536.0 - 12000000.0/(F*512.0));
    LOAD_TMR0 = LOAD_TMR0 - 380;
    //Salva na memória EEPROM o último valor de frequencia definido
    F = F * 10.0;
    Busy_eep ();
    Write_b_eep (0,F);
    F = F / 10.0;
    i = 1;
    //Busca na memória EEPROM o último valor de Duty Cycle definido
    DC = Read_b_eep(2);
    //VELOCIDADE DO ARAME
    //LCD
    PosicaoCursorLCD(1,1);
    EscreveFraseRomLCD("DUTY CYCLE ");
    PosicaoCursorLCD(2,1);
    EscreveInteiroLCD(DC);
    EscreveFraseRomLCD(" %");
    EscreveFraseRomLCD(" ");
}

```

```

while(Z);
DelayMs(500);
DutyCycle = (int)(DC * 10.23);
Busy_eep ();
Write_b_eep (2,DC);
INTCON3bits.INT2IE=0; //Desabilita interrupção externa INT2
while(1)
{
    i = 0;
    //LCD
    PosicaoCursorLCD(1,1);
    EscreveFraseRomLCD("AGUARDANDO... ");
    PosicaoCursorLCD(2,1);
    EscreveInteiroLCD(DC);
    EscreveFraseRomLCD("% ");
    EscreveFloatLCD(F,1);
    EscreveFraseRomLCD("Hz");
    EscreveFraseRomLCD(" ");
    //Define um sentido de rotação
    IN1 = 0;
    IN2 = 1;
    INTCONbits.TMR0IF=0; // Garantir flag inicial da interrupção em zero
    while(COMANDO == 0); // AGUANDANDO COMANDO
    WriteTimer0(LOAD_TMR0); // Valor inicial do contador do TIMER0
    INTCONbits.TMR0IE=1; // Habilita interrupção do TIMER0
    //LCD
    PosicaoCursorLCD(1,1);
    EscreveFraseRomLCD("ALIMENTANDO... ");
    while(COMANDO); //INTERROMPER ARAME
    INTCONbits.TMR0IE=0; // Desabilita interrupção do TIMER0
    IN1 = 1;
    IN2 = 1;
    SetDCPWM1(0);
    DelayMs(50);
    //Retorna um pedaço do arame
    IN1 = 1;
    IN2 = 0;
    SetDCPWM1(1023);

```

```

    DelayMs(250);
    IN1 = 1;
    IN2 = 1;
    SetDCPWM1(0);
    //LCD
    PosicaoCursorLCD(1,1);
    EscreveFraseRomLCD(" PROCESSO ");
    PosicaoCursorLCD(2,1);
    EscreveFraseRomLCD(" INTERROMPIDO ");
    DelayMs(1000);
    } //end while(1)
} //end main
void ConfiguraSistema(void)
{
    ADCON1 |= 0x0F;    //Configura todas as portas como digitais
    TRISBbits.TRISB2=1; //A
    TRISBbits.TRISB3=1; //B
    TRISBbits.TRISB0=1; //Z
    TRISBbits.TRISB4=0; // LED_VERMELHO
    TRISBbits.TRISB5=0; // LED_AMARELO
    TRISCbits.TRISC2=0; //PWM
    TRISCbits.TRISC7=0; //IN1
    TRISCbits.TRISC6=0; //IN2
    TRISCbits.RC1 = 1; //COMANDO
    TRISBbits.RB1 = 1; //ENCODER
    ConfiguraLCD(); //Configura o LCD
    ConfiguraPWM(); //Configura o PWM
    ConfiguraInterrupcao(); //Configura as Interrupções
} //end ConfiguraSistema
void ConfiguraInterrupcao(void)
{
    RCONbits.IPEN=1; // Habilita os níveis de prioridade nas interrupções
    INTCONbits.GIEL=0; // Desabilita interrupções de alta prioridade
    INTCONbits.GIEH=0; // Desabilita interrupções de baixa prioridade
    //INT2 - ENCODER ROTATIVO
    INTCON3bits.INT2IP=1; // Interrupção selecionada como de ALTA Prioridade
    INTCON2bits.INTEDG2=0; // Interrupção INT2 é percebida na borda de descida
    INTCON3bits.INT2IF=0; // Garantir flag inicial da interrupção em zero.
    INTCON3bits.INT2IE=1; // Habilita interrupção externa INT2

```

```

//TIMER0
INTCON2bits.TMR0IP=0; // Seleciona ALTA prioridade para interrupção
OpenTimer0( T0_16BIT & // Timer0 usando 16 bits
            T0_SOURCE_INT & // Fonte de clock interna, o mesmo da CPU
            T0_PS_1_256 & // Prescaler = 1:256
            TIMER_INT_OFF // Desabilita interrupção
        );
INTCONbits.GIEL=1; // Desabilita interrupções de alta prioridade
INTCONbits.GIEH=1; // Desabilita interrupções de baixa prioridade
}
void ConfiguraPWM(void)
{
    //FREQUÊNCIA = 1 / PERIODO - PERIODO = 0 a 255
    PERIODO = 255; // FREQUÊNCIA = 3kHz / PERIODO = 255
    OpenTimer2(TIMER_INT_OFF &
              T2_PS_1_16 &
              T2_POST_1_1 );
    OpenPWM1(PERIODO);
    SetDCPWM1(0);
    IN1 = 1;
    IN2 = 1;
}
//TRATAMENTO DE INTERRUPÇÃO
#pragma interrupt Tratamento_High_Interrupt
void Tratamento_High_Interrupt(void)
{
    //INT2 - ENCODER ROTATIVO
    if(INTCON3bits.INT2IF)
    {
        if(i == 0)
        {
            ESTADO = A;
            if(B != ESTADO)
            {
                F = F + 0.1;
                if(F > 5.0)
                {
                    F = 0.0;
                }
            }
        }
    }
}

```

```
}  
else  
{  
    F = F - 0.1;  
  
    if(F < 0.0)  
    {  
        F = 5.0;  
    }  
}  
//LCD  
PosicaoCursorLCD(2,1);  
EscreveFloatLCD(F,1);  
EscreveFraseRomLCD(" Hz");  
EscreveFraseRomLCD("      ");  
}  
else  
{  
    ESTADO = A;  
    if(B != ESTADO)  
    {  
        DC = DC + 1;  
  
        if(DC > 100)  
        {  
            DC = 50;  
        }  
    }  
    else  
    {  
        DC = DC - 1;  
        if(DC < 50)  
        {  
            DC = 100;  
        }  
    }  
    PosicaoCursorLCD(2,1);  
    EscreveInteiroLCD(DC);  
    EscreveFraseRomLCD(" %");  
}
```

```

        EscreveFraseRomLCD("          ");
    }
    INTCON3bits.INT2IF=0; // Garantir flag inicial da interrupção em zero.
}
} // end Tratamento_High_Interrupt
#pragma interruptflow Tratamento_Low_Interrupt
void Tratamento_Low_Interrupt(void)
{
    //TIMER0
    if(INTCONbits.TMR0IF)
    {
        if(i == 0)
        {
            SetDCPWM1(0); //DSD
            //SetDCPWM1(DutyCycle); //DSC
            i = 1;
        }
        else
        {
            SetDCPWM1(DutyCycle); //DSD
            //SetDCPWM1(0);
            i = 0;
        }
        WriteTimer0(LOAD_TMR0);
        INTCONbits.TMR0IF = 0;
    }
}
#pragma code high_vector = 0x08
void _high_ISR(void)
{
    _asm goto Tratamento_High_Interrupt_endasm
}
#pragma code low_vector = 0x18
void _low_ISR(void)
{
    _asm goto Tratamento_Low_Interrupt_endasm
}
/** FIM DO ARQUIVO main.c *****/

```


B.4 OSCILADOR MAGNÉTICO DE ARCO ELÉTRICO

```

/** INCLUDES *****/
#include <p18cxxx.h>
#include <delays.h>
#include <timers.h>
#include <eep.h>
#include "displayLCD.h" //Library developed by SEMPRA, Brazil
#include "timedelay.h" //Library developed by SEMPRA, Brazil
#include "dac4725.h" //Library developed by SEMPRA, Brazil
#include "Signals.h"
/** CONFIGURATION BITS OF PIC18F2550 *****/
#pragma config FOSC = HSPLL_HS // Enable PLL, CPU and USB with High Speed Crystal
#pragma config PLLDIV = 5 // 20 MHz Oscillator
#pragma config CPUDIV = OSC1_PLL2 // Clock CPU = 96MHz PLL/2
#pragma config USBDIV = 2 // Clock USB = 96MHz PLL/2
#pragma config FCMEN = OFF // Fail Safe Clock Monitor
#pragma config IESO = OFF // internal / external oscillator changing
#pragma config PWRT = OFF // Power up Timer
#pragma config BOR = OFF // Brown-out Reset
#pragma config BORV = 3 // Voltage of Brown-out Reset = 2.05V
#pragma config VREGEN = OFF // USB Voltage Regulator of 3,3V
#pragma config WDT = OFF // Watch Dog Timer
#pragma config WDTPS = 32768 // Postcaler do Watch Dog Timer
#pragma config MCLRE = ON // Master Clear Reset pin RE3
#pragma config LPT1OSC = OFF // Timer1 em Low-Power Oscilator
#pragma config PBADEN = OFF // PORTB<4:0> Analogicas no Reset
#pragma config CCP2MX = ON // CCP2 Mux connect to RC1(ON) or RB3(OFF)
#pragma config STVREN = ON // Stack Full / Overflow Reset
#pragma config LVP = OFF // Single Supply ICSP, Low-Voltage ICSP
#pragma config DEBUG = OFF // RB6 e RB7 pins dedicated for In Circuit Debug
#pragma config ICPRT = ON // RB6 e RB7 pins dedicated for ICSP Recording
#pragma config XINST = OFF // Extended Instructions
// Protection against Flash Blocks External Reading
#pragma config CP0 = OFF // Block0
#pragma config CP1 = OFF // Block1
#pragma config CP2 = OFF // Block2
#pragma config CP3 = OFF // Block3
#pragma config CPB = OFF // Block Boot

```

```

#pragma config CPD    = OFF                // EEPROM
// Protection against Flash Blocks External Writing
#pragma config WRT0   = OFF                // Block0
#pragma config WRT1   = OFF                // Block1
#pragma config WRT2   = OFF                // Block2
#pragma config WRT3   = OFF                // Block3
#pragma config WRTB   = OFF                // Block Boot
#pragma config WRTC   = OFF                // Bits of Configuration
#pragma config WRTD   = OFF                // EEPROM
// Protection against Block Reading via TBLRD located on other blocks
#pragma config EBTR0  = OFF                // Block0
#pragma config EBTR1  = OFF                // Block1
#pragma config EBTR2  = OFF                // Block2
#pragma config EBTR3  = OFF                // Block3
#pragma config EBTRB  = OFF                // Block Boot
/** D E F I N E S *****/
//ENCOLDER ROTATIVO
#define A PORTBbits.RB2
#define B PORTBbits.RB3
#define Z PORTBbits.RB4
//LEDS
#define LED_RED PORTCbits.RC6
#define LED_YELLOW PORTCbits.RC7
//EXTERN
#define EXTERN PORTCbits.RC0
/** G L O B A L   V A R I A B L E S *****/
unsigned int C = 0;           //Auxiliary Variable
char STATE;                 //Rotary Encoder
unsigned long int LOAD_TMR0; //Timer0
int cont = 0;
char Pattern;               //Pattern
float F;                    //Frequency of Oscillation
unsigned int AMP;          //Amplitude of Oscillation
unsigned int WF;           //Wave Form
float a;                    //Sine Amplitude Variable
char Increment;           //Increment of the waveform points
float Y;
int X;
float V;                    //Maximum Voltage

```

```

/** PRIVATE PROTOTYPES *****/
void ConfiguraSistema(void);
void ConfiguraInterrupcao(void);
void Treatment_High_Interrupt(void);
void Treatment_Low_Interrupt(void);
/** FUNCTIONS *****/
void main(void)
{
    ConfiguraSistema(); //Configuration of ports and peripherals
    LED_RED = 1;
    LED_YELLOW = 1;
    if (Z == 0)
    {
        //LCD
        PosicaoCursorLCD(1,1);
        EscreveFraseRomLCD(" CONFIG ");
        PosicaoCursorLCD(2,1);
        EscreveFraseRomLCD(" OPTION ");
        while (Z == 0);
        DelayMs(500);
        //Read EEPROM Memory
        Pattern = Read_b_eep(0);
        //Pattern
        //LCD
        PosicaoCursorLCD(1,1);
        EscreveFraseRomLCD("PATTERN ");
        PosicaoCursorLCD(2,1);
        switch (Pattern)
        {
            case 1://CIRCULAR
                EscreveFraseRomLCD("CIRCULAR");
                break;
            case 2://LONGITUDINAL
                EscreveFraseRomLCD("LONGITUDINAL");
                break;
            case 3://TRANSVERSE
                EscreveFraseRomLCD("TRANSVERSE");
                break;
        }
    }
}

```

```

EscreveFraseRomLCD("      ");
while(Z);
DelayMs(500);
C = 1;
//Save EEPROM Memory
Busy_eep ();
Write_b_eep (0,Pattern);
//Read EEPROM Memory
F = Read_b_eep(1);
//FREQUENCIA
//LCD
PosicaoCursorLCD(1,1);
EscreveFraseRomLCD("FREQUECY      ");
PosicaoCursorLCD(2,1);
EscreveFloatLCD(F,3);
EscreveFraseRomLCD(" Hz");
EscreveFraseRomLCD("      ");
while(Z);
DelayMs(500);
C = 2;
//LOAD_TMR0
//128 points each wave period -> 128 * 16
LOAD_TMR0 = (int)(65536.0 - (12000000.0/(F*2048.0)));
//Save EEPROM Memory
Busy_eep ();
Write_b_eep (1,F);
//Read EEPROM Memory
V = Read_b_eep(2)/10.0;
//AMPLITUDE
//LCD
PosicaoCursorLCD(1,1);
EscreveFraseRomLCD("MAXIMUM VOLTAGE ");
PosicaoCursorLCD(2,1);
EscreveFloatLCD(V,3);
EscreveFraseRomLCD(" V");
EscreveFraseRomLCD("      ");
while(Z);
DelayMs(500);

```

```

AMP = (int)(V * 4095.0 / 12.0);
//Amplitude Correction
Y = AMP * 5.0 / 4095.0;
X = (int)((2.5 - Y/2) * 4095.0 / 5.0);
//Save EEPROM Memory
V = V * 10.0;
Busy_eep ();
Write_b_eep (2,V);
V = V / 10.0;
if(Pattern == 1)//Circular
{
    a = AMP / 4095.0;
    WF = 1;
}
else
{
    C = 3;
    //Read EEPROM Memory
    WF = Read_b_eep(3);
    //AMPLITUDE
    //LCD
    PosicaoCursorLCD(1,1);
    EscreveFraseRomLCD("WAVE FORM    ");
    PosicaoCursorLCD(2,1);
    switch (WF)
    {
        case 1:
            EscreveFraseRomLCD("SINE");
            break;
        case 2:
            EscreveFraseRomLCD("SQUARE");
            break;
        case 3:
            EscreveFraseRomLCD("UP SAWTOOTH");
            break;
        case 4:
            EscreveFraseRomLCD("DOWN SAWTOOTH");
            break;
    }
}

```

```

    EscreveFraseRomLCD("      ");
    while(Z);
    DelayMs(500);
    C = 0;
    Busy_eep ();
    Write_b_eep (3,WF);
    if(WF == 1)
    {
        a = AMP / 4095.0;
    }
    else
    {
        if(WF == 3 || WF == 4)
        {
            Increment = AMP/128;
        }
    }
    }
    Reset();
}
Pattern = Read_b_eep(0);
F = Read_b_eep(1);
//LOAD_TMR0
//128 points each wave period -> 128 * 16
LOAD_TMR0 = (int)(65536.0 - (12000000.0/(F*2048.0)));
//Read EEPROM Memory
V = Read_b_eep(2)/10.0;
AMP = (int)(V * 4095.0 / 12.0);
//Amplitude Correction
Y = AMP * 5.0 / 4095.0;
X = (int)((2.5 - Y/2) * 4095.0 / 5.0);
if(Pattern == 1)//Circular
{
    WF = 1;
}
else
{
    WF = Read_b_eep(3);
}
}

```

```
if(WF == 1)
{
    a = AMP / 4095.0;
}
else
{
    if(WF == 3 || WF == 4)
    {
        Increment = AMP/128;
    }
}
INTCON3bits.INT2IE=0; //Desable INT2
PosicaoCursorLCD(2,1);
switch (Pattern)
{
    case 1://CIRCULAR
        EscreveFraseRomLCD("C ");
        break;
    case 2://LONGITUDINAL
        EscreveFraseRomLCD("L ");
        break;
    case 3://TRANSVERSE
        EscreveFraseRomLCD("T ");
        break;
}
switch (WF)
{
    case 1:
        EscreveFraseRomLCD("S ");
        break;
    case 2:
        EscreveFraseRomLCD("SQ ");
        break;
    case 3:
        EscreveFraseRomLCD("US ");
        break;
    case 4:
        EscreveFraseRomLCD("DS ");
        break;
}
```

```

}
EscreveFloatLCD(F,3);
EscreveFraseRomLCD("Hz ");
EscreveFloatLCD(V,3);
EscreveFraseRomLCD("V ");
EscreveFraseRomLCD(" ");
cont = 0;
WriteTimer0(LOAD_TMR0); // Initial Value of TIMER0
INTCONbits.TMR0IE=1; // Enable TIMER0
//LCD
PosicaoCursorLCD(1,1);
EscreveFraseRomLCD("ARC OSCILLATING ");
while(1)
{
} //end while(1)
} //end main
void ConfiguraSistema(void)
{
    ADCON1 |= 0x0F; //Digital Ports
    TRISBbits.TRISB2=1; //A
    TRISBbits.TRISB3=1; //B
    TRISBbits.TRISB0=1; //Z
    TRISCbits.TRISC6=0; //LED_RED
    TRISCbits.TRISC7=0; //LED_YELLOW
    TRISCbits.RC0 = 1; //EXTERN
    ConfiguraLCD(); //LCD
    ConfiguraInterrupcao(); //INTERRUPTION
    MCP4725Config(); //D/A CONVERTER
    MCP4725WriteI2C(addr1, 2048 >> 8, 2048);
    MCP4725WriteI2C(addr2, 2048 >> 8, 2048);
} //end
void ConfiguraInterrupcao(void)
{
    RCONbits.IPEN=1; // Disable any interrupt priority
    INTCONbits.GIEL=0; // Disable high interrupt priority
    INTCONbits.GIEH=0; // Disable low interrupt priority
    //INT2 - ROTARY ENCODER
    INTCON3bits.INT2IP=0; // Low interrupt priority
    INTCON2bits.INTEDG2=0; // INT2 interrupt on falling edge

```



```

INTCON3bits.INT2IF=0; // Flag bit ins cleared
INTCON3bits.INT2IE=1; // Enable INT2 interrupt
//TIMER0
INTCON2bits.TMR0IP=1; // High interrupt priority
INTCONbits.TMR0IF=0; // Flag bit is cleared
OpenTimer0( T0_16BIT & // Timer0 16 bits
            T0_SOURCE_INT & // Internal clock source
            T0_PS_1_16 & // Prescaler = 1:128
            TIMER_INT_OFF // Disable interruption
        );
INTCONbits.GIEL=1; // Enable high interrupt priority
INTCONbits.GIEH=1; // Enable low interrupt priority
}
//INTERRUPTION TREATMENT
#pragma interrupt Treatment_High_Interrupt
void Treatment_High_Interrupt(void)
{
//TIMER0
if(INTCONbits.TMR0IF)
{
switch (Pattern)
{
case 1: //CIRCULAR
if (cont < 128)
{
MCP4725WriteI2C(addr1,((int)(DACLookup_FullSine_7Bit_1[cont] * a) + X) >> 8,
((int)(DACLookup_FullSine_7Bit_1[cont] * a) + X));
MCP4725WriteI2C(addr2,((int)(DACLookup_FullSine_7Bit_2[cont] * a) + X) >> 8,
((int)(DACLookup_FullSine_7Bit_2[cont] * a) + X));
}
else
{
cont = 0;
MCP4725WriteI2C(addr1,((int)(DACLookup_FullSine_7Bit_1[cont] * a) + X) >> 8,
((int)(DACLookup_FullSine_7Bit_1[cont] * a) + X));
MCP4725WriteI2C(addr2,((int)(DACLookup_FullSine_7Bit_2[cont] * a) + X) >> 8,
((int)(DACLookup_FullSine_7Bit_2[cont] * a) + X));
}
cont++;
}
}
}

```

```

break;
case 2: //LONGITUDINAL
    if (WF == 1)
    {
        if (cont < 128)
        {
            MCP4725WriteI2C(addr1, ((int)(DACLookup_FullSine_7Bit_1[cont] * a) + X) >> 8,
((int)(DACLookup_FullSine_7Bit_1[cont] * a) + X));
        }
        else
        {
            cont = 0;
            MCP4725WriteI2C(addr1, ((int)(DACLookup_FullSine_7Bit_1[cont] * a) + X) >> 8,
((int)(DACLookup_FullSine_7Bit_1[cont] * a) + X));
        }
        cont++;
    }
    else
    {
        if (WF == 2)
        {
            if (cont < 64)
            {
                MCP4725WriteI2C(addr1, (AMP + X) >> 8, (AMP + X));
            }
            else
            {
                if (cont >= 64 && cont < 128)
                {
                    MCP4725WriteI2C(addr1, X >> 8, X);
                }
                else
                {
                    cont = 0;
                    MCP4725WriteI2C(addr1, (AMP + X) >> 8, (AMP + X));
                }
            }
            cont++;
        }
    }
}

```

```

else
{
    if(WF == 3)
    {
        if (cont < 128)
        {
            MCP4725WriteI2C(addr1, ((cont * Increment) + X) >> 8, ((cont * Increment) + X));
        }
        else
        {
            cont = 0;
            MCP4725WriteI2C(addr1, X >> 8, X);
        }
        cont++;
    }
    else
    {
        if(WF == 4)
        {
            if (cont < 128)
            {
                MCP4725WriteI2C(addr1, (AMP + X - (cont * Increment)) >> 8, (AMP + X - (cont *
Increment)));
            }
            else
            {
                cont = 0;
                MCP4725WriteI2C(addr1, X >> 8, X);
            }
            cont++;
        }
    }
}
break;
case 3: //TRANSVERSE
    if (WF == 1)
    {
        if (cont < 128)

```

```

    {
        MCP4725WriteI2C(addr2,((int)(DACLookup_FullSine_7Bit_1[cont] * a) + X) >> 8,
((int)(DACLookup_FullSine_7Bit_1[cont] * a) + X));
    }
    else
    {
        cont = 0;
        MCP4725WriteI2C(addr2,((int)(DACLookup_FullSine_7Bit_1[cont] * a) + X) >> 8,
((int)(DACLookup_FullSine_7Bit_1[cont] * a) + X));
    }
    cont++;
}
else
{
    if (WF == 2)
    {
        if (cont < 64)
        {
            MCP4725WriteI2C(addr2,(AMP + X) >> 8, (AMP + X));
        }
        else
        {
            if (cont >= 64 && cont < 128)
            {
                MCP4725WriteI2C(addr2, X >> 8, X);
            }
            else
            {
                cont = 0;
                MCP4725WriteI2C(addr2, (AMP + X) >> 8, (AMP + X));
            }
        }
        cont++;
    }
}
else
{
    if(WF == 3)
    {
        if (cont < 128)

```

```

        {
            MCP4725WriteI2C(addr2, ((cont * Increment) + X) >> 8, ((cont * Increment) + X));
        }
        else
        {
            cont = 0;
            MCP4725WriteI2C(addr2, X >> 8, X);
        }
        cont++;
    }
    else
    {
        if(WF == 4)
        {
            if (cont < 128)
            {
                MCP4725WriteI2C(addr2, (AMP + X - (cont * Increment)) >> 8, (AMP + X - (cont *
Increment)));
            }
            else
            {
                cont = 0;
                MCP4725WriteI2C(addr2, X >> 8, X);
            }
            cont++;
        }
    }
}
break;
}
WriteTimer0(Load_TMR0);
INTCONbits.TMR0IF = 0;
}
} // end Treatment_High_Interrupt
#pragma interruptlow Treatment_Low_Interrupt
void Treatment_Low_Interrupt(void)
{
    //INT2 - ROTARY ENCODER

```

```

if(INTCON3bits.INT2IF)
{
if(C == 0)
{
STATE = A;
if(B != STATE)
{
Pattern = Pattern + 1;

if(Pattern >= 4)
{
Pattern = 1;
}
}
else
{
Pattern = Pattern - 1;
if(Pattern <= 0)
{
Pattern = 3;
}
}
//LCD
PosicaoCursorLCD(2,1);
switch (Pattern)
{
case 1://CIRCULAR
EscreveFraseRomLCD("CIRCULAR");
break;
case 2://LONGITUDINAL
EscreveFraseRomLCD("LONGITUDINAL");
break;
case 3://TRANSVERSE
EscreveFraseRomLCD("TRANSVERSE");
break;
}
EscreveFraseRomLCD(" ");
}
else

```

```
{
  if(C == 1)
  {
    STATE = A;
    if(B != STATE)
    {
      F = F + 1.0;
      if(F >= 41.0)
      {
        F = 0.0;
      }
    }
  }
  else
  {
    F = F - 1.0;
    if(F <= -1.0)
    {
      F = 40.0;
    }
  }
  //LCD
  PosicaoCursorLCD(2,1);
  EscreveFloatLCD(F,3);
  EscreveFraseRomLCD(" Hz");
  EscreveFraseRomLCD(" ");
}
else
{
  if(C == 2)
  {
    STATE = A;
    if(B != STATE)
    {
      V = V + 0.1;
      if(V >= 12.1)
      {
        V = 0.0;
      }
    }
  }
}
```

```

else
{
    V = V - 0.1;
    if(V <= -0.1)
    {
        V = 12.0;
    }
}
//LCD
PosicaoCursorLCD(2,1);
EscreveFloatLCD(V,3);
EscreveFraseRomLCD(" V");
EscreveFraseRomLCD("      ");
}
else
{
    if(C == 3)
    {
        STATE = A;
        if(B != STATE)
        {
            WF = WF + 1;
            if(WF >= 5)
            {
                WF = 1;
            }
        }
    }
    else
    {
        WF = WF - 1;
        if(WF <= 0)
        {
            WF = 4;
        }
    }
}
//LCD
PosicaoCursorLCD(2,1);
switch (WF)
{

```



```

        case 1:
            EscreveFraseRomLCD("SINE");
        break;
        case 2:
            EscreveFraseRomLCD("SQUARE");
        break;
        case 3:
            EscreveFraseRomLCD("UP SAWTOOTH");
        break;
        case 4:
            EscreveFraseRomLCD("DOWN SAWTOOTH");
        break;
    }
    EscreveFraseRomLCD("      ");
}
}
}
}
    INTCON3bits.INT2IF=0;
}
}
#pragma code high_vector = 0x08
void _high_ISR(void)
{
    _asm goto Treatment_High_Interrupt _endasm
}
#pragma code low_vector = 0x18
void _low_ISR(void)
{
    _asm goto Treatment_Low_Interrupt _endasm
}
/** END *****/

```

ANEXOS

ANEXO A – CÂMERA MOTIONPRO X3PLUS

Resolve the Moment...



MotionPro X3 and X3PLUS



Redlake's MotionPro® X3 high-speed motion camera combines excellent resolution to frame rate performance, along with the advanced features you require for accurate high-speed motion analysis on your PC or Mac laptop or desktop computer. The enhanced sensitivity of the MotionPro® X3 combined with 1000 fps at 1280 x 1024 is perfect for research and development laboratory environments. The NEW PLUS option (available on monochrome cameras only) uses SmartCapture technology to effectively double the frame rate to 2000 fps at full resolution while preserving the total length of record time.

The X3 and X3PLUS cameras feature the latest Gigabit ethernet along with USB2.0 for easy interface. They also feature live video for continuous monitoring.

With the MotionPro®, camera integration could not be simpler. Just install the software, connect one or more Xseries cameras to USB 2.0 or ethernet ports (or both), and you are ready to capture high-speed digital imagery. Control the camera with the feature-rich MotionPro® X software or use the LabVIEW™ or MATLAB® plugin to integrate it into a larger experiment setup. To create your own control software, an SDK is included.

The extensive image processing algorithms include binning (2x2, 3x3, and 4x4), filtering, advanced color control, and programmable LUT enable you to maximize the image quality under various lighting conditions.

Flexible recording options allow the user to capture pre-selected number of frames before and/or after receiving a trigger. Double-exposure mode, with a 100 nanoseconds inter-frame time, is perfect for motion analysis on objects moving at very high speeds. Memory may be divided into multiple sessions with or without automatic download to assure no event is missed.

Applications: Microscopy, Ballistics and Munitions testing, Biomechanical research, Fluid dynamics research (PIV), Off-board vehicle impact testing

Features	Benefits
Up to 1280 x 1024 resolution color or mono	High resolution allows fine detail to be captured even at high frame rates
Fast frame rates from 1000 fps at full resolution to over 64,000 fps at reduced resolution	Perfect for capturing movies of fast dynamics of a process or event
NEW PLUS option to effectively double the frame rate and memory size (Mono only)	Allows twice the time resolution while preserving the total length of record time
Gigabit Ethernet and USB2.0	Operate camera from remote locations via Gigabit Ethernet while using USB 2.0 for local monitoring
100 nanosecond inter-frame time in double exposure mode	perform particle imaging velocimetry (PIV) measurements to study fast moving fluids
iPod and PDA compatibility	Store movies on to iPod (video) for quick review. Control the camera operation remotely and wirelessly via PDA interface

Sample Frame Rates (@ Max. Horizontal resolution of 1280)

Vertical Resolution	X3 (fps)	X3PLUS frame rate* (fps)
1024	1000	2000
768	>1,300	>2,600
512	2000	4000
256	4000	8000
128	8000	16,000
64	16,000	32,000
32	32,000	64,000
16	64,000	128,000

Note: Horizontal resolution does not affect frame rate performance. *PLUS option is available for monochrome versions only. Effective frame rate is shown for X3PLUS.

Accessories

X Timing Hub	8 independently adjustable CMOS level outputs, 2 inputs; USB interface
X Data Acquisition System	16 analog inputs and 4 analog outputs, USB interface
USB Repeater	For use up to 15m

Spectral Range



X3 Mono 8 relative Spectral Response


MotionPro X3/X3PLUS Rev A1
page 1 of 2

Resolve the Moment...

MotionPro X3 and X3PLUS Performance Specifications

CMOS Imager	
Sensor Array	Area Array with 12µm x 12µm pixels, color or monochrome
Image Resolution	Up to 1280 x 1024
Dynamic Range	59 dB at sensor
Memory and Record Rates	
On-board Storage	4 GB; with PLUS option, the memory is effectively doubled
Recording Rates	X3: Selectable, up to 64,000 fps X3PLUS (optional): Selectable, up to 128,000 fps; available in monochrome version only
Playback Rates	User selectable
Camera Control	
Shutter	Global Electronic Shutter variable from 1µs, optional 100 nanosecond exposure*
Exposure modes	Single, Double, XDR (eXtended Dynamic Range)
Trigger frame	Variable position from start to the maximum available frame capacity
Trigger Mode	CMOS level (3.3v) via BNC connectors
Time Stamp	Each frame
Software	
Control Software	MotionPro X; Windows 2000/XP, Mac OS X** (10.3 or later)
Image Processing Algorithms	Binning, filtering, advance color control, and programmable LUT
Plug-ins	LabVIEW™ for PC; MATLAB® for PC and Mac; Twain Driver for PC and Mac
File Formats	TIFF, BMP, PNG, MRF, MCF, AVI, BLD, MPEG, and MOV (Mac only)
Mechanical Description	
Camera Dimensions	3.7 in (95 mm) H x 3.7 in (95 mm) W x 6.4 in (162 mm) L
Camera Weight	4.2 lbs (1.9 kg)
Camera to PC Interface	USB 2.0; Dual USB 2.0 & Gigabit Ethernet (optional)
Camera Cable Lengths	5m (USB 2.0); Longer cable lengths (not supplied) may be used with GigE
Lens Compatibility	1" C-mount
Lens Mount	C-mount, F-mount adapter (optional)
Synchronization	
Synchronization (USB Hub Optional)	All cameras are synchronized with each other using an external sync pulse on 3.3v CMOS BNC connector
Environmental	
Camera Power	+24 vdc (100-240 VAC, 50-60 Hz ac/dc converter)
Operating Temperature	+5°C to +40°C Ambient (0°F to 122°F)
Emission/Safety	CE approved, FCC Class B compliant, UL listed
Input/Output	
Trig In (BNC)	
Sync In (BNC)	
Sync Out (BNC)	
USB 2.0 (LEMO)	
Gigabit Ethernet	
Live Out (BNC) RS170 (NTSC/PAL)	
DC Power (LEMO)	

*Enquire with factory
**GigE interface is not supported under Mac.
Specifications are subject to change.



www.redlake.com

USA +1 800.462.4307

Japan +81 3.5639.2770

email: info@redlake.com

Asia/Pacific +65 6293.4758

EMEA +31 347.32.4989

MotionPro X3/X3PLUS Rev. A1 page 2 of 2

Fonte: REDLAKE

Disponível em:

[http://www.hoskinscientifique.com/uploadpdf/Instrumentation/Redlake/hoskin_X3_X3PLUS_47d53b824d611.p](http://www.hoskinscientifique.com/uploadpdf/Instrumentation/Redlake/hoskin_X3_X3PLUS_47d53b824d611.pdf)

df. Acesso em: 28 de julho de 2020.

ANEXO B – CÂMERA XIRIS XVC-1100

Xiris® XVC-1000/1100 Weld Camera



Better Images. Better Decisions. Better Process Control.

The Xiris XVC-1000/1100 Weld Camera combines a spectacular 140+ dB High Dynamic Range capability with power over Ethernet, a full suite of welding-specific imaging software tools, and a host of unique features to provide unprecedented image quality of a variety of welding and laser processes.

The XVC-1000/1100 comes packed with functionality designed to maximize image quality and reliability, including image triggering, general purpose I/O, image windowing capability, and a weld arc photodetector.



GTAW/TIG



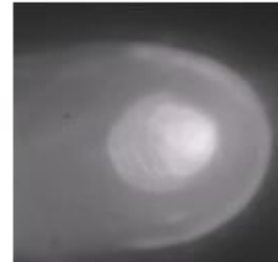
GMAW/MIG



Plasma



Laser



High Dynamic Range

With a dynamic range image in excess of 140 dB, the XVC-1000/1100 is able to acquire images with a greater range of tonal detail than any standard camera. This is particularly important for various industrial processes such as welding where there is a very bright light source in the image that needs to be seen in great detail without saturation as well as darker surrounding background features that also need to be present in the image and seen by the user. The XVC-1000 is the monochrome version; the XVC-1100 is the color version.

Color When You Need It

With high dynamic range (HDR) color imaging, the XVC-1100 is able to acquire color images when required for various welding processes, such as GTAW, where color provides extra information to the user such as: the boundary of the Heat Affected Zone, oxidation of the melt pool and tip, and shielding gas presence. The very bright weld arc can be seen in color without saturation as well as its darker surrounding background features as a result of the HDR imaging.

Welding Specific Functionality

Every feature of the XVC-1000/1100 is designed to maximize usability for the welding industry, including the high dynamic range sensor, the small compact body size, the industry standard C/CS mount lens holder, multiple mounting points, status LED and removable glass with UV/IR filter system.

Field Programmable Gate Array (FPGA)

The on board FPGA controls all camera functionality, including on-camera image processing, Area of Interest (AOI) extraction, user memory channels and more. It can also be updated with new firmware in the field.

Opto-Isolated GPIO

Opto-isolated GPIO protects the camera from noise generated by external devices typically found in a welding environment, such as welding power supplies, motors, etc., as well as power issues caused by malfunctioning devices attached to the camera.

Triggering

Hardware and software triggering to synchronize image acquisition to an external device such as a welding power supply, light source, or to other cameras. Supported modes include free running, external, and single shot triggering, with an optional trigger delay.

All Digital Solution

The image coming from the camera is an 8 or 12 bit digital signal, providing lots of extra information that can be processed to obtain the best possible image for display. Also being a digital only signal, there are no additional image losses going from analog to digital, providing the best quality image possible.

Software

The Xiris WeldStudio™ Viewer is a full demo software utility compatible with Microsoft Windows 7/8.1. It includes the Xiris camera driver and controls, graphic tools to provide the user with crosshairs and targets, and image processing functions to provide additional image enhancements for the user. Also included is a full video recording and playback utility.

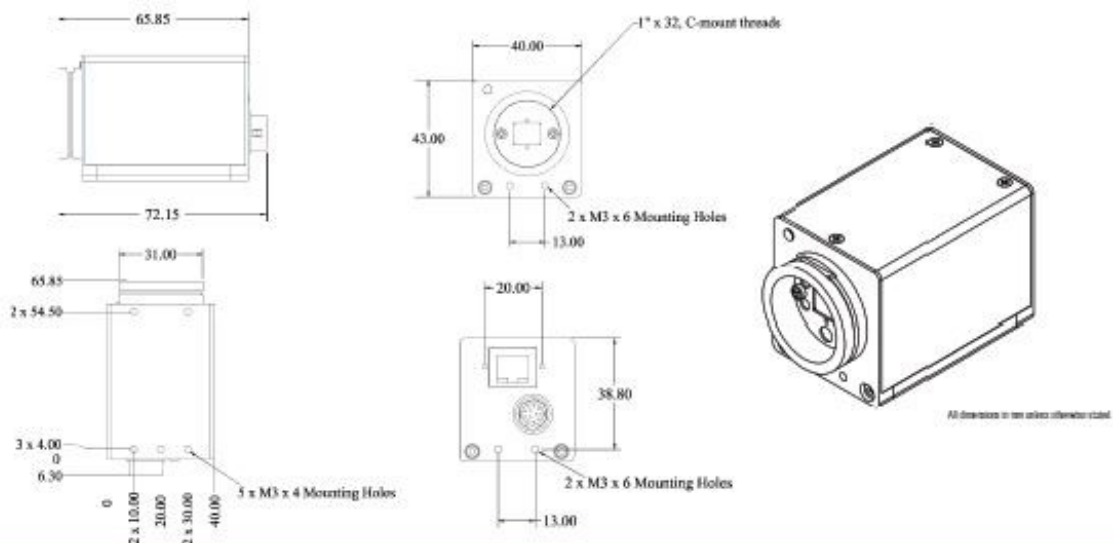
Accessories

Customize your system to meet your needs. All the accessories you need to get up and running, such as a fanless PC, display monitors, cables, power adapters, external cooling plates, industrial housings and optics can be provided on a custom basis from Xiris.

Xiris® XVC-1000/1100 Weld Camera

XVC-1000/1100 Specifications

Image Sensor	2/3" HDR CMOS (Model 1000) 2/3" HDR Color CMOS (Model 1100)	Shutter Range	1 μ s - 53s Exposure
Speed/Resolution	Up to 55 FPS at 1280 (H) x 1024 (V) pixels	Imaging Controls	ROI, exposure time, shutter mode, trigger delay, image format
Pixel Size	6.8 μ m square (8.7 mm x 7 mm active area)	Dimensions (mm)	40 (W) x 43 (H) x 65 (L) without optics
Filter	UV + IR Cut Filter	Weight	135 g (without optics)
Shutter	Global or Rolling	Lens Mount	CS mount (C mount with adapter)
Dynamic Range	140+ dB	Power Consumption	Power over Ethernet (PoE), or 12 V nominal (10-16 V) via GPIO interface, maximum 6 W
Bit Depth	12 bits	Connectors	Locking RJ-45, Hirose HR10A-10R-12P (73)
Image Data	Mono 8/12 (Model 1000), Bayer 8/12 (Model 1100)	Max. # of Cameras	Up to 2 supported @ full speed (Model 1000 only, reduced speed for Model 1100)
Max. Cable Length	100 m	Machine Vision Stds.	GigE vision 2.0 GenICam upon request
Trigger Options	<ul style="list-style-type: none"> Free-running External/delayed trigger Single shot 	Video Recording	Recording & Playback utility integrated
		Camera Control	Via Xiris WeldStudio™ Viewer (standard), or via Xiris WeldStudio™ SDK (optional)
Synchronization	Via external trigger or software trigger	Temperature	Operating: 0 ° to 45 ° C, Storage: -20 ° to 60 ° C
Trigger Inputs	2 high-speed opto-isolated, 5-24 VDC	Humidity	Operating: 20 to 80% Storage: 20 to 95% (no condensation)
Strobe Outputs	1 opto-isolated open-collector, max 40 VDC	Compliance	CE, FCC-B, RoHS
GP Inputs	2 opto-isolated 5-24 VDC	Operating System	Windows 7/8 (32 or 64 bit)
GP Outputs	2 opto-isolated open-collector, max 40 VDC	Photodiode	Detects presence of weld arc
Communications	Gigabit Ethernet, opto-isolated UART interface		



Xiris Automation Inc.

1018 Sutton Drive, Unit C5, Burlington, Ontario, Canada L7L 6B8

T: +1.905.331.6660 F: +1.905.331.6661 E: sales@xiris.com www.xiris.com

For your local Representative, please check our website at www.xiris.com/en/about/contact-us. Oct 2018.

Specifications are subject to change without notice. Please check our website for most recent details.

Fonte: XIRIS

Disponível em: <https://weldspray.us/imagens/Xiris/Xiris%20XVC-1000-1100%20Datasheet%20Oct%202016.pdf>. Acesso em: 28 de julho de 2020.