



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FRANCISCO MACHADO DE ASSIS BENTES NETO

**SOLDAGEM GMAW – P COM SWITCHBACK E ADIÇÃO DE ARAME FRIO
APLICADA À MANUFATURA ADITIVA DO ALUMÍNIO**

BELÉM
2020

FRANCISCO MACHADO DE ASSIS BENTES NETO

**SOLDAGEM GMAW-P COM SWITCHBACK E ADIÇÃO DE ARAME FRIO
APLICADA À MANUFATURA ADITIVA DO ALUMÍNIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Caracterização e processamento de materiais.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes da Mota

BELÉM
2020

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

B475s Bentes Neto, Francisco Machado de Assis
SOLDAGEM GMAW-P COM SWITCHBACK E ADIÇÃO
DE ARAME FRIO APLICADA À MANUFATURA ADITIVA
DO ALUMÍNIO / Francisco Machado de Assis Bentes Neto. —
2020.
114 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes da Mota
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade
Federal do Pará, Belém, 2020.

1. Manufatura Aditiva. 2. Alumínio. 3. GMAW-P. 4.
Switchback. 5. Arame Frio. I. Título.

CDD 671.52


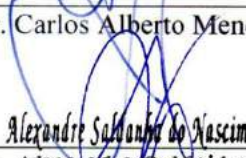
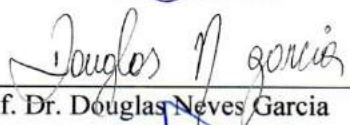

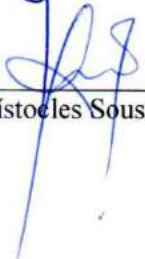
Francisco Machado de Assis Bentes Neto

**SOLDAGEM GMAW – P COM SWITCHBACK E ADIÇÃO DE ARAME FRIO
APLICADA À MANUFATURA ADITIVA DO ALUMÍNIO**

Dissertação apresentada para a
obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica do Instituto de
Tecnologia da Universidade Federal
do Pará. Área de Concentração:
Ciências Mecânicas.

Data de aprovação: 06 de março de 2020.

Banca examinadora:

- | | |
|---|--|
|  _____ Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes da Mota | – Orientador / Presidente PPGEM/ITEC/UFPA |
|  _____ Prof. Dr. Alexandre Sabino do Nascimento PROFESSOR ASSOCIADO UFPA SIAPE 2413748 | – Membro Interno PPGEM/ITEC/UFPA |
|  _____ Prof. Dr. Douglas Neves Garcia | – Membro Externo CAMTUC/UFPA |
|  _____ Prof. Dr. Hélio Antônio Lameira de Almeida | – Membro Externo IFPA |
|  _____ Prof. Dr. Temístocles Sousa Luz | – Membro Externo PPGEM/CT/UFES |

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar forças para superar as dificuldades e sempre seguir em frente.

Aos meus pais e irmãos, Domingos Sávio de Souza Bentes, Edilena da Silva e Sousa, Roger Rodrigo de Sousa Bentes e Bruno Danilo da Silva e Sousa, por todo apoio e confiança ao longo destes anos de estudo.

À minha namorada, Débora de Abreu Ferreira, por todo apoio nos momentos difíceis, pelas conversas, pelos inúmeros momentos felizes, pela confiança e amor que temos um pelo outro.

Aos professores Carlos Alberto Mendes da Mota e Alexandre Saldanha do Nascimento, pela orientação e parceria no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Instituto Federal do Pará (IFPA), representado pelo professor Dr. Otávio Rocha, por possibilitar o uso de equipamentos da instituição.

Ao GPEMAT – UFPA, por possibilitar o uso de seus equipamentos.

Ao PPGEM – UFPA, pela estrutura do programa de e pelos ensinamentos passados através docentes que o compõem.

Aos membros/egressos do GETSOLDA – UFPA, Alexandre Baldez, Marcelino Neto, Humberto Aguirre, Felipe Teixeira, Thiago Farias, Adriano Martins, Saulo Monteiro, Lucas Nagib e Anderson, pela amizade dos últimos anos e pelas contribuições, sem as quais, inviabilizariam esta pesquisa.

Ao CNPQ, pelo suporte financeiro.

À todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

A manufatura aditiva (MA) é um processo de fabricação que consiste na deposição de múltiplas camadas de material sobre um substrato, a partir de um modelo tridimensional. Este processo possibilita a criação de peças de pequeno, médio e grande portes, com geometrias complexas que frequentemente não seriam possíveis de fabricar por processos convencionais de manufatura subtrativa. A manufatura aditiva de materiais metálicos normalmente é realizada através de processos de soldagem e, neste contexto, destaca-se o processo GMAW por possibilitar a fabricação de peças de grande porte e em mais altas taxas de deposição, além de apresentar baixo custo em comparação à MA com feixe de elétrons e a laser. Muitas dificuldades ainda precisam ser superadas para viabilizar a fabricação de componentes, através da manufatura aditiva por processos de soldagem que usam o arco elétrico como fonte de calor. Este trabalho estuda o processo de soldagem GMAW-P (Gas Metal Arc Welding – Pulsed) com as técnicas switchback e adição de arame frio, aplicado à manufatura aditiva do alumínio. Foram realizados testes em simples deposição utilizando o arame ER5356 para explorar o efeito dos parâmetros de soldagem do processo GMAW – P, e das referidas técnicas derivativas, sobre a qualidade da solda. Os resultados desta etapa mostraram que o melhor acabamento superficial e a menor incidência de defeitos (poros, falta de fusão e trincas) foram obtidos nas condições de baixa amplitude de tecimento para as soldas com switchback, e para as soldas com adição de arame frio depositadas em até 50% da velocidade do arame eletrodo. Foram confeccionadas paredes por MA utilizando os melhores parâmetros da etapa anterior. Os resultados mostraram que as paredes depositadas com adição de arame frio apresentaram uma maior altura por camada, um menor volume de poros e microdureza ligeiramente mais elevada. As paredes depositadas com switchback apresentaram um melhor acabamento superficial, uma melhor relação BTA (buy-to-apply) e uma maior redução na anisotropia microestrutural. A combinação das técnicas switchback e arame frio gerou parede com aspecto geométrico intermediário, com fator BTA e uma altura por camada melhores em comparação à condição GMAW-P, além de redução na orientação preferencial do crescimento de grãos e baixo volume de poros.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva. Alumínio. GMAW-P. Arame Frio. Switchback.

ABSTRACT

Additive manufacturing (AM) is a manufacturing process that consists of depositing multiple layers of material, using a three-dimensional model. This process allows the creation of small to large parts, with complex geometries that are often not possible through conventional subtractive manufacturing processes, with applications in the aerospace, aeronautical, naval sectors, among others. The additive manufacturing of metallic materials is usually performed through welding processes, in this context, the GMAW welding process can be employed, enabling the manufacture of large parts, with high deposition rates, in addition to presenting lower cost in comparison to EBM and DMLM processes. Despite these advantages, many difficulties have yet to be overcome in order to broaden the wire arc additive manufacturing of components. Therefore, this work addresses the GMAW-P welding with switchback technique and with cold wire addition applied to aluminum additive manufacturing. Bead on plate tests were performed using ER5356 wire to explore the welding and the derived techniques parameters. The results showed that the best surface quality and the lowest incidence of defects (pores, lack of fusion and cracks) were observed on low amplitude of weave conditions for switchback welds, and for cold wire feed speed up to 50% of the electrode wire feed speed. Finally, walls were made using the best parameters from the previous step, the results showed that the deposited walls with cold wire addition presented greater height per layer, lower pore volume and slightly higher microhardness. On the other hand, switchback deposited walls showed better surface finish, lower BTA (buy-to-apply) ratio and lower microstructural anisotropy. The combination of the techniques (switchback and cold wire) generated a wall with intermediate geometry, with better BTA ratio and height per layer in comparison to a GMAW-P wall without any of the aforementioned techniques, in addition to a lower grain growth preferential orientation and low pore volume.

Key-words: Additive Manufacturing. Aluminum. GMAW-P. Cold Wire. Switchback.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Diferentes condições de molhabilidade para nucleação de poros. a) o líquido molha o substrato. b) o gás molha o substrato. A condição b favorece a nucleação heterogênea..... | 25 |
| Figura 2. Representação esquemática demonstrando a variação do volume de poros em função da velocidade de soldagem. | 26 |
| Figura 3. Diagrama de equilíbrio de fases ligas Al-Mg (5XXX). | 27 |
| Figura 4. Esquema do processo de soldagem GMAW. | 28 |
| Figura 5. Diagrama esquemático de uma onda do tipo corrente pulsada e transferência do metal | 30 |
| Figura 6. Ilustração da tocha de soldagem e da alimentação do arame frio no processo GMAW-AF..... | 31 |
| Figura 7. Ilustração da técnica switchback. A: movimento de avanço. R: movimento de reversão..... | 32 |
| Figura 8. a) Resultado da simulação do método switchback. b) Aparência do fundo do cordão GMAW-P sem cobre-junta com switchback. | 34 |
| Figura 9. Estrutura de solidificação do metal de solda com avanço de 10 mm e reversão de 5 mm. Observam-se grãos equiaxiais próximos à linha de fusão..... | 35 |
| Figura 10. Macroestrutura longitudinal de parede de solda, com destaque à direção do crescimento colunar de grãos: a) modo unidirecional; b) modo bidirecional; c) modo switchback (ampliação da quarta à sexta camada). | 36 |
| Figura 11. Modos de solidificação básicos de metais. a) planar. b) celular. c) colunar dendrítico. d) equiaxial dendrítico..... | 37 |
| Figura 12. Efeito do super-resfriamento constitucional no modo de solidificação. | 38 |
| Figura 13. Efeitos do gradiente de temperatura e da taxa de crescimento na morfologia e no tamanho da microestrutura de solidificação. | 38 |
| Figura 14. Início de solidificação da poça de fusão: (a) vista de cima, (b) corte transversal em AB. PF - poça de fusão, MB - metal base, v - velocidade de soldagem, BB' - linha de fusão, BB''- frente de solidificação. As setas no interior dos grãos em (a) indica..... | 39 |
| Figura 15. Ciclograma de corrente e tensão para o modo de transferência CMT. | 41 |
| Figura 16. Distribuição de porosidade. a) CMT convencional. b) CMT-P. c) CMT-ADV. d) CMT-PADV. | 42 |
| Figura 17. Microestrutura de solda. a) CMT convencional. b) CMT-P. c) CMT-ADV. d) CMT-PADV. | 42 |

| | |
|--|----|
| Figura 18. Montagem esquemática para o funcionamento do RAQI. | 43 |
| Figura 19. Efeito das diferentes técnicas de gerenciamento térmico sobre a altura e largura, bem como o aspecto das preformas. | 44 |
| Figura 20. Fluxograma das etapas desta pesquisa. | 45 |
| Figura 21. Sistema mecanizado para soldagem switchback. Arranjo dos carros de deslocamento: a) vista lateral; b) vista isométrica. | 46 |
| Figura 22. Representação esquemática do número de camadas/passadas do arco por um dado trecho durante a soldagem GMAW com switchback (R/A = 50%). | 49 |
| Figura 23. Sistema de alimentação de arame frio em malha fechada. | 52 |
| Figura 24. Disposição da tocha de soldagem e do dispositivo de alimentação do arame frio. | 52 |
| Figura 25. Disposição da tocha de soldagem e do metal de base para deposição de paredes. O dispositivo auxiliar de alimentação somente foi utilizado nas soldas com adição de arame frio. | 54 |
| Figura 26. Esquema de seccionamento para retirada das amostras dos cordões de simples deposição. Dimensões em (mm). | 55 |
| Figura 27. Esquema de seccionamento para retirada de amostras das paredes de alumínio. Dimensões em (mm). | 55 |
| Figura 28. Representação das medidas do perfil geométrico para os cordões de simples deposição. | 56 |
| Figura 29. a) Descarte da última e da primeira camada. b) critério para determinação da altura entre camadas (linhas vermelhas no ponto de maior penetração de cada camada). | 57 |
| Figura 30. Critério para determinar a altura da parede através do alinhamento das distorções. a) parede reta; b) parede com distorções. | 58 |
| Figura 31. Áreas total e efetiva da camada. | 58 |
| Figura 32. Esquema de ensaio de microdureza para seção transversal dos passes de simples deposição. | 59 |
| Figura 33. Esquema de ensaio de microdureza seção transversal das paredes. | 60 |
| Figura 34. Testes na soldagem de aço baixa liga com switchback na condição GMAW SB50.1. | 63 |
| Figura 35. Testes na soldagem de aço baixa liga com switchback na condição GMAW SB90.3. | 64 |

| | |
|--|----|
| Figura 36. Resultado dos ensaios visual e de liquido penetrante para soldas GMAW-P. | 65 |
| Figura 37. Resultado dos ensaios visual e liquido penetrante dos cordões: (A) GMAW-P SB50.1; (B) GMAW-P SB50.2; (C) GMAW-P SB50.3. | 66 |
| Figura 38. Resultados ensaio visual e liquido penetrante dos cordões: (A) GMAW-P SB75.1; (B) GMAW-P SB75.2; (C) GMAW-P SB75.3. | 66 |
| Figura 39. Resultados ensaio visual e liquido penetrante dos cordões: (A) GMAW-P SB90.1; (B) GMAW-P SB90.2; (C) GMAW-P SB90.3. | 67 |
| Figura 40. Ilustração da relação entre a amplitude de tecimento e o número de ciclos do movimento switchback necessários para completar um cordão de solda com comprimento determinado. (a) GMAW-P SB50.1. (b) GMAW-P SB50.3. | 68 |
| Figura 41. Macrografias da seção transversal do cordão de solda na condição GMAW-P: (a) seção A e (b) seção C. Aumento 10X. | 69 |
| Figura 42. Macrografias da seção transversal dos cordões de solda com switchback, (a) seção A; (b) seção C. Aumento 8X. | 70 |
| Figura 43. Variação no modo de solidificação para uma mesma condição de soldagem. Condição GMAW- P SB50.2: (a) seção A e (b) seção C. Aumento 12,5X. | 71 |
| Figura 44. Indentações na interface metal de solda (MS)/metal de base (MB) evidenciando o crescimento de grãos colunares. (a) Aumento 200X e (b) Aumento 100X. Condição GMAW- P SB50.2 seção A..... | 72 |
| Figura 45. Macrografia da seção longitudinal do metal de solda: (a) GMAW-P, (b) GMAW-P SB50.3 (c) GMAW-P SB75.3 e (d) GMAW-P SB90.3. Aumento 8X..... | 73 |
| Figura 46. Incidência de porosidade na seção transversal do cordão de solda GMAW-P. (a) seção A e (b) seção C. Aumento 10X. | 74 |
| Figura 47. Incidência de porosidade na seção transversal dos cordões de solda com switchback. (a) seção A; (b) seção C. Aumento 10X..... | 75 |
| Figura 48. Microestrutura e linha de indentação. Seção transversal C dos cordões de solda GMAW-P; GMAW-P SB50.3; GMAW-P SB75.3 e GMAW-P SB90.3. Ampliação 50X. | 77 |
| Figura 49. Microestrutura e linha de indentação. Seção transversal C dos cordões GMAW-P; GMAW-P SB50.3; GMAW-P SB75.3 e GMAW-P SB90.3. Ampliação 200X. | 78 |
| Figura 50. Perfil de microdureza. Soldas nas condições GMAW-P; GMAW-P SB50.3; GMAW-P SB75.3 e GMAW-P SB 90.3: (a) Seção A; (b) Seção C. | 80 |

| | |
|---|-----|
| Figura 51. Perfil geométrico das soldas GMAW-P; GMAW-P SB50.1; GMAW-P SB50.2 e GMAW-P SB50.3..... | 82 |
| Figura 52. Perfil geométrico das soldas GMAW-P; GMAW-P SB75.1; GMAW-P SB75.2 e GMAW-P SB75.3..... | 82 |
| Figura 53. Perfil geométrico das soldas GMAW-P; GMAW-P SB90.1; GMAW-P SB90.2 e GMAW-P SB90.3..... | 82 |
| Figura 54. Perfil geométrico das soldas GMAW-P; GMAW-P SB50.3; GMAW-P SB75.3 e GMAW-P SB90.3..... | 84 |
| Figura 55. Aspecto superficial e LP das soldas GMAW-P e GMAW-P AF1 a AF6..... | 85 |
| Figura 56. Macrografia da seção transversal das soldas GMAW-P e GMAW-P AF1 a AF6. (a) seção A; (b) seção C. Ampliação 10X. | 86 |
| Figura 57. Trincas nas seções transversais AF4a, AF5a e AF5c..... | 87 |
| Figura 58. Macrografia da seção longitudinal. Soldas GMAW-P com adição de arame frio. Ampliação 8X..... | 88 |
| Figura 59. Incidência de porosidade na seção transversal dos cordões de solda com adição de arame frio. (a) Seção A; (b) Seção C. Aumento 10X. | 90 |
| Figura 60. Microestrutura e linha de indentação. Soldas GMAW-P, GMAW-P AF1, GMAW-P AF2 e GMAW-P AF3. Ampliação 100X. | 91 |
| Figura 61. Perfil de microdureza. Soldas GMAW-P, GMAW-P AF1, GMAW-P AF2 e GMAW-P AF3: (a) Seção A; (b) Seção C. | 93 |
| Figura 62. Perfil dos valores médios do aspecto geométrico das solda GMWA – P com arame frio..... | 95 |
| Figura 63. Aspecto superficial da parede de alumínio nas condições GMAW-P, GMAW-P AF, GMAW-P SB e GMAW-P SBAF..... | 96 |
| Figura 64. Perfil geométrico da parede de solda com diferentes metodologias de deposição dos passes de soldagem. A) descontínuo. B) contínuo..... | 97 |
| Figura 65. Macrografias da seção transversal da parede nas condições: a) GMAW-P; b) GMAW-P AF; c) GMAW-P SB d) GMAW SBAF. Ampliação 8x..... | 98 |
| Figura 66. Macrografias da seção longitudinal da parede nas condições: a) GMAW-P; b) GMAW-P AF; c) GMAW-P SB d) GMAW SBAF. Ampliação 8x..... | 98 |
| Figura 67. Microestrutura equiaxial no 10° passe. a) GMAW-P; b) GMAW-P AF; c) GMAW-P SB; d) GMAW-P SBAF. Aumento 50x..... | 100 |

| | |
|---|-----|
| Figura 68. Transição entre o 10º e 9º passe apresentando grãos colunares no 10º passe e grãos equiaxiais grosseiros no topo do 9º. a) GMAW-P; b) GMAW-P AF; c) GMAW-P SB; d) GMAW-P SBAF. Aumento 50x. | 100 |
| Figura 69. Transição entre o 6º e 5º passe apresentando grãos alongados no 6º passe e grãos equiaxiais grosseiros no topo do 5º. a) GMAW-P; b) GMAW-P AF; c) GMAW-P SB; d) GMAW-P SBAF. Aumento 50x. | 101 |
| Figura 70. Microestrutura equiaxial no centro do 6º passe. a) GMAW-P; b) GMAW-P AF; c) GMAW-P SB; d) GMAW-P SBAF. Aumento 50x. | 101 |
| Figura 71. Microestrutura equiaxial no centro do 6º passe para condição GMAW-P sob luz polarizada a) Grãos grosseiros; b) grãos refinados. Aumento 50x. | 102 |
| Figura 72. Transição entre 5º e 4º passe para condição GMAW-P SBAF sob luz polarizada. a) grãos refinados; b) transição; c) grãos grosseiros. Aumento 50x. | 102 |
| Figura 73. Trinca observada na transição entre 9º e 8º passe para a condição GMAW-P SB. Aumento 50x. | 103 |
| Figura 74. Trinca no centro do 10º passe da condição GMAW-P SB. Aumento 50x.. | 103 |
| Figura 75. Trinca intergranular a quente na manufatura aditiva da liga AA5183. | 103 |
| Figura 76. Perfil de microdureza da parede. a) GMAW-P; b) GMAW-P AF; c) GMAW-P SB e d) GMAW-P SBAF. | 105 |
| Figura 77. Valores médios de microdureza para as condições avaliadas. | 105 |
| Figura 78. Representação gráfica do volume de poros para as paredes analisadas. | 107 |
| Figura 79. Distribuição de poros na seção transversal da parede. | 107 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1. Pesquisas abordando a técnica de soldagem com switchback, organizadas por área de estudo..... | 33 |
| Tabela 2. Variáveis dependentes e independentes para realização do switchback com o sistema mecanizado..... | 47 |
| Tabela 3. Equações que descrevem as variáveis dependentes em função das independentes..... | 47 |
| Tabela 4. Composição química do arame eletrodo e do metal de base..... | 48 |
| Tabela 5. Parâmetros de soldagem utilizados para as soldas com aço baixa liga..... | 48 |
| Tabela 6. Parâmetros de switchback utilizados para a soldagem com aço baixa liga..... | 49 |
| Tabela 7. Parâmetros fixados para todas as soldas de alumínio com switchback..... | 51 |
| Tabela 8. Composição química do arame eletrodo ER 5356..... | 51 |
| Tabela 9. Parâmetros de switchback utilizados para as soldas de alumínio..... | 51 |
| Tabela 10. Velocidades de alimentação de arame frio para os experimentos..... | 53 |
| Tabela 11. Parâmetros para deposição das paredes de alumínio..... | 54 |
| Tabela 12. Composição química Marble..... | 56 |
| Tabela 13. Composição química Keller..... | 56 |
| Tabela 14. Relação entre amplitude e frequência máxima de tecimento..... | 61 |
| Tabela 15. Calibração dos valores de amplitude do carro de cima..... | 61 |
| Tabela 16. Valor máximo de comprimento de avanço e seus demais parâmetros..... | 62 |
| Tabela 17. Valores máximos de comprimento de avanço para R/A de 50%, 75% e 90% e seus demais parâmetros..... | 62 |
| Tabela 18. Valores médios de microdureza para as seções analisadas das condições GMAW-P; GMAW-P SB50.3; GMAW-P SB75.3 e GMAW-P SB90.3..... | 79 |
| Tabela 19. Perfil geométrico. Valores médios das condições de soldagem..... | 81 |
| Tabela 20. Valores médios de microdureza para as seções analisadas das condições GMAW-P AF0, GMAW-P AF1, GMAW-P AF2 e GMAW-P AF3..... | 92 |
| Tabela 21. Valores médios dos aspectos geométricos das seções transversais das amostras de cada condição de soldagem com adição de arame frio..... | 95 |
| Tabela 22. . Dados de geometria das paredes. Unidades em (mm)..... | 104 |
| Tabela 23. Porosidade nas paredes de acordo com o teste de gravimetria..... | 106 |

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

3D - Tridimensional

A – Comprimento de avanço

Amp. - Amplitude

ASTM - American Society for Testing and Materials

BTF – Buy-to-fly

CAD – Computer aided design

CMT – Cold Metal Transfer

CMT – P - Cold Metal Transfer Pulsed

CMT-ADV - Cold Metal Transfer Advanced

CMT-PADV - Cold Metal Transfer Pulsed Advanced

DBCP – Distância bico de contato-peça

E - Empuxo

F – Frequência

G – Gradiente de temperatura

GMAW – Gas Metal Arc Welding

GMAW – AF – Gas Metal Arc Welding com adição de Arame Frio

GMAW – P - Gas Metal Arc Welding Pulsed

L - Largura

LASER - light amplification by stimulated emission of radiation

MA - Manufatura aditiva

P – Penetração

R_e - Reforço

R – Comprimento de reversão

R_c – Taxa de crescimento

RAQI – Resfriamento ativo por quase imersão

S/L – Interface sólido/líquido

WAAM – Wire arc additive manufacturing

D_L – Coeficiente de difusão

I_m – Corrente média

r_c – Raio crítico

ρ_a – Densidade da parede

ρ_{al} – Densidade da liga de alumínio 5356

T_L – Temperatura liquidus

ΔT – Diferença entre temperatura liquidus e solidus

V_A – Velocidade de avanço

V_R – Velocidade de reversão

V_s – Velocidade de soldagem

V_{af} – Velocidade de alimentação de arame frio

V_a – Velocidade de alimentação do arame eletrodo

V_{eq} – Velocidade equivalente de soldagem

V_s – Velocidade de soldagem

V_p – Volume de poro

Θ – Ângulo de contato

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 18 |
| 2. OBJETIVO | 21 |
| 2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 21 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 22 |
| 3.1. ALUMÍNIO E SUAS LIGAS | 22 |
| 3.1.1. Propriedades do alumínio..... | 22 |
| 3.1.3. Ligas Alumínio-Magnésio (5XXX) | 26 |
| 3.2. SOLDAGEM GMAW | 28 |
| 3.2.2. Modos de transferência metálica..... | 29 |
| 3.2.3. Soldagem GMAW com adição de arame frio (GMAW-AF):..... | 30 |
| 3.3. SOLDAGEM COM SWITCHBACK..... | 32 |
| 3.4. METALURGIA DA SOLDAGEM | 36 |
| 3.5. MANUFATURA ADITIVA DO ALUMÍNIO..... | 39 |
| 4. METODOLOGIA..... | 45 |
| 4.1. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA MECANIZADO PARA SOLDAGEM SWITCHBACK | 45 |
| 4.2. SOLDAGEM GMAW COM SWITCHBACK DE AÇO BAIXA LIGA..... | 48 |
| 4.4. SOLDAGEM GMAW-P COM SWITCHBACK DO ALUMÍNIO | 50 |
| 4.5. SOLDAGEM GMAW-P DE ALUMÍNIO COM ADIÇÃO DE ARAME FRIO | 52 |
| 4.5 DEPOSIÇÃO DE PAREDES DE ALUMÍNIO | 53 |
| 5.5. ANÁLISE METALÚRGICA | 54 |
| 5.6. ANÁLISE DE POROS | 58 |
| 5.7. ANÁLISE DE MICRODUREZA VICKERS..... | 59 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 61 |
| 5.1. AFERIÇÃO DO SISTEMA MECANIZADO PARA SOLDAGEM SWITCHBACK | 61 |
| 5.2. SOLDAGEM COM SWITCHBACK DE AÇO BAIXA LIGA..... | 63 |
| 5.3. SOLDAS DE ALUMÍNIO COM SWITCHBACK | 64 |
| 5.3.1. Aspecto superficial..... | 64 |
| 5.3.2. Macroestrutura | 68 |
| 5.3.3. Porosidade | 74 |
| 5.3.4. Microestrutura | 76 |
| 5.3.5. Microdureza | 78 |
| 5.3.6. Aspecto geométrico das soldas | 81 |
| 5.4. SOLDAGEM COM ARAME FRIO DE ALUMÍNIO | 84 |

| | |
|--|-----|
| 5.4.1. Aspecto superficial..... | 84 |
| 5.4.2. Macroestrutura | 86 |
| 5.4.3. Porosidade | 89 |
| 5.4.4. Microestrutura | 91 |
| 5.4.5 Ensaio de microdureza | 92 |
| 5.4.6. Análise geométrica..... | 94 |
| 5.5. MANUFATURA ADITIVA DO ALUMÍNIO..... | 95 |
| 5.5.1 Aspecto superficial..... | 95 |
| 5.5.2. Macroestrutura | 97 |
| 5.5.5. Porosidade | 106 |
| 7. TRABALHOS FUTUROS | 109 |
| 8. REFERÊNCIAS | 110 |
| APÊNDICE | 114 |

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (MA) é caracterizada pelo emprego de equipamentos capazes de fabricar objetos por meio da adição de material, camada por camada, a partir de um modelo digital tridimensional (3D), usualmente obtido por meio de um sistema CAD (Computer Aided Design). Assim, tem-se o conceito de produção por adição de material em contraste à produção por métodos convencionais, em que a peça é obtida pela retirada de material, como na usinagem (RODRIGUES et al, 2016).

Esta metodologia de fabricação tem ganhado popularidade devido aos seus inúmeros benefícios relacionados tanto à sua habilidade de trabalhar com diversos materiais, como à sua capacidade de produzir componentes novos e complexos eliminando a necessidade de usinagem adicional (DAREKAR, 2018). O emprego da MA apresenta melhor custo-benefício na produção de peças individuais ou pequenos lotes, além de reduzir o tempo de espera pelas mesmas e possibilitar a fabricação de peças que não seriam possíveis através de manufatura subtrativa, sendo aplicado em setores como aeroespacial, automobilístico, biomédico e geração de energia (WATERMAN e DICKENS, 1994; GUO e LEU, 2013).

O sistema básico de manufatura aditiva consiste na combinação de um sistema de deslocamento, uma fonte de calor e a alimentação de material (WILLIAMS et al, 2015). No caso dos metais, a fabricação normalmente é realizada por processos de soldagem auxiliados por robôs. Inicialmente apenas técnicas de alta densidade energética como o LASER cladding e o feixe de elétrons eram utilizados, porém, o uso de processos a arco elétrico (WAAM – Wire Arc Additive Manufacturing) surge como uma alternativa mais econômica e com taxa de deposição superior, sendo indicado para fabricação de componentes de maiores dimensões (ALBERTI et al, 2014).

Dentre os materiais metálicos trabalhados por manufatura aditiva, destacam-se as ligas de titânio, níquel, cobalto, aços (inoxidáveis, ferramenta e baixa liga) e alumínio. Este último apresenta uma combinação única de propriedades como boa resistência mecânica e à corrosão, baixa densidade, capacidade de formar liga com diversos metais e não metais entre outras, tornando o alumínio um metal versátil, sendo aplicado na indústria de transportes, energia, máquinas, construção civil, embalagens etc. Apesar destas vantagens, a soldagem de ligas de alumínio sempre foi problemática devido a seu

elevado coeficiente de expansão térmica, formação de camada de óxido superficial, trincas de solidificação e porosidade (DAREKAR, 2018).

As ligas não tratáveis termicamente Alumínio-Magnésio (5XXX) são amplamente utilizadas em componentes estruturais de grande porte que requerem baixo custo, alta confiabilidade, boa resistência mecânica e à corrosão. Apesar do grande potencial destas ligas para a manufatura aditiva, as mesmas sofrem com problemas técnicos como a incidência de porosidade, trincas, isotropia microestrutural, e propriedades mecânicas geralmente inferiores às de ligas fundidas comerciais (GU et al, 2018 e COLEGROVE et al, 2017). Entretanto, ainda é relativamente pequeno o número de pesquisas para viabilizar este processo.

Atualmente, novas técnicas de soldagem estão sendo estudadas para melhorar a fabricação de componentes por manufatura aditiva. Neste contexto, surge a técnica de oscilação longitudinal da tocha de soldagem, conhecida na literatura como técnica de soldagem com switchback. Kaneko et al (2009) afirmam que o referido movimento promove um melhor controle da poça de fusão. Almeida et al (2012) descobriram que a técnica contribui para o surgimento de grãos equiaxiais próximos à linha de fusão na soldagem de aços carbono. Teixeira (2018) reportou que a técnica promove uma redução do aporte térmico do processo de soldagem e, recentemente, Yehorov (2018) aponta que a técnica é capaz de reduzir a incidência de poros e refinar a microestrutura em soldas de alumínio.

Outro processo de soldagem derivativo em destaque é a técnica GMAW – AF (Gas Metal Arc Welding – Arame Frio) ou, simplesmente, técnica GMAW com adição de arame frio. Por esta técnica de soldagem, um arame frio (não energizado) é injetado na poça de fusão à frente do arame eletrodo, alinhado à direção de soldagem, e com velocidade de alimentação controlada. O objetivo é aproveitar a energia de uma condição estável de soldagem, sem provocar perturbações significativas no processo ou alterações na qualidade da solda, e assim se obter maior produção, menor diluição, e soldas de qualidade com potencial de utilização na manufatura aditiva de ligas metálicas (GARCIA, 2011; ANDRADE, 2010 BARCELAR, 2005).

Tendo em vista o aumento dos interesses industrial e acadêmico acerca da manufatura aditiva do alumínio, bem como pelos encorajadores resultados obtidos com o uso das técnicas switchback e adição de arame frio, aplicadas à soldagem GMAW de

diversos materiais, o objetivo desta pesquisa é investigar a potencialidade da aplicação das referidas técnicas em processos de manufatura aditiva. Desta forma, espera-se compreender a influência dos parâmetros operacionais das técnicas sobre os aspectos geométricos e metalúrgicos, propriedades mecânicas e incidência de defeitos como trincas e porosidade no produto.

2. OBJETIVO

Investigar a influência dos parâmetros das técnicas switchback e de adição de arame frio sobre os aspectos geométricos, metalúrgicos, mecânicos e incidência de defeitos na manufatura aditiva do alumínio.

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar os efeitos dos parâmetros das técnicas switchback e de adição de arame frio em soldas de alumínio GMAW – P de passe isolado.
- Estudar os efeitos dos parâmetros da técnica switchback e de adição arame frio na construção de paredes de alumínio.
- Avaliar a viabilidade operacional da soldagem GMAW-P com switchback e com adição de arame frio aplicadas na manufatura aditiva do alumínio.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

Rooy (1990) afirma que o alumínio é o segundo metal mais abundante na Terra, tornando-se uma alternativa importante em aplicações de engenharia nas últimas décadas. A compatibilidade entre as crescentes necessidades da indústria com as propriedades únicas do alumínio e suas ligas promoveu um grande avanço na produção e no uso deste metal.

3.1.1. Propriedades do alumínio

Uma das características mais importantes do alumínio é a sua versatilidade. As propriedades mecânicas e físicas que podem ser alcançadas a partir do alumínio puro até às mais complexas ligas de alumínio são notáveis. A seguir serão descritas algumas das propriedades do alumínio e suas ligas.

- Densidade

O alumínio possui densidade de apenas 2700 kg/m^3 , aproximadamente um terço da densidade do aço (7830 kg/m^3). Esta propriedade torna o alumínio competitivo com outros materiais, em base de peso, mesmo quando estes apresentam melhores propriedades em base volumétrica (ALCAN, 1993). O módulo de elasticidade é definido como a razão da tensão por unidade de deformação e, para o alumínio equivale a 69 GPa. O aço apresenta módulo de elasticidade de 200 GPa. Portanto, o peso de uma chapa plana de alumínio requerida para igualar sua rigidez à flexão a uma de aço equivale a 51% do peso da chapa de aço (ALCAN, 1993).

- Condutividade elétrica

A condutividade elétrica do alumínio varia de acordo com a composição de sua liga. O alumínio comercialmente puro é o material que mais se aproxima da condutividade do cobre, apresentando 60% do valor do mesmo. Por este motivo, um condutor de alumínio necessita de 1,67 a área da seção transversal de um condutor equivalente de cobre, com a vantagem de ser mais leve. (ALCAN, 1993).

- Propriedades térmicas

O alumínio apresenta altos valores de condutividade térmica, sendo a metade em relação ao cobre, porém cinco vezes maior que a do aço. Esta característica torna este

material sensível a flutuações de aporte térmico durante a soldagem. Portanto, é preferível o uso de processos com aporte térmico estáveis como o GMAW para evitar defeitos como variações de penetração e fusão (METALS HANDBOOK).

Devido à alta condutividade térmica do alumínio, é necessário um fornecimento de calor cerca de cinco vezes maior que o requerido para o aço, para uma mesma massa elevar sua temperatura localmente. Isto implica no uso de uma fonte de calor com maior intensidade para que a soldagem seja bem-sucedida. Este fato pode parecer controverso, uma vez que o ponto de fusão do alumínio é menor que o do aço, entretanto, a alta condutividade térmica do alumínio compensa esta diferença entre as temperaturas de fusão e, de fato, o alumínio necessita de pelo menos tanto quanto ou mais calor que o aço para ser soldado (ALCAN, 1993).

O coeficiente de expansão linear do alumínio é de $23,6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, sendo aproximadamente o dobro do aço, seu ponto de fusão gira em torno de $660 \text{ } ^\circ\text{C}$ e o calor específico equivale a $940 \text{ J}/(\text{Kg}^\circ\text{C})$ (ALCAN, 1993). As soldas de alumínio contraem cerca de 6% em volume durante a solidificação. As distorções provocadas por este efeito devem ser balanceadas através da correta sequência de soldagem. Outro problema comum nas soldas de alumínio são as “crateras” que tendem a surgir nos pontos de extinção do arco, podendo gerar trincas e vazios devido ao encolhimento do material. (METALS HANDBOOK).

A alta condutividade térmica, o alto coeficiente de expansão linear e a necessidade de maior aporte térmico podem causar consideráveis distorções durante a soldagem, se não forem utilizadas as velocidades de trabalhos mais altas possíveis. Entretanto, a alta condutividade térmica pode representar uma vantagem do ponto de vista do soldador, pois proporciona rápida solidificação da poça de fusão, tornando a sua soldagem mais rápida que a do aço.

- Camada de óxido

Uma importante característica do alumínio e suas ligas é a formação natural de um filme de óxido (Al_2O_3) sobre a sua superfície. A espessura do óxido ao longo do início de sua formação é cerca de 0,015 microns, mas a taxa de crescimento subsequente decresce de modo que a espessura de óxido normal fica em torno de 0,0025 a 0,005 microns. Embora a camada de óxido seja extremamente fina, ela é suficiente para proteger o metal

contra o ataque dos mais diversos meios corrosivos. Isto justifica a excelente resistência à corrosão deste material (ALCAN, 1993).

O filme de óxido é tenaz, aderente, impermeável e funde a 2052 °C (cerca de três vezes a temperatura de fusão do alumínio), além de ser isolante elétrico. A camada de óxido é suficientemente fina para ser removida através da soldagem GMAW, porém, em condições que favoreçam o crescimento da camada, torna-se necessário a remoção da mesma através de produtos químicos ou por meios mecânicos, sob pena de ocorrência de instabilidades no arco e falta de fusão durante a soldagem (METALS HANDBOOK).

- Solubilidade do hidrogênio

O hidrogênio apresenta elevada solubilidade no alumínio líquido e baixa solubilidade no alumínio sólido, portanto, na fase líquida, uma elevada quantidade de hidrogênio se dissolve e, durante a solidificação, a solubilidade se reduz e parte do hidrogênio é aprisionado formando poros caso não consigam escapar da poça de fusão (METALS HANDBOOK).

De acordo com Carl et al (2003), durante o processo de soldagem a arco do alumínio, a poça de fusão pode atingir temperaturas próximas ao ponto de ebulição deste material. O alumínio apresenta variações na solubilidade de hidrogênio em função da temperatura, não sendo tão sensível à diferença de solubilidade entre os estados sólido e líquido, mas sim com a temperatura na poça de fusão. Portanto, devido à elevada temperatura da poça de fusão, em conjunto com intensa convecção na mesma, ocorre elevada tendência de retenção de hidrogênio gasoso. Durante a solidificação da poça de fusão com elevado teor de hidrogênio dissolvido, não há tempo suficiente para o gás atingir a superfície e escapar, consequentemente ocorrerá a formação de poros na solda.

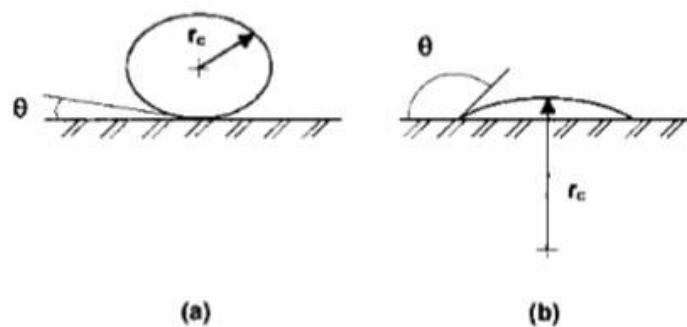
O hidrogênio é proveniente de impurezas presentes no metal de base ou metal de adição como: óleos e graxas, umidade na forma de óxidos hidratados, umidade no gás de proteção, condensação no bocal de uma tocha refrigerada a água entre outros. As ligas alumínio-magnésio (5XXX) são mais sensíveis à formação de óxidos hidratados, portanto, os arames desta liga devem ser guardados em locais secos e aquecidos.

- Porosidade

A nucleação de poros em soldas de alumínio pode ocorrer de duas maneiras: nucleação homogênea ou heterogênea. No primeiro caso é necessário superar uma

determinada energia de ativação, havendo um raio crítico segundo o qual o poro irá crescer espontaneamente. No segundo caso a nucleação do poro ocorre com o auxílio de um substrato de tal forma que, caso o gás “molhe” o substrato com eficácia, o mesmo poderá atingir o raio crítico com um pequeno volume (CROSS et al, 2003). Portanto, superfícies de dendritas e cristais precipitados, os quais são bem “molhados” pelo metal líquido circundante, criam uma elevada resistência capilar e inibe a nucleação de poros conforme a Figura 1, onde r_c indica o raio crítico e θ o ângulo de contato.

Figura 1. Diferentes condições de molhabilidade para nucleação de poros. a) o líquido molha o substrato. b) o gás molha o substrato. A condição b favorece a nucleação heterogênea.

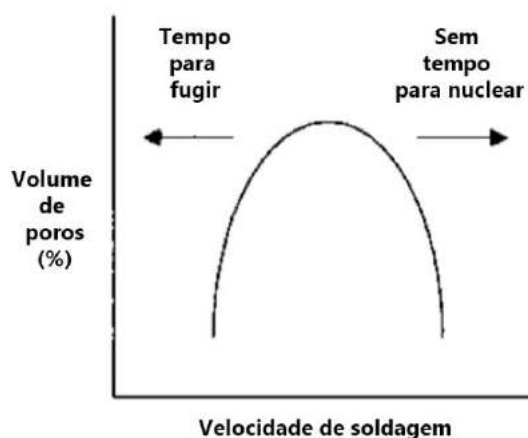


Fonte: Cross et al (2003).

O tamanho, a morfologia e a distribuição dos poros são afetados primeiramente pela taxa de solidificação. O surgimento de poros de grandes dimensões requer baixas velocidades de soldagem e/ou alto aporte térmico, o que resulta em uma baixa taxa de solidificação. Portanto, uma estrutura mais grosseira facilita a nucleação heterogênea de poros na interface sólido/líquido e o destacamento dos mesmos da referida interface.

A concentração, a distribuição e o tamanho dos poros estão diretamente relacionados com dois processos competitivos. Quando o tempo de solidificação é longo os poros de hidrogênio podem escapar com mais facilidade da poça de fusão, resultando em baixa concentração de poros, porém, quando o tempo de solidificação é reduzido a concentração de poros inicialmente irá aumentar devido ao aprisionamento, e em seguida irá diminuir devido à redução do tempo para nucleação e crescimento do poro. A Figura 2 demonstra esta relação.

Figura 2. Representação esquemática demonstrando a variação do volume de poros em função da velocidade de soldagem.



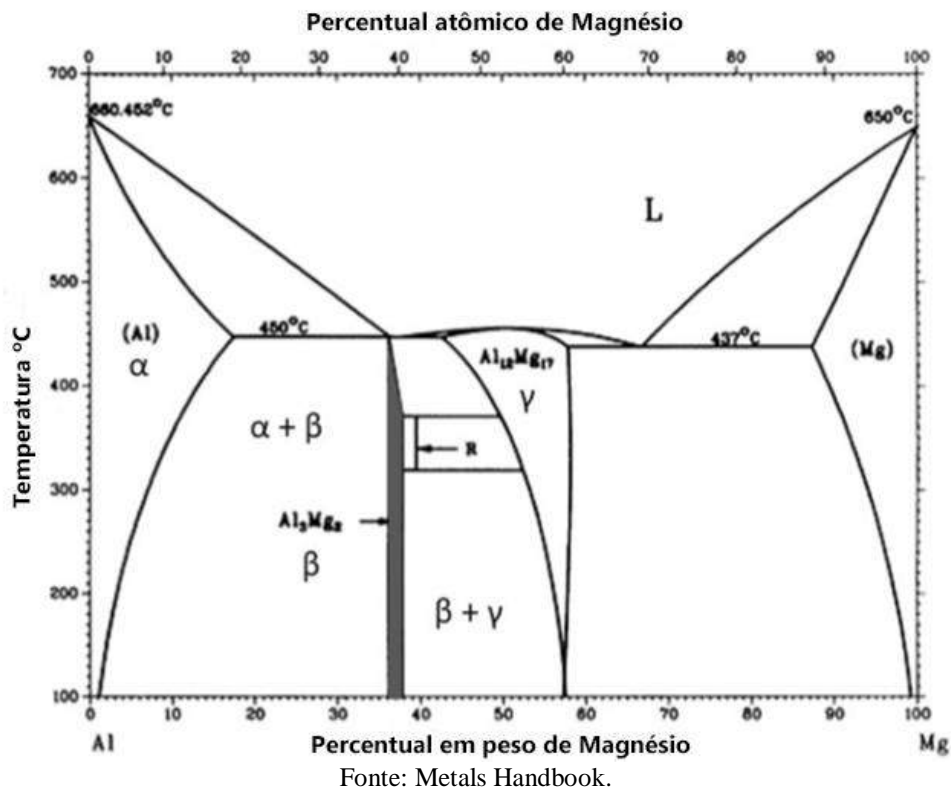
Fonte: Cross et al (2003).

3.1.3. Ligas Alumínio-Magnésio (5XXX)

As ligas da série 5XXX são compostas principalmente de alumínio (Al) e Magnésio (Mg). Ligas comerciais contém cerca de 4,0 a 5,5% de magnésio em sua composição. Esta liga é classificada como não tratável termicamente, ou seja, o aumento de resistência somente pode ser obtido através de trabalho a frio, e não através de processos de aquecimento com resfriamento sucessivo.

A Figura 3 apresenta o diagrama de equilíbrio de fases para esta liga. Para ligas com teor de magnésio entre 4,0 a 5,5% nota-se que duas principais fases são formadas: uma matriz de alumínio (α) com intermetálico Al_3Mg_2 (β). Ligas com teor de magnésio superiores a 3%, quando expostas a longos períodos a temperaturas de cerca de 50°C, sofrem difusão de magnésio através da matriz α , de modo a migrarem para regiões de baixa energia, como os contornos de grão (BUMILLER, 2011). A precipitação de fase β depende tanto da temperatura quanto do tempo de exposição do material, ocorrendo de maneira mais veloz em temperaturas de cerca de 60 a 180°C.

Figura 3. Diagrama de equilíbrio de fases ligas Al-Mg (5XXX).



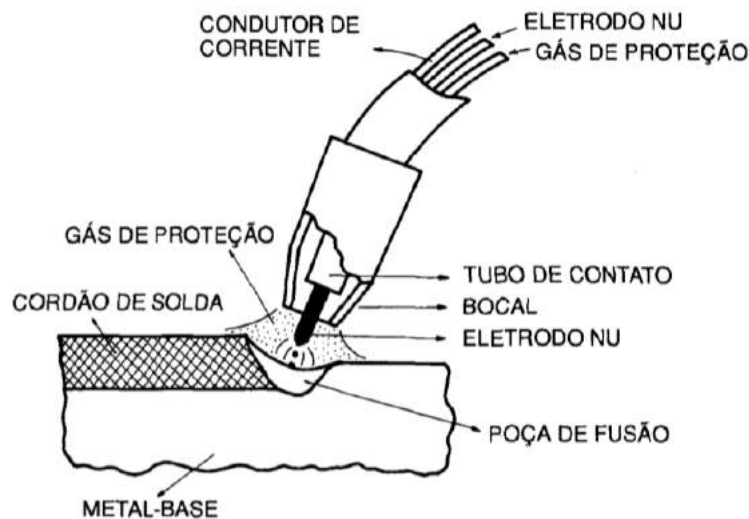
O magnésio é um dos elementos mais eficazes e largamente empregado na formação de ligas de alumínio. As ligas desta série são as que apresentam as maiores resistências entre as ligas não tratáveis termicamente, e por isso são de grande importância para as aplicações estruturais. Elas se destinam à fabricação de vagões ferroviários, embarcações, tanques rodoviários, veículos militares, carrocerias de ônibus e furgões etc.

As ligas desta série, com teor de magnésio abaixo de 2,5% (5052, 5252, 5005, 5050), quando soldadas com os processos de fusão a arco ficam sujeitas à fissuração a quente durante a fase de solidificação, caso o metal de adição utilizado tenha a mesma composição química do metal de base. O risco de fissuração aumenta quando a solda é depositada sob condições de restrição. Este problema pode ser amenizado com o aumento do teor de magnésio do metal de solda para mais de 3%, o que pode ser feito realizando a seleção adequada do metal de adição. Os metais de adição com 5% de magnésio (ER 5356, ER5556 e ER5183) são muito eficazes e podem evitar fissuração até mesmo em juntas com movimentação restrita, nas quais há considerável diluição do metal de base.

3.2. SOLDAGEM GMAW

De acordo com Marques (2014), o processo de soldagem GMAW pode ser definido como um processo em que a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento destas com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico nu, consumível, e a peça de trabalho. A proteção do arco e da região da solda contra contaminação pela atmosfera é realizada por um gás ou mistura de gases, que podem ser inertes ou ativos. A Figura 4 mostra esquematicamente o processo GMAW.

Figura 4. Esquema do processo de soldagem GMAW.



Fonte: Wainer et al (2004).

Wainer et al (2004) listam algumas vantagens e limitações do processo GMAW.

Entre as principais vantagens, destacam-se:

- Processo semiautomático e versátil.
- Fácil adaptação para soldagem automática.
- O eletrodo nu é alimentado continuamente à poça de fusão.
- A soldagem pode ser executada em todas as posições.
- A velocidade de soldagem é relativamente elevada.
- Taxa de deposição é elevada devido à densidade de corrente na ponta do arame.
- Não há formação de escória e, conseqüentemente, não se perde tempo na sua remoção, nem se corre risco de inclusão de escória em soldas de vários passes.
- Penetração de raiz mais uniforme que no processo eletrodo revestido.
- Processo com baixo teor de hidrogênio que, no caso de eletrodos nus, fica ao redor de 5 ppm/100g de metal.
- Problemas de distorção e tensões residuais reduzidos.

- Soldagem com visibilidade total da poça de fusão.
- Possibilidade de controlar a penetração e a diluição durante a soldagem.
- Facilidade de execução da soldagem.

Dentre as limitações, os referidos autores mencionam:

- Maior velocidade de resfriamento por não haver escória, o que aumenta a possibilidade de trincas, principalmente em aços temperáveis.
- A soldagem deve ser protegida de correntes de ar.
- Como o bocal da pistola precisa ficar próximo do metal base, a operação não é fácil em locais de difícil acesso.
- Projeções de gotas de metal líquido durante a soldagem.
- Grande emissão de raios ultravioleta.
- Equipamento de soldagem mais caro, complexo e menos portátil em comparação ao utilizado no processo eletrodo revestido.

3.2.2. Modos de transferência metálica

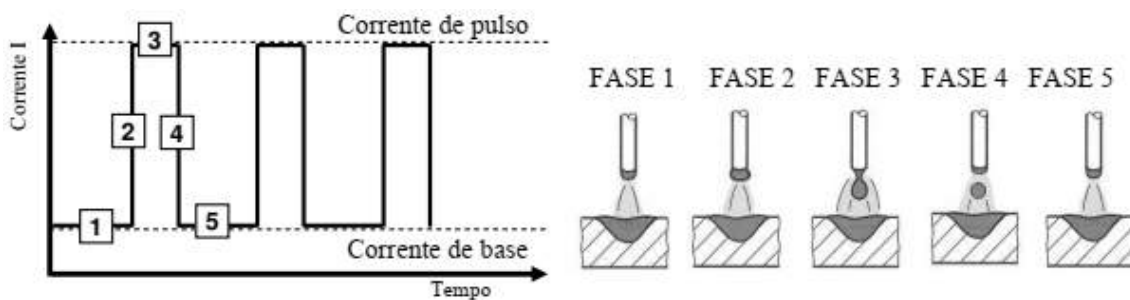
Quanto aos tipos de transferência metálica no processo GMAW, Wainer et al (2004) afirmam que existem quatro principais tipos: globular, curto-circuito, pulverização axial (spray) e rotacional e por arco pulsado. Machado (1996) aponta que o modo como o metal fundido se transfere desde o arame eletrodo até a peça, é determinado por complexas interações de forças, as quais são influenciadas pelos seguintes fatores principais: natureza do gás de proteção, polaridade e natureza da corrente, densidade da corrente, tensão de soldagem, comprimento energizado de arame, composição química e diâmetro do eletrodo, características específicas da fonte de potência e pressão do ambiente. Neste trabalho o enfoque será no modo de transferência por corrente pulsada.

O modo de transferência por corrente pulsada foi uma alternativa criada na década de 1960 com o intuito de superar as desvantagens dos modos curto-circuito e globular, e agregar os benefícios do modo spray (PRAVEEN e YARLAGADDA, 2005). Este modo é caracterizado pela pulsação da corrente de soldagem em dois patamares, um inferior à corrente de transição e outro superior a esta, de modo que durante o período de tempo em que a corrente é baixa uma gota se forma e cresce na ponta do arame, e esta é transferida quando o valor da corrente salta para o valor elevado (Figura 5). Isto permite uma

transferência metálica com características do modo “spray”, porém com menores níveis de corrente média. (MARQUES, 2014).

Além da redução do aporte térmico, outras vantagens da pulsação da corrente em soldagem de alumínio são destacadas, tais como, a estabilidade de arco, menores distorções e produção de fumos, redução do nível de porosidade e melhor molhabilidade (PRAVEEN e YARLAGADDA, 2005). Para atingir uma transferência controlada neste modo pulsado, é essencial que a velocidade de alimentação do arame esteja balanceada com a taxa de fusão deste, de modo a ocorrer a transferência de uma gota por pulso de corrente. Entretanto, isto envolve a correta seleção de diversos parâmetros do processo. Para superar este obstáculo surgiram os controles sinérgicos, que consistem em sistemas pelos quais um parâmetro de pulso significativo é alterado de modo que haja um equilíbrio para diversas velocidades de alimentação de arame. Deste modo, o usuário precisa entrar com menos dados na fonte de energia, reduzindo o consumo do tempo com otimização de parâmetros (PRAVEEN e YARLAGADDA, 2005).

Figura 5. Diagrama esquemático de uma onda do tipo corrente pulsada e transferência do metal

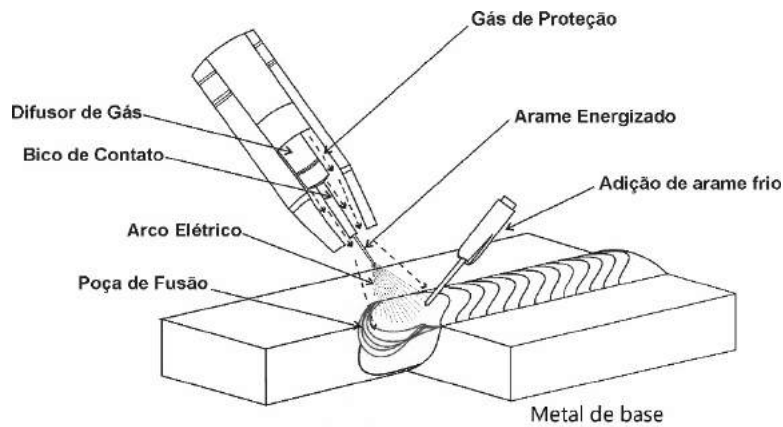


3.2.3. Soldagem GMAW com adição de arame frio (GMAW-AF):

De acordo com Mota et al (2016), o processo de soldagem GMAW – AF também conhecido como soldagem com adição de arame frio, é uma técnica derivativa do processo GMAW que apresenta, além das vantagens deste, maior produção, menor diluição e grande potencial de utilização no campo.

O processo funciona da seguinte forma: um arame não energizado (frio) posicionado à frente do arame eletrodo e alinhado à direção de soldagem é injetado, com velocidade controlada, na poça de fusão com o objetivo de aproveitar a energia e a estabilidade do arco elétrico de uma dada condição da soldagem GMAW, sem causar perturbações significativas no processo. A Figura 6 detalha a disposição da tocha de soldagem e a alimentação do arame frio.

Figura 6. Ilustração da tocha de soldagem e da alimentação do arame frio no processo GMAW-AF.



Fonte: autoria própria.

Garcia (2011) lista as seguintes vantagens do processo GMAW com arame frio: soldagens semi-automática e automática, utiliza o mesmo equipamento da soldagem GMAW com um alimentador de arame adicional adaptado, utiliza a mesma alimentação de energia e gás de proteção do processo GMAW, solda em todas as posições, maior taxa de deposição, boa qualidade superficial dos cordões e facilidade de montagem do equipamento. Como desvantagem o autor cita: menor penetração (dependendo da aplicação).

Desde a sua concepção o processo de soldagem GMAW com arame frio foi alvo de estudos por muitos pesquisadores no revestimento de ligas de níquel (MOTA et al, 2016 e GARCIA, 2011), na avaliação das tensões residuais em soldas de aço carbono (COSTA et al, 2017) e na soldagem de revestimento (RIBEIRO et al 2012). No caso do alumínio poucas pesquisas foram realizadas com a aplicação do arame frio, pode-se citar: controle da composição química de soldas de alumínio com a adição de múltiplos arames (PICKIN, et al, 2010), avaliação do comportamento de fadiga de liga de alumínio soldada pelo processo GMAW-AF (RIBEIRO et al, 2016) e no controle de defeitos em soldas de alumínio com altos níveis de corrente (MIYAZAKI et al, 1994).

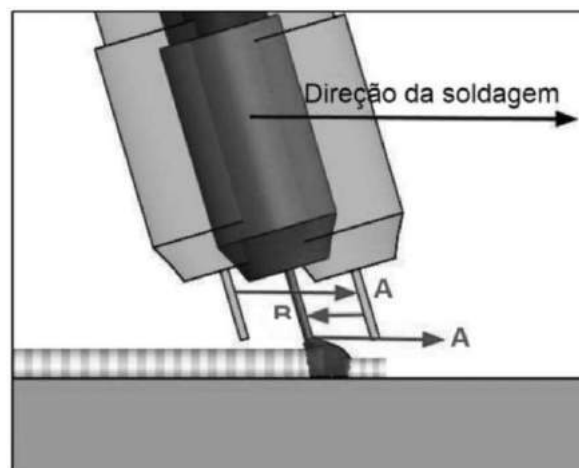
De um modo geral, os autores supracitados afirmam que a adição de arame frio é capaz de reduzir a temperatura da poça de fusão, o aporte térmico do processo, aumentar a taxa de deposição, economizar energia e gás, reduzir a penetração e a diluição, aumentar o reforço, reduzir tensões residuais sem implicar em instabilidade apreciável de arco, além do amplo potencial e aplicação. Entretanto, a maioria dos autores não publicaram resultados relativos às alterações metalúrgicas no caso do alumínio, e não foi encontrada

nehuma pesquisa aplicando a técnica GMAW-AF na manufatura aditiva do alumínio ou em conjunto com a técnica switchback.

3.3. SOLDAGEM COM SWITCHBACK

A técnica de soldagem com switchback consiste no deslocamento da tocha de soldagem com movimentação em oscilação periódica e, conseqüentemente, do arco elétrico (fonte de calor) no sentido longitudinal do cordão de solda durante o processo de soldagem, conforme o ilustrado na Figura 7. O arco avança periodicamente durante um certo comprimento e então retorna num comprimento menor do que o de avanço.

Figura 7. Ilustração da técnica switchback. A: movimento de avanço. R: movimento de reversão.



Fonte: Teixeira et al (2019).

Visando compreender a importância da técnica de oscilação longitudinal da tocha de soldagem tipicamente conhecida na literatura como técnica switchback, esta etapa do trabalho se propõe a realizar uma revisão da literatura sobre as principais pesquisas abordando este assunto nos últimos anos.

A Tabela 1 apresenta os trabalhos publicados, autores e ano de publicação, organizados por área de estudo.

Tabela 1. Pesquisas abordando a técnica de soldagem com switchback, organizadas por área de estudo.

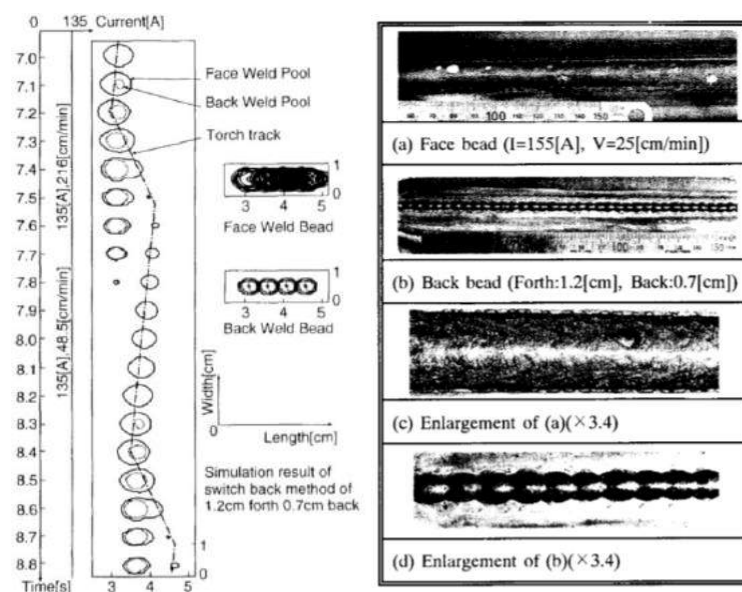
| Área de estudo | Ano | Área específica | Autores |
|--|------|---|--------------------|
| Controle da poça de fusão/Soldagem sem cobre junta | 1995 | Simulação para controle da poça de fusão na soldagem MIG sem cobre-junta | Jin et al. |
| | 1998 | Rede neural para detecção abertura de junta na soldagem de chanfro sem cobre-junta | Eguchi et al. |
| | 2000 | Simulação de switchback para controle da poça de fusão em soldas de alumínio | Jin et al. |
| | 2001 | Sistema de controle para soldagem robotizada sem cobre-junta | Sharif et al. |
| | 2005 | Processamento de imagem e controle da poça de fusão na soldagem robotizada sem cobre juntas | Yamane et al. |
| | 2007 | Sistema de controle da poça de fusão na soldagem sem cobre-junta | Yamane et al. |
| | 2009 | Simulação da poça de fusão na soldagem MIG com switchback | Kaneko et al. |
| | 2014 | Sincronização de polaridade e reversão da tocha para passe de raiz automatizado em tubulações | Skhabovsky |
| Juntas de espessuras dissimilares | 2013 | Soldagem de juntas de espessuras dissimilares com P.V. | Gonçalves e Dutra |
| | 2017 | Investigação do aumento de produtividade na soldagem de juntas de espessuras dissimilares | Bonacorso et al. |
| Estrutura de solidificação | 2012 | Investigação da influência dos parâmetros de switchback na geometria e estrutura de solidificação | Almeida et al. |
| Revestimento | 2016 | Avaliação da influência do switchback na soldagem de revestimento | Teichmann |
| | 2018 | Avaliação do switchback aplicado em soldas de revestimento de níquel | Teixeira |
| | 2018 | Avaliação mecânica e metalúrgica de soldas de níquel | Sodré |
| | 2015 | Adaptação de robô para execução de switchback | Weizenmann |
| Produtividade | 2017 | Investigação do aumento de produtividade e qualidade de soldas TIG | Schwedersky et al. |
| WAAM do alumínio | 2018 | Soluções para mitigar o crescimento unidirecional na WAAM de ligas de alumínio. | Yehorov |
| Soldagem de passes de raiz | 2019 | Efeitos do switchback no passe de raiz com diferentes aberturas | Almeida et al. |

Fonte: autoria própria.

O trabalho realizado por Jin et al (1995) buscou uma metodologia para lidar com problemas relacionados à detecção e controle da geometria da poça de fusão durante a soldagem GMAW de chapas de aço, objetivando a soldagem robotizada sem cobre juntas

e isenta de defeitos como perfurações. Os autores afirmam que para atingir soldas de qualidade sem cobre junta, faz-se necessário controlar a geometria da poça de fusão. Para tanto, os autores propuseram a oscilação longitudinal da tocha de soldagem, denominando o movimento cíclico de switchback. Foram obtidos resultados teóricos a partir de simulações numéricas, e resultados experimentais comprovando a eficácia do método proposto em controlar a geometria da poça de fusão, possibilitando a soldagem GMAW sem cobre junta. A Figura 8 mostra um resumo do resultado obtido neste trabalho. Por fim, os autores afirmam que o uso da técnica switchback possibilitou a soldagem de juntas com maior abertura de raiz obtendo soldas de excelente qualidade, se comparadas aquelas produzidas pela soldagem tradicional, ou seja, com um sentido único e progressivo da poça de fusão.

Figura 8. a) Resultado da simulação do método switchback. b) Aparência do fundo do cordão GMAW-P sem cobre-junta com switchback.



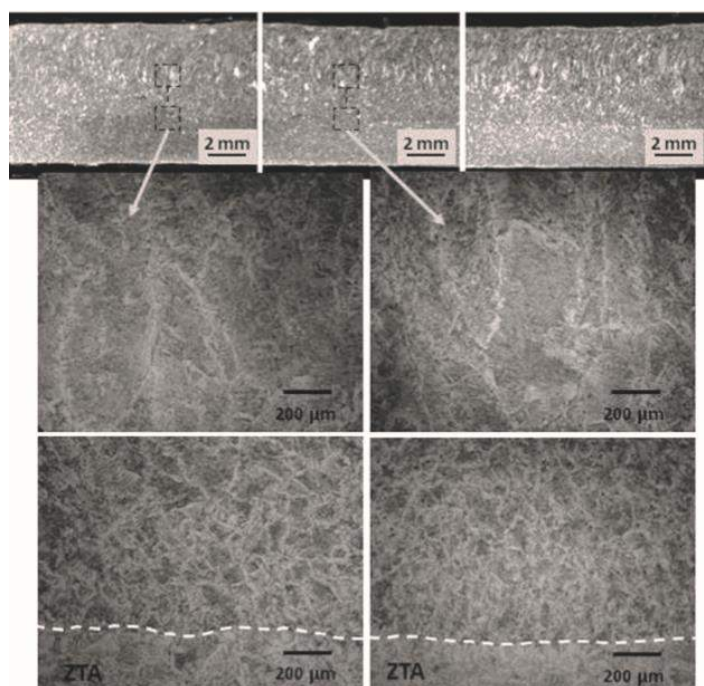
Fonte: Jin et al (1995).

Em 2009, Kaneko et al realizaram simulações numéricas para avaliar a influência dos parâmetros de soldagem, dos comprimento e velocidade de avanço e de reversão da técnica switchback, sobre a união de chapas finas de até 3,2 mm de espessura utilizando o processo GMAW-P com switchback. Os autores obtiveram resultados satisfatórios em soldas depositadas para a velocidade de avanço maior que a velocidade de reversão, e para comprimento de reversão maior que a metade do comprimento de avanço. Estes pesquisadores concluíram que o uso do switchback favoreceu o controle e a redução do tamanho da poça de fusão, reduziu a incidência de perfurações, e estabilizou a penetração na raiz com passe único. Por fim, eles afirmam que a técnica switchback é uma técnica

eficaz na obtenção de penetração adequada em solda de chapa fina, além de possibilitar aplicar o passe de raiz sem cobre junta.

Almeida et al (2012) foram pioneiros na investigação dos efeitos do comprimento de reversão e do ângulo de ataque da tocha de soldagem sobre a estrutura de solidificação de soldas de aço carbono depositadas pelo processo GMAW-P com switchback. Com relação ao ângulo de ataque, os resultados obtidos por estes pesquisadores mostraram vantagem do uso desta técnica na condição “empurrando-puxando” haja vista que favorece a formação de grãos equiaxiais próximos à linha de fusão. Com relação ao comprimento de reversão da tocha, foi observado que o aumento deste comprimento tendeu a refinar os grãos próximos à linha de fusão. A Figura 9 mostra o resultado obtido da soldagem com avanço de 10 mm e reversão de 5 mm, e velocidades de avanço e reversão iguais a 74 cm/min. Os demais parâmetros operacionais de soldagem foram mantidos constantes.

Figura 9. Estrutura de solidificação do metal de solda com avanço de 10 mm e reversão de 5 mm. Observam-se grãos equiaxiais próximos à linha de fusão.

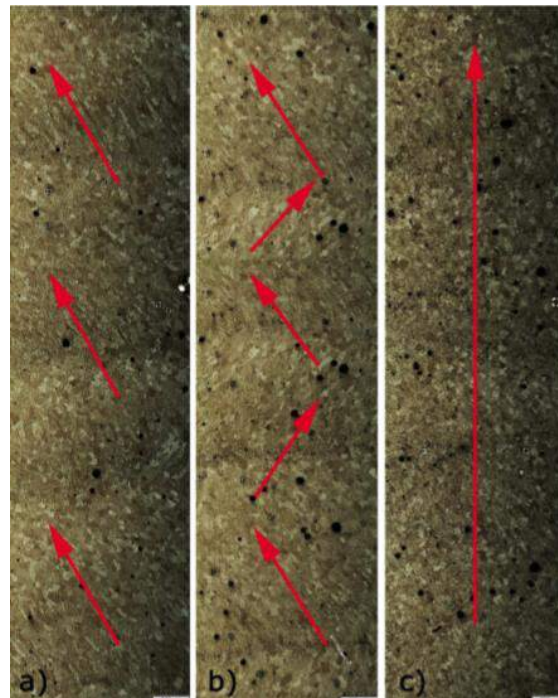


Fonte: Almeida et al (2012).

O recente estudo realizado por Yehorov (2018) utilizou a técnica switchback pela primeira vez como forma de mitigar o crescimento unidirecional de grãos de ligas de alumínio aplicadas a WAAM. Ao realizar a confecção de paredes com liga de alumínio 5356 utilizando o processo CMT (Cold Metal Transfer), o autor concluiu que o uso do switchback contribuiu para a quebra do crescimento epitaxial, refinamento de grãos,

redução da anisotropia de propriedades mecânicas, redução da quantidade de poros e melhoria da qualidade superficial. Entretanto, destaca-se que apenas um parâmetro de switchback foi avaliado nesta pesquisa não havendo assim base mais sólida para se generalizar os resultados dela obtidos. A Figura 10 mostra a macroestrutura obtida neste trabalho.

Figura 10. Macroestrutura longitudinal de parede de solda, com destaque à direção do crescimento colunar de grãos: a) modo unidirecional; b) modo bidirecional; c) modo switchback (ampliação da quarta à sexta camada).

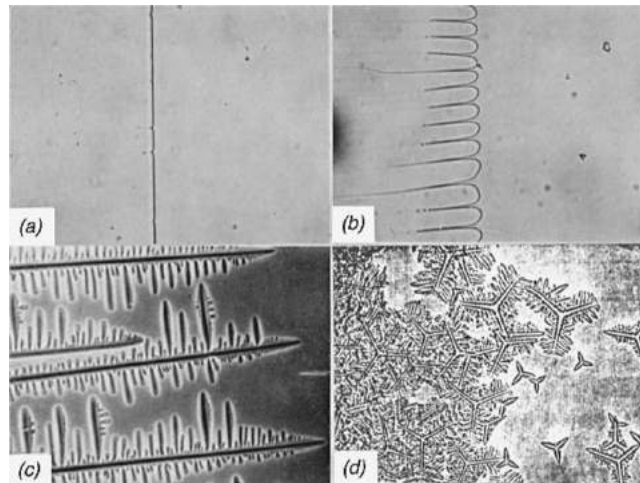


Fonte: Yehorov (2018).

3.4. METALURGIA DA SOLDAGEM

Segundo Kou (2003), durante a solidificação de um metal puro a interface sólido/líquido (S/L) costuma ser planar, a menos que um super-resfriamento seja imposto. Por outro lado, durante a solidificação de uma liga metálica a interface S/L e, portanto, o modo de solidificação pode ser planar, celular, colunar dendrítico ou equiaxial dendrítico dependendo da condição de solidificação. A Figura 11 ilustra os modos de solidificação básicos de metais.

Figura 11. Modos de solidificação básicos de metais. a) planar. b) celular. c) colunar dendrítico. d) equiaxial dendrítico.



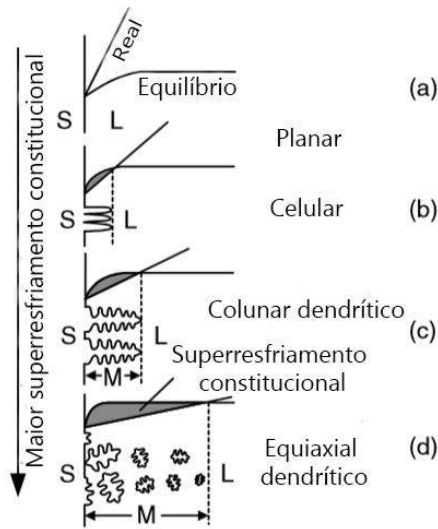
Fonte: Kou (2003).

Desta forma, o conceito de super-resfriamento constitucional é essencial para a compreensão da variação dos modos de solidificação. Segundo este fenômeno, há uma considerável redução na temperatura liquidus (T_L) devido ao acúmulo de soluto no metal líquido adjacente à interface S/L. Este super-resfriamento desestabiliza a interface planar, e favorece o crescimento de protuberâncias. O modo de solidificação é ainda dependente de alguns outros importantes fatores como o gradiente de temperatura (G), a taxa de crescimento (R_C) e o coeficiente de difusão (D_L). Sendo assim, pode-se afirmar que uma interface de solidificação planar é estável somente se o critério da equação 1 for respeitado.

$$\frac{G}{R_C} \geq \frac{\Delta T}{D_L} \quad (1)$$

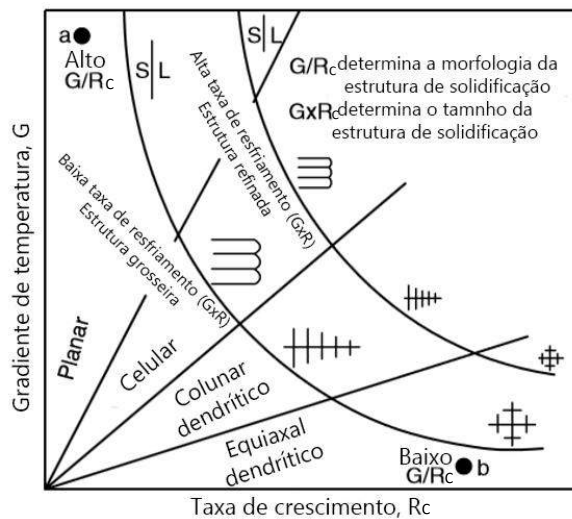
Ou seja, uma liga se solidificará no modo planar se a razão G/R_C (gradiente de temperatura/taxa de crescimento) for maior ou igual à razão $\Delta T/D_L$ (Diferença entre temperatura liquidus e solidus/Coeficiente de difusão). A Figura 12 mostra como o modo de solidificação varia em função do super-resfriamento constitucional como, por exemplo, a redução do gradiente de temperatura e o aumento da taxa de crescimento. Esta última é responsável ainda por influenciar o refinamento da microestrutura resultante no metal de solda, conforme o ilustrado na Figura 13.

Figura 12. Efeito do super-resfriamento constitucional no modo de solidificação.



Fonte: Kou (2003).

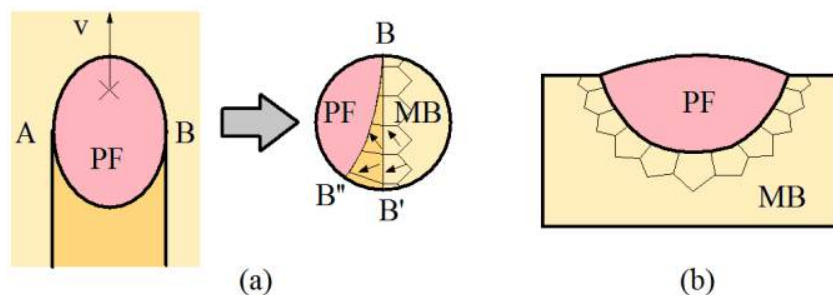
Figura 13. Efeitos do gradiente de temperatura e da taxa de crescimento na morfologia e no tamanho da microestrutura de solidificação.



Fonte: Kou (2003).

A solidificação se inicia na linha que passa entre os pontos de largura máxima e profundidade máxima da poça de fusão. Usualmente, os grãos na zona fundida se formam como um prolongamento dos grãos do metal de base, sem a necessidade da nucleação de novos grãos. Este fenômeno é denominado de crescimento epitaxial (MODENESI, 2012), e pode representado conforme a Figura 14.

Figura 14. Início de solidificação da poça de fusão: (a) vista de cima, (b) corte transversal em AB. PF - poça de fusão, MB - metal base, v - velocidade de soldagem, BB' - linha de fusão, BB'' - frente de solidificação. As setas no interior dos grãos em (a) indica



Fonte: Modenesi (2012).

3.5. MANUFATURA ADITIVA DO ALUMÍNIO

Darekar (2018), em sua revisão acerca da manufatura aditiva com arames de alumínio, afirma que este processo de fabricação tem ganhado popularidade devido às suas vantagens como melhor razão BTF (buy-to-fly: relação entre a massa da matéria prima utilizada e a massa do componente final), capacidade de fabricar componentes de grandes dimensões além de custo reduzido quando comparado à manufatura aditiva baseada em pós metálicos. O autor destaca as principais áreas de estudo relacionadas ao assunto, leia-se: aspecto superficial, tensões residuais, laminação entre passes, porosidade, propriedades mecânicas e técnicas de aplicação.

A adição de sucessivas camadas de metal promove o acréscimo de uma grande quantidade de calor ao componente, ocasionando ciclos térmicos responsáveis pela expansão e contração do material, criando grandes tensões residuais tanto no componente quanto no substrato de apoio.

Mughal et al (2007) estudaram os efeitos mecânicos dos padrões de deposição na manufatura aditiva baseada em processos de soldagem. Para tanto, foram realizadas simulações com elementos finitos em três dimensões com o software ANSYS®. Foi considerada uma fonte de calor elipsoidal, adição de material, variação de propriedades dos materiais com a temperatura. Os resultados mostraram que a sequência de deposição iniciando na periferia em direção ao centro do componente fornece menor empenamento.

Um dos principais problemas na manufatura aditiva do alumínio está relacionado com a presença de poros nas soldas, sendo este um fator limitante na expansão desta técnica. Visando reduzir este problema, autores como Cong et al (2015) focaram suas

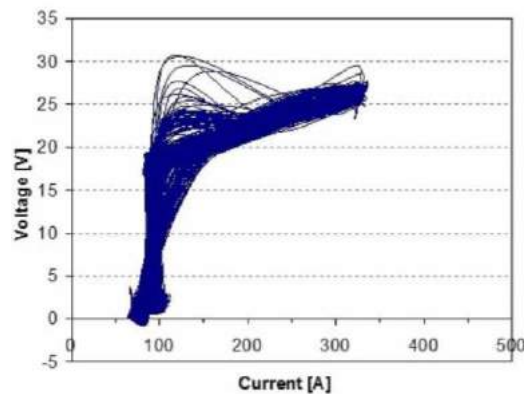
pesquisas em soluções através de processos de soldagem com baixo aporte térmico como o CMT (Cold Metal Transfer).

O CMT é o processo de soldagem mais bem-sucedido na manufatura aditiva do alumínio, sendo capaz de praticamente eliminar os poros da solda além de promover intenso refinamento microestrutural, minimizar respingos e manter bom aspecto superficial. O CMT é uma variante do processo GMAW e consiste no controle do comprimento de arco e da transferência metálica através da regulagem da alimentação de arame, e recebe o nome de transferência de metal frio pois atua em ciclos quentes e frios (altas e baixas correntes e tensões).

O processo cíclico do CMT pode ser descrito em quatro estágios, os quais estão representados na Figura 15. (DEREKAR, 2018):

- 1) Queima do arco: estágio quente com arco estabelecido com altos valores de corrente e tensão. Forma-se uma gota metálica na extremidade do arame.
- 2) Colapso do arco: nesta fase ocorre a redução do comprimento de arco através do aumento da alimentação de arame até que o mesmo toque a poça de fusão, extinguindo o arco e criando uma fase fria. Neste momento a gota formada no estágio anterior é transferida para a poça de fusão.
- 3) Curto-Circuito: ao tocar a poça de fusão o arame é instantaneamente retraído. Praticamente nenhum aquecimento por resistência é observado nesta fase devido ao curto período de curto circuito, e pela manutenção de baixos valores de corrente neste estágio.
- 4) Reestabelecimento do arco: A corrente e a tensão de soldagem são elevadas durante a retração do arame, promovendo a reabertura do arco e o surgimento de uma nova fase quente, reiniciando o ciclo.

Figura 15. Ciclograma de corrente e tensão para o modo de transferência CMT.

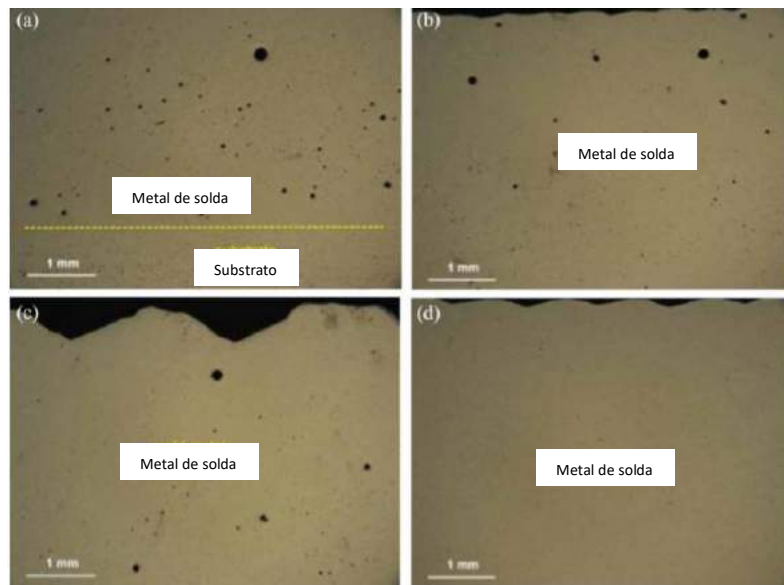


Fonte: Darekar (2018).

Cong et al (2015) compararam os efeitos de diferentes técnicas CMT, tais como, CMT convencional, CMT-P (Pulsed), CMT-ADV (Advanced) e CMT-PADV (Pulsed Advanced) quanto a formação de porosidade em soldas de liga de Al-6%Cu aplicadas à manufatura aditiva. No caso do CMT convencional os resultados mostraram que maiores aportes térmicos, maiores penetrações e estruturas de grãos colunares grosseiros dificultaram o escape do hidrogênio gasoso da poça de fusão, resultando em um maior número de poros de tamanhos variando de 10 a 100 μm , ocorrendo a coalescência de poros menores em poros de maiores dimensões.

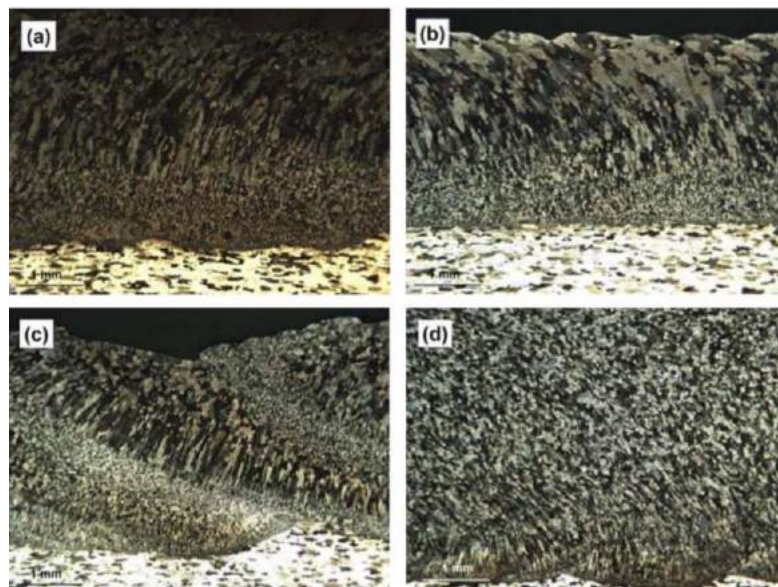
Já o CMT-P apresentou menor penetração e estrutura mais refinada, reduzindo a distância de escape para o hidrogênio, eliminando poros com tamanhos superiores a 100 μm e reduzindo a quantidade de poros de menores dimensões. O processo CMT-ADV apresentou grãos equiaxiais refinados, menor aporte térmico e penetração além de melhor limpeza da camada de óxido devido à variação de polaridade do processo, como consequência não foram encontrados poros com tamanho superior a 50 μm . Por fim, o processo CMT-PADV obteve os melhores resultados, não apresentando poros com tamanhos superiores a 10 μm devido a presença de uma estrutura equiaxial intensamente refinada bem como menores valores de diluição. Os autores atribuem o sucesso do processo CMT-PADV ao baixo aporte térmico, melhor refinamento microestrutural, melhor limpeza de óxido e menor diluição/penetração. As Figuras 16 e 17 mostram a distribuição de poros e a microestrutura obtida para os processos mencionados.

Figura 16. Distribuição de porosidade. a) CMT convencional. b) CMT-P. c) CMT-ADV. d) CMT-PADV.



Fonte: Cong et al (2015).

Figura 17. Microestrutura de solda. a) CMT convencional. b) CMT-P. c) CMT-ADV. d) CMT-PADV.



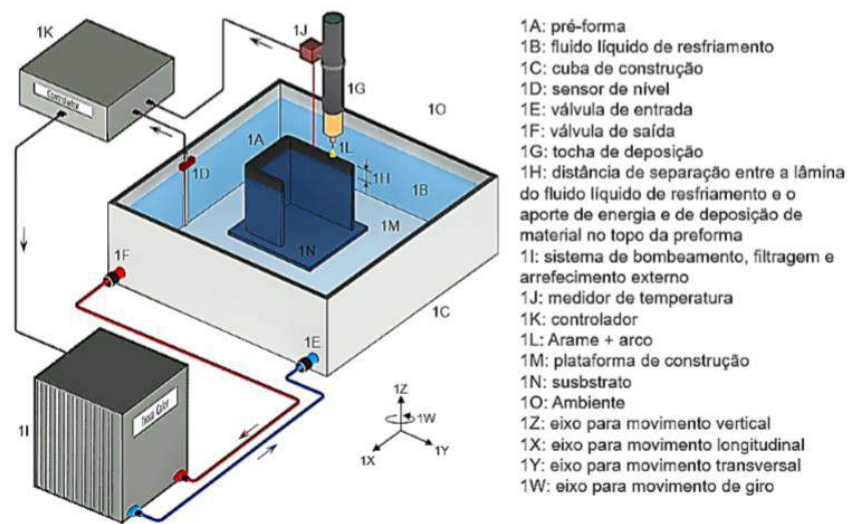
Fonte: Cong et al (2015).

Recentemente, os autores Silva et al (2018) realizaram um novo estudo referente ao gerenciamento térmico por resfriamento ativo aplicado à manufatura aditiva a arco do alumínio. Os autores destacam que apesar das vantagens já conhecidas da manufatura aditiva a arco, como maior taxa de deposição, capacidade de confeccionar componentes de grandes dimensões e baixo custo, existe um inconveniente associado ao crescente acúmulo de calor no componente durante a aplicação das camadas, podendo gerar

irregularidades geométricas e metalúrgicas que podem prejudicar a qualidade final do produto.

Com base neste inconveniente, os autores desenvolveram o sistema de resfriamento ativo por quase-imersão (RAQI), que consiste em um sistema de quase imersão de uma preforma em um fluido de arrefecimento tal que, à medida que são depositadas novas camada, o nível do líquido é aumentado até um limite, visando evitar perturbações/contaminações no depósito e melhorar o aspecto geométrico sem prejudicar a produtividade. A Figura 18 detalha o aparato utilizado.

Figura 18. Montagem esquemática para o funcionamento do RAQI.

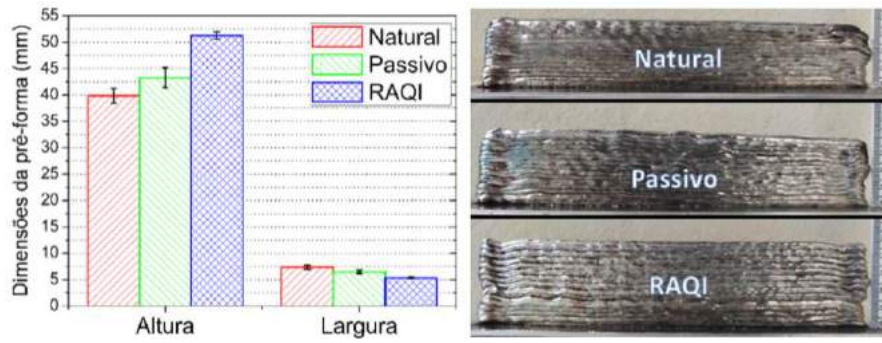


Fonte: Silva et al (2018).

Visando avaliar a eficácia do sistema de gerenciamento térmico proposto, os autores realizaram a deposição de paredes de alumínio 5356 em três condições: resfriamento natural (ar), resfriamento com água a um nível fixo (passivo) e resfriamento a água com nível variável (RAQI). A deposição de material foi monitorada através de termopares e câmera termográficas, além disso, foi realizada uma análise geométrica das paredes depositadas, bem como a realização de ensaios mecânicos de tração.

Os resultados mostraram que o sistema demonstrou eficiência em promover o resfriamento do depósito, sem implicar em instabilidades ou defeitos como porosidade. A parede depositada com o sistema RAQI apresentou altura superior além de maior regularidade geométrica em comparação aos dois outros métodos avaliados (Figura 19). Os ensaios mecânicos mostraram ligeira redução da anisotropia na parede depositada pelo sistema RAQI devido, principalmente, à transferência de calor quase-tridimensional.

Figura 19. Efeito das diferentes técnicas de gerenciamento térmico sobre a altura e largura, bem como o aspecto das preformas.

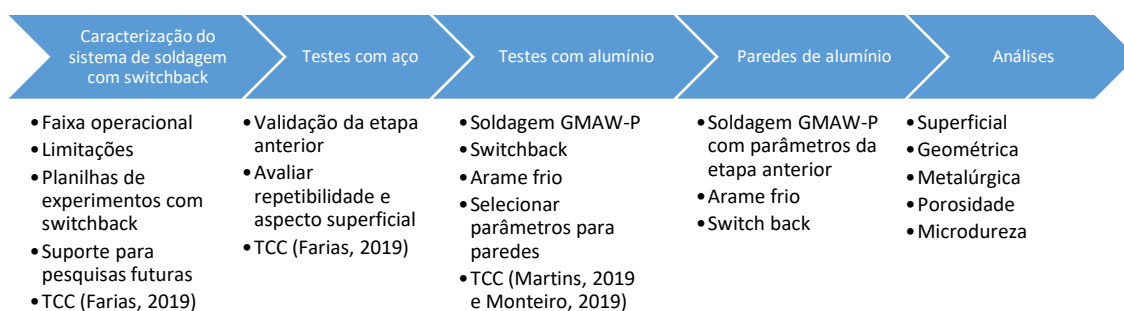


Fonte: Silva et al (2018).

4. METODOLOGIA

O fluxograma apresentado na Figura 20 mostra as principais etapas realizadas no desenvolvimento desta pesquisa. Ressalta-se que este trabalho contou com a participação de três alunos de graduação do curso de Engenharia Mecânica/UFPA (FARIAS, 2019; MARTINS, 2019 e MONTEIRO, 2019) que realizaram seus trabalhos de conclusão de curso com temas vinculados às três primeiras etapas desta pesquisa, conforme apresentadas no fluxograma: caracterização do sistema de soldagem com switchback, testes com aço e testes com alumínio (GMAW-P com switchback e com adição de arame frio).

Figura 20. Fluxograma das etapas desta pesquisa.



Fonte: autoria própria.

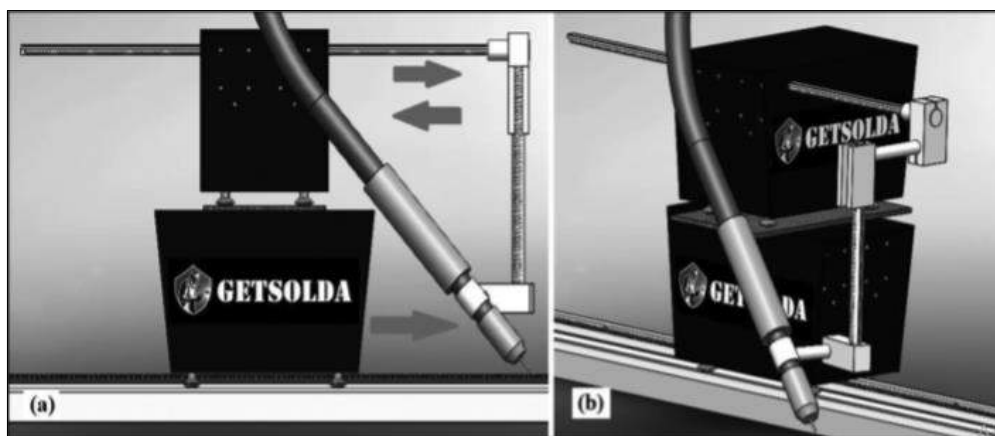
4.1. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA MECANIZADO PARA SOLDAGEM SWITCHBACK

Almeida (2012); Teixeira (2018); Sodré (2018) realizaram pesquisas abordando a aplicação da técnica switchback na soldagem GMAW do aço carbono e ligas de níquel. Diferente de outras pesquisas realizadas sobre o tema, que utilizaram robôs adaptados para realização da soldagem com técnica switchback, o Grupo de Estudos em Tecnologia de Soldagem da Universidade Federal do Pará (GETSOLDA) empregou, para a soldagem com a técnica switchback, um sistema mecanizado com mecanismo de deslocamento controlado da tocha de soldagem composto por dois carros em sobreposição, o carro de cima e o carro de baixo (Figura 21).

Os bons resultados obtidos das recentes pesquisas que utilizaram com sucesso este sistema mecanizado na soldagem com switchback comprovaram a sua eficácia na realização da oscilação longitudinal e movimentação controlada da tocha de soldagem, apresentando vantagens como baixos custos de aquisição e manutenção, facilidade de

operação, transporte e manuseio. Por outro lado, o equipamento apresenta limitações quanto ao comprimento e a velocidade de avanço, cujos valores são sempre maiores que os de reversão.

Figura 21. Sistema mecanizado para soldagem switchback. Arranjo dos carros de deslocamento: a) vista lateral; b) vista isométrica.



Fonte: Teixeira et al (2018).

A primeira etapa deste trabalho consistiu da caracterização experimental e da aferição do sistema mecanizado utilizado para soldagem switchback. O objetivo foi obter as faixas operacionais adequadas ao pleno funcionamento deste sistema mecânico visando a repetibilidade dos movimentos de switchback, além da aferição dos comprimentos e velocidades limites de avanço e de reversão, ajustados para minimizar vibrações danosas a estabilidade operacional do equipamento e possíveis perturbações à operação de soldagem.

O carro de baixo foi projetado para realizar a soldagem mecanizada em qualquer posição, promovendo o deslocamento linear da tocha de soldagem com velocidade definida em sua própria interface (velocidade de soldagem). Sendo assim, o carro de baixo apresenta apenas um grau de liberdade. O carro de cima, por outro lado, apresenta dois graus de liberdade, ou seja, ele é capaz de deslocar a tocha de soldagem nos eixos x e y (longitudinal e transversal), possibilitando a realização de tecimento (zig zag) durante a soldagem. Com base nisso, os carros foram sobrepostos de forma que o deslocamento do eixo y do segundo ficasse alinhado ao eixo x do primeiro, de modo que o tecimento agora fosse realizado no mesmo sentido da soldagem, caracterizando o movimento switchback.

A técnica apresenta dois tipos de variáveis: independentes e dependentes. As variáveis independentes são as disponíveis diretamente na interface dos carros de deslocamento, enquanto as dependentes são as variáveis desejadas para a aplicação do

switchback. Estas informações estão sintetizadas na Tabela 2. Destaca-se que a velocidade de soldagem é inserida na interface do carro de baixo enquanto as demais variáveis independentes são inseridas na interface do carro de cima.

Tabela 2. Variáveis dependentes e independentes para realização do switchback com o sistema mecanizado.

| Independentes | Dependentes |
|--|--|
| Velocidade de soldagem – V_s (cm/min.) | Comprimento de avanço - A (mm) |
| Frequência – f (Hz) | Comprimento de reversão – R (mm) |
| Amplitude – Amp. (mm) | Velocidade de avanço – V_A (cm/min.) |
| - | Velocidade de reversão – V_R (cm/min.) |
| - | Relação reversão/avanço – R/A |

Fonte: autoria própria.

As fórmulas matemáticas que relacionam as variáveis dependentes e independentes foram definidas por Teixeira (2018) e estão sintetizadas na Tabela 3.

Tabela 3. Equações que descrevem as variáveis dependentes em função das independentes.

| Parâmetro | Equação |
|-------------------------|---------------------------------------|
| Velocidade de tecimento | $V_t = 2 * \text{Amp} * f$ |
| Velocidade de avanço | $V_a = V_t + V_s$ |
| Velocidade de reversão | $V_r = V_t - V_s$ |
| Comprimento de avanço | $A = \text{Amp.} + \frac{V_s}{2 * f}$ |
| Comprimento de reversão | $R = \text{Amp.} - \frac{V_s}{2 * f}$ |

Fonte: autoria própria.

Buscou-se compreender como as variáveis independentes influenciam o comportamento das variáveis dependentes. Foram realizados testes com o sistema mecanizado para soldagem switchback com a entrada de valores máximos de velocidade de soldagem, frequência e amplitude. A partir de um valor máximo de 45 mm, a amplitude foi reduzida de 5 em 5 mm e, para cada valor testado, foram verificadas as frequências máxima e mínima disponíveis, de modo a se obter experimentalmente os limites de uso do equipamento. Com base nos testes realizados foram elaboradas planilhas que possibilitaram uma melhor visualização dos dados experimentais, para a seleção dos parâmetros de switchback.

4.2. SOLDAGEM GMAW COM SWITCHBACK DE AÇO BAIXA LIGA

Após a etapa de caracterização do sistema mecanizado para realização do movimento switchback foram realizadas soldas em simples deposição com aço baixa liga, para averiguar a repetibilidade dos resultados obtidos, e a confiabilidade do sistema mecanizado (equipamento) para a execução de soldas com switchback.

As soldas foram realizadas sobre chapas de aço medindo 120x50,8x9 mm. As composições químicas do arame eletrodo e do metal de base encontram-se na Tabela 4. Os parâmetros de soldagem utilizados constam na Tabela 5.

Nesta etapa experimental o modo de transferência durante a soldagem foi spray, devido sua maior estabilidade. A soldagem GMAW foi realizada com inclinação de 15° de modo que as soldas sem switchback ocorressem empurrando, enquanto as com switchback, empurrando-puxando.

Tabela 4. Composição química do arame eletrodo e do metal de base.

| | % | Fe | Mn | Cu | C | Si | Ni |
|----------------------------------|-------------|-------------|------|------|------|------|-------|
| Arame eletrodo (ER 80S-G) | Min. | Base | 1,4 | 0,4 | 0,1 | 0,8 | 0,8 |
| Metal de base | Min. | Base | 0,65 | 0,28 | 0,15 | 0,12 | 0,069 |

Fonte: ESAB.

Tabela 5. Parâmetros de soldagem utilizados para as soldas com aço baixa liga.

| | |
|--|---|
| Modos de soldagem | Empurrando (GMAW)/Empurrando-Puxando (Switchback) |
| Posição de soldagem | Plana |
| Polaridade | CC+ |
| Arame eletrodo | ER 80S-G 1,2mm |
| Gás de proteção | Ar2%O ₂ |
| Vazão do gás | 14 l/min. |
| Distância bico de contato-peça (DBCP) | 15mm |
| Ângulo da tocha | 15° |
| Vel. alimentação | 6 m/min |
| Tensão | 30 V |

Fonte: autoria própria.

Nesta fase experimental, a velocidade equivalente de soldagem foi mantida constante em 20 cm/min. para todos os experimentos. Foram realizados ensaios, em três repetições, para relações R/A de 50%, 75% e 90% em valores alto (.1), médio (.2) e baixo

(.3) de amplitude, conforme representados na Tabela 6. Nestas condições, após a soldagem dos corpos de prova foi realizada inspeção visual dos cordões de solda.

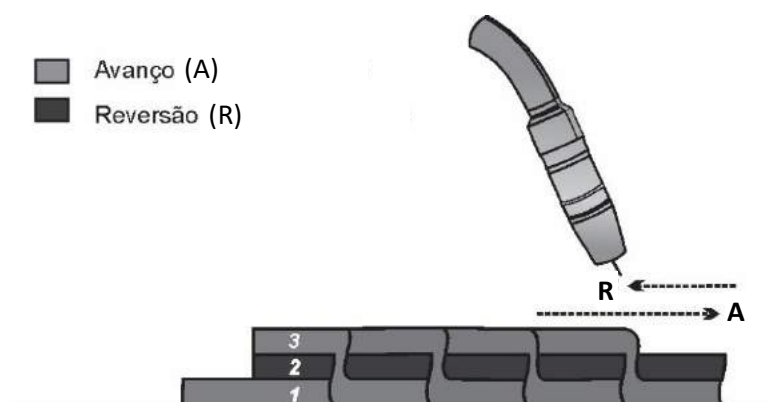
Tabela 6. Parâmetros de switchback utilizados para a soldagem com aço baixa liga.

| Condição | R/A. (%) | Amp. (mm) | f (Hz) | A (mm) | R (mm) | V _A (mm/s) | V _R (mm/s) |
|-------------|-------------|--------------|-----------|-----------|-----------|--------------------------|--------------------------|
| GMAW | - | - | - | - | - | - | - |
| GMAW SB50.1 | | 24,99 | 0,20 | 33,33 | 16,66 | 13,33 | 6,66 |
| GMAW SB50.2 | 50 | 12,49 | 0,40 | 16,66 | 8,33 | 13,33 | 6,66 |
| GMAW SB50.3 | | 3,33 | 1,50 | 4,44 | 2,22 | 13,33 | 6,66 |
| GMAW SB75.1 | | 37,49 | 0,4 | 41,66 | 33,33 | 33,33 | 26,66 |
| GMAW SB75.2 | 75 | 24,99 | 0,6 | 27,77 | 22,22 | 33,33 | 26,66 |
| GMAW SB75.3 | | 9,99 | 1,5 | 11,11 | 8,88 | 33,33 | 26,66 |
| GMAW SB90.1 | | 35,18 | 0,9 | 37,03 | 33,33 | 66,66 | 59,99 |
| GMAW SB90.2 | 90 | 28,78 | 1,1 | 30,30 | 27,27 | 66,66 | 59,99 |
| GMAW SB90.3 | | 21,11 | 1,5 | 19,99 | 19,99 | 66,66 | 59,99 |

Fonte: Farias (2019)

O uso de relações R/A maior que 50% para os experimentos desta pesquisa se justificam por evitar falhas de continuidade na deposição e formação de “vazios no preenchimento do cordão de solda”, conforme os resultados obtidos por Farias (2019). As relações R/A selecionadas para este trabalho, utilizando o sistema mecanizado para soldagem com switchback, geraram um número camadas de solda correspondentes ao número de passadas do arco por um dado trecho ao longo do comprimento do cordão de solda, sendo 3 camadas/passadas para R/A = 50% (Figura 22), 7 camadas/passadas para R/A = 75% e 19 camadas/passadas para R/A = 90%.

Figura 22. Representação esquemática do número de camadas/passadas do arco por um dado trecho durante a soldagem GMAW com switchback (R/A = 50%).



Fonte: autoria própria.

4.4. SOLDAGEM GMAW-P COM SWITCHBACK DO ALUMÍNIO

Tendo em vista os resultados reportados na literatura (CONG et al, 2014; CONG et al, 2017; RYAN et al, 2018 e YEHOV, 2018) quanto a performance do processo de soldagem GMAW CMT – PADV (Gas Metal Arc Welding Cold Metal Transfer – Pulsed Advanced) na redução de porosidade em soldas de alumínio e suas ligas, e que estes resultados foram atribuídos, principalmente, à excelente limpeza da camada de óxidos de alumínio, ao refinamento microestrutural e ao baixo aporte térmico do referido processo, buscou-se a realização de experimentos com o uso de um outro equipamento, alternativo, de baixo custo e fácil acesso, capaz de promover resultados semelhantes ou até melhores.

Desta forma, neste trabalho foram estudadas algumas condições de soldagem aplicadas pelos processos GMAW – P com switchback e com adição de arame frio, haja vista que estas versões derivativas apresentam potenciais características para a redução do aporte térmico, refinamento microestrutural e redução de porosidade (MOTA et al, 2016; TEIXEIRA, 2018, ALMEIDA et al, 2012 e YEHOV, 2018).

A soldagem de passe isolado em simples deposição foi realizada por uma fonte sinérgica ajustada em corrente pulsada e CC+. No modo sinérgico de soldagem a fonte permite alterar apenas dois parâmetros: corrente média (I_m) e comprimento de arco (a). Deste modo, com base em testes preliminares, a corrente média foi ajustada em 120 A e o comprimento do arco ajustado no nível 18 (do equipamento), haja vista que estes parâmetros proporcionaram boa estabilidade de arco, soldas sem perfurações da chapa e um bom aspecto superficial. Os níveis dos demais parâmetros de soldagem foram mantidos constantes durante todo experimento, conforme apresentados na Tabela 7.

Foi utilizado um arame de adição ER 5356 com diâmetro de 1,2 mm cuja composição química encontra-se na Tabela 8, além de chapas de alumínio comercialmente puro (1XXX) como metal de base, medindo 150x50x6 mm. Antes da soldagem foi realizada a limpeza da chapa com escova de aço inoxidável e álcool (99%).

Tabela 7. Parâmetros fixados para todas as soldas de alumínio com switchback.

| | |
|--|---|
| Modos de soldagem | Empurrando (GMAW-P)/Empurrando-Puxando (Switchback) |
| Posição de soldagem | Plana |
| Polaridade | CC+ |
| Arame eletrodo | ER 5356 1,2 mm |
| Gás de proteção | Argônio puro |
| Vazão de gás | 18 l/min. |
| Distância bico de contato-peça (DBCP) | 15 mm |
| Ângulo | 15° |
| Corrente média (Im) | 120 A |
| Comprimento de arco (a) | 18 |

Fonte: autoria própria.

Tabela 8. Composição química do arame eletrodo ER 5356.

| % | Al | Mg | Ti | Mn | Cr | Cu | Si | Zn | Fe |
|-------------|-------------|-----|------|------|------|-----|------|-----|-----|
| Min. | Base | 4,5 | 0,06 | 0,05 | 0,05 | - | - | - | - |
| Máx. | | 5,5 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,1 | 0,25 | 0,1 | 0,4 |

Fonte: American Welding Society.

As condições experimentais adotadas constam na Tabela 9, com os respectivos parâmetros da técnica switchback. Os experimentos foram realizados com velocidade equivalente constante em 30 cm/min. e relação R/A em três níveis (50%, 75% e 90%) com alta (.1), média (.2) e baixa amplitude (.3).

Tabela 9. Parâmetros de switchback utilizados para as soldas de alumínio.

| Condição | R/A (%) | Amp. (mm) | f (Hz) | A (mm) | R (mm) | V_A (mm/s) | V_R (mm/s) |
|-----------------|----------------|------------------|---------------|---------------|---------------|-----------------------------|-----------------------------|
| GMAW-P | - | - | - | - | - | - | - |
| GMAW-P SB50.1 | | 37,50 | 0,20 | 50,00 | 25,00 | 20 | 10 |
| GMAW-P SB50.2 | 50 | 18,75 | 0,40 | 25,00 | 12,50 | 20 | 10 |
| GMAW-P SB50.3 | | 5,00 | 1,50 | 6,66 | 3,33 | 20 | 10 |
| GMAW-P SB75.1 | | 38,04 | 0,46 | 43,47 | 32,60 | 40 | 30 |
| GMAW-P SB75.2 | 75 | 29,16 | 0,60 | 33,33 | 25,00 | 40 | 30 |
| GMAW-P SB75.3 | | 11,66 | 1,50 | 13,33 | 10,00 | 40 | 30 |
| GMAW-P SB90.1 | | 38,00 | 1,25 | 40,00 | 36,00 | 100 | 90 |
| GMAW-P SB90.2 | 90 | 25,40 | 1,87 | 26,73 | 24,06 | 100 | 90 |
| GMAW-P SB90.3 | | 19,79 | 2,40 | 20,83 | 18,75 | 100 | 90 |

Fonte: autoria própria.

4.5. SOLDAGEM GMAW-P DE ALUMÍNIO COM ADIÇÃO DE ARAME FRIO

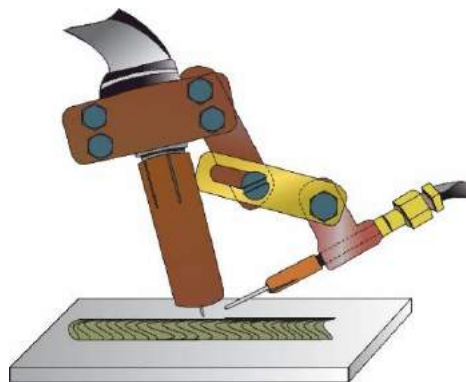
Os testes de soldagem GMAW em corrente pulsada com adição de arame frio foram realizados com o dispositivo eletrônico de controle desenvolvido por Andrade (2010), que consiste em um sistema de controle de alimentação de arame frio em malha fechada. Deste modo, um circuito eletrônico (Figura 23) controla um motor de corrente contínua, responsável por tracionar o arame frio. Maiores detalhes acerca do projeto do circuito estão disponíveis no trabalho de Andrade (2011). A Figura 24 mostra a disposição da tocha de soldagem e do dispositivo de alimentação de arame frio

Figura 23. Sistema de alimentação de arame frio em malha fechada.



Fonte: Andrade (2011).

Figura 24. Disposição da tocha de soldagem e do dispositivo de alimentação do arame frio.



Fonte: autoria própria.

Foram realizadas soldas de simples deposição utilizando o mesmo arame eletrodo, metal de base e demais parâmetros de soldagem empregados na etapa anterior (Tabela 7). O arame frio empregado tem mesma classificação e características do arame eletrodo (ER 5356 e 1,2 mm de diâmetro). Foram realizadas soldagens com diferentes velocidades de alimentação de arame frio, mantendo a mesma energia de soldagem em todos os experimentos, conforme dados da Tabela 10. Deste modo, foi possível avaliar o comportamento do cordão de solda em função de incrementos sucessivos de 1 m/min. na alimentação de arame frio.

Tabela 10. Velocidades de alimentação de arame frio para os experimentos.

| Condição | V_{af} (m/min.) | V_a (m/min.) | V_s (cm/min.) |
|-----------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| GMAW-P AF0 | 0 | 6 | 30 |
| GMAW-P AF1 | 1 | 6 | 30 |
| GMAW-P AF2 | 2 | 6 | 30 |
| GMAW-P AF3 | 3 | 6 | 30 |
| GMAW-P AF4 | 4 | 6 | 30 |
| GMAW-P AF5 | 5 | 6 | 30 |
| GMAW-P AF6 | 6 | 6 | 30 |

Fonte: autoria própria.

V_{af} = Velocidade de alimentação do arame frio

V_a = Velocidade de alimentação do arame eletrodo

V_s = Velocidade de soldagem

4.5 DEPOSIÇÃO DE PAREDES DE ALUMÍNIO

Cada parede experimental deste trabalho foi construída pela deposição de dez cordões de solda sucessivamente empilhados um sobre o outro. Utilizou-se a metodologia do resfriamento forçado, com um jato de ar frio aplicado entre passes, de forma que cada novo cordão fosse depositado em um substrato à temperatura ambiente. O metal de adição foi o arame ER 5356, e o metal de base foi o alumínio comercialmente (1XXX) puro medindo 150x37x12 mm. O gás de proteção foi o argônio comercialmente puro com vazão de 16 l/min.

Os cordões de solda foram depositados sobre a borda da chapa (Figura 25), haja vista que esta configuração reduz a possibilidade de empenamento do substrato, devido ao aporte térmico. O modo de soldagem sinérgico foi novamente selecionado para deposição dos cordões em corrente pulsada, com uma corrente média de 110 A e o comprimento de arco (a) foi definido em 12 (parâmetro do equipamento), visando reduzir a possibilidade de escoamento lateral da poça de fusão durante a deposição das paredes. Os demais parâmetros de soldagem foram mantidos iguais aos das etapas anteriores.

Figura 25. Disposição da tocha de soldagem e do metal de base para deposição de paredes. O dispositivo auxiliar de alimentação somente foi utilizado nas soldas com adição de arame frio.



Fonte: autoria própria.

Com base nas análises realizadas sobre as soldas GMAW-P de alumínio em simples deposição com switchback e com adição de arame frio, foram selecionadas 4 condições para deposição dos cordões: GMAW – P, GMAW - P SB50.3, GMAW - P AF1 e uma condição combinando as técnicas switchback (SB50.3) e arame frio (AF1) denominada GMAW-P SBAF, conforme a Tabela 11.

Tabela 11. Parâmetros para deposição das paredes de alumínio.

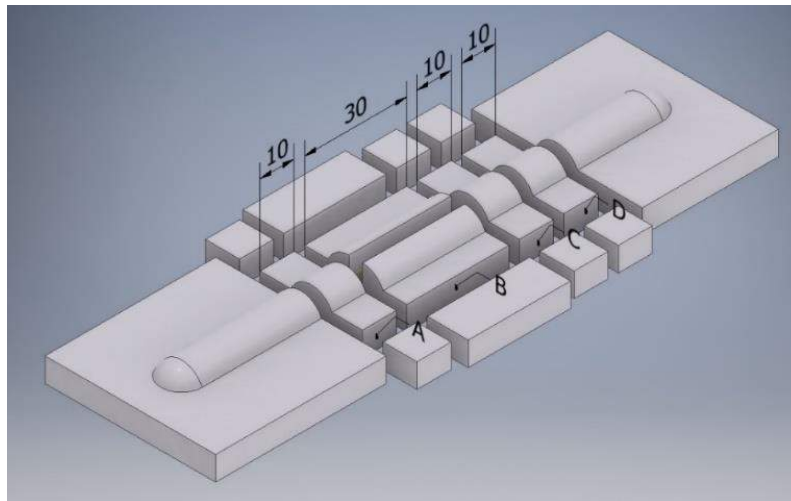
| Condição | Condição de switchback | Velocidade de alimentação de arame frio |
|-------------|------------------------|---|
| GMAW-P | - | - |
| GMAW-P AF | - | 1 m/min. |
| GMAW-P SB | SB50.3 (Tabela 9) | - |
| GMAW-P SBAF | SB50.3 (Tabela 9) | 1 m/min. |

Fonte: autoria própria.

5.5. ANÁLISE METALÚRGICA

Os cordões de solda de alumínio em simples deposição e as paredes de alumínio foram seccionados conforme as metodologias das Figuras 26 e 27, respectivamente. Desta forma, dos cordões de simples deposição foram obtidos três corpos de prova da seção transversal (A, C e D) e um da seção longitudinal (B). No decorrer do texto, serão avaliadas seções específicas dos cordões as quais serão indicadas pelas letras A, B, C ou D. Por exemplo: o termo GMAW- P SB90.1C se refere à seção C do cordão SB90.1.

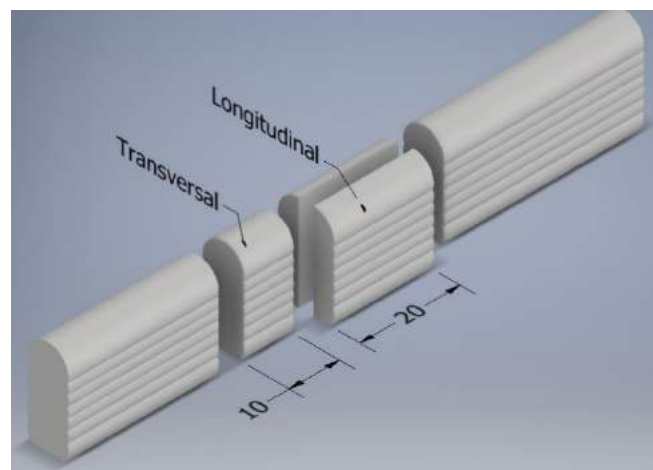
Figura 26. Esquema de seccionamento para retirada das amostras dos cordões de simples deposição. Dimensões em (mm).



Fonte: autoria própria.

Para as paredes, foram obtidas uma seção transversal e outra longitudinal. Os cortes foram realizados com auxílio de cortadora metalográfica (cutoff) com disco apropriado para corte de materiais não ferrosos.

Figura 27. Esquema de seccionamento para retirada de amostras das paredes de alumínio. Dimensões em (mm).



Fonte: autoria própria.

As seções selecionadas das amostras passaram por processo de metalografia que consistiu no lixamento com granulometrias 80 a 1200 mesh, seguido de polimento com alumina $\frac{1}{4} \mu$, com auxílio de uma politriz metalográfica. Para a revelação da macroestrutura foi utilizado o reagente Marble, cuja composição química está na Tabela 12. O ataque foi realizado por passadas de um algodão embebido do reagente sobre a área da seção de interesse.

Tabela 12. Composição química Marble.

| | |
|-------------------|-------|
| CuSO ₄ | 4 g |
| HCl | 20 g |
| Água destilada | 20 ml |

Fonte: Monteiro (2019).

Para caracterização microestrutural dos passes isolados foi utilizado o reagente Keller cuja composição está na Tabela 13. O ataque foi realizado por imersão da seção de interesse da amostra por cerca de 40 s. A microestrutura das paredes foi revelada com reagente HF 20% por imersão de 30 s. As macro e micrografia foram registradas com estereomicroscópio modelo Leica EZ4 e microscópio ótico modelo Opton, respectivamente.

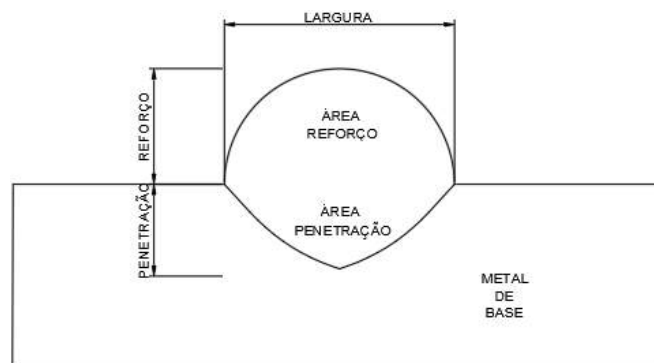
Tabela 13. Composição química Keller.

| | |
|------|--------|
| HF | 2 ml |
| HCL | 3 ml |
| HNO3 | 5 ml |
| H2O | 190 ml |

Fonte: Monteiro (2019).

A análise geométrica dos cordões de simples deposição foi realizada com base na macrografia retirada da seção transversal, sendo obtidas medidas de reforço (R_e), largura (L), penetração (P) e diluição (D) com o auxílio do software ImageJ, conforme a Figura 28.

Figura 28. Representação das medidas do perfil geométrico para os cordões de simples deposição.



Fonte: autoria própria.

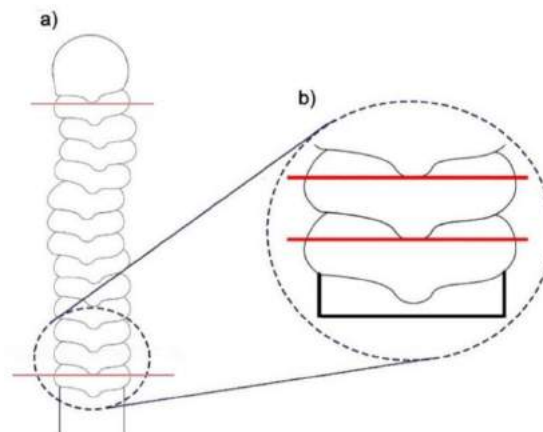
A análise geométrica das paredes de alumínio foi realizada de acordo com a metodologia adotada por Yehorov (2018). Inicialmente foram descartadas a primeira e última camada da parede (Figura 29a). Em seguida foram determinados os pontos centrais na seção transversal de cada camada (Figura 29b). O terceiro passo foi simular o alinhamento da seção transversal da parede (Figura 30). Este alinhamento simulado

tornou-se necessário para compensar possíveis distorções apresentadas na parede, que podem influenciar a sua altura final.

Por fim, foram medidas as áreas total e efetiva da parede (Figura 31). A área efetiva é definida como a maior área da parede que poderia ser usada após usinagem, e normalmente é representada por retângulo inscrito na área total da camada. A determinação destas áreas também seguiu a orientação da geometria da parede.

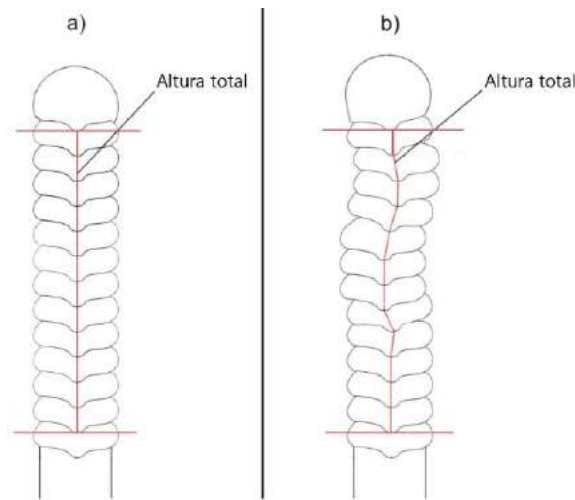
Os parâmetros avaliados foram a altura por camada, largura média e fator buy-to-apply. A altura por camada é a razão entre a altura da parede e o número de camadas. A largura efetiva média é estimada pela razão entre a área efetiva e a altura da parede. O fator buy-to-apply é definido como a razão entre a área total e a área efetiva de cada parede. Este fator quantifica a porcentagem de metal que deve ser removido da parede para acabamento, quanto mais próximo da unidade estiver este fator, menos material deverá ser retirado da parede através de usinagem.

Figura 29. a) Descarte da última e da primeira camada. b) critério para determinação da altura entre camadas (linhas vermelhas no ponto de maior penetração de cada camada).



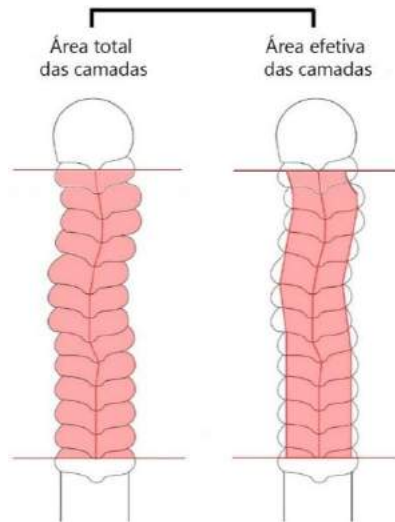
Fonte: adaptado de Yehorov (2018)

Figura 30. Critério para determinar a altura da parede através do alinhamento das distorções. a) parede reta; b) parede com distorções.



Fonte: adaptado de Yehorov (2018)

Figura 31. Áreas total e efetiva da camada.



Fonte: adaptado de Yehorov (2018)

5.6. ANÁLISE DE POROS

A porosidade foi avaliada qualitativamente nos cordões de simples deposição a partir das seções transversais. O volume de poros das paredes foi quantificado pelo método da gravimetria, que se baseia no princípio de Arquimedes, ou seja, na análise das forças que atuam sobre um objeto dentro e fora da água, sendo capaz de mostrar o percentual de vazio em relação a uma referência (amostra livre de poros), de acordo com Yehorov (2018).

O procedimento consiste em medir com uma balança de precisão, as massas da parede no ar e flutuando em um recipiente com água. Dentro da água, a amostra sofre a ação das forças empuxo (E) e peso. Calcula-se a densidade da parede (ρ_a) e relaciona-se

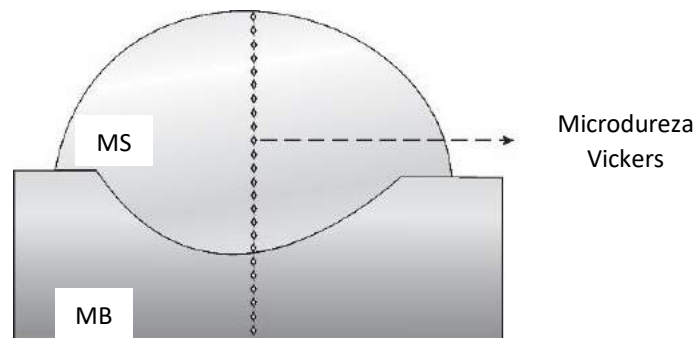
com uma densidade de referência de um corpo considerado livre de poros (densidade da liga 5356 $\rho_{Al} = 2,6572 \text{ g/cm}^3$). A relação entre a densidade da parede e a densidade de referência revela o percentual de volume de poros da parede (Equação 4). Maiores detalhes acerca da dedução das equações empregadas neste método podem ser encontrados no trabalho de Yehorov (2018).

$$V_p = (\rho_{Al} - \rho_a) * \frac{100}{\rho_{Al}} \quad (4)$$

5.7. ANÁLISE DE MICRODUREZA VICKERS

Para os cordões de simples deposição, o ensaio de microdureza Vickers foi realizado nas amostras transversais (A e C da Figura 26) posteriormente ao ataque para revelação microestrutural. Foi feita uma linha de indentações conforme a Figura 32, de modo a abranger o metal de solda e parte do metal de base. Para tanto, foi utilizado um microdurômetro Shimadzu HMV com carga de 490,3 mN, tempo de indentação de 10 s. e espaçamento de 0,1mm. Deste modo, foi possível verificar possíveis mudanças de microdureza ao longo da seção transversal do cordão de solda.

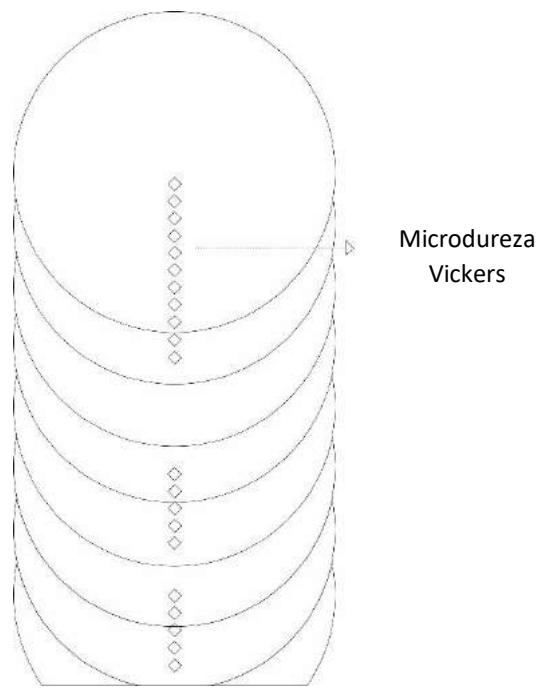
Figura 32. Esquema de ensaio de microdureza para seção transversal dos passes de simples deposição.



Fonte: autoria própria (2020)

A metodologia do ensaio de microdureza Vickers para as amostras transversais das paredes consistiu na realização de três linhas de indentações, uma na porção superior da parede, uma na região central e outra na região de baixo. Cada linha iniciou na zona central de um passe e finalizou na zona central do passe imediatamente abaixo, conforme a Figura 33. Os parâmetros de ensaio foram os mesmos dos realizados nos cordões de simples deposição.

Figura 33. Esquema de ensaio de microdureza seção transversal das paredes.



Fonte: autoria própria.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. AFERIÇÃO DO SISTEMA MECANIZADO PARA SOLDAGEM SWITCHBACK

A Tabela 14 apresenta os valores máximos de frequência correspondentes à cada valor de amplitude, os quais foram reduzidos e testados de 5 em 5 mm. A partir da análise e testes experimentais do sistema mecanizado para soldagem switchback concluiu-se que, para qualquer valor de amplitude a frequência mínima será de 0,1 Hz, porém, para cada valor de amplitude, o próprio sistema do equipamento limitará o valor máximo da frequência de tecimento, com vista a proteção do sistema contra danos.

Tabela 14. Relação entre amplitude e frequência máxima de tecimento.

| Amplitude de tecimento (mm) | Frequência máxima de tecimento (Hz) |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| 45 | 1 |
| 40 | 1,2 |
| 35 | 1,3 |
| 30 | 1,6 |
| 25 | 1,9 |
| 20 | 2,4 |
| 15 | 3,2 |
| 10 | 4,8 |
| 5 | 9,6 |
| 0,5 | 10 |

Fonte: Farias (2019).

A Tabela 15 mostra os dados da calibração do sistema mecanizado para soldagem switchback realizada por Teixeira (2018), para o ajuste dos valores de amplitude. Neste caso, ao se inserir, por exemplo, uma amplitude de 45 mm na interface do carro de cima, o mecanismo irá deslocar apenas 38,3 mm, e assim sucessivamente.

Tabela 15. Calibração dos valores de amplitude do carro de cima.

| Amplitude de tecimento (mm) | Amplitude real (mm) |
|-----------------------------|---------------------|
| 45 | 38,3 |
| 40 | 34,1 |
| 35 | 29,8 |
| 30 | 25,6 |
| 25 | 21,3 |
| 20 | 17,0 |
| 15 | 12,8 |
| 10 | 8,5 |
| 5 | 4,3 |

Fonte: Teixeira (2018).

O comprimento máximo de avanço é obtido quando a amplitude e velocidade de soldagem forem máximas e a frequência for mínima, de acordo com a equação do

comprimento de avanço apresentada na Tabela 3. Sendo assim, foram realizados testes com o valor mínimo de frequência (0,1 Hz) e máximo da velocidade equivalente de soldagem (26,66 mm/s), variando a amplitude real entre 1 e 38 mm, com incrementos de 1 mm. A partir destes testes foi observado que esta combinação de parâmetros resultou em um movimento que consistia na alternância da velocidade de soldagem entre um valor menor e outro mais elevado, sem ocorrer o movimento de reversão da tocha, característico do switchback.

Desta forma, observou-se que neste sistema mecanizado existe uma condição necessária para a obtenção do movimento switchback: a velocidade de tecimento do carro de cima deve ser maior que a velocidade linear de soldagem fornecida pelo carro de baixo.

A condição de maior comprimento de avanço em que a velocidade de tecimento do carro de cima superou a velocidade linear do carro de baixo ocorreu para uma frequência de 0,4 Hz. Assim, de acordo com a Tabela 16, o maior comprimento de avanço possível do sistema mecanizado para soldagem switchback é de 71,33 mm. Porém, este comprimento de avanço somente é atingido para uma relação R/A de 6,54%, que não é interessante para fins de pesquisa. Portanto, definiram-se os comprimentos máximos de avanço para relações R/A específicas de 50%, 75% e 90% de acordo com a Tabela 17.

Tabela 16. Valor máximo de comprimento de avanço e seus demais parâmetros.

| Amp. real (mm) | Freq. (Hz) | V_{soldagem} (mm/s) | Avanço (mm) | Reversão (mm) | V_{avanço} (mm/s) | V_{reversão} (mm/s) | R/A (%) |
|---------------------------|-----------------------|--|------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--|----------------|
| 36 | 0,4 | 26,66 | 69,33 | 2,66 | 55,46 | 2,13 | 3,84 |
| 37 | 0,4 | 26,66 | 70,33 | 3,66 | 56,26 | 2,93 | 5,21 |
| 38 | 0,4 | 26,66 | 71,33 | 4,66 | 57,06 | 3,73 | 6,54 |

Fonte: Farias (2019).

Tabela 17. Valores máximos de comprimento de avanço para R/A de 50%, 75% e 90% e seus demais parâmetros.

| Amp. real (mm) | Freq. (Hz) | V_{soldagem} (mm/s) | Avanço (mm) | Reversão (mm) | V_{avanço} (mm/s) | V_{reversão} (mm/s) | R/A (%) |
|---------------------------|-----------------------|--|------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--|----------------|
| 38,10 | 1,05 | 26,67 | 53,34 | 50,8 | 106,68 | 53,34 | 50 |
| 38,26 | 2,44 | 26,67 | 43,72 | 32,79 | 213,37 | 160,04 | 75 |
| 38,31 | 3,72 | 15 | 40,32 | 36,29 | 300,02 | 270,02 | 90 |

Fonte: Farias (2019).

Estes resultados balizaram a construção de planilhas capazes de estabelecer uma variação sistemática dos parâmetros de switchback, possibilitando a realização de

experimentos capazes de avaliar com clareza a influência de parâmetros como a razão R/A, os comprimentos e as velocidades de avanço e reversão sobre o aspecto superficial, microestrutura e propriedades mecânicas das soldas depositadas.

Os testes mostraram que o sistema se comportou bem trabalhando nas velocidades máximas de avanço e reversão, entretanto, quando a frequência atingiu valores acima de 3,2 Hz as vibrações do deslocamento dos carros se tornaram excessivas. Maiores detalhes acerca da caracterização do equipamento encontram-se no trabalho de Farias (2019).

5.2. SOLDAGEM COM SWITCHBACK DE AÇO BAIXA LIGA

A Figura 34 apresenta os cordões de solda realizados na condição SB50.1, ou seja, R/A de 50% com alta amplitude. A partir da análise visual dos cordões de solda pode-se afirmar que os cordões apresentaram bom aspecto superficial e que as réplicas apresentaram grande semelhança entre si, indicando a eficácia e confiabilidade do equipamento para realização da soldagem com a técnica switchback. O cordão apresentou aspecto escamado, típicos dos movimentos de avanço e reversão sucessivos, e com espaçamento considerável entre as escamas devido aos altos comprimentos de avanço e reversão.

Figura 34. Testes na soldagem de aço baixa liga com switchback na condição GMAW SB50.1.



Fonte: Farias (2019).

A Figura 35 apresenta os cordões de solda na condição SB90.3. Novamente observa-se o bom aspecto superficial dos cordões bem como a semelhança entre as

réplicas, indicando uma boa repetibilidade dos resultados da soldagem com o equipamento empregado.

As soldas de aço baixa liga nas demais condições encontram-se no apêndice desta obra.

Figura 35. Testes na soldagem de aço baixa liga com switchback na condição GMAW SB90.3.



Fonte: Farias (2019).

5.3. SOLDAS DE ALUMÍNIO COM SWITCHBACK

5.3.1. Aspecto superficial

As Figuras 36 a 39 apresentam o resultado das inspeções visual e de líquido penetrante para os cordões GMAW - P e GMAW - P SB de 50%, 75% e 90% com alta, média e baixa amplitude de tecimento. De um modo geral, os cordões apresentaram bom aspecto superficial. Entretanto, os cordões depositados sem a técnica switchback e os com switchback em baixa amplitude de tecimento, apresentaram uma menor incidência de porosidade superficial. Por outro lado, os cordões depositados com alta amplitude de tecimento apresentaram maior incidência de defeitos.

A Figura 37 A mostra o cordão de solda na condição GMAW-P SB50.1. Nesta condição de maior amplitude, onde o comprimento de avanço foi de 50 mm, obteve-se um menor número de ciclos de avanço e reversão necessários para completar o cordão de solda, quando comparada à uma condição de menor amplitude. Isto implica em um menor tempo de permanência da fonte de calor (arco elétrico) sobre o substrato e, conseqüentemente, menor temperatura do metal de base durante a operação de soldagem,

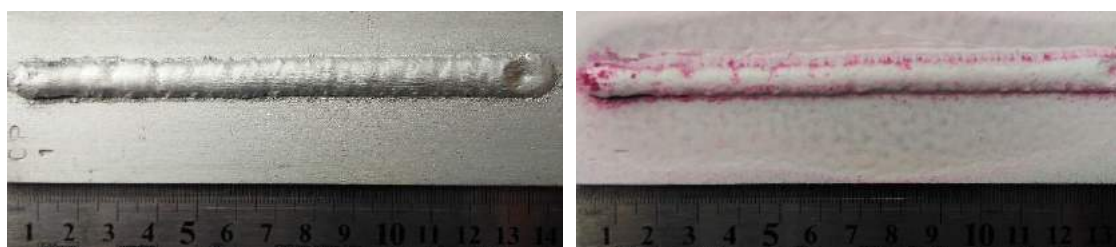
resultando em uma maior taxa de resfriamento, o que pode aumentar a incidência de poros e influenciar o comportamento metalúrgico da solda.

Outro aspecto a ser considerado para soldas com switchback de alta amplitude é a posição da fonte de calor em relação a poça de fusão. Para a condição GMAW-P SB50.1, devido ao elevado comprimento de avanço (50 mm), a fonte de calor (arco elétrico) permanece afastada da poça de fusão, reduzindo sua fluidez e acelerando o processo de resfriamento que, por sua vez, pode aumentar a incidência de poros.

Analogamente, para condição GMAW-P SB50.3 (Figura 37 C), devido à menor amplitude de tecimento e, conseqüente, menor comprimento de avanço (6,66 mm), a fonte de calor permanece mais próxima à poça de fusão, além de ser necessário um maior número de ciclos do movimento switchback para a concluir a deposição do cordão, aumentando a fluidez da poça, a temperatura do substrato e a possibilidade de fuga dos poros.

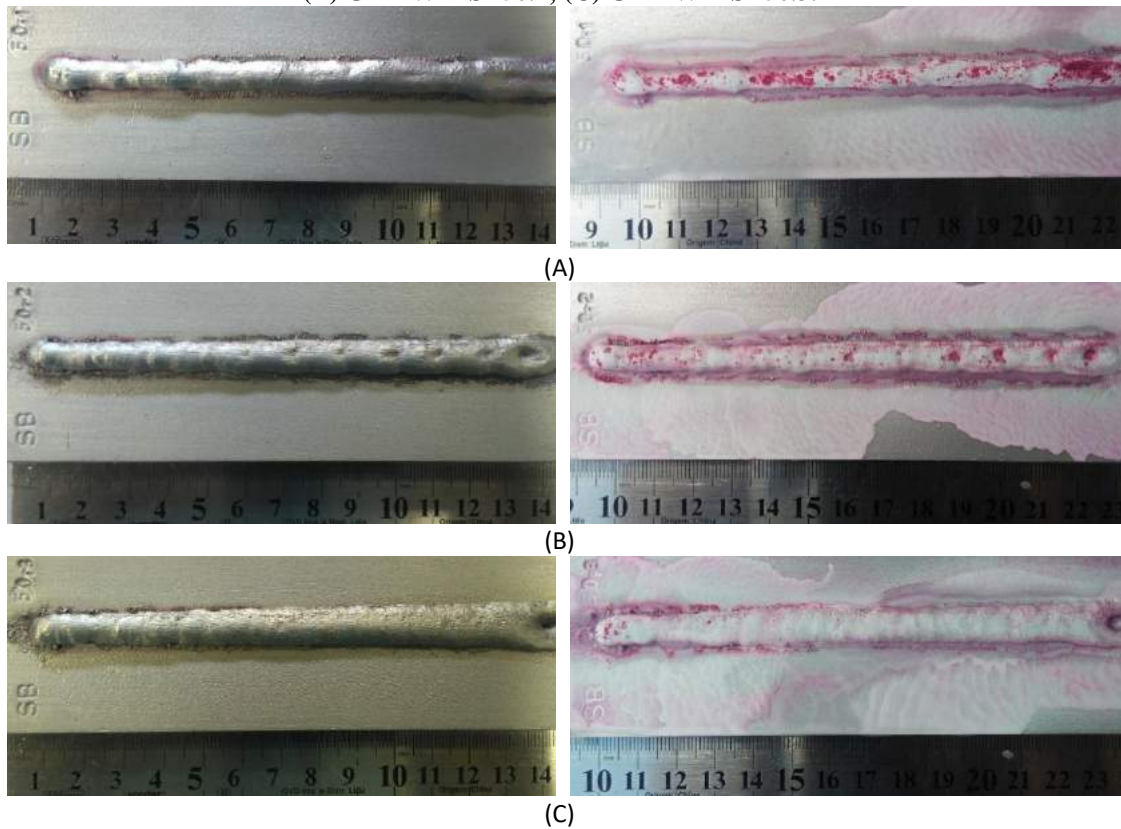
Do exposto acima, pode-se inferir que, mantidas constantes a velocidade equivalente e a relação R/A, a variação da amplitude do movimento switchback influencia a incidência de defeitos. Destaca-se a relação direta entre a amplitude do movimento switchback com os comprimentos de avanço e reversão da tocha, e destes com o número de ciclos da técnica necessários para se completar o cordão de solda, conforme a relação apresentada na Figura 40. Esta análise é semelhante para as demais condições avaliadas nesta pesquisa (75% e 90%).

Figura 36. Resultado dos ensaios visual e de líquido penetrante para soldas GMAW-P.



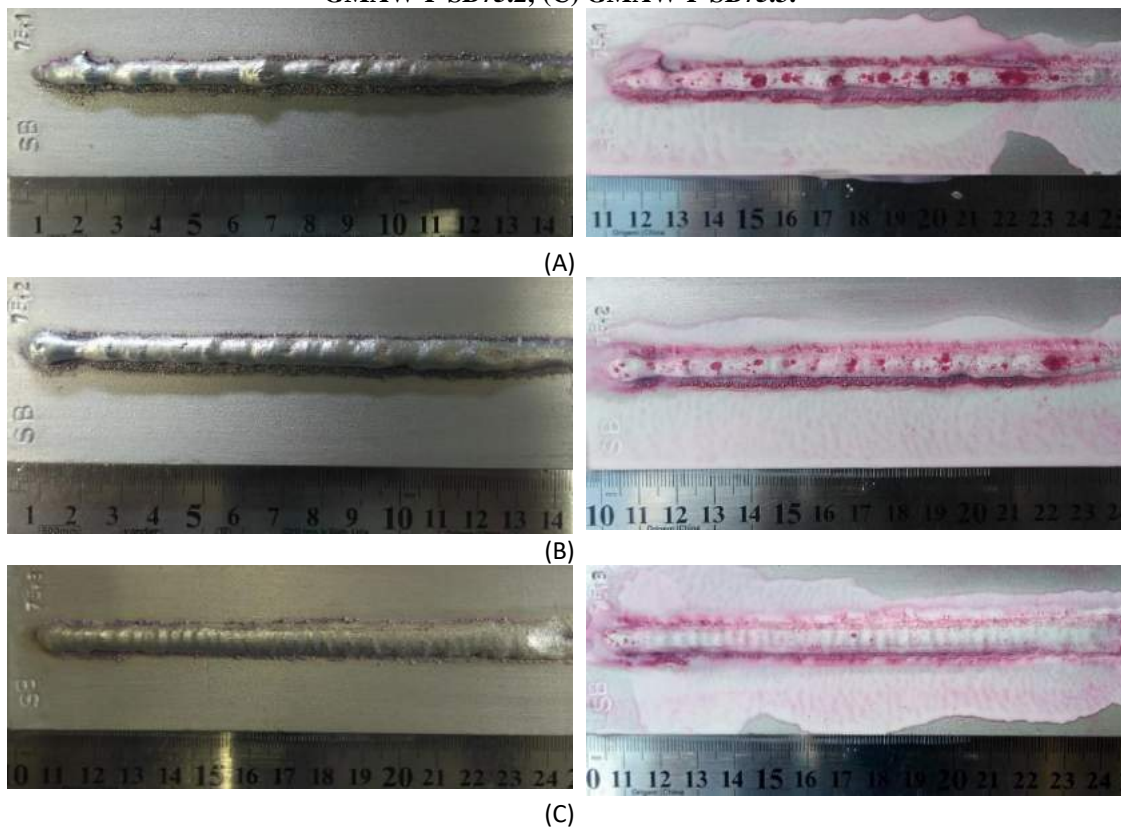
Fonte: Martins (2019).

Figura 37. Resultado dos ensaios visual e líquido penetrante dos cordões: (A) GMAW-P SB50.1; (B) GMAW-P SB50.2; (C) GMAW-P SB50.3.



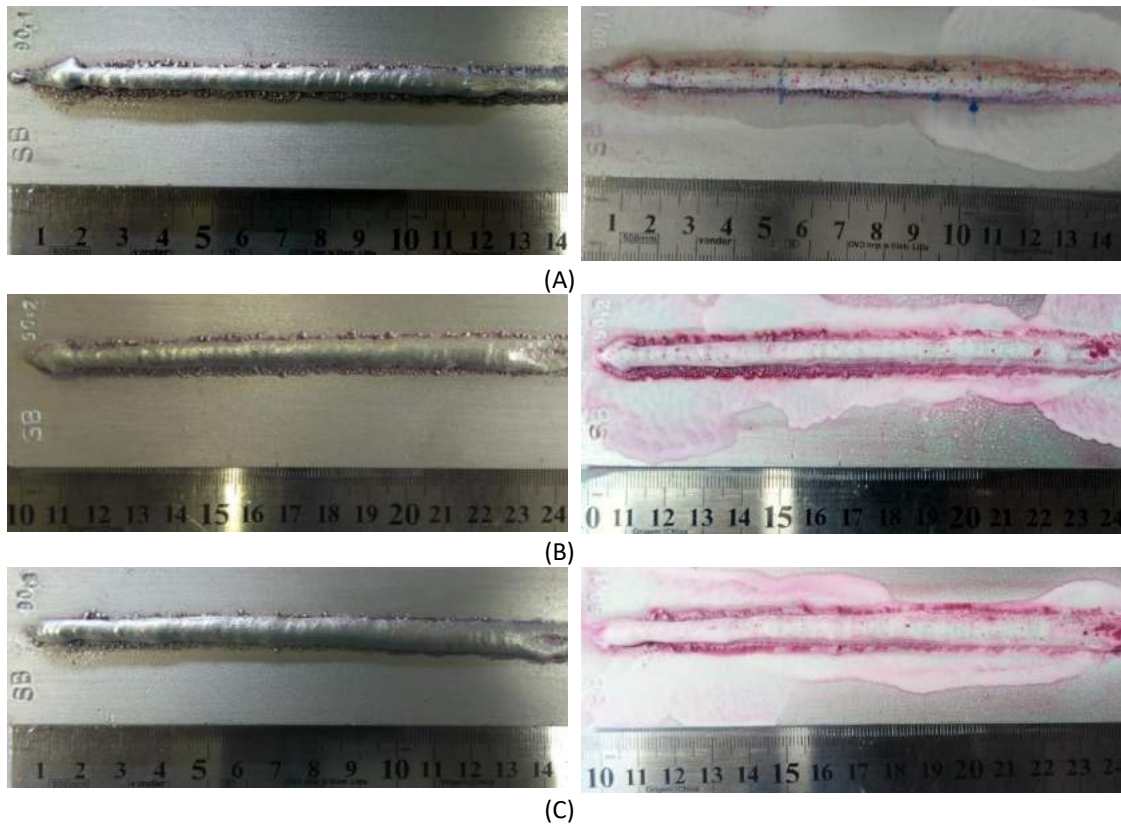
Fonte: Martins (2019).

Figura 38. Resultados ensaio visual e líquido penetrante dos cordões: (A) GMAW-P SB75.1; (B) GMAW-P SB75.2; (C) GMAW-P SB75.3.



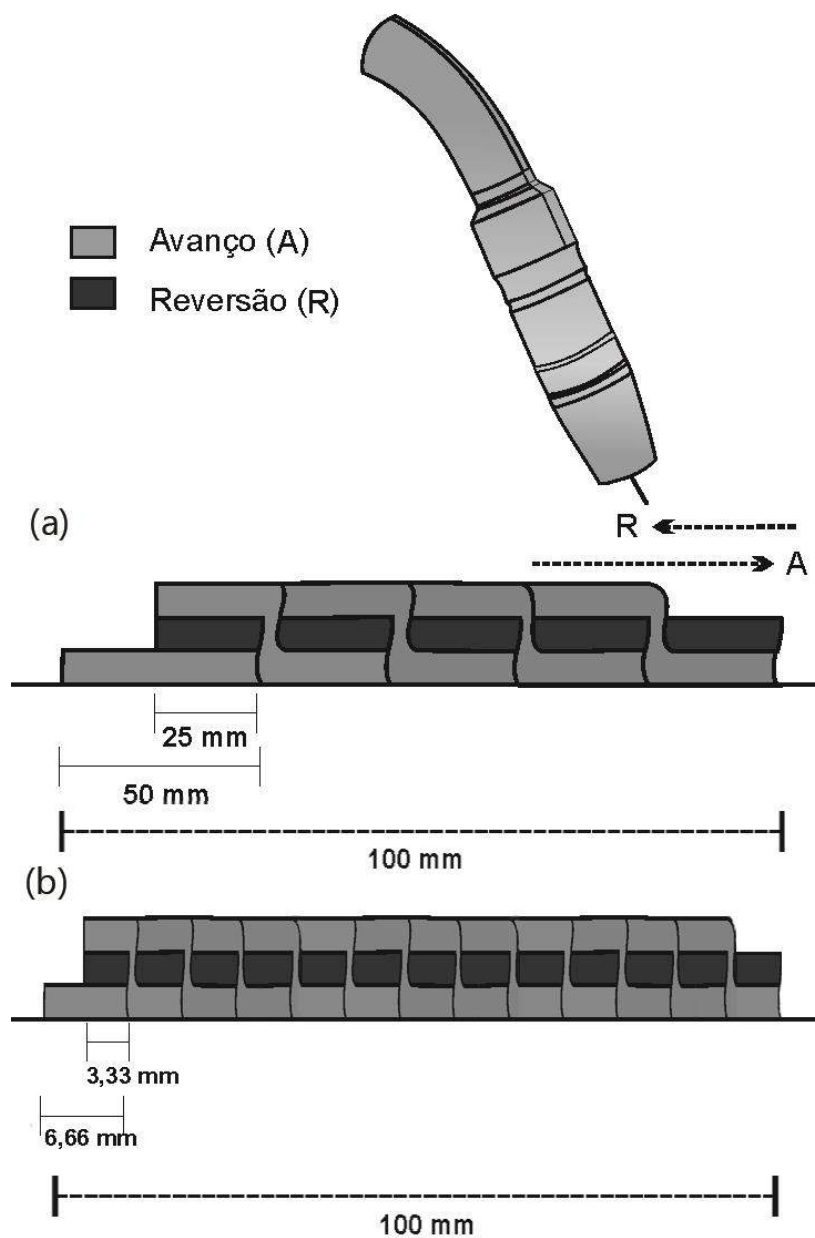
Fonte: Martins (2019).

Figura 39. Resultados ensaio visual e liquido penetrante dos cordões: (A) GMAW-P SB90.1; (B) GMAW-P SB90.2; (C) GMAW-P SB90.3.



Fonte: Martins (2019).

Figura 40. Ilustração da relação entre a amplitude de tecimento e o número de ciclos do movimento switchback necessários para completar um cordão de solda com comprimento determinado. (a) GMAW-P SB50.1. (b) GMAW-P SB50.3.



Fonte: autoria própria (2019).

5.3.2. Macroestrutura

As Figuras 41 e 42 mostram as macrografias da seção transversal dos cordões de solda de simples deposição GMAW-P e GMAW-P SB, respectivamente.

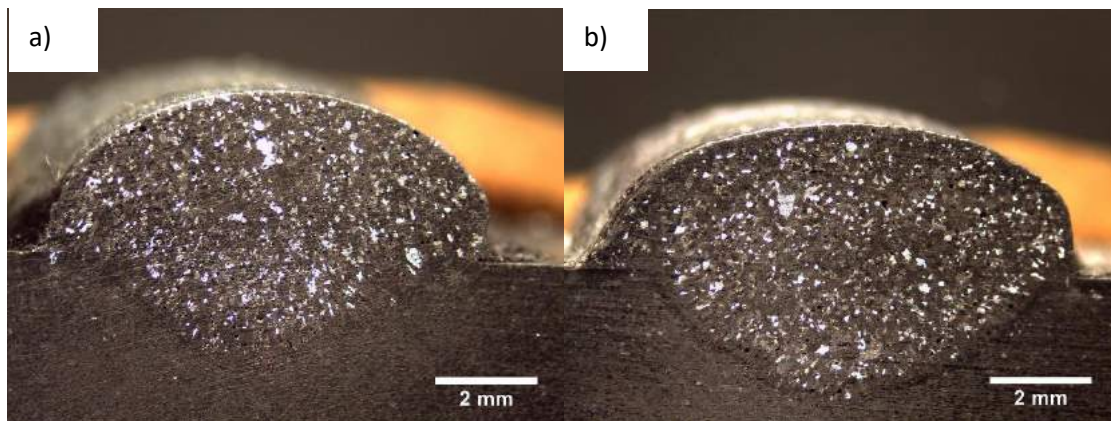
A solda GMAW-P apresentou uma estrutura predominante de grãos equiaxiais, com grãos colunares praticamente imperceptíveis. Isto pode ser explicado devido à pulsação da corrente durante a soldagem, a qual tende a agitar a poça de fusão promovendo a quebra de dendritas e favorecendo a nucleação de novos grãos. Observa-se também a

penetração considerável do cordão de solda e indícios de falta de fusão entre a solda e o metal de base, que pode estar relacionada à presença de uma fina camada de óxido na superfície da peça ou à baixa energia de soldagem.

Pode-se afirmar que a penetração das soldas com switchback de 50% foram maiores do que a penetração das soldas depositadas com R/A de 75% e 90%, independente da amplitude avaliada. Este efeito pode estar relacionado à velocidade com que a tocha de soldagem realiza os movimentos de avanço e reversão que, de acordo com a Tabela 9, para R/A de 50% é de 20 mm/s para o avanço e 10 mm/s para reversão, enquanto que para R/A de 90% é de 100 mm/s para o avanço e 90 mm/s para reversão. Nota-se também que, para uma mesma relação R/A, quanto menor a amplitude de tecimento maior a penetração do cordão. Os cordões com alta e média amplitudes também apresentaram maior convexidade quando comparada aos cordões de baixa amplitude.

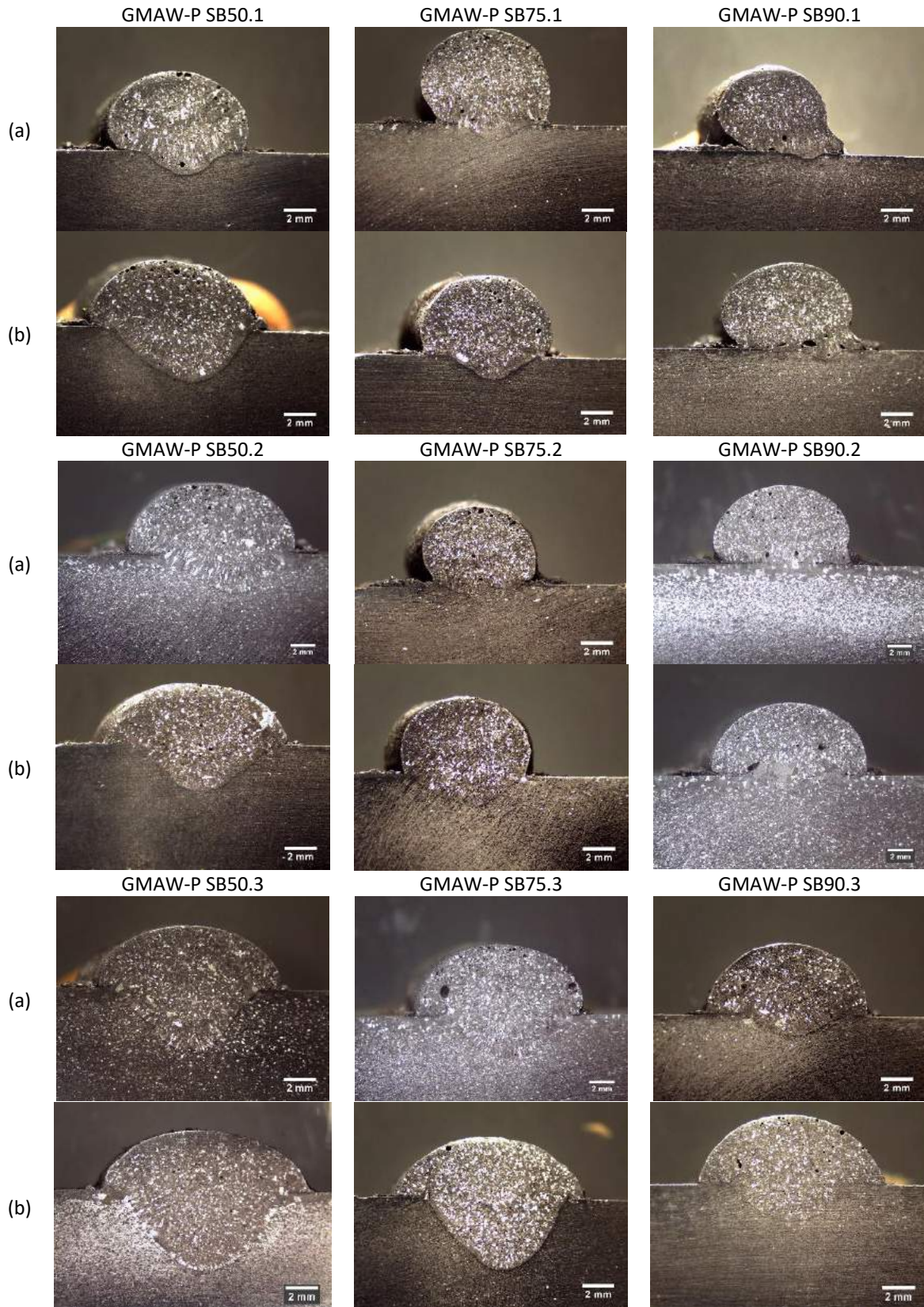
Os cordões com R/A de 90% apresentaram falta de fusão mais evidente em comparação aos cordões de 50% e 75%. Neste aspecto, a relação R/A de 50% com baixa amplitude mostrou melhor resultado.

Figura 41. Macrografias da seção transversal do cordão de solda na condição GMAW-P: (a) seção A e (b) seção C. Aumento 10X.



Fonte: Martins (2019).

Figura 42. Macrografias da seção transversal dos cordões de solda com switchback, (a) seção A; (b) seção C. Aumento 8X.

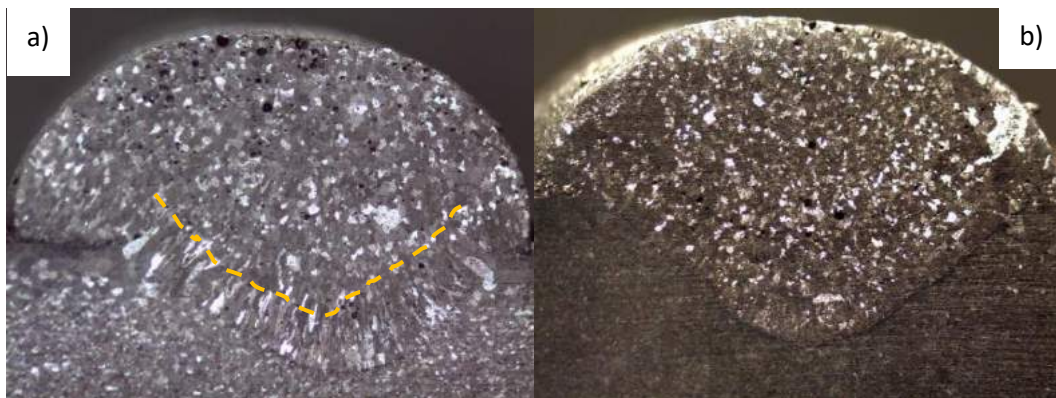


Fonte: Martins (2019).

As macrografias da seção transversal de algumas condições (GMAW-P SB50.1; SB 50.2; SB75.1 e SB90.1) apresentadas na Figura 42 mostram diferentes estruturas de soldificação ao longo do comprimento do cordão. Isto fica evidente ao comparar, por exemplo, as seções GMAW-P SB50.2A e GMAW-P SB50.2C (Figura 43 A e B). No primeiro caso observam-se grãos colunares próximos à linha de fusão e grãos equiaxiais no restante do metal de solda (Figura 44), enquanto no segundo caso os grãos colunares são praticamente imperceptíveis, predominando os grãos equiaxiais.

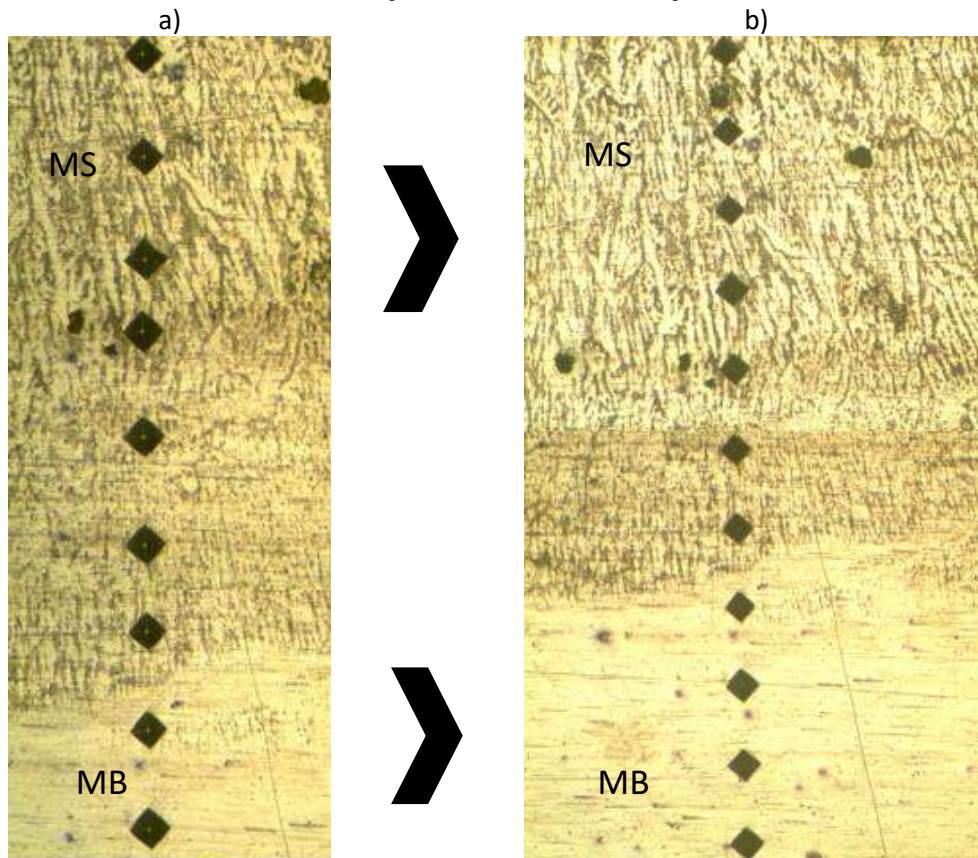
Considerando que os grãos colunares somente surgem na seção retirada antes da primeira metade do cordão, este fenômeno pode estar relacionado com a temperatura da chapa. Na região da seção GMAW- P SB50.2A, a temperatura da chapa é menor, portanto, o gradiente de temperatura é maior, aumentando a razão G/R e favorecendo o crescimento colunar. Os grãos colunares se estendem apenas até certo ponto, que possivelmente corresponde ao primeiro passe do movimento switchback, os passes posteriores são depositados sobre uma camada de metal de solda mais quente, que favorece grãos equiaxiais. Já na seção retirada após a segunda metade do cordão (GMAW-P SB 50.2C), quando a chapa está mais quente, onde o gradiente de temperatura é menor, reduzindo a razão G/R e favorecendo o crescimento equiaxial.

Figura 43. Variação no modo de solidificação para uma mesma condição de soldagem. Condição GMAW- P SB50.2: (a) seção A e (b) seção C. Aumento 12,5X.



Fonte: Martins (2019).

Figura 44. Indentações na interface metal de solda (MS)/metal de base (MB) evidenciando o crescimento de grãos colunares. (a) Aumento 200X e (b) Aumento 100X. Condição GMAW- P SB50.2 seção A.

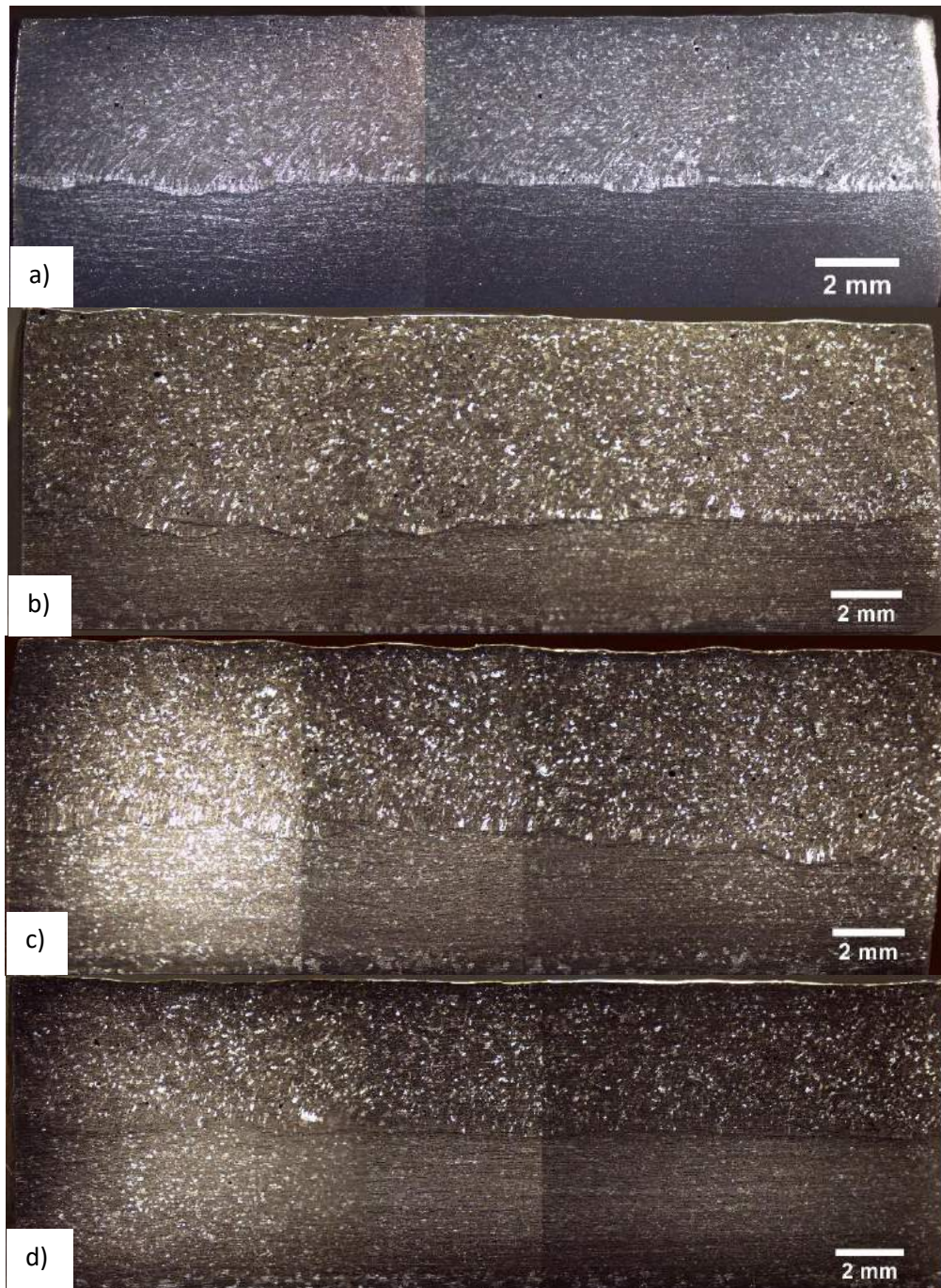


Fonte: Martins (2019).

Nas análises visual, líquido penetrante e macrográfica os cordões de solda depositados com baixa amplitude apresentaram menor incidência de defeitos por isso, apenas estes passaram por uma avaliação macrográfica na seção longitudinal, conforme mostra a Figura 45.

A análise da seção longitudinal do metal de solda mostra uma evidente presença de grãos colunares próximo à linha de fusão do cordão de solda GMAW-P, enquanto nos cordões com switchback os grãos colunares são suprimidos dando lugar à grãos predominantemente equiaxiais. Isto pode estar relacionado aos sucessivos movimentos de avanço e reversão, que tendem a alterar a direção do gradiente térmico e potencializar a quebra das dendritas durante o processo de solidificação da poça de fusão, ocasionando um refinamento estrutural.

Figura 45. Macrografia da seção longitudinal do metal de solda: (a) GMAW-P, (b) GMAW-P SB50.3 (c) GMAW-P SB75.3 e (d) GMAW-P SB90.3. Aumento 8X.

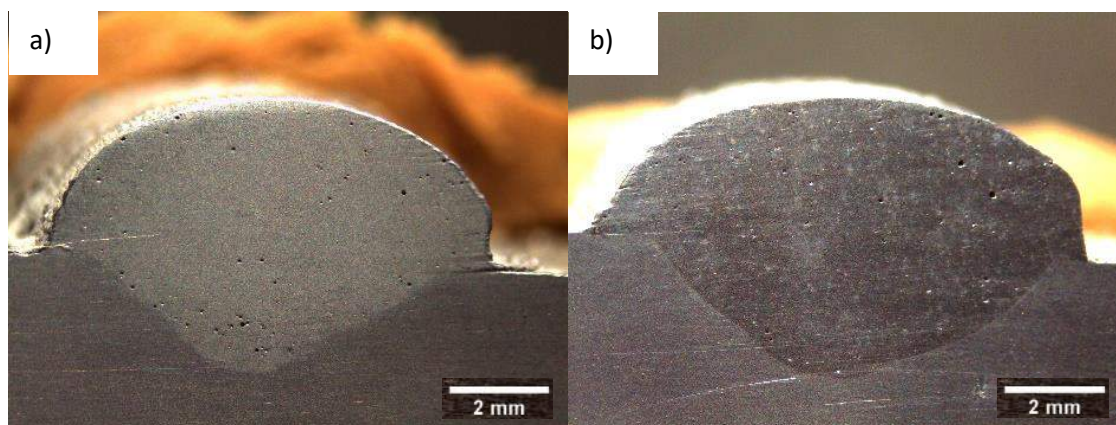


Fonte: Martins (2019).

5.3.3. Porosidade

As Figuras 46 e 47 mostram, respectivamente, a presença de porosidade nas soldas GMAW-P e GMAW-P com switchback.

Figura 46. Incidência de porosidade na seção transversal do cordão de solda GMAW-P. (a) seção A e (b) seção C. Aumento 10X.



Fonte: autoria própria.

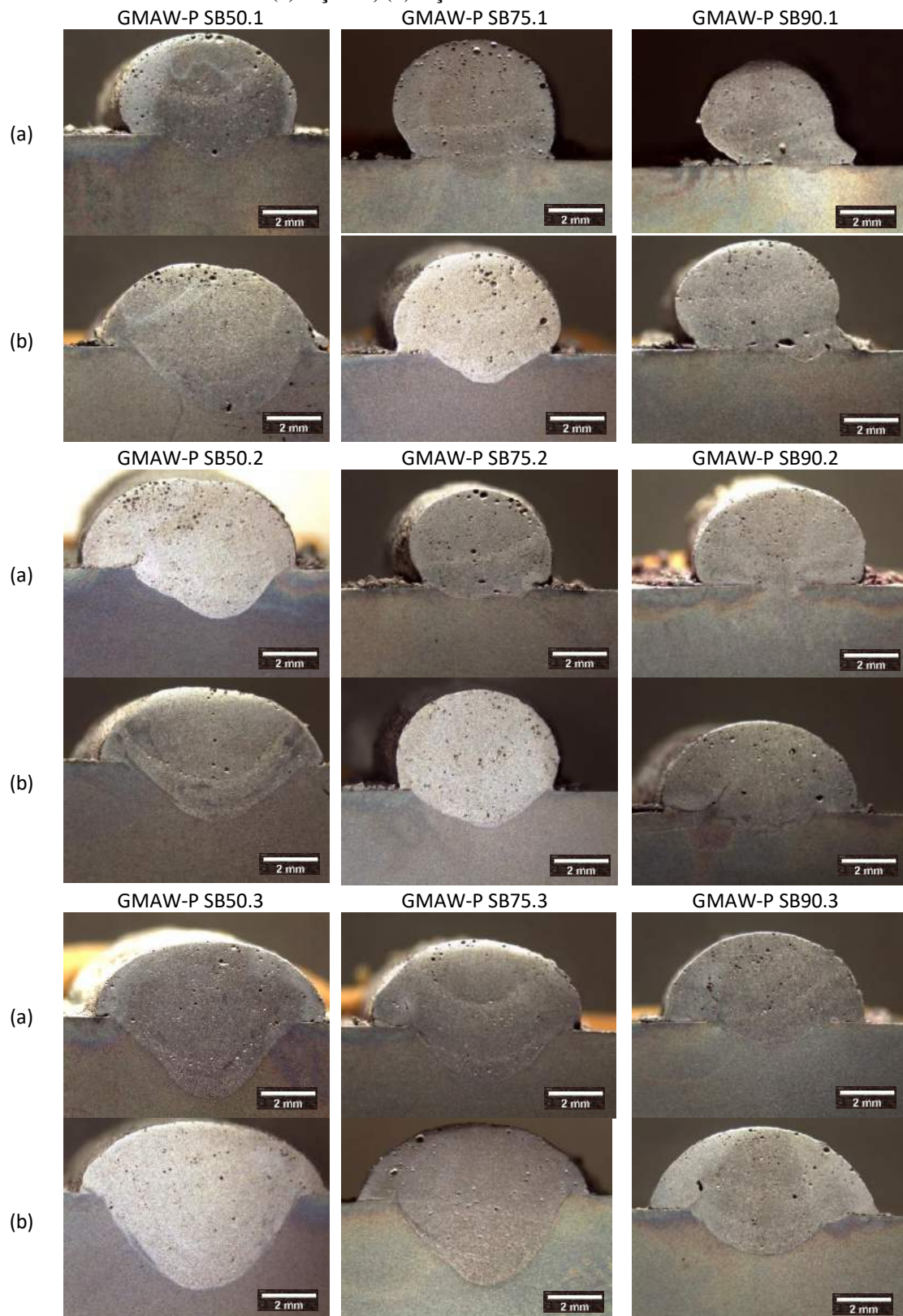
Observa-se que as soldas GMAW– P apresentaram uma menor quantidade de poros em relação as demais condições. Isto pode ser um indício de que os sucessivos movimentos de avanço e reversão com velocidades relativamente elevadas nas condições com switchback podem ter prejudicado a proteção gasosa, resultando em contaminação do metal de solda por gases atmosféricos.

Dentre as condições com switchback, a menor incidência de poros foi obtida nos cordões com baixa amplitude de tecimento, para R/A de 50% e 75%. Já para R/A de 90%, a variação nos comprimentos de avanço e reversão não afetou visivelmente a quantidade de poros do metal de solda. Dentre as condições de baixa amplitude do tecimento switchback, a porosidade da solda reduziu com a proporção R/A e, desta forma, as soldas depositadas na proporção de 50% apresentaram poros em menores quantidades e diâmetros.

A análise qualitativa de porosidade da seção transversal nos cordões de solda com switchback permite afirmar que as condições com baixa amplitude de tecimento tendem a apresentar menor quantidade de poros independentemente da relação R/A avaliada. Isto pode estar relacionado ao número de ciclos necessários para conclusão do cordão de solda ser maior nestas condições, conforme apresentado anteriormente na Figura 40, o que tende a elevar a temperatura da chapa, reduzir a taxa de resfriamento e facilitar a fuga de poros, além de ocorrer maior proximidade entre a fonte de calor e a poça de fusão,

aumentando sua temperatura, fluidez e agitação, aumentando a possibilidade de escape de gases.

Figura 47. Incidência de porosidade na seção transversal dos cordões de solda com switchback. (a) seção A; (b) seção C. Aumento 10X.



Fonte: autoria própria.

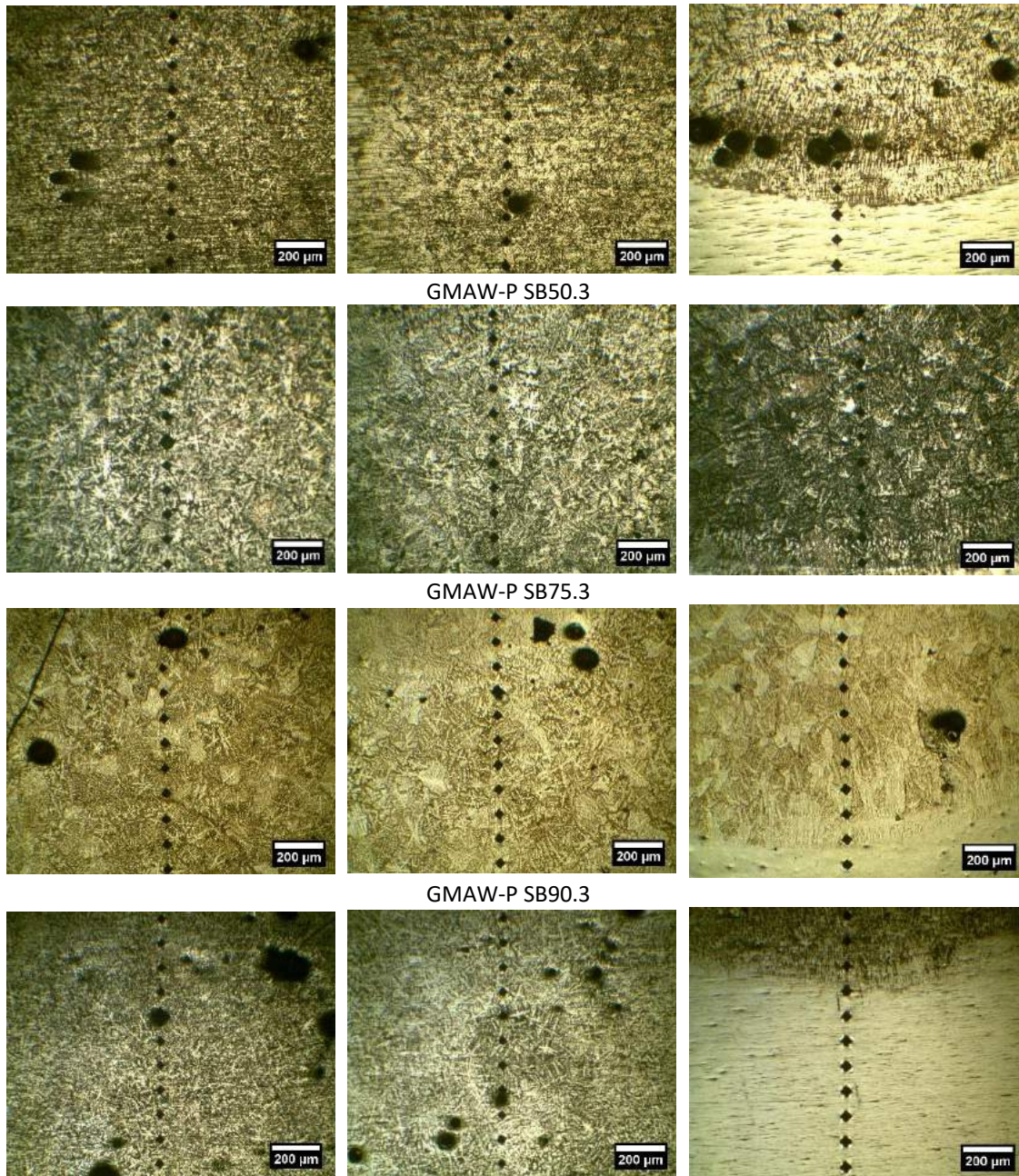
5.3.4. Microestrutura

Considerando a menor incidência de defeitos nas condições de baixa amplitude de tecimento, apenas estas foram submetidas à análise micrográfica.

As Figuras 48 e 49 mostram as micrografias das soldas depositadas nas condições GMAW-P, GMAW-P SB50.3, GMAW-P SB75.3 e GMAW-P SB90.3, obtidas das regiões superior e central do cordão, e da interface metal de solda/metal de base. De acordo com a composição química da liga, predominantemente Al5%Mg, tem-se uma estrutura basicamente constituída por uma matriz de alumínio (α), representada pelas regiões claras, além do intermetálico Al_3Mg_2 (β) nas regiões interdendríticas (áreas escuras).

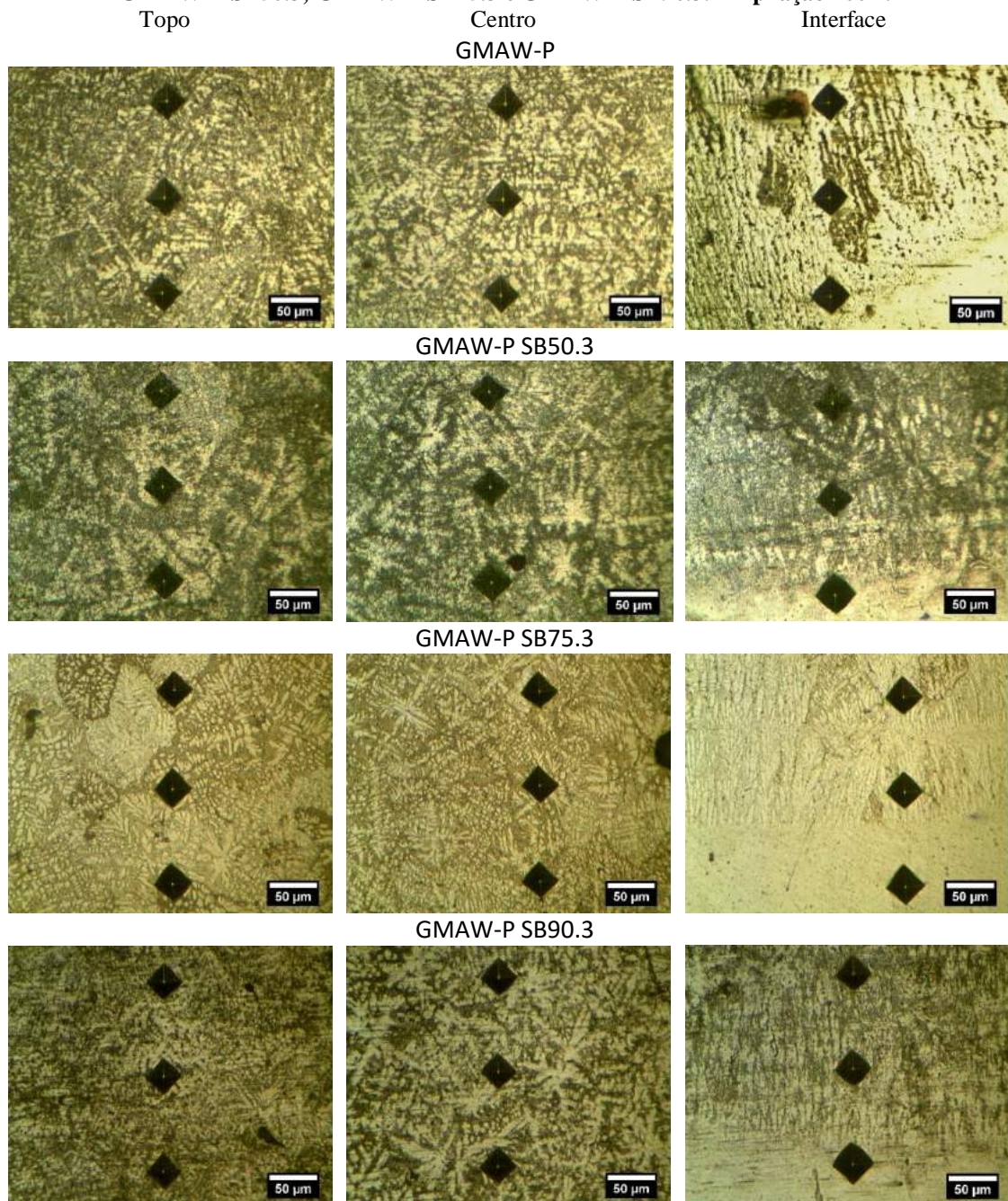
Na interface metal de base/metal de solda, nota-se uma morfologia de crescimento de grãos alongados similar aos crescimentos celular e colunar dendrítico. Nas regiões superior e central da seção transversal solda, não se observa uma orientação preferencial na morfologia de crescimento da estrutura de solidificação, o que configura um crescimento equiaxial dendrítico. Nas microestruturas com ampliação de 50x (Figura 48) nota-se que a estrutura presente na região superior do cordão GMAW-P SB90.3 apresenta-se ligeiramente mais refinada quando comparada à encontrada na região central. Tal efeito pode estar associado à uma maior velocidade de resfriamento nesta região.

Figura 48. Microestrutura e linha de indentação. Seção transversal C dos cordões de solda GMAW-P; GMAW-P SB50.3; GMAW-P SB75.3 e GMAW-P SB90.3. Ampliação 50X.



Fonte: Martins (2019).

Figura 49. Microestrutura e linha de indentação. Seção transversal C dos cordões GMAW-P; GMAW-P SB50.3; GMAW-P SB75.3 e GMAW-P SB90.3. Ampliação 200X.



Fonte: Martins (2019).

5.3.5. Microdureza

Nesta etapa foram avaliadas somente as condições com baixa amplitude de tecimento, devido à menor quantidade de defeitos apresentados. Estas condições foram GMAW-P, GMAW-P 50.3, GMAW-P 75.3 e GMAW-P 90.3. A Tabela 18 apresenta os valores médios de microdureza da linha de indentações feita no metal de solda para as condições avaliadas.

Tabela 18. Valores médios de microdureza para as seções analisadas das condições GMAW-P; GMAW-P SB50.3; GMAW-P SB75.3 e GMAW-P SB90.3.

| Condição | Metal de Solda (HV) |
|-----------------|----------------------------|
| GMAW-P | 63,9 |
| GMAW-P SB50.3 | 58,8 |
| GMAW-P SB75.3 | 64,7 |
| GMAW-P SB90.3 | 68,7 |

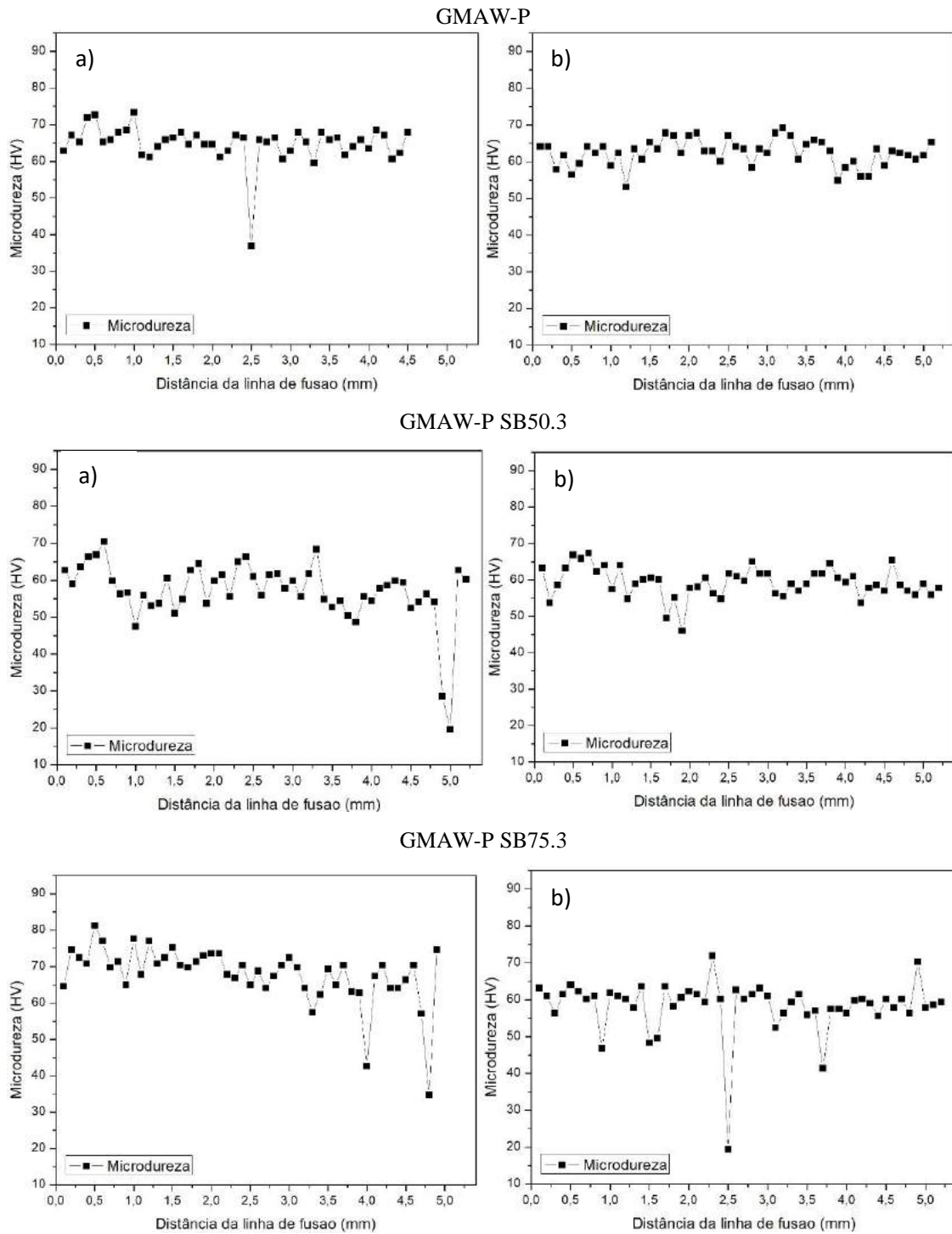
Fonte: autoria própria.

A Figura 50 apresenta o perfil gráfico de microdureza, obtido das diversas condições de soldagem desta etapa. Alguns valores de microdureza se apresentaram excessivamente baixos, isto ocorreu sempre que a indentação coincidia com um poro. Estes pontos não foram considerados para o cálculo da microdureza média. A microdureza média das condições GMAW-P e GMAW-P SB75.3 apresentaram valores próximos entre si. As condições GMAW-P SB90.3 e GMAW-P SB50.3 apresentaram as maior e menor microdurezas médias, respectivamente.

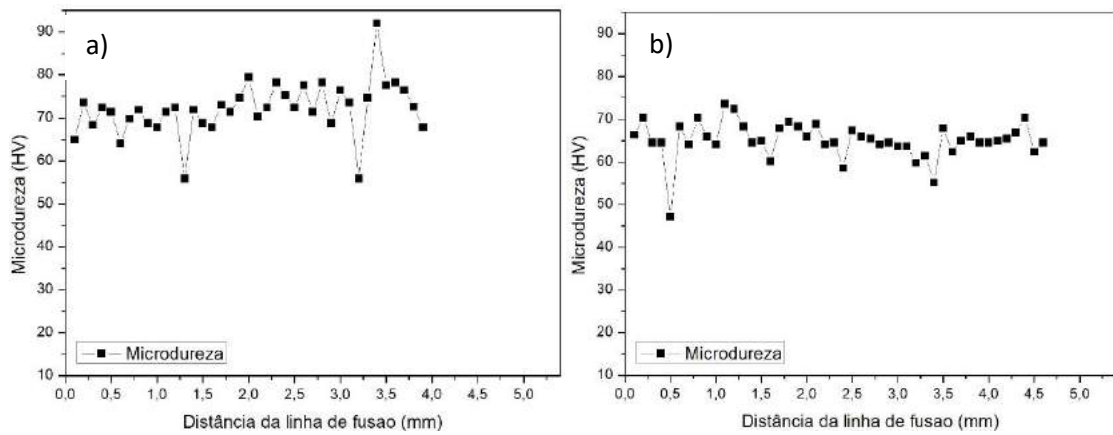
Os valores de microdureza média obtidos nas condições GMAW-P SB90.3 e GMAW-P SB50.3 podem estar relacionados ao número de camadas ou de passagens do arco elétrico por um mesmo trecho durante a soldagem switchback. Farias (2019) afirma que, com uma relação R/A de 50%, o arco elétrico passa 3 vezes por um mesmo trecho ao longo do comprimento do cordão de solda, totalizando três finas camadas depositadas para completar o cordão, durante a operação da soldagem, com 75% passa 9 vezes, totalizando nove finas camadas depositadas para completar o cordão, e com 90% passa 19 vezes, totalizando dezenove finas camadas depositadas para completar o cordão. As sucessivas passagens do arco por um mesmo trecho durante a operação da soldagem implica na deposição do material num mesmo número de finas camadas, uma após a outra. Este processo pode acarretar maior agitação da poça de fusão bem como a quebra de dentritas, possibilitando o surgimento de grãos equiaxiais bem como o refinamento de grãos, culminando em maiores valores de dureza para o metal de solda, principalmente para a condição com R/A de 90%.

Outra consideração é que, conforme observado nas macrografias dos cordões de solda (Figura 42), a condição GMAW-P SB50.3 apresentou uma penetração considerável, resultando em maior diluição com possibilidade de redução da dureza do metal de solda devido à redução da concentração de magnésio da liga. O inverso pode ter ocorrido para a condição GMAW-P SB 90.3.

Figura 50. Perfil de microdureza. Soldas nas condições GMAW-P; GMAW-P SB50.3; GMAW-P SB75.3 e GMAW-P SB 90.3: (a) Seção A; (b) Seção C.



GMAW-P SB90.3



Fonte: Martins (2019).

5.3.6. Aspecto geométrico das soldas

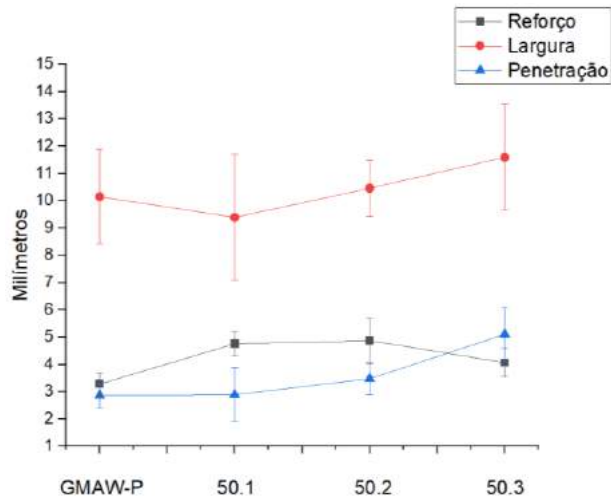
A Tabela 19 apresenta os valores geométricos médios obtidos a partir da avaliação de três seções transversais (A, C e D) de cada condição de soldagem. Estes dados estão representados graficamente nas Figuras 51 a 53.

Tabela 19. Perfil geométrico. Valores médios das condições de soldagem.

| Condição | Reforço (mm) | Largura (mm) | Penetração (mm) | Diluição (%) |
|----------------|--------------|--------------|-----------------|--------------|
| GMAW-P | 3,3 | 10,2 | 2,9 | 35 |
| GMAW- P SB50.1 | 4,8 | 9,4 | 2,9 | 27 |
| GMAW- P SB50.2 | 4,9 | 10,5 | 3,5 | 30 |
| GMAW- P SB50.3 | 4,0 | 11,6 | 5,1 | 45 |
| GMAW- P SB75.1 | 5,3 | 6,6 | 1,5 | 12 |
| GMAW- P SB75.2 | 5,3 | 7,1 | 1,7 | 14 |
| GMAW- P SB75.3 | 5,0 | 11,0 | 4,4 | 37 |
| GMAW- P SB90.1 | 5,8 | 3,8 | 0,5 | 2 |
| GMAW- P SB90.2 | 5,8 | 6,2 | 1,2 | 8 |
| GMAW- P SB90.3 | 4,6 | 8,2 | 2,3 | 21 |

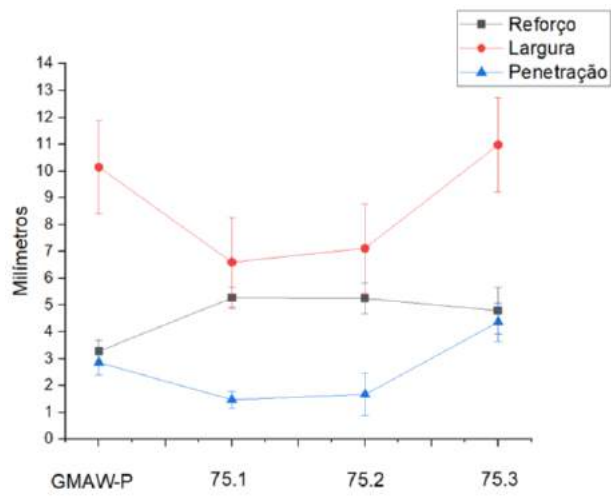
Fonte: Martins (2019).

Figura 51. Perfil geométrico das soldas GMAW-P; GMAW-P SB50.1; GMAW-P SB50.2 e GMAW-P SB50.3.



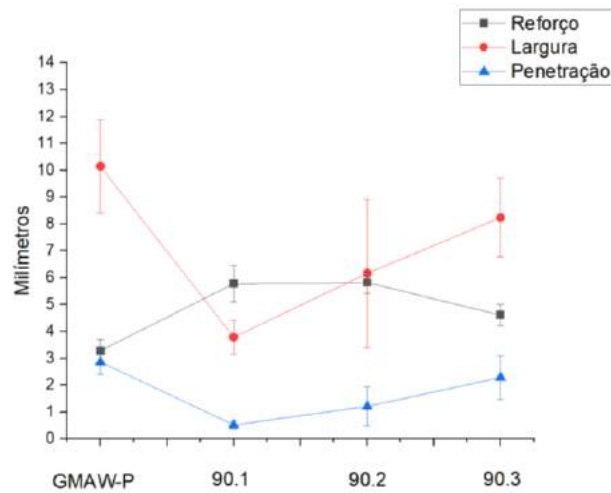
Fonte: autoria própria.

Figura 52. Perfil geométrico das soldas GMAW-P; GMAW-P SB75.1; GMAW-P SB75.2 e GMAW-P SB75.3.



Fonte: autoria própria.

Figura 53. Perfil geométrico das soldas GMAW-P; GMAW-P SB90.1; GMAW-P SB90.2 e GMAW-P SB90.3.



Fonte: autoria própria.

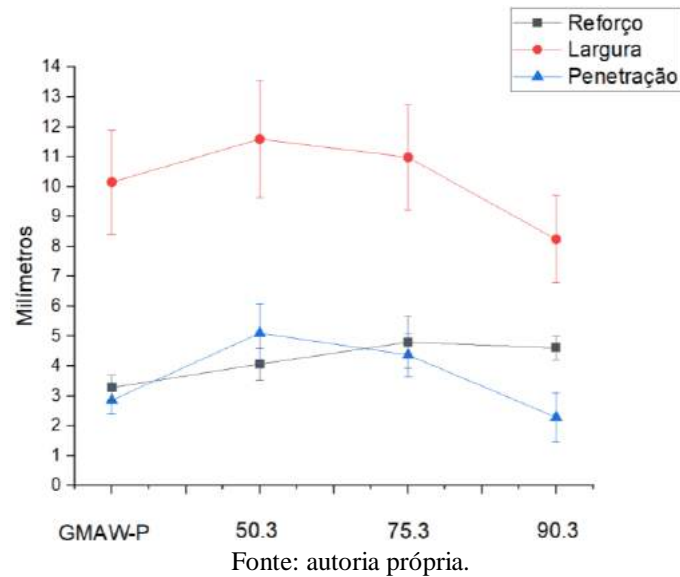
Os dados mostram que para uma mesma relação R/A, a redução da amplitude de tecimento provocou um aumento nos valores de penetração e largura com ligeira redução nos valores de reforço. Entretanto, os valores de reforço nas condições com switchback foram sempre superiores àsquelas sem switchback, condição interessante em aplicações como a manufatura aditiva.

Observa-se também que as soldas com relação R/A de 90% apresentaram penetração inferior àsquelas sem switchback, indicando uma maior redução do aporte térmico do processo, possivelmente devido à deposição em um maior número de camadas do metal de solda (19 camadas para R/A = 90%), reduzindo a incidência direta do arco elétrico sobre o metal de base. As condições 75.1 e 75.2 também apresentaram valores de penetração menores que os da condição GMAW-P, enquanto as demais condições apresentaram valores de penetração iguais ou superiores aos da condição GMAW-P.

A Figura 54 apresenta os dados geométricos das soldas com menor incidência de defeitos (condições de baixa amplitude). A análise do gráfico mostra que, mantendo baixos valores de amplitude, um aumento na relação R/A provoca uma queda nos valores de largura e penetração. A condição com proporção de 90% apresentou valores superiores de reforço, algo favorável para aplicações em manufatura aditiva, pois possibilita a elevação de paredes com menor número de passes, entretanto, conforme visto anteriormente, estas condições apresentaram alta incidência de defeitos como falta de fusão, poros e trincas.

De acordo com a Tabela 19, os valores de diluição acompanharam a tendência dos valores de penetração, ou seja, ocorreu um aumento nestes valores com a redução da amplitude de tecimento (para uma mesma relação R/A). Considerando apenas as condições de baixa amplitude, a relação R/A de 90% apresentou menor valor de diluição.

Figura 54. Perfil geométrico das soldas GMAW-P; GMAW-P SB50.3; GMAW-P SB75.3 e GMAW-P SB90.3.



5.4. SOLDAGEM COM ARAME FRIO DE ALUMÍNIO

5.4.1. Aspecto superficial

A Figura 55 mostra o aspecto superficial dos cordões de solda bem como os resultados dos ensaios de líquido penetrante. De um modo geral, os cordões de solda apresentaram bom aspecto superficial, entretanto, o ensaio de líquido penetrante evidencia que os cordões com velocidade de alimentação de arame frio de 4 a 6 m/min. apresentaram maior incidência de porosidade superficial. Além disso, fica evidente que com maior alimentação de arame frio o cordão de solda tornou-se mais robusto.

Figura 55. Aspecto superficial e LP das soldas GMAW-P e GMAW-P AF1 a AF6

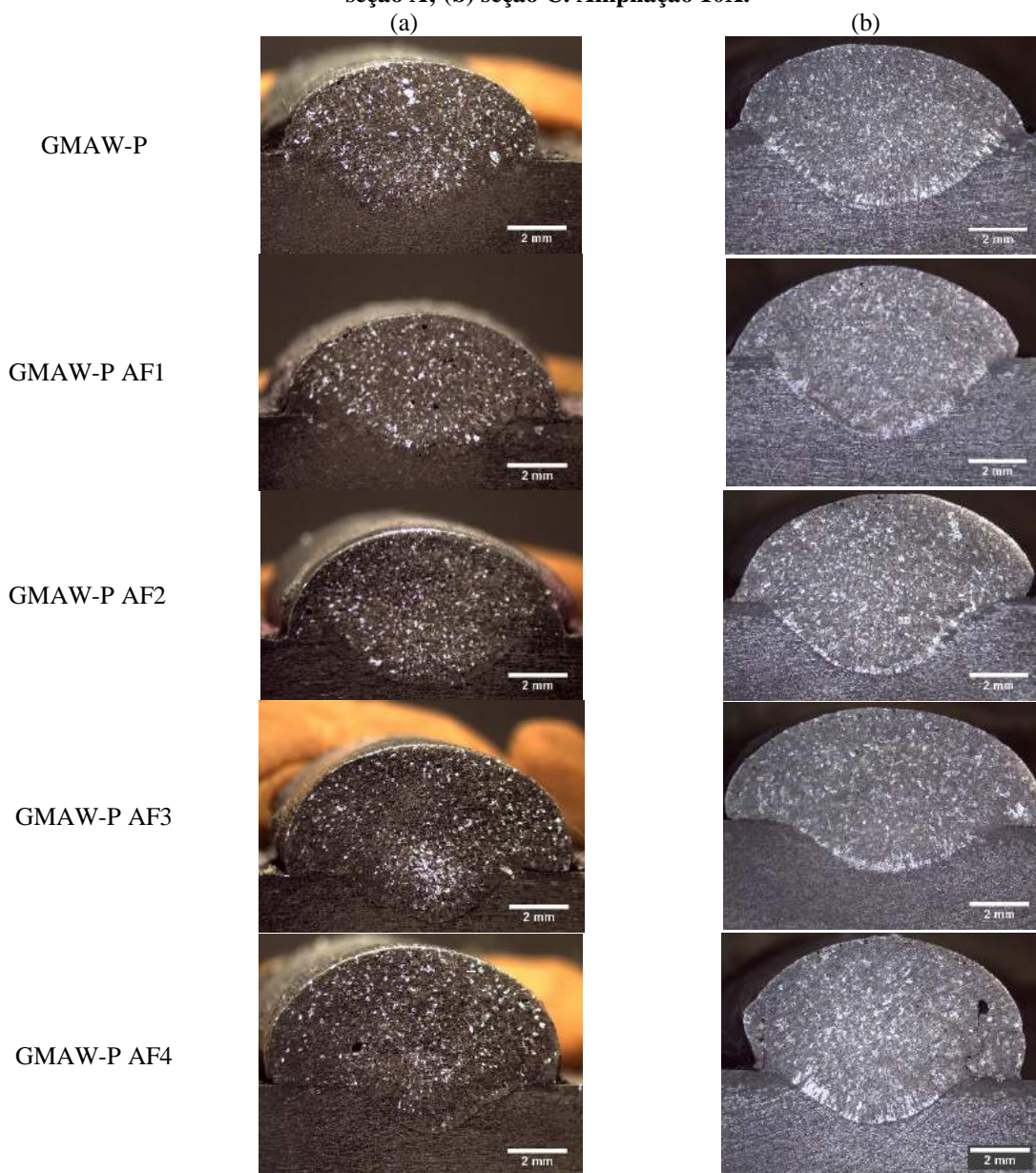


Fonte: Monteiro (2019).

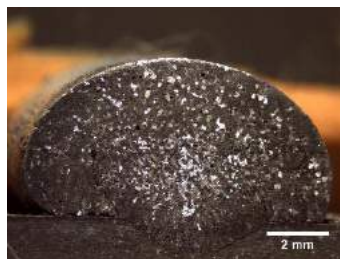
5.4.2. Macroestrutura

A Figura 56 apresenta a seção transversal de soldas GMAW-P depositadas com adição de arame frio, nas diversas condições de soldagem estabelecidas neste trabalho. Observa-se a ocorrência de falta de fusão nas laterais dos cordões principalmente nas amostras GMAW-P AF3a, GMAW-P AF4a, GMAW-P AF5a, GMAW-P AF6a e GMAW-P AF6c. Isto ocorreu devido a adição do arame frio na poça de fusão, aumentar a taxa de resfriamento e acelerar o processo de solidificação de modo a reduzir o poder de escavação da poça de fusão no metal de base.

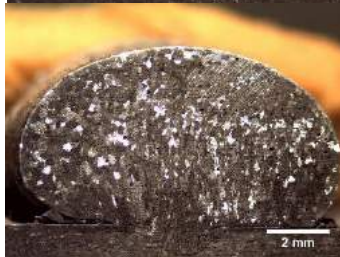
Figura 56. Macrografia da seção transversal das soldas GMAW-P e GMAW-P AF1 a AF6. (a) seção A; (b) seção C. Ampliação 10X.



GMAW-P AF5



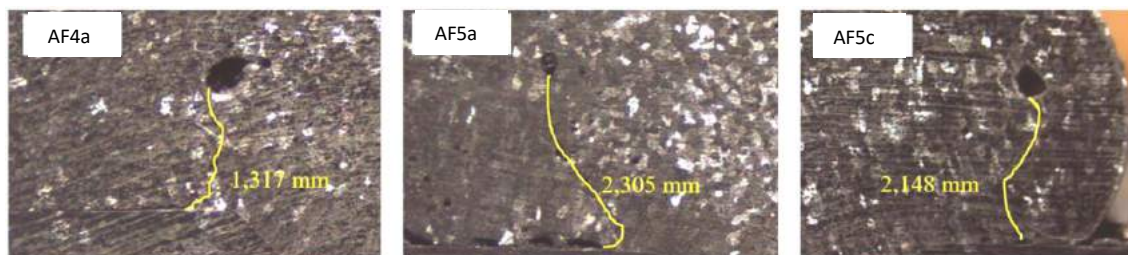
GMAW-P AF6



Fonte: Monteiro (2019).

As amostras da seção transversal das soldas GMAW-P AF4a, GMAW-P AF5a e AF5c e GMAW-P AF6c apresentaram trincas (Figura 57). Nas três amostras o comportamento da trinca se mostrou semelhante, iniciando em uma porosidade e propagando até atingir uma região de falta de fusão indicando que, neste caso, o poro poderia ser um concentrador de tensão, e ter facilitado o surgimento da trinca.

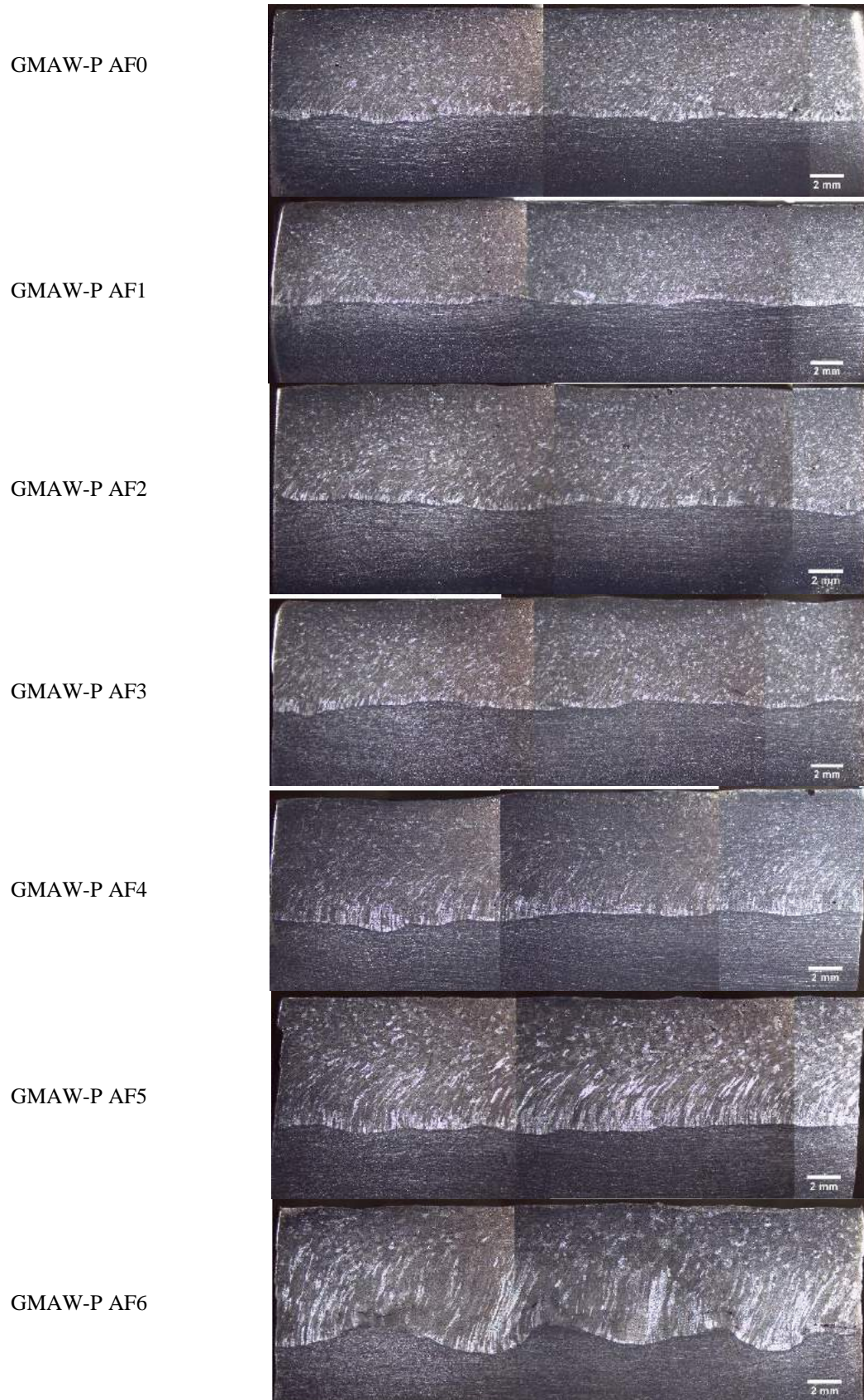
Figura 57. Trincas nas seções transversais AF4a, AF5a e AF5c.



Fonte: Monteiro (2019).

A Figura 58 mostra a seção longitudinal dos cordões de solda. Observa-se que até 3 m/min. de velocidade de alimentação do arame frio, a região de grãos colunares diminuiu sensivelmente, visto que, com o aumento da taxa de resfriamento existe uma maior tendência ao surgimento de grãos equiaxiais dendríticos, além de tornar a estrutura mais refinada. Entretanto, tal efeito não se repete para velocidades de alimentação de arame frio acima de 50% da velocidade de alimentação do arame eletrodo (GMAW-P AF4, AF5 e AF6). Nestas condições, ocorre um aparente crescimento dos grãos colunares, especialmente na condição GMAW-P AF6, podendo estar relacionado ao sentido da extração de calor devido ao acréscimo de massa pela adição de arame frio, que pode ter favorecido o crescimento excessivo dos grãos colunares.

Figura 58. Macrografia da seção longitudinal. Soldas GMAW-P com adição de arame frio. Ampliação 8X.



Fonte: Monteiro (2019).

O aumento progressivo na alimentação de arame frio também influenciou o surgimento de irregularidades na penetração do cordão de solda, como pode ser observado na seção longitudinal dos cordões GMAW-P AF4 e, principalmente, no cordão GMAW-P AF6. Este comportamento pode estar relacionado às flutuações da temperatura da poça de fusão durante o processo de soldagem devido à alimentação do arame não energizado.

As condições GMAW-P AF4, GMAW-P AF5 e GMAW-P AF6 foram consideradas inadequadas para utilização em manufatura aditiva devido às irregularidades observadas no metal de solda. Dentre as descontinuidades destacam-se a falta de fusão, trincas e porosidade. Em decorrência destes defeitos, estas condições foram descartadas também para as etapas de análise micrográfica e de microdureza.

5.4.3. Porosidade

A Figura 59 apresenta as porosidades no metal de solda. A análise qualitativa das seções transversais permite afirmar que, de um modo geral, as soldas realizadas com adição de arame frio apresentaram poros dispersos e em menor quantidade em comparação às soldas realizadas com switchback, isto pode ter sido provocado devido à adição de arame frio acelerar o processo de solidificação, reduzindo o tempo disponível para nucleação de poros, de acordo com a relação apresentada na Figura 2.

Não foram observadas variações visíveis na quantidade, localização ou geometria dos poros com o aumento da alimentação de arame frio, porém, as condições GMAW-P AF4 e GMAW-P AF5 apresentaram poros associados à trincas que provavelmente foram favorecidas pela falta de fusão nas laterais dos cordões destas condições.

Figura 59. Incidência de porosidade na seção transversal dos cordões de solda com adição de arame frio. (a) Seção A; (b) Seção C. Aumento 10X.



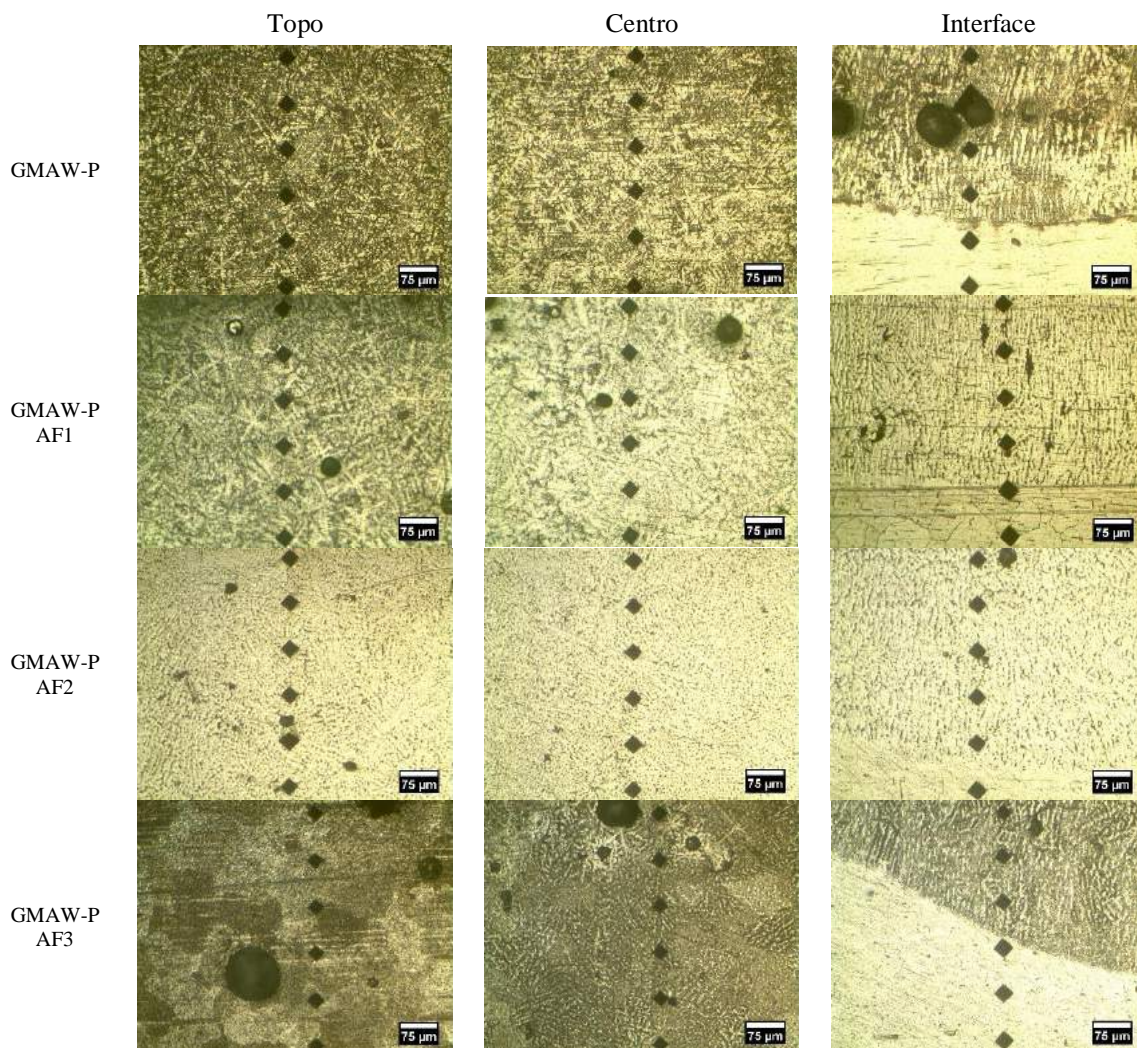
Fonte: Monteiro (2019).

5.4.4. Microestrutura

Considerando a menor incidência de defeitos nas soldas com até 3 m/min. de alimentação de arame frio, à análise microestrutural limitou-se à estas condições.

A Figura 60 mostra as micrografias das soldas GMAW-P, GMAW-P AF1c, GMAW-P AF2a e GMAW-P AF3a, obtidas da região próxima à superfície do cordão de solda, no centro e na interface. Observa-se pouca variação na microestrutura entre as condições de soldagem avaliadas, a qual consiste em uma matriz de alumínio (área clara) com presença de intermetálico Al_3Mg_2 (β) nas regiões interdendríticas (áreas escuras). Nota-se a presença de grãos equiaxiais nas regiões central e topo dos cordões, e a presença de grãos colunares partindo da interface.

Figura 60. Microestrutura e linha de indentação. Soldas GMAW-P, GMAW-P AF1, GMAW-P AF2 e GMAW-P AF3. Ampliação 100X.



Fonte: Monteiro (2019)

5.4.5 Ensaio de microdureza

Considerando a menor incidência de defeitos para as condições GMAW-P, AF1, AF2 e AF3, apenas estas foram submetidas à avaliação de microdureza.

A Tabela 20 apresenta os valores médios de microdureza, desprezadas as indentações realizadas sobre poros. Nota-se que o aumento da velocidade de alimentação de arame frio tendeu a aumentar a microdureza média, podendo estar relacionada a uma maior taxa de resfriamento e, portanto, maior refinamento microestrutural no metal de solda.

Conforme observado anteriormente nas macrografias das seções longitudinais (Figura 58), a adição de arame frio até 3 m/min. pode ter reduzido o crescimento colunar, o que também pode ter contribuído para o maior valor médio de microdureza para a condição com 3 m/min de alimentação de arame frio.

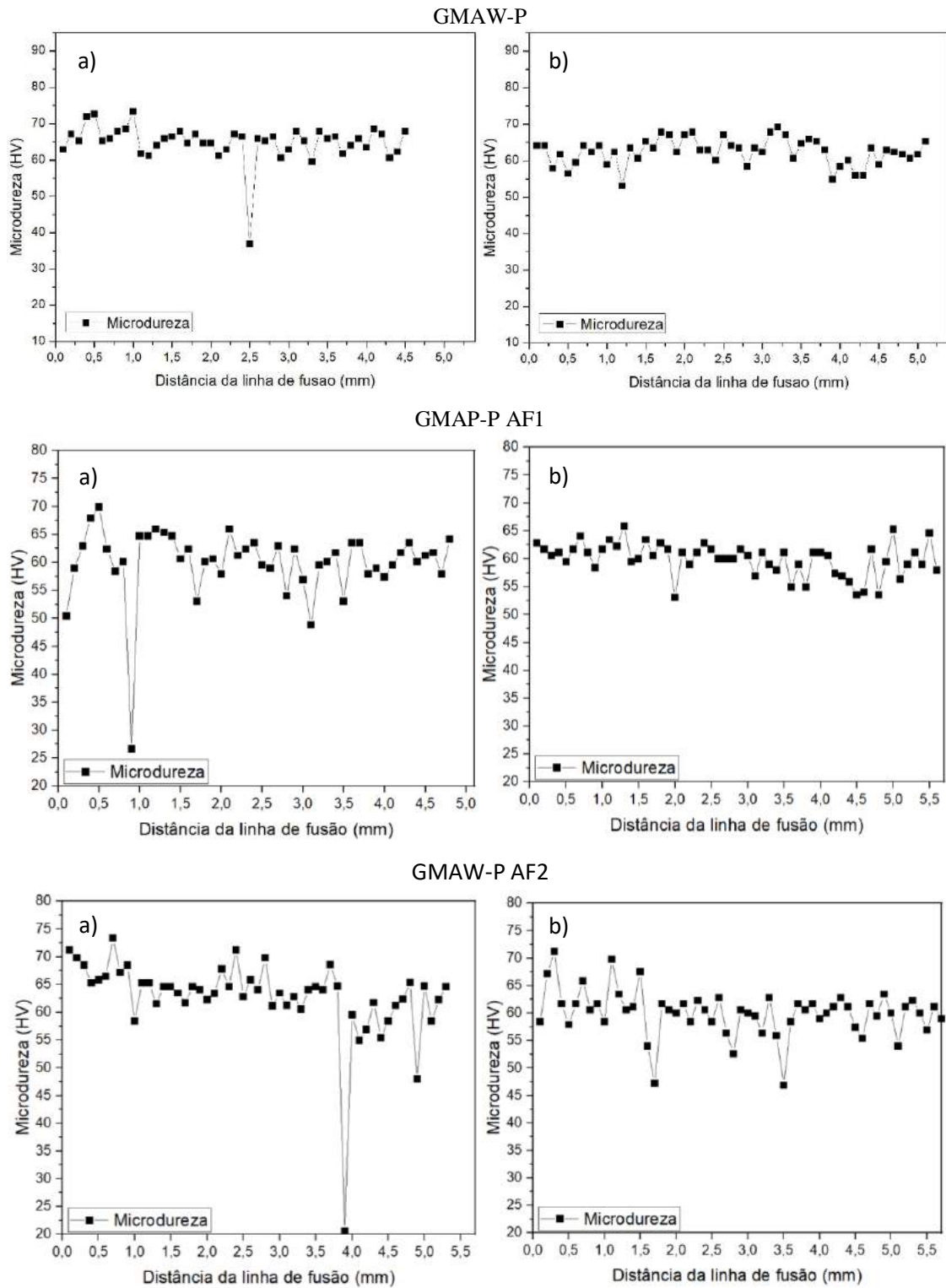
Tabela 20. Valores médios de microdureza para as seções analisadas das condições GMAW-P, GMAW-P AF1, GMAW-P AF2 e GMAW-P AF3.

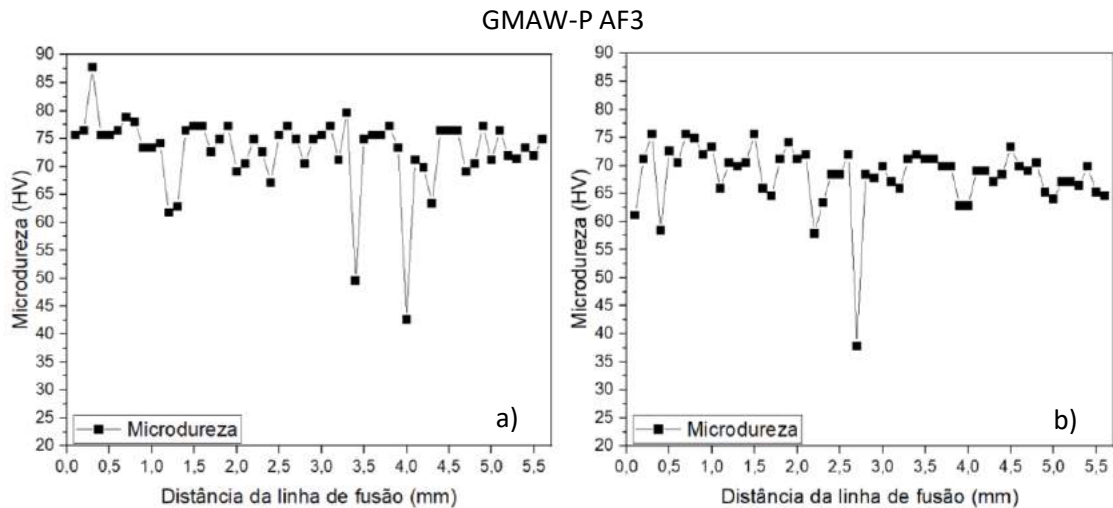
| Condição | Vaf (m/min) | Metal de Solda (HV) |
|------------|-------------|---------------------|
| GMAW-P | 0 | 63,9 |
| GMAW-P AF1 | 1 | 60,5 |
| GMAW-P AF2 | 2 | 62,0 |
| GMAW-P AF3 | 3 | 71,1 |

Fonte: Monteiro (2019).

A Figura 61 mostra os perfis de microdureza para as cordões de solda com 0 a 3 m/min. de alimentação de arame frio. De um modo geral, houve pouca variação nos valores de microdureza ao longo dos cordões de solda, com exceção de alguns pontos com dureza excessivamente baixa, os quais correspondem à indentações sobre poros e a microdureza ligeiramente superior nas amostras AF3.

Figura 61. Perfil de microdureza. Soldas GMAW-P, GMAW-P AF1, GMAW-P AF2 e GMAW-P AF3: (a) Seção A; (b) Seção C.





Fonte: autoria própria.

5.4.6. Análise geométrica

A Tabela 21 apresenta o resultado das características geométricas dos cordões de solda GMAW-P com adição de arame frio, e a Figura 62 representa graficamente este resultado. Os valores obtidos de largura podem, em princípio, parecer contraditórios em relação ao esperado, haja vista, que a largura se reduz com o aumento na alimentação de arame frio, entretanto, deve-se mencionar que quanto maior a alimentação de arame frio, maior foi a incidência de falta de fusão na seção transversal da interface solda/metal de base e, que este comprimento linear da falta de fusão não foi contabilizado na medição da largura da solda.

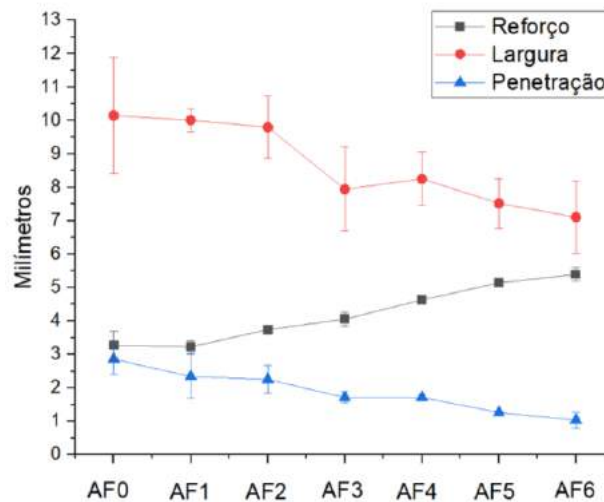
O gráfico da Figura 62 mostra ainda uma tendência de redução da penetração e o aumento do reforço com o aumento progressivo na adição de arame frio. O aumento do reforço é um resultado particularmente interessante para manufatura aditiva, haja vista possibilitar a edificação de paredes com menor número de passes em sobreposição. No entanto, esta característica vantajosa apresentada como resultado nesta pesquisa, vem acompanhada da redução na penetração e maior incidência da falta de fusão, que deve ser controlada na deposição de paredes pela MA, visto que podem atuar como concentrador de tensão.

Tabela 21. Valor médio das características geométricas. Soldas GMAW-P com arame frio.

| Condição | Vaf (m/min) | Reforço (mm) | Largura (mm) | Penetração (mm) | Diluição (%) |
|------------|-------------|--------------|--------------|-----------------|--------------|
| GMAW-P | 0 | 3,3 | 10,2 | 2,9 | 35 |
| GMAW-P AF1 | 1 | 3,2 | 10,0 | 2,3 | 30,7 |
| GMAW-P AF2 | 2 | 3,7 | 9,8 | 2,2 | 27,6 |
| GMAW-P AF3 | 3 | 4,0 | 8,0 | 1,7 | 17,6 |
| GMAW-P AF4 | 4 | 4,6 | 8,3 | 1,7 | 15,4 |
| GMAW-P AF5 | 5 | 5,1 | 7,5 | 1,3 | 9,8 |
| GMAW-P AF6 | 6 | 5,4 | 7,1 | 1,0 | 6,3 |

Fonte: Monteiro (2019).

Figura 62. Perfil dos valores médios do aspecto geométrico das solda GMWA – P com arame frio.



Fonte: autoria própria.

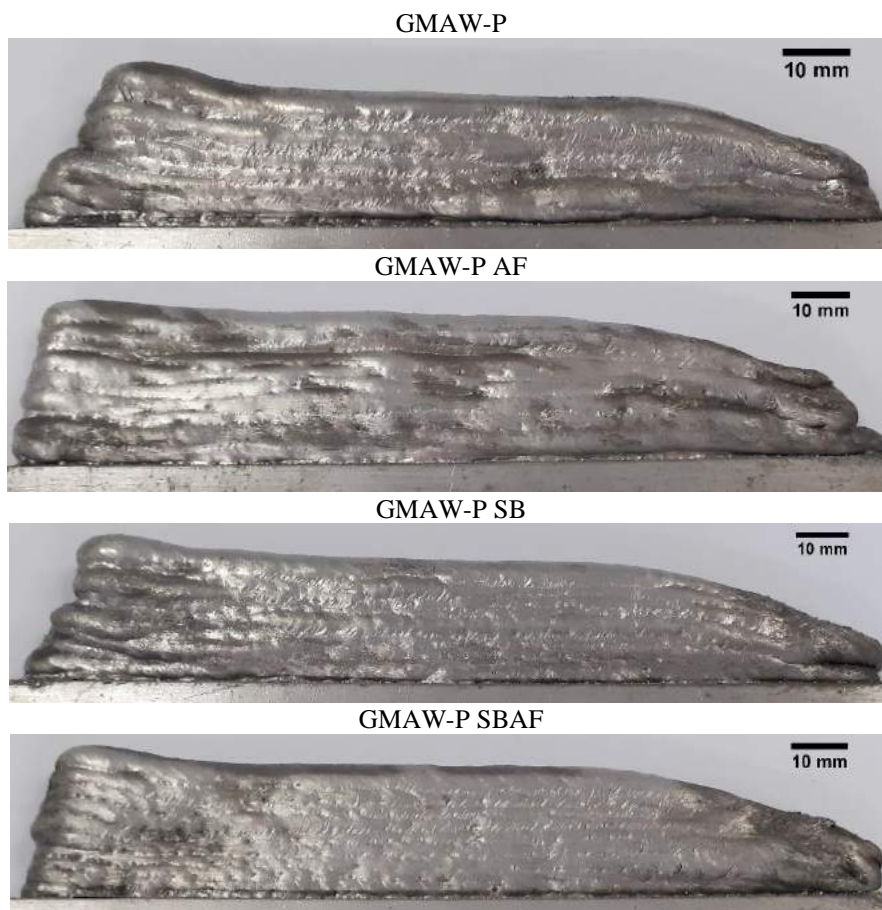
5.5. MANUFATURA ADITIVA DO ALUMÍNIO

5.5.1 Aspecto superficial

A Figura 63 mostra o aspecto superficial das paredes depositadas nas condições GMAW-P, GMAW-P AF, GMAW-P SB e GMAW SBAF. Todos os parâmetros avaliados apresentaram uma altura maior na região de abertura do arco, ou seja, no início da deposição da parede, e menor na região de extinção do arco (degraus) típicos de processos de MA. Este fenômeno também foi observado por outros autores (YEHOROV et al, 2019 e ZHANG et al, 2003), sendo atribuído à elevada dissipação de calor no início da parede, que provoca baixa penetração e elevado reforço, enquanto no final da parede, devido à elevada temperatura do substrato, a penetração passa a ser maior, assim como a largura. Além disso, a súbita extinção do arco elétrico no final da parede provoca uma deposição insuficiente de material.

Diferentes estratégias tem sido propostas para amenizar este problema. Zhang et al (2003), propuseram o controle dos parâmetros de soldagem no início e final da deposição de cada cordão da parede, de forma a aumentar a velocidade de soldagem e a corrente no início da deposição, e a reduzir estes mesmos parâmetros ao final da deposição, entretanto, os autores afirmam que esta estratégia consome tempo e deve ser evitada. Graf et al (2018) propuseram a alternância no sentido da deposição dos cordões de solda (soldagem contínua) como método de homogeneizar a geometria da parede (Figura 64).

Figura 63. Aspecto superficial da parede de alumínio nas condições GMAW-P, GMAW-P AF, GMAW-P SB e GMAW-P SBAF.



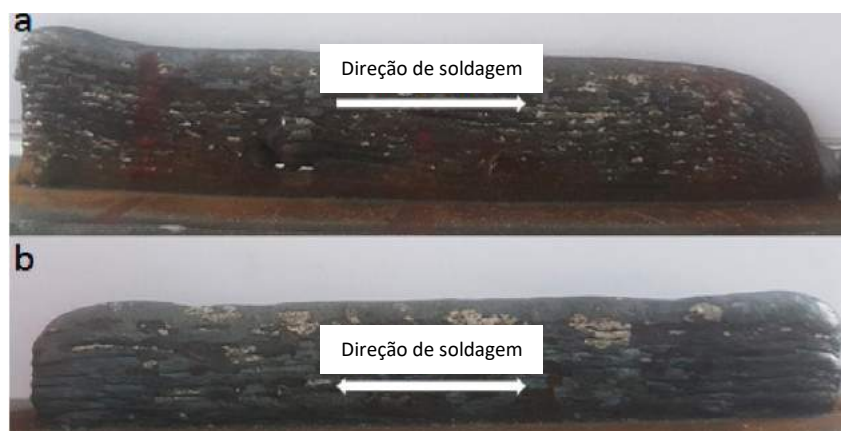
Fonte: autoria própria.

As paredes da Figura 63 não apresentaram defeitos como ondulações no topo ou indícios de colapso da poça de fusão indicando que, para os parâmetros de soldagem utilizados, a velocidade de soldagem empregada foi adequada evitando o surgimento do fenômeno “humping” (altas velocidades de soldagem) e o escoamento da poça de fusão (baixas velocidades de soldagem).

Quanto ao aspecto lateral das paredes, as condições GMAW-P e GMAW-P AF apresentaram resultados semelhantes, com ondulações mais perceptíveis. Por outro lado,

as condições GMAW-P SB e GMAW-P SBAF apresentaram os melhores acabamentos, com ondulações mais suaves, fator que pode indicar menor desperdício de material em operações de acabamento (usinagem).

Figura 64. Perfil geométrico da parede de solda com diferentes metodologias de deposição dos passes de soldagem. A) descontínuo. B) contínuo.



Fonte: Graf et al (2018).

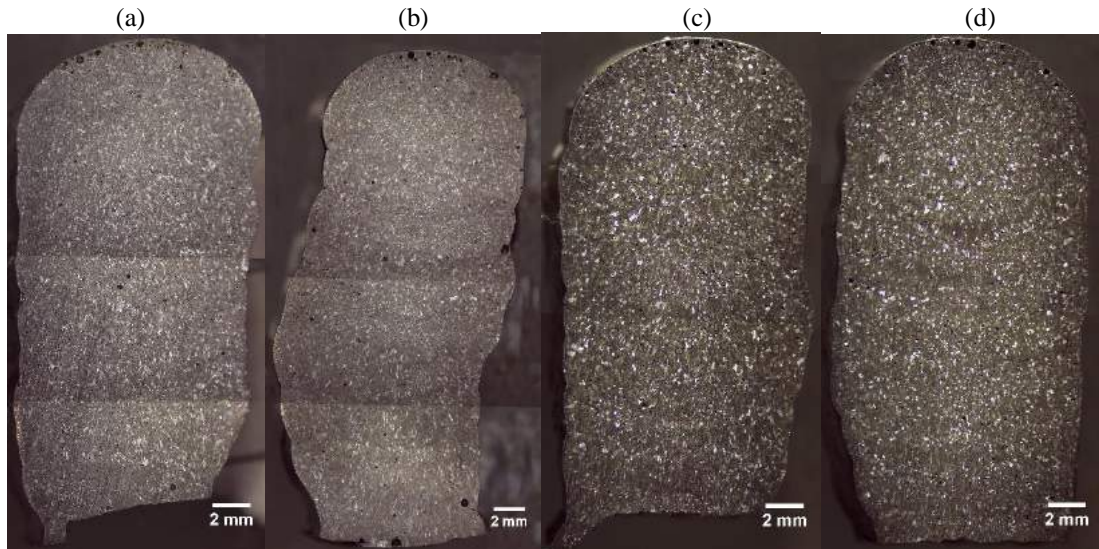
5.5.2. Macroestrutura

A Figura 65 apresenta as macrografias da seção transversal das paredes. Nota-se que a condição GMAW-P com adição de arame frio apresentou um maior desvio geométrico, podendo estar relacionado à falhas operacionais durante a sequência na sobreposição de passes.

A estrutura dos grãos para todas as condições aqui estudadas se apresenta equiaxial refinado, não havendo região com alguma evidência de crescimento colunar. Visualmente, não é possível identificar variações consideráveis no tamanho dos grãos ao longo da parede. Por fim, a análise macroestrutural não revelou defeitos entre os passes de solda como falta de fusão e trincas.

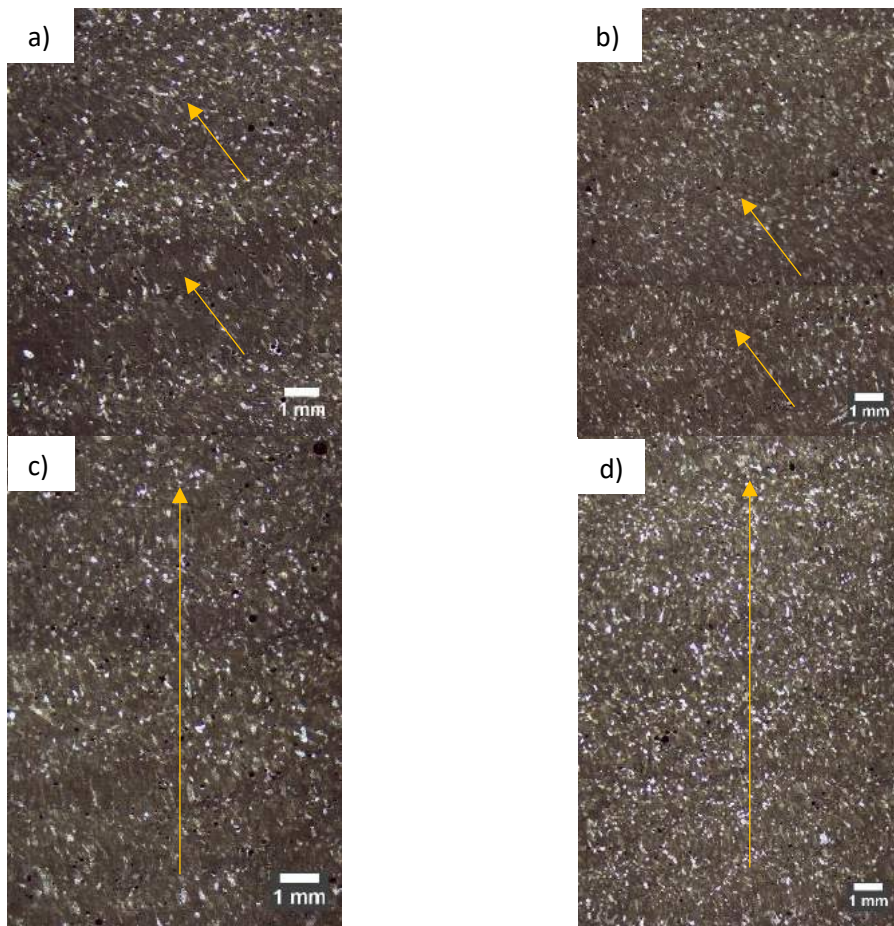
A Figura 66 apresenta as macrografias da seção longitudinal da parede. Observa-se que para as condições GMAW-P e GMAW-P AF, os grãos apresentaram uma orientação preferencial, seguindo o sentido de deposição das camadas, por outro lado, este efeito não é evidenciado para as condições GMAW-P SB e GMAW-P SBAF, podendo estar associado à constante variação do gradiente de temperatura devido aos movimentos de avanço e reversão do processo. Isto indica que o uso da técnica switchback pode contribuir para redução da anisotropia da microestrutura e das propriedades mecânicas da parede. Este resultado está de acordo com o apresentado por Yehorov (2018) na Figura 10.

Figura 65. Macrografias da seção transversal da parede nas condições: a) GMAW-P; b) GMAW-P AF; c) GMAW-P SB d) GMAW SBAF. Ampliação 8x.



Fonte: autoria própria.

Figura 66. Macrografias da seção longitudinal da parede nas condições: a) GMAW-P; b) GMAW-P AF; c) GMAW-P SB d) GMAW SBAF. Ampliação 8x.



Fonte: autoria própria.

5.5.3. Microestrutura

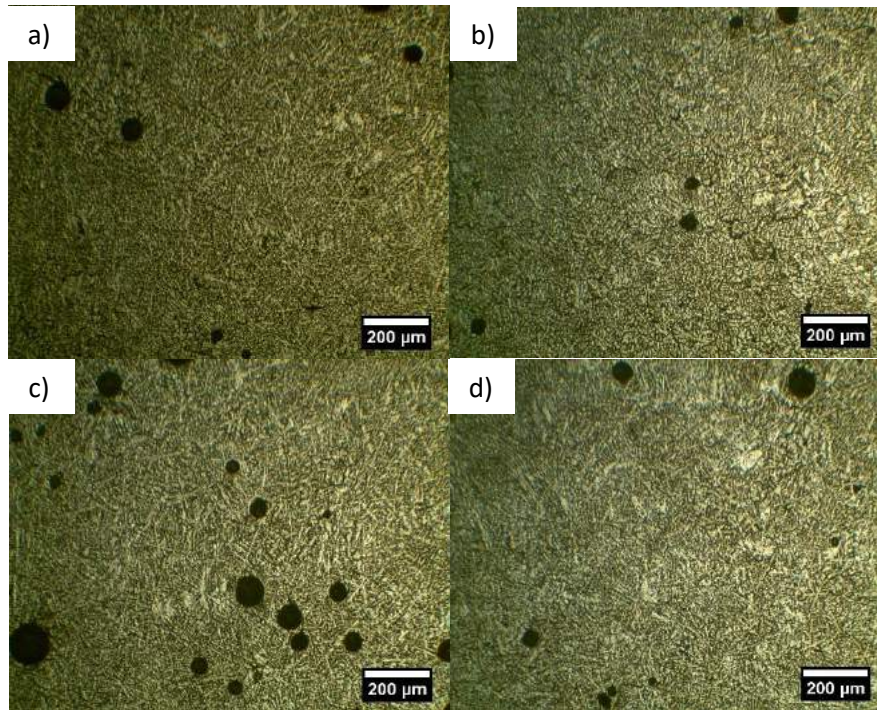
O comportamento microestrutural da parede se apresentou semelhante para as diferentes condições avaliadas nesta pesquisa. Poucas variações foram notadas ao longo das paredes. O 10º (último) passe apresentou estrutura predominantemente equiaxial (Figura 67), com grãos colunares refinados partindo da transição entre o 10º e o 9º passes (Figura 68). Comportamento semelhante foi observado em outras regiões das paredes, conforme apresenta a Figura 69. Este comportamento está de acordo com o resultado apresentado por Horgar et al (2018). O 9º passe também apresentou estrutura equiaxial, porém, ligeiramente mais grosseira, indicando que o reaquecimento da região pode ter provocado o crescimento dos grãos. O crescimento de grãos na ZTA de ligas de alumínio-magnésio (5xxx) também foi reportado por Katsas et al (2006), sendo atribuído ao aquecimento da região à temperaturas entre 550 e 600 °C

A Figura 70 apresenta a região central do 6º passe da parede, com estrutura de grãos equiaxiais similares aos observados no 10º passe. A Figura 71 mostra a mesma região apresentada na Figura 70a, porém com luz polarizada, evidenciando os contornos de grão, onde é possível observar grãos equiaxiais mais refinados abaixo, e mais grosseiros acima.

A Figura 72 apresenta a transição do 5º para o 4º passe da condição GMAW – P SBAF sob luz polarizada, onde é possível notar grãos grosseiros no topo do 4º passe (região inferior da Figura), uma região de transição com grãos mais alongados, seguido de uma nova região de grãos equiaxiais mais refinados no centro do 5º passe.

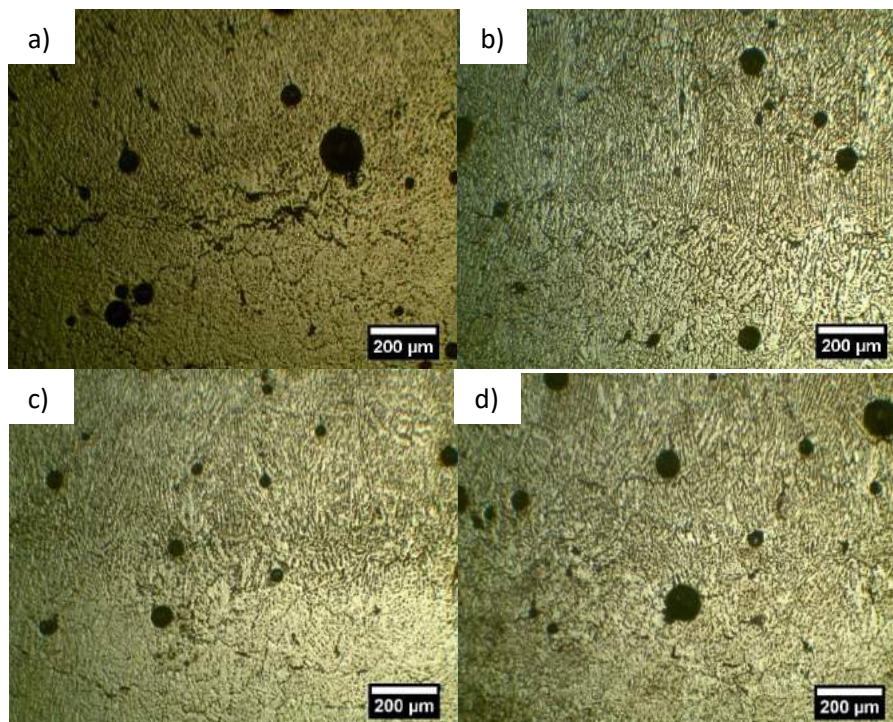
Algumas regiões apresentaram trincas, normalmente localizadas na transição entre passes ou camadas (Figura 68a e Figura 73), porém, foram encontradas trincas no centro de alguns passes, como no 10º passe da condição GMAW – P SB (Figura 74). Trincas semelhantes foram observadas por Horgar et al (2018) (Figura 75), o qual as definiu como trincas intergranulares a quente, sendo atribuídas ao reaquecimento da região e à presença de fases de baixo ponto de fusão, que não resistem ao ciclo térmico da soldagem.

Figura 67. Microestrutura equiaxial no 10º passe. a) GMAW-P; b) GMAW-P AF; c) GMAW-P SB; d) GMAW-P SBAF. Aumento 50x.



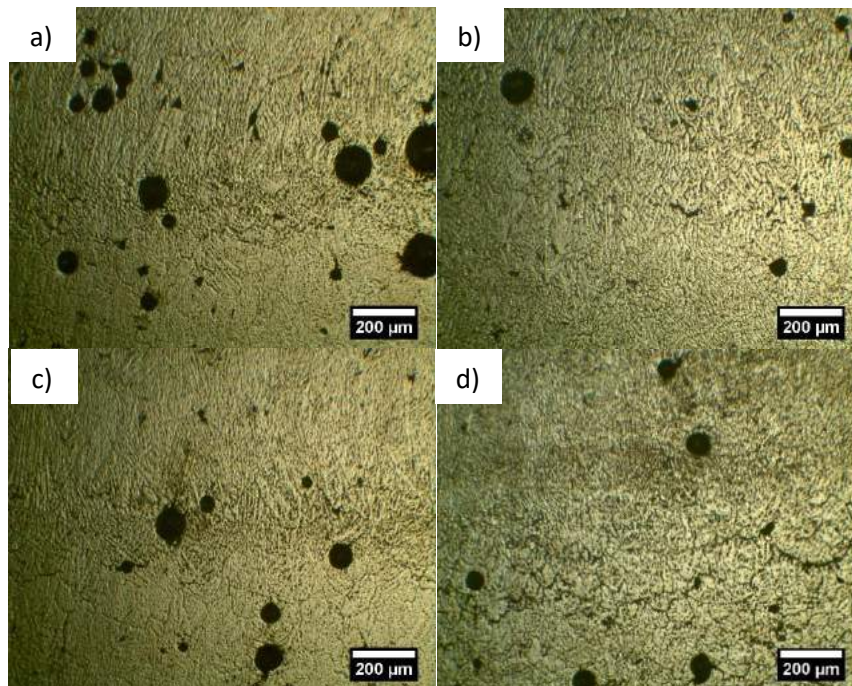
Fonte: autoria própria.

Figura 68. Transição entre o 10º e 9º passe apresentando grãos colunares no 10º passe e grãos equiaxiais grosseiros no topo do 9º. a) GMAW-P; b) GMAW-P AF; c) GMAW-P SB; d) GMAW-P SBAF. Aumento 50x.



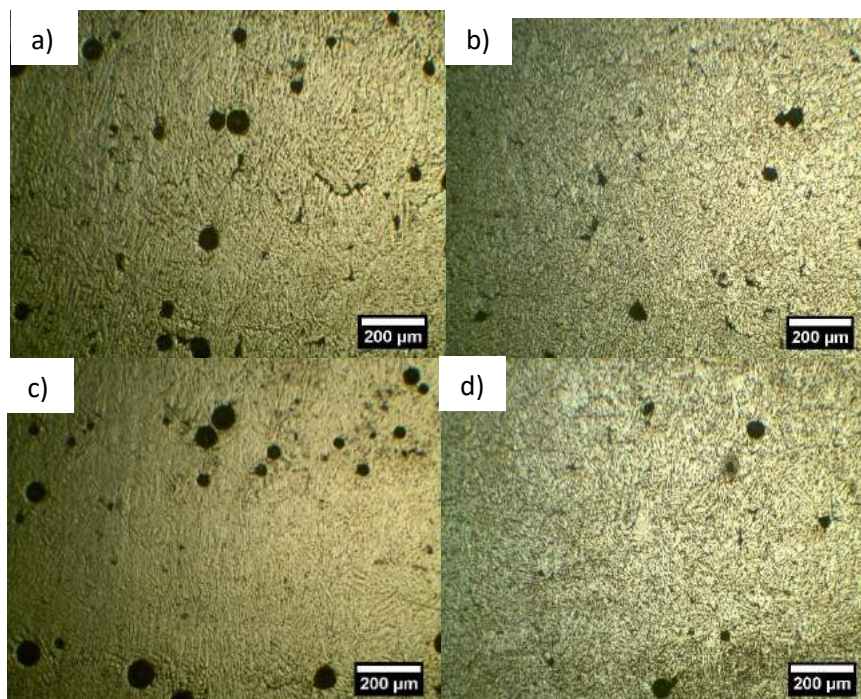
Fonte: autoria própria.

Figura 69. Transição entre o 6° e 5° passe apresentando grãos alongados no 6° passe e grãos equiaxiais grosseiros no topo do 5°. a) GMAW-P; b) GMAW-P AF; c) GMAW-P SB; d) GMAW-P SBAF. Aumento 50x.



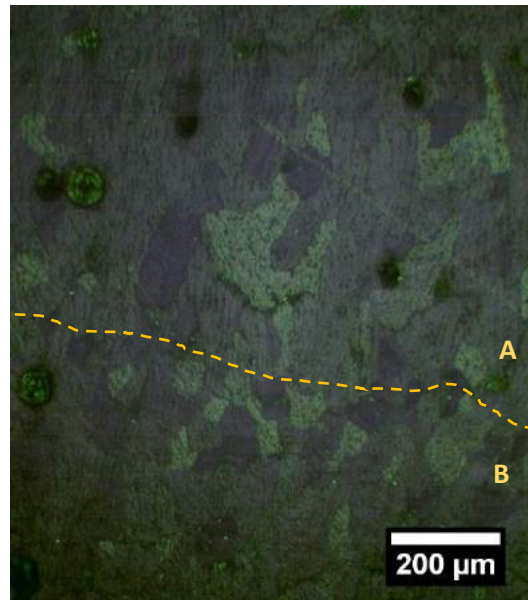
Fonte: autoria própria.

Figura 70. Microestrutura equiaxial no centro do 6° passe. a) GMAW-P; b) GMAW-P AF; c) GMAW-P SB; d) GMAW-P SBAF. Aumento 50x.



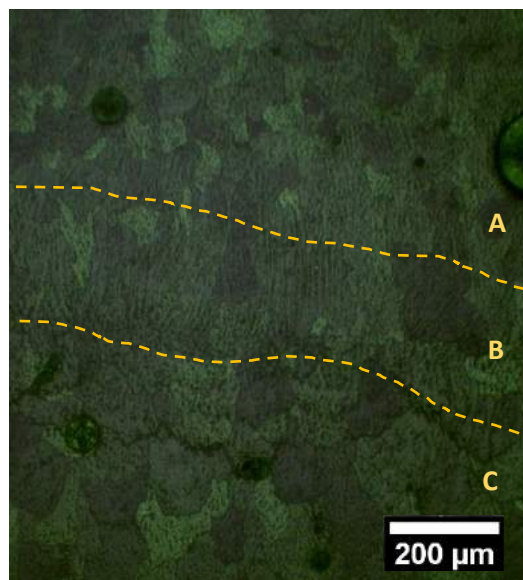
Fonte: autoria própria.

Figura 71. Microestrutura equiaxial no centro do 6º passe para condição GMAW-P sob luz polarizada a) Grãos grosseiros; b) grãos refinados. Aumento 50x.



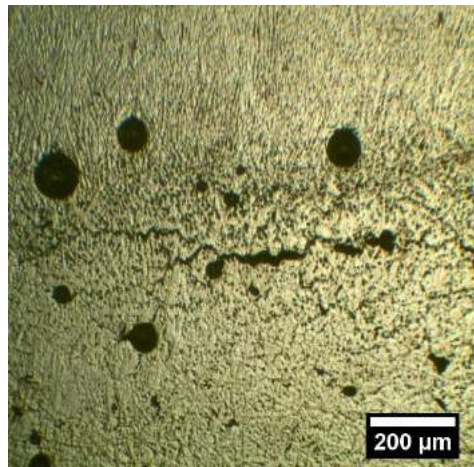
Fonte: autoria própria.

Figura 72. Transição entre 5º e 4º passe para condição GMAW-P SBAF sob luz polarizada. a) grãos refinados; b) transição; c) grãos grosseiros. Aumento 50x.



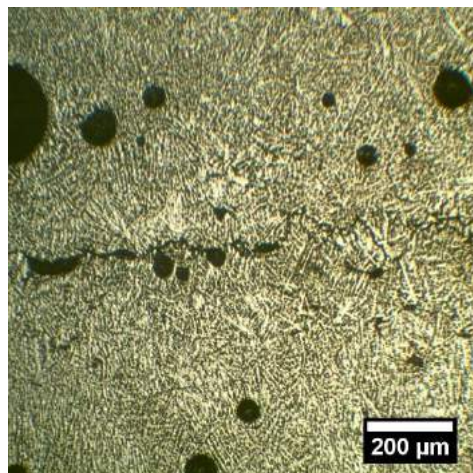
Fonte: autoria própria.

Figura 73. Trinca observada na transição entre 9º e 8º passe para a condição GMAW-P SB. Aumento 50x.



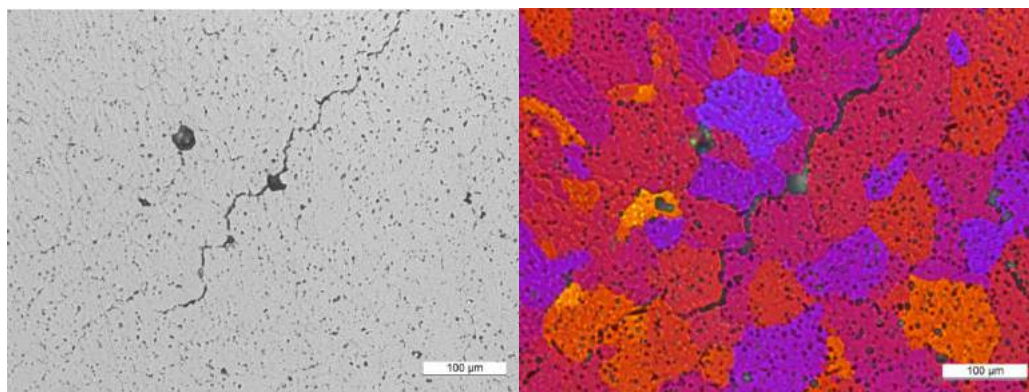
Fonte: autoria própria.

Figura 74. Trinca no centro do 10º passe da condição GMAW-P SB. Aumento 50x.



Fonte: autoria própria.

Figura 75. Trinca intergranular a quente na manufatura aditiva da liga AA5183.



Fonte: Horgar et al (2018).

5.5.4. Aspectos geométricos

A Tabela 22 apresenta os dados geométricos da parede. Nota-se que a maior altura média foi obtida para a condição GMAW-P AF, seguida da condição GMAW-P SBAF.

Este resultado era o esperado, uma vez que o acréscimo de um arame adicional contribuiu para o aumento do reforço do cordão de solda, indicando que com estes parâmetros uma dada altura de parede pode ser alcançada com um menor número de passes ou camadas, representando uma redução de custos em termos de tempo e energia.

Por outro lado, o fator BTA (relação entre as áreas total e efetiva da camada) foi menor para a condição GMAW-P SB, enquanto para a condição GMAW-P AF foi a maior. Este resultado também era o esperado, visto que, conforme a análise da Figura 63, as paredes depositadas com switchback apresentaram um melhor acabamento lateral, enquanto as condições GMAW-P AF e GMAW-P apresentaram ondulações mais pronunciadas. Isto significa que, as condições com switchback permitem que uma maior porção do material seja aproveitada na fabricação de um componente, havendo menor perda pela remoção por processos de usinagem.

Tabela 22. Dados de geometria da parede. Unidade, mm.

| Condição | Altura da parede | Altura média por camada | Área total da camada | Área efetiva da camada | Largura média da parede | Fator BTA |
|--------------------|------------------|-------------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|-----------|
| GMAW-P | 15,11 | 1,88 | 158,12 | 150,12 | 9,94 | 1,06 |
| GMAW-P AF | 19,17 | 2,39 | 192,11 | 192,11 | 10,02 | 1,10 |
| GMAW-P SB | 15,43 | 1,91 | 166,32 | 166,32 | 10,80 | 1,03 |
| GMAW-P SBAF | 16,54 | 2,06 | 176,37 | 176,37 | 10,7 | 1,05 |

Fonte: autoria própria.

5.5.5. Microdureza

A Figura 76 apresenta os perfis de microdureza Vickers da parede. Observa-se que em alguns pontos os valores de microdureza foram abaixo da média, possivelmente por conta da presença de poros na região (essas medidas foram descartadas para os cálculos da média e do desvio padrão). As paredes apresentaram valores de microdureza variando entre 60 e 80 HV, com exceção da parede depositada com adição de arame frio, que apresentou valores de microdureza superiores a 90 HV, principalmente próximo ao topo da parede.

Em termos de microdureza média (Figura 77), a condição GMAW-P AF apresentou o maior valor (76,8 HV), seguida das condições GMAW-P (73,0 HV), GMAW-P SB (72,8) e GMAW-P SBAF (70,0). Apesar de a condição GMAW-P AF ter apresentado a maior microdureza média, esta condição também apresentou o maior desvio padrão, indicando variações relativamente grandes desta grandeza ao longo da parede. A adição de arame frio tendeu a acelerar o processo de solidificação, podendo gerar uma estrutura mais refinada e com maior dureza.

Os valores de microdureza apresentados nesta etapa foram superiores aos encontrados nas etapas de passes isolados de simples deposição, indicando que os sucessivos ciclos térmicos impostos devido a sobreposição de passes de soldagem pode ter provocado alguma alteração microestrutural que contribuiu para a elevação da microdureza.

Figura 76. Perfil de microdureza da parede. a) GMAW-P; b) GMAW-P AF; c) GMAW-P SB e d) GMAW-P SBAF.

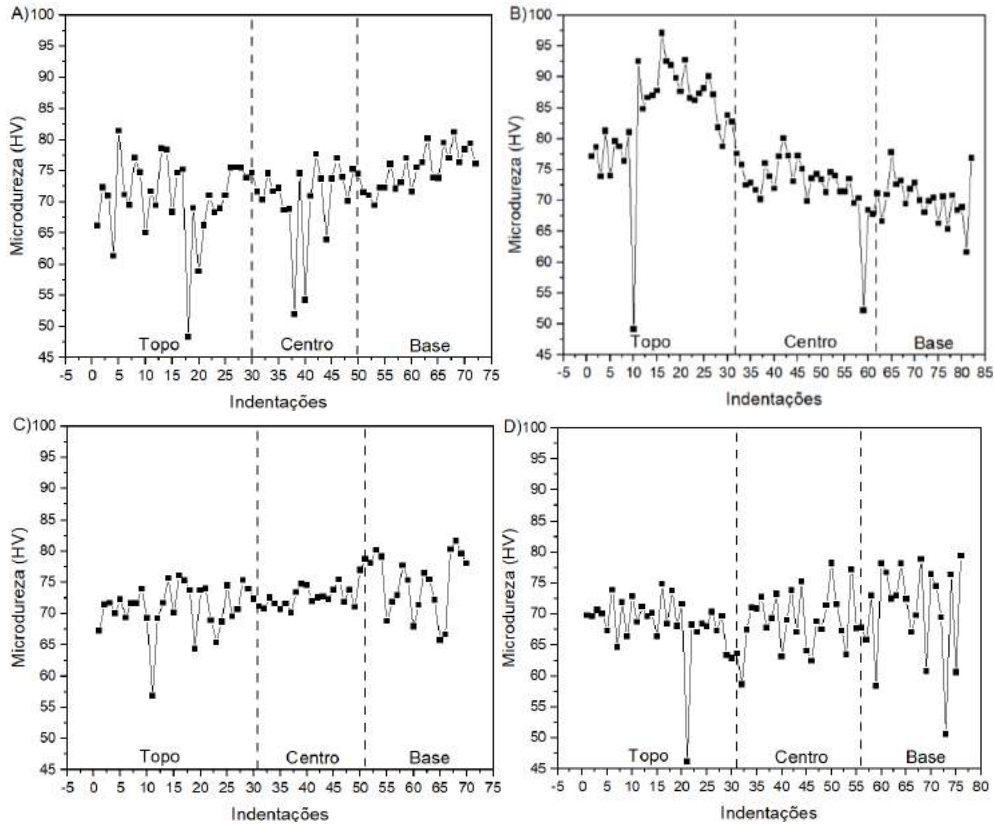
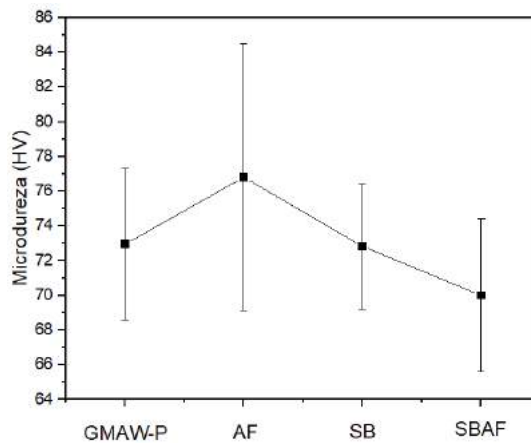


Figura 77. Valores médios de microdureza para as condições avaliadas.



Fonte: autoria própria.

5.5.5. Porosidade

A Tabela 23 e a Figura 78 apresentam os resultados do ensaio de gravimetria para medição do volume de poros nas paredes de alumínio. A parede na condição GMAW-P apresentou o maior volume de poros, enquanto a condição GMAW-P AF, com adição de arame frio, apresentou o menor volume de poros. As paredes depositadas nas condições GMAW-P SB e GMAW-P SBAF, com switchback e switchback com adição de arame frio, também apresentaram volumes de poros inferiores ao da condição GMAW-P. Estes resultados estão de acordo com os resultados obtidos por Yehorov (2018). Este pesquisador afirma em seu trabalho, que o emprego do switchback pode reduzir o teor de poros em soldas de alumínio provavelmente devido à movimentação do arco promover maior agitação na poça de fusão, facilitando a fuga dos gases.

O menor teor de poros encontrados na condição GMAW-P AF pode estar associado à uma redução na temperatura da poça de fusão, a qual tende a reduzir drasticamente a solubilidade de hidrogênio na mesma. Além disso, o acréscimo de arame frio tende a acelerar o processo de solidificação da poça de fusão, podendo reduzir o tempo para a nucleação de poros. Outra hipótese seria que, com a adição de arame frio ocorre um aumento da viscosidade da poça de fusão, aumentando a tensão superficial entre as bolhas e o metal líquido, reduzindo a probabilidade de crescimento de poros (Ren et al, 2019).

A Figura 79 apresenta a seção transversal das paredes polidas e sem ataque, com destaque para a distribuição dos poros. Nota-se claramente que a condição com arame frio apresentou uma quantidade inferior de poros e em menor diâmetro. Além disso, os poros se apresentaram de forma dispersa. Por outro lado, as condições GMAW-P, GMAW-P SB e GMAW-P SBAF apresentaram maior quantidade de poros e com maior diâmetro, além de aparente concentração de poros nas regiões entre passes ou camadas. Este aprisionamento de poros nas regiões entre camadas pode estar relacionado ao reaquecimento da região, que pode provocar a coalescência e crescimento de poros, ou com o aprisionamento de hidrogênio na poça de fusão ainda fria.

Tabela 23. Porosidade nas paredes de acordo com o teste de gravimetria.

| Amostras | Massa do corpo no ar (g) | Massa do corpo na água (g) | Densidade do corpo (g/cm³) | Volume de vazios (%) |
|--------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|-----------------------------|
| GMAW-P | 59,60 | 36,40 | 2,56 | 3,35 |
| GMAW-P AF | 85,16 | 52,30 | 2,59 | 2,28 |
| GMAW-P SB | 64,70 | 39,70 | 2,58 | 2,63 |
| GMAW-P SBAF | 69,40 | 42,40 | 2,57 | 3,02 |

Fonte: autoria própria.

Figura 78. Representação gráfica do volume de poros para as paredes analisadas.

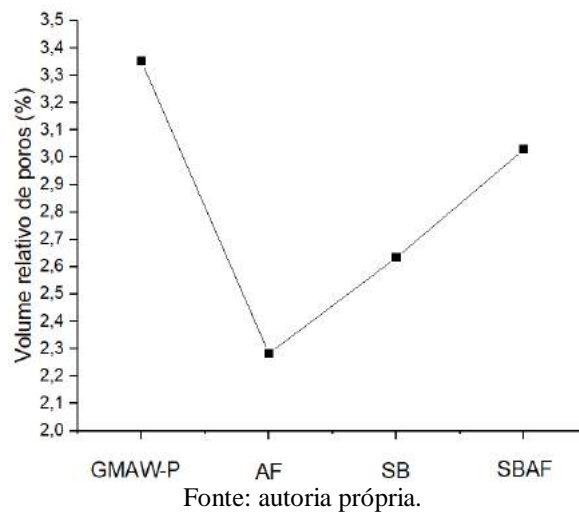
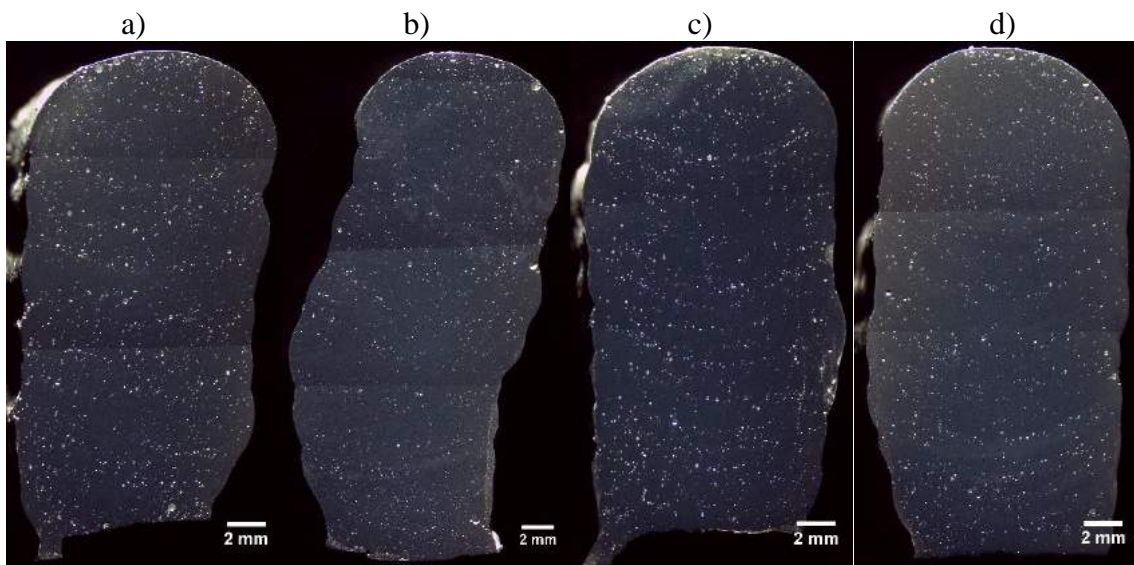


Figura 79. Distribuição de poros na seção transversal da parede.



Fonte: autoria própria.

6. CONCLUSÕES

- O equipamento mecanizado para soldagem com switchback mostrou-se eficaz na realização de soldas com a referida técnica, conforme observado nas soldas com arame ER5356.
- As planilhas elaboradas a partir dos testes com o equipamento mecanizado possibilitaram melhor organização dos experimentos com switchback.
- Para os parâmetros de soldagem adotados nesta pesquisa, as soldas switchback com baixa amplitude de tecimento apresentaram os melhores resultados em termos de acabamento superficial, trincas, porosidade e falta de fusão.
- Apesar das soldas switchback com alta amplitude de tecimento apresentarem maior reforço (algo interessante em MA), o aspecto superficial e a incidência de falta de fusão inviabilizaram o uso destes parâmetros.
- As soldas switchback R/A = 90% apresentaram valores de microdureza ligeiramente superiores em relação as demais condições de soldas switechback.
- O aumento na adição de arame frio em até 50% da velocidade do arame eletrodo tendeu a reduzir o tamanho do grão colunar na parede depositada com GMAW-P AF. Para adição de arame frio acima de 50% da velocidade do arame eletrodo, o grão colunar cresce e torna a estrutura grosseira.
- O aumento na adição de arame frio aumentou progressivamente o reforço do cordão de solda, por outro lado, reduziu a penetração e aumentou a incidência de falta de fusão.
- Menor incidência de poros ocorreu nas soldas com adição de arame frio.
- As paredes depositadas apresentaram bom aspecto superficial e poucos desvios geométricos, com exceção da condição GMAW-P AF que apresentou distorções em seu comprimento, possivelmente devido a falhas operacionais.
- A parede GMAW-P AF apresentou maior altura por camada e menor volume de poros de acordo com o teste de gravimetria.
- As GMAW-P SB e GMAW-P SBAF apresentaram melhor fator BTA, indicando melhor aproveitamento do material em manufatura aditiva.
- Ambas as técnicas alternativas de soldagem, com switchback e com adição de arame frio, apresentaram, isoladas ou associadas, resultados promissores para a manufatura aditiva do alumínio, havendo necessidade de exploração de novos parâmetros com o intuito de aprimorá-las para aplicações efetivas na indústria.

7. TRABALHOS FUTUROS

- Explorar parâmetros de soldagem que viabilizem a soldagem de alumínio com switchback de 90%.
- Avaliar possíveis variações de composição química no metal de solda, que podem influenciar nas propriedades mecânicas.
- Realizar filmagem com câmeras especiais (alta velocidade e termográfica) das soldagens com switchback e com adição de arame frio, visando compreender a transferência metálica, variações térmicas e demais fenômenos envolvidos nestes processos.
- Confeccionar paredes de maiores dimensões para realização de ensaios mecânicos de tração, visando avaliar a anisotropia de propriedades mecânicas.

8. REFERÊNCIAS

- ALBERTI, E. A.; SILVA, L. J.; D'OLIVEIRA, A. S. C. M. Manufatura aditiva: o papel da soldagem nesta janela de oportunidade. *Soldagem e Inspeção*. São Paulo. Vol. 19. Nº 2. pp. 190 – 198. 2014.
- ALCAN. Manual de soldagem. ALCAN – Alumínio do Brasil S/A, 1º ed., 1993.
- ALMEIDA, H. A. L.; MOTA, C. A. M.; SCOTTI, A. Efeitos do comprimento de avanço e reversão e do ângulo de ataque sobre a estrutura de solidificação do cordão em soldagem MIG/MAG com switchback. *Soldagem e Inspeção*. v. 17, p. 123-137, 2012.
- ANDRADE, E. S. S. Acionamento e controle eletrônico para soldagem GMAW de revestimento interno de dutos com adição de arame frio. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – UFPA. Dissertação de Mestrado. 2010.
- BARCELAR, A. R. C., FERRAZ, A. C. Estudo da viabilidade operacional do processo de soldagem MAG com alimentação adicional de um arame frio. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Pará. 2005.
- BUMILLER, E.; SHEDD, M.; KAZEROONI, B. ADEDEJI, W.; KELLY, R. G. The electrochemistry of intergranular corrosion and sensitization in 5XXX aluminum alloys. 2009 Dod Corrosion Conference (2009).
- BUMILLER, E. Intergranular corrosion in AA5XXX aluminum alloys with discontinuous precipitation at the grain boundaries. Ph.D dissertation. The University of Virginia: Charlottesville, VA, 2011.
- COSTA, E. S.; ASSUNÇÃO, P. D. C.; SANTOS, E. B. F.; FEIO, L. G.; BITTENCOURT, M. S. Q.; BRAGA, E. M. Residual stresses in cold-wire gas metal arc welding. *Science and technology of welding and joining*. 2017.
- CONG, B.; DING, J.; WILLIAMS, S. Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactures Al-6.3%Cu alloy. *International Journal of Manufacturing Technology*. pp. 1593 – 1606. 2015.
- CONG, B, Qi Z, Qi B, et al. A comparative study of additively manufactured thin wall and block structure with Al-6.3%Cu alloy using cold metal transfer process. 2017
- COLEGROVE, P.A.; DONOGHUE, J.; MARTINA, F.; GU, J.L., PRANGNELL, P.; HÖNNIGE, J. Application of bulk deformation methods for microstructural and property improvement and residual stress and distortion control in additively manufactured components. *Scr. Mater.* 135 (2017) 111-118.
- CROSS, C. E.; OLSON, D. L.; LIU, S. Aluminum Welding. *Handbook of Aluminum*. Chapter 9 pp. 481 – 545. 2003.
- DAREKAR, K. S. A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium. *Materials Science and Technology*, DOI: 10.1080/02670836.2018.1455012. 2018.

DUTRA, J. C.; SILVA, R. H. G.; SAVI, B. M.; MARQUES, C.; ALARCON, O. E. New methodology for AC-pulsed GMAW parametrization applied to aluminum shipbuilding. *Journal of the Brazilian society of mechanical sciences and engineering*. 2016.

FARIAS, T. V. C. Parametrização do sistema duplo-tartílope no processo GMAW com switchback. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Pará. Belém. 2019

FISCHER A., Estudo da influência dos parâmetros no processo de soldagem GMAW-arco pulsado. 170 f. Tese de Doutorado (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte 2011.

GARCIA, D. N. Soldagem MIG com arame frio aplicada ao revestimento de chapas planas com uma superliga de níquel tipo Hastelloy C276. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – UFPA. Dissertação de Mestrado. 2011.

GRAF, M.; HÄLSIG, A.; HÖFER, K.; AWISZUS, B.; MAYR, P. Thermo-mechanical modelling of wire-arc additive manufacturing (WAAM) of semi-finished products. *Metals*. 2018.

GU, J.; WANG, X.; BAI, J.; DING, J.; WILLIAMS, S.; ZHAI, Y.; LIU, K. Deformation microstructures and strengthening mechanisms for the wire + arc additively manufactured Al-Mg4.5Mn alloy with inter-layer rolling. *Materials Science & Engineering A*. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.113>. 2018.

GUO, N.; LEU, M.C.; Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2013.

HORGAR, A.; FOSTERVOLL, H.; NYHUS, B.; REN, X.; ERIKSSON, M.; AKSELSSEN, O. M.; Additive manufacturing using WAAM with AA5183 wire. *Journal of materials processing technology* 259 (2018) 66-74.

JIN, B.; KANEKO, Y.; SOEDA, M.; OHSHIMA, K. Control of back weld pool shape in MIG welding by using switch back method. *Anais IEEE Industry applications conference thirtieth IAS annual meeting*. Orlando. 1995.

KATSAS, S.; NIKOLAOU, J.; PAPADIMITRIOU, G. Microstructural changes accompanying repair welding in 5xxx aluminium alloys and their effect on the mechanical properties. *Materials and Design* 27 (2006) 968-975.

KANEKO, Y., YAMANE, S., OSHIMA, K. Numerical simulation of MIG weld pool in switch back welding. *Welding in the world*. v. 53, p. 372 – 380, 2009.

KOU, S. *Welding metallurgy*. John Wiley & Sons Inc. Hoboken. New Jersey. 2003.

KUMAR, R.; DILTNEY, U.; DWIVEDI, D.K.; GHOSH, P.K. Thin sheet welding of Al 6082 alloy by AC pulse-GMA and AC wave pulse-GMA welding. *Mater. Des.* 2009, 30, 306–313.

MACHADO, I. G. *Soldagem e técnicas conexas: processos*. Porto Alegre. Editado pelo autor. 477p.

MARQUES, P. V. MODENESI, P. J. BRACARENSE, A. Q. *Soldagem: fundamentos e tecnologia*. 3ª edição. Belo Horizonte. Editora UFMG. 2014.

- MARTINS, A. B. Efeito dos parâmetros da técnica switchback sobre a geometria e características metalúrgicas de soldas MIG em liga de alumínio. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Pará, 2019.
- METALS HANDBOOK. Volume 3: Alloy Phase Diagrams. USA: ASM (American Society for Metals), 1986.
- METALS HANDBOOK. Volume 6: Welding, brazing and soldering. USA: ASM (American Society for Metals), 1986.
- MODENESI, P. J. Soldabilidade de aços transformáveis. Apostila de aula. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Departamento de Engenharia Mecânica. Belo Horizonte, 2002.
- MONTEIRO, S. C. Efeito da adição de arame frio em soldas da liga AL 5356 depositadas pelo processo GMAW em corrente pulsada. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Pará, 2019.
- MOTA, C. A. M.; NASCIMENTO, A. S.; GARCIA, D. N.; SILVA, D. A. S.; TEIXEIRA, F. R.; FERRARESI, V. A. Revestimento de níquel depositado pela soldagem MIG e MIG com arame frio. Soldagem & Inspeção. 2016.
- MIYAZAKI, H.; MIYAUCHI, H.; SUGIYAMA, Y.; SHINODA, T. Puckering phenomenon and its prevention in GMA welding of aluminum alloys. Welding Research. 1994.
- MUGHAL, M.P.; Mufti, R.A.; Fawad, H.; The mechanical effects of deposition patterns in welding-based layered manufacturing. Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf [Internet].2007
- PICKIN, C. G.; WILLIAMS, S. W.; PRANGNELL, P.; DERRY, C.; LUNT, M. Control of weld composition when arc welding high strength aluminium alloys using multiple filler wires. Science and technology of welding and joining. Vol. 15. 2010.
- PRAVEEN, P.; YARLAGADDA, P.K.D.V. Meeting challenges in welding of aluminum alloys through pulse gas metal arc welding. Journal of Materials Processing Technology. 2005. 1106-1112.
- REN, L.; GU, H.; WANG, W.; WANG, S.; LI, C.; WANG, Z.; ZHAI, Y.; MA, P. Effect of Mg content on microstructure and properties of Al-Mg alloy produced by the wire arc additive manufacturing method. Materials. 2019. Vol. 12.
- RIBEIRO, P. P. G. Influência dos parâmetros de soldagem GMAW e GMAW-CW sobre a diluição e relação reforço/largura em revestimentos. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Pará. 2012.
- RODRIGUES, V. P.; ZANCUL, E. S.; MANÇANARES, C. G.; GIORDANO, C. M.; SALERNO, M. S. Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações. GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas, Bauru, Ano 12, nº3, p. 1-34. 2016.
- RYAN, E. M.; SABIN, T. J.; WATTS, J. F.; WHITING, M. J. The influence of build parameters and wire batch on porosity of wire and arc additive manufactured aluminium alloy 2319. Journal of materials processing technology. 2018.

SILVA, L. J.; SOUZA, D. M.; ARAÚJO, D. B.; SAAD, N. S.; REIS, R. P.; SCOTTI, A. Gerenciamento térmico via resfriamento ativo por quase-imersão aplicado à manufatura aditiva por fusão-deposição a arco. XLIV CONSOLDA. Uberlândia. 2018.

SILVA, R. H. G. Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito controlado aplicada ao passe de raiz. Dissertação de mestrado – Engenharia Mecânica. UFSC. Florianópolis. 2005.

SCOTTI, A.; MONTEIRO, L. S. Uma metodologia para parametrização do processo MIG/MAG CA. 2012.

SOMASHEKARA, M.A.; NAVEENKUMAR, M.; KUMAR, A. Investigations into effect of weld-deposition pattern on residual stress evolution for metallic additive manufacturing. Int J Adv Manuf Technol. 2017.

SODRÉ, R. M. R. Aspectos metalúrgicos e do comportamento mecânico de soldas de níquel depositadas pelo processo MIG pulsado utilizando a técnica switchback. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM). Instituto de tecnologia. Universidade Federal do Pará. Belém, 2018.

TEIXEIRA, F. R. Explorando a potencialidade do processo GMAW switch back para revestimento de um aço BLAR com liga de níquel. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM). Instituto de Tecnologia. Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

TONG, H.; UEYAMA, T.; HARADA, S.; USHHIO, M. Quality and productivity improvement in aluminium alloy thin sheet welding using alternating current pulsed metal inert gas welding system. Science and Technology Welding Journal. 2001.

The Lincoln Electric Company. Classroom student reference material: GMAW modes of metal transfer. Apostila. 2015.

WATERMAN, N. A.; DICKENS, P. Rapid product development in the USA, Europe and Japan. World Class Design to Manufacture. Vol. 1. Issue: 3, pp. 27-36. 1994.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. Soldagem: processos e metalurgia. São Paulo. Edgard Blücher, 2004.

WILLIAMS, S.W.; MARTINA, F.; ADDISON, A. C.; DING, J.; PARDAL, G.; COLEGROVE, P. Wire + Arc Additive Manufacturing. Materials Science and Technology. pp. 641-647. 2015.

YEHOROV, Y., Exploring Solutions to Mitigate Unidirectional Grain Growth and to Set Operational Envelop for Wire + Arc Additive Manufacturing of Aluminium Alloys, MSc Thesis, Federal University of Uberlandia, August, 2018.

YEHOROV, Y.; SILVA, L. J. SCOTTI, A. Balancing WAAM production costs and wall surface quality through parameter selection: a case of study of an Al-Mg5 alloy multilayer-non-oscillated single pass wall. Journal of manufacturing and materials processing. 2019.

ZHANG, Y.; CHEN, Y.; LI, P.; MALE, A. T. Weld deposition-based rapid prototyping: a preliminary study. Journal of materials processing technology. 2003.

APÊNDICE

1. SOLDAS GMAW SWITCHBACK COM AÇO BAIXA LIGA (ER80S-G)

GMAW



GMAW SB50.2



GMAW SB50.3



GMAW SB75.1



GMAW SB75.2



GMAW SB75.3



GMAW SB90.1



GMAW SB90.2

